

**КОЭСИТ КАК ИНДИКАТОР СВЕРХВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ
В КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЛИТОСФЕРЕ**

Н.В. Соболев

Институт минералогии и петрографии СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия

Обобщены данные по составам и парагенезисам сосуществующих гранатов и пироксенов, включенных в алмазах, содержащих коэсит из различных месторождений земного шара и из ксенолитов коэситовых эклогитов. Характерно, что алмазы с включениями коэсита (более 250 образцов) установлены практически во всех разрабатываемых месторождениях. Как в алмазах с коэситом, так и в ксенолитах коэситовых эклогитов зафиксированы все без исключения парагенезисы, представленные в алмазах эклогитового (Э-типа) парагенезиса в кимберлитах и глубинных эклогитах. Эти парагенезисы включают в себя широкую непрерывную серию составов, начиная от вебстеритов (пироксенитов) вплоть до кианитовых эклогитов, гроспидитов и известково-силикатных составов. Данные по исключительно широкому колебанию состава глубинных коэситсодержащих пород и имеющиеся данные по изотопии кислорода коэсита, а также изотопии углерода и азота алмазов, содержащих включения коэсита, свидетельствуют об образовании коэситсодержащих эклогитовых парагенезисов кимберлитов и лампроитов в результате субдукции древней океанической коры. Аналогичные особенности алмазов зафиксированы и в коэсит- и алмазсодержащих метаморфических породах сверхвысоких давлений земной коры.

Алмаз, коэсит, кимберлиты, ксенолиты, сверхвысокие давления, включения, эклогиты, континентальная литосфера, субдукция.

**COESITE AS AN INDICATOR OF ULTRAHIGH PRESSURES
IN CONTINENTAL LITHOSPHERE**

N.V. Sobolev

Data on compositions and parageneses of coexisting garnets and pyroxenes trapped by diamonds containing coesite from different deposits of the world and from xenoliths of coesite eclogites have been generalized. Remarkably, the diamonds with coesite inclusions (over 250 specimens) have been established in all deposits in operation. Diamonds with coesite as well as xenoliths of coesite eclogites contain all the parageneses represented in eclogite (E-type) diamonds in kimberlites and mantle-derived eclogites. These parageneses include a wide continuous series of compositions from websterites (pyroxenites) to kyanite eclogites, grosspydites, and calc-silicate compositions. Data on exclusively wide variations of composition of mantle-derived coesite-bearing rocks and the available data on oxygen isotopy of coesite as well as carbon and nitrogen isotopes of diamonds with coesite inclusions suggest the formation of coesite-bearing eclogite parageneses of kimberlites and lamproites as a result of the subduction of ancient oceanic crust. Similar features of diamonds have been recorded in coesite as well as in diamondiferous UHP metamorphic rocks.

Diamond, coesite, kimberlites, xenoliths, ultrahigh pressures, inclusions, eclogites, continental lithosphere, subduction

ВВЕДЕНИЕ

Высокобарическая модификация кремнезема — коэсит — привлекла внимание исследователей не сразу после ее успешного синтеза [1] и утверждения в качестве нового минерала, обнаруженного в кварцсодержащих породах ударного метеоритного кратера в Аризоне (США) [2]. Однако только находка включения коэсита в алмазе из неустановленного, предположительно африканского, источника и идентифицированного с помощью рентгенографических исследований положила начало дискуссии о возможной роли коэсита в верхней мантии в области устойчивости алмаза [3]. Высказанное предположение о вероятном эклогитовом парагенезисе коэсита в природных алмазах [4] получило убедительное подтверждение в виде находок полной эклогитовой ассоциации (гранат, омфациит, коэсит) минеральных включений в двух кристаллах алмазов из россыпей северо-восточной части Сибирской платформы [5]. Последующие находки ксенолитов коэситовых эклогитов в кимберлитовой тр. Робертс Виктор (ЮАР) [6]

и тр. Удачная (Якутия) [7] подтвердили справедливость данного подхода и продемонстрировали значительные вариации возможных составов коэситовых эклогитов и гроспидитов как для области устойчивости алмаза, обнаруженных в качестве включений в алмазах, так и при более низких давлениях, не достигающих перехода графит—алмаз [8].

Если для глубинных включений сам факт присутствия коэсита и его парагенезис были выявлены уже к середине 70-х годов XX века, то для метаморфических пород высоких давлений земной коры достоверные находки коэсита были сделаны значительно позднее как в Западных Альпах в виде включений в пиропе из кварцитов [9], так и в норвежских эклогитах в качестве включения в клинопироксене [10]. Именно эти находки послужили убедительным достоверным доказательством проявления метаморфизма сверхвысоких давлений, что получило в дальнейшем многократное подтверждение для альпийских пироповых кварцитов [11], а также для серии норвежских эклогитов [12]. Соответствующая терминология заняла прочное место в геологической литературе, что, в частности, отражено в названии первой крупной международной монографии, обобщающей результаты исследований за первое десятилетие после обнаружения коэсита в метаморфических породах [11] и являющейся, судя по ее высокой цитируемости, настольной книгой исследователей, занимающихся проблемами метаморфизма.

Указанные находки, имевшие революционное значение, пробудили исключительно высокий интерес к поискам реликтов коэсита в метаморфических породах, поскольку только такие реликты можно рассматривать как наиболее убедительные доказательства проявления метаморфизма сверхвысоких давлений. Отдельные признаки возможного присутствия реликтов коэсита, включающие трещины вокруг включений кварца [13], а также голубое свечение в катодолюминесценции [14], были использованы для предположительной диагностики коэсита в южно-уральских эклогитах [15]. В то же время окончательная достоверная диагностика коэсита выполнена для широкой серии метаморфических пород Альп, Норвегии, Кокчетавского массива, района Даби Шань (КНР) только с применением спектроскопии комбинационного рассеяния (КР) для включений коэсита в гранатах, пироксенах, цирконах, причем циркон признан уникальным контейнером, сохраняющим коэсит от последующих изменений [16, 17], с убедительным подтверждением этого в целой серии последующих работ [11, 18—22].

Целью настоящей работы является обобщение имеющейся информации по парагенезисам коэсита в глубинных включениях в кимберлитах, а именно, в алмазах и ксенолитах, а также сопоставление с данными по парагенезисам коэсита в метаморфических породах сверхвысоких давлений земной коры.

МЕТОДЫ ЭКСПРЕССНОЙ ДИАГНОСТИКИ КОЭСИТА

Коэсит, в связи с существенно более высоким показателем преломления и низким двупреломлением, легко отличается в шлифах от кварца благодаря более высокому рельефу и низким цветам интерференции. Важной особенностью, отличающей его от других модификаций кремнезема при исследовании методом катодолюминесцентной микроскопии (КЛ), является его яркая люминесценция голубовато-зеленым светом [23, 24], а при непосредственном проведении анализа с помощью электронного микронзонда — люминесценция вплоть до ярко-голубого свечения, четко отличающегося от оранжевого свечения кварца [14]. К сожалению, возможность такой простой диагностики оказалась упущенной в ряде работ по изучению включений в алмазах. Примером такой работы может служить описание серии включений в алмазах Западной Африки [25], где после анализа с помощью электронного микронзонда приводятся только сведения о присутствии SiO_2 , без указания конкретной фазы. Последующими исследованиями коэсит установлен в качестве включений в многочисленных алмазах из кимберлитов, лампроитов и россыпей с помощью комбинированного подхода во время микроанализа по люминесценции, подтвержденного рентгенографическими исследованиями или спектроскопией КР.

Существенный интерес для достоверной диагностики коэсита могут представлять особенности его двойникования, хорошо наблюдающиеся не только в скрещенных николях под микроскопом, но и в связи с получающимися цветами люминесценции [24].

В некоторых ксенолитах коэситовых эклогитов из кимберлитов, в особенности наиболее крупных, свежий, неизменный коэсит составляет до 5—7 об.% образцов [6, 26]. Характерной особенностью псевдоморфоз по коэситу как в случае сохранения его реликтов, так и в случае полного замещения кварцем является частоколоподобное обрамление, представленное поликристаллическим кварцем [9—11 и др.]. Важно отметить, что методом катодолюминесценции можно достаточно уверенно выявить также и отдельные генерации кварца в частоколоподобном обрамлении псевдоморфоз по коэситу. Особый, коричневый цвет люминесценции имеют выполненные кварцем трещины в коэсите [24]. Ассоциация тальк—кварц отмечена в качестве наиболее обычных псевдоморфоз по коэситу в серии ксенолитов эклогитов из южно-африканских кимберлитов [27].

Аналогичный подход применим и для метаморфических пород. Особые затруднения здесь вызваны проявлениями наложенного метаморфизма более низких давлений, затушевывающими первичные парагенезисы. Здесь особое значение имеет систематическое исследование включений в цирконах [16, 17].

В отдельных случаях, как, например, при исследовании некоторых эклогитов Кокчетавского массива не только коэсит, но и первичный омфацил обнаружены только в виде включений в цирконах [21]. В более редких случаях коэсит выявлен также и в виде включений в гранатах [20, 22 и др.]. Специальные исследования цирконов из кварцитов Дора Майра (Западные Альпы) и из гнейсов, вмещающих коэситсодержащие эклогиты района Даби Шань (КНР), привели к обнаружению серии включений коэсита, не затронутых вторичными изменениями [17].

Совершенно очевидно, что все отмеченные методы можно успешно использовать лишь для предварительной диагностики коэсита. Окончательное же заключение может быть сделано только после применения спектроскопии КР.

ВКЛЮЧЕНИЯ КОЭСИТА В АЛМАЗАХ

Со времени первой достоверной идентификации эклогитового парагенезиса включений коэсита в алмазе [5], по состоянию на середину 2005 г., в литературе опубликованы данные по изучению более 250 алмазов, содержащих включения коэсита из различных месторождений мира. Эта база данных непрерывно пополняется, о чем может свидетельствовать обобщение [28], где обсуждались данные примерно по 150 таким алмазам. Значительный интерес здесь представляет не только существенное расширение географии находок алмазов с включениями коэсита, но и дальнейшее выявление разнообразия его парагенезисов и повышение роли коэситсодержащих алмазов в общем балансе алмазов эклогитового типа парагенезиса (Э-тип) в различных месторождениях земного шара в процессе более детальных исследований включений в алмазах конкретных месторождений. Характерным примером, демонстрирующим существенную роль коэсита, включенного в алмазах отдельного месторождения, в зависимости от детальности исследований, может служить тр. Мир. Несмотря на общую очень низкую роль алмазов Э-типа парагенезиса, не превышающую, по разным оценкам, 1—5 %, коэсит установлен в 5 из 70 изученных алмазов Э-типа [28]. Общее количество месторождений алмаза различных континентов с достоверно установленными включениями коэсита в алмазах превысило 25 и охватывает практически все разрабатываемые трубки и россыпи. До настоящего времени коэсит не установлен только в алмазах Индии, что, безусловно, связано только с их недостаточной изученностью.

На основании находок включений коэсита и кварца в одном и том же кристалле алмаза, предполагается, что кварц образуется за счет изменения коэсита, чему способствует, вероятно, наличие микро-трещин. Даже в одном кристалле алмаза фиксируются различные индивидуальные включения коэсита, одно из которых окружено трещинами, не выходящими на поверхность, а вокруг другого трещины отсутствуют [28]. Специальными исследованиями с помощью спектроскопии КР доказано высокое внутреннее давление, испытываемое включениями коэсита в алмазе, достигающее $5,5 \pm 0,5$ ГПа [28]. В ряде образцов, исследованных методом спектроскопии КР, установлена примесь кварца в коэсите, а также коэсита в кварце. Более половины всех находок включений коэсита в алмазах зафиксированы в четырех месторождениях, включающих лампроиты месторождения Аргайл (Австралия) [29, 30], кимберлиты района Гуаньямо (Венесуэла) [31, 32], а также россыпи северо-востока Сибирской платформы и Австралии [33—35]. Уникальным россыпным месторождением алмазов, где коэсит установлен в 25 из 64 изученных алмазов с включениями Э-типа, являются россыпи штата Новый Южный Уэльс (Австралия) [14, 34, 35].

Наряду с новыми находками в известных месторождениях алмаза, список, где выявлены включения коэсита в алмазе, пополнен разрабатываемыми месторождениями кратона Слэйв (Северная Канада) [36], а также рядом месторождений Южной Африки [37—40] и Якутии, в частности тр. Комсомольская [40]. Как уже отмечалось выше, для некоторых месторождений алмаза зафиксирована только фаза кремнезема в виде SiO_2 на основании рентгеноспектрального микроанализа. Однако это дает возможность утверждать, что коэсит либо вторичный кварц присутствуют в алмазах в указанном случае [25] в россыпях Западной Африки.

Примерно в 20 % известных находок, коэсит в алмазе зафиксирован в виде единичных или реже множественных включений, без присутствия каких-либо других фаз. В то же время достаточно часто он отмечен в ассоциации с гранатом, омфацилом или с обеими указанными фазами, а также с сульфидами (рис. 1). В более редких случаях вместе с указанными минералами установлены санидин, кианит, рутил, магнетит, пирротин, ильменит. В единственном образце в алмазе из месторождения Гуаньямо (Венесуэла) установлен муассанит в парагенезисе с кварцем, вероятно, образовавшемся за счет изменения коэсита [32]. Морфология кристаллов коэсита, включенных в алмазы, весьма разнообразна. Три примера (см. рис. 1) демонстрируют таблитчатое включение, сфотографированное непосредственно в алмазе (А), веретенообразный кристалл (Б) и уплощенный октаэдр (В), извлеченные из алмазов, а также сростки коэсита с гранатом (Г, Д) и омфацилом (Е). Разнообразие парагенезисов коэсита в алмазах из

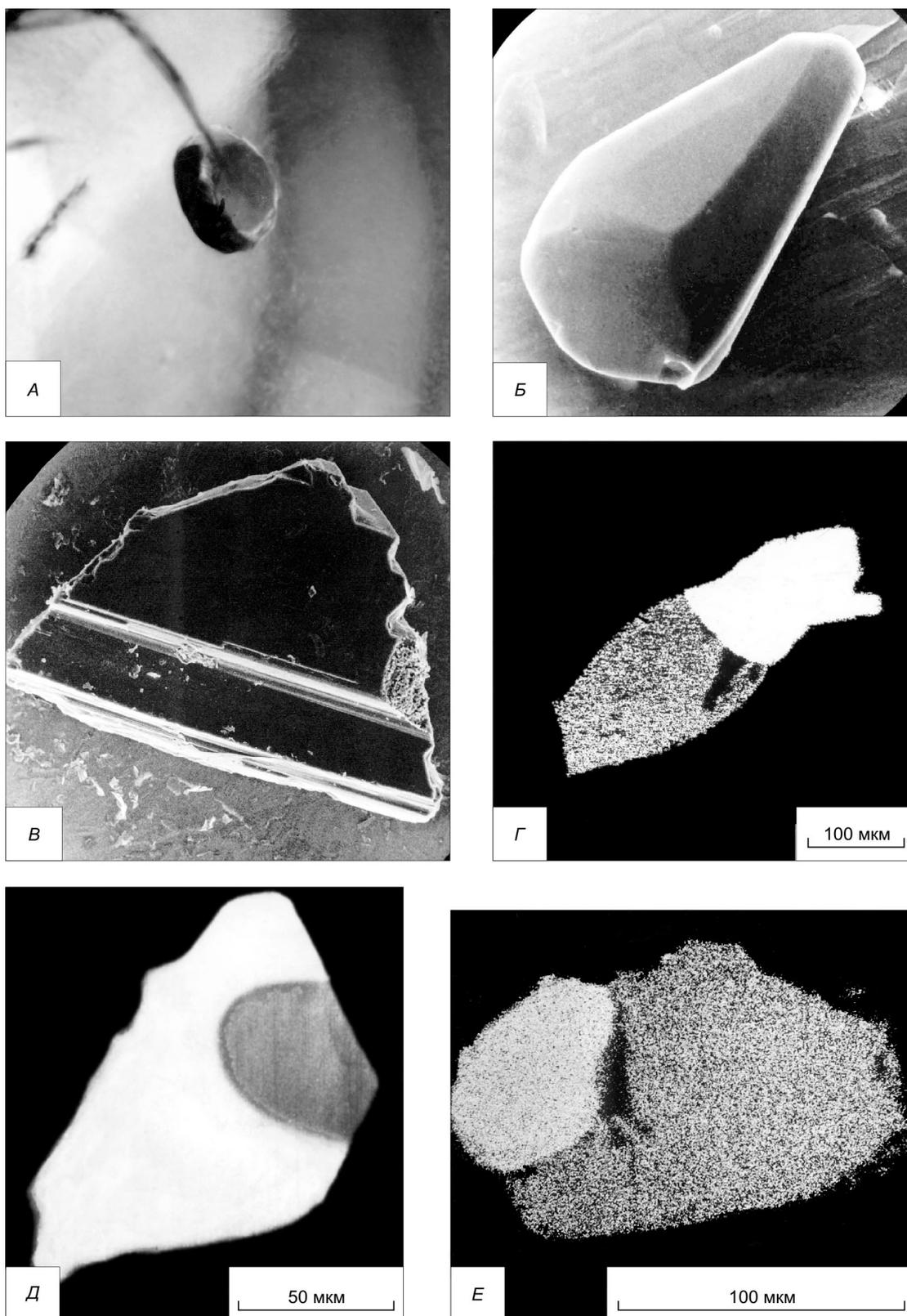


Рис. 1. Особенности морфологии и парагенезиса включений коэсита в алмазах.

A — включение коэсита табличатого габитуса, россыпи штата Новый Южный Уэльс (Австралия); *B* — удлиненный веретенообразный кристалл коэсита, россыпи с-в Сибирской платформы (Россия); *B* — уплощенное октаэдрическое включение коэсита с овальным востком пирротина (справа внизу), обр. Мг-664, тр. Мир, Якутия; *Г* — сросток граната (темное) и коэсита (светлое), россыпи Урала в SiK_α рентгеновском излучении, обр. Уш-103; *Д* — сросток омфацита (светлое) и коэсита (темное), тр. Удачная, обр. UD-2, снимок в обратно-рассеянных электронах в единой полированной поверхности с алмазом; *Е* — сросток коэсита (светлое) и граната (темное) в SiK_α рентгеновском излучении, тр. Мир, обр. М-447. Размеры кристаллов коэсита (*A–B*) — 300 мкм. Источник данных: *A, B* — материалы автора, *B, Г* — [33], *Д* — [40].

указанных четырех месторождений, в которых он зафиксирован наиболее часто, отражено в табл. 1. Это разнообразие охватывает все известные случаи находок включений коэсита в алмазах.

КСЕНОЛИТЫ ЭКЛОГИТОВ С КОЭСИТОМ

Со времени первых находок ксенолитов эклогитов с коэситом в кимберлитовой тр. Робертс Виктор (ЮАР) и тр. Удачная (Якутия) пород подобного типа обнаружено не так много, немногим более 40 [6, 7, 26, 27, 41], что примерно на порядок меньше количества выявленных ксенолитов алмазоносных эклогитов [33, 42]. Часть этих ксенолитов просто упомянуты без приведения детальной минералогической характеристики. Абсолютное большинство всех находок относится к двум вышеназванным трубкам. Некоторые из изученных образцов характеризуются крупными размерами, что способствует объективной оценке относительной роли главных и акцессорных минералов. Наиболее крупным (26 × 17 × 12 см), массой 11 кг, является ксенолит обр. У-2290 из тр. Удачная [26]. Первичный модалный состав образца (об.%): гранат — 42, омфациит — 49, коэсит — 5,4, кианит — 3,7, рутил — 0,5, сульфиды — 0,5. Первый выявленный образец с коэситом в тр. Робертс Виктор, диагностированный как коэсит-санидиновый гроспидит [6], представлен уплощенным овальным массой 5 кг ксенолитом с прослоями, обогащенными гранатом. Усредненный модалный состав его (об.%): омфациит — 56, гранат — 28, кианит — 9, коэсит — 6 и санидин — 0,6. Как в отмеченных двух образцах, так и в серии других, найденных позднее [27, 41, 43], коэсит распределен неравномерно. В некоторых случаях фиксируется слабая полосчатость, обусловленная чередованием обогащенных и обедненных коэситом участков. Доступные данные по особенностям состава граната и пироксена из более 30 образцов коэситовых эклогитов приведены на рис. 2 и 3.

На основании изучения представительной коллекции ксенолитов алмазоносных эклогитов из тр. Удачная [44] показано, что колебания относительного содержания граната и омфациита фиксируются для большинства образцов в пределах 40—60 об.% каждого из минералов, приблизительно близкие соотношения отмечены как для самых крупных образцов коэситовых эклогитов, так и для большинства остальных. Характерно, что как ксенолиты коэситовых, так и алмазоносных эклогитов, содержащих обогащенные жадеитом пироксены, исключительно сильно изменены, причем от пироксенов остаются только очень редкие реликты. Среди продуктов изменения в таких эклогитах типичны альцитим, различные цеолиты, что продемонстрировано на примере кианитовых эклогитов из тр. Робертс Виктор [45] и полностью подтверждено последующими исследованиями образцов из кимберлитов Якутии.

Несмотря на систематические детальные исследования ксенолитов алмазоносных эклогитов, ни в одном из описанных образцов, общее количество которых приближается к 400, коэсит не отмечен [33, 42—44, 46, 47]. Частично, это может быть связано с вторичными изменениями ксенолитов. Коэсит не

Таблица 1. Парагенезисы включений, содержащих коэсит

Минералы включений	1	2	3	4	5
Coe/Q	18	9	19	10	—
Ga, Coe	7 (4)	16 (2)	2*	6	—
Cpx, Coe/Q	13 (8)	2	4**	3	—
Msn, Q	1 (1)	—	—	—	—
Coe/Q, Mt	2	—	—	—	—
Coe, Ru	1	—	—	2	—
Ga, Cpx, Coe/Q	6 (1)	11	—	—	11
Ga, Q, Mt	2	—	—	—	—
Ga, Coe, Snd	—	—	—	1	—
Cpx, Coe, Ru	2 (1)	—	—	—	3
Cpx, Q, Mt	1	—	—	—	—
Ru, Ilm, Q	1	—	—	—	—
Ga, Cpx, Q, Ru	1 (1)	—	—	—	3
Ga, Cpx, Q, Mt	1 (1)	—	—	—	—
Ga, Q, Snd, Mt	1	—	—	—	—
Ga, Cpx, Q, Mt	1 (1)	—	—	—	—
Ga, Cpx, Coe, Snd	1 (1)	—	—	—	2
Ga, Ru, Q, Mt	1 (1)	—	—	—	—
Ga, Cpx, Coe, Ky	—	—	—	—	24
Ga, Cpx, Coe, Ky, Ru	—	—	—	—	1
Ga, Cpx, Coe, Ky, Snd	—	—	—	—	1
Алмазы с коэситом	60	38	25	22	—
Алмазы Э-типа	314	251	64	177	—
Coe/Э-тип (%)	19,1	15,1	39	12,4	—

Примечание. 1 — из алмазов Гуаньямо (Венесуэла) [31, 32], 2 — из лампроитов Аргайл (Австралия) [29, 30], 3 — из россыпей ю-в Австралии [14, 34, 35], 4 — из россыпей с-в Сибирской платформы [28, 33], 5 — из коэситовых эклогитов [6, 7, 26, 27, 41, 43]. Ga — гранат, Cpx — клинопироксен, Coe/Q — коэсит или кварц, Snd — санидин, Ru — рутил, Mt — магнетит, Ilm — ильменит, Ky — кианит, Msn — муассанит. Цифры в круглых скобках — количество алмазов, указанное в соответствующей строке парагенезиса, которые также содержат включения сульфидов (преимущественно пирротин). Жирным шрифтом выделены главные парагенезисы коэсита.

* Гранат является гроссуляром с Ca# 80.

** Пироксен представлен диопсидом: Ca# 50 и низкой примесью жадеита.

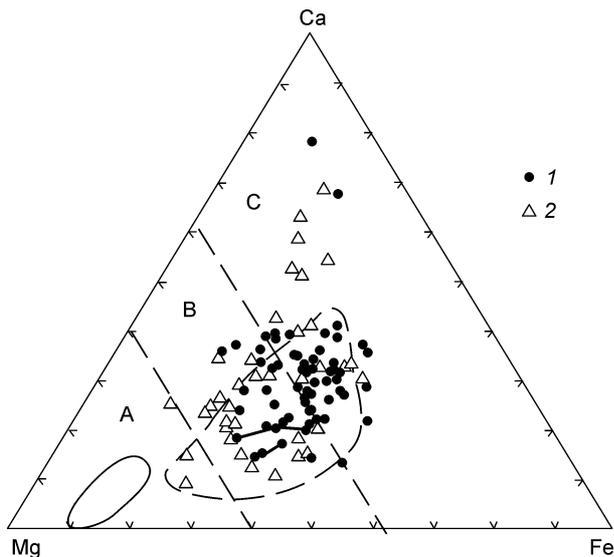


Рис. 2. Особенности состава гранатов ассоциирующих с коэситом.

1 — из алмазов, 2 — из ксенолитов коэситовых эклогитов из кимберлитов. Группы составов А, В, С в соответствии с классификацией [52]. Оконтурена область состава 95 % гранатов, включенных в алмазы [31].

выявлен также и в алмазах из эклогитов, несмотря на значительное количество изученных включений граната, омфацита и рутила [47—51].

ПАРАГЕНЕЗИСЫ КОЭСИТА В АЛМАЗАХ И КСЕНОЛИТАХ

Как показано выше, четыре месторождения алмазов, два из которых относятся к коренным (кимберлиты Венесуэлы и лампроиты Австралии), а два — к россыпным (северо-восток Сибирской платформы и юго-восток Австралии), охарактеризованы

максимальным количеством алмазов, содержащих включения коэсита в ассоциации с другими минералами. Они представляют более половины всех выявленных алмазов с включениями коэсита. Эти данные наряду с информацией по парагенезисам коэситовых эклогитов представлены в табл. 1.

Наиболее необычным парагенезисом характеризуются коэситсодержащие алмазы россыпей штата Новый Южный Уэльс (Австралия). Выявленная ассоциация гроссуляра-коэсит и пироксен диопсид-омфацитового состава—коэсит наряду с особенностями состава ряда пироксенов из алмазов существенно отличается от распространенного Э-типа парагенезиса алмазов, включающего в себя типичный омфацит и Mg-Fe-гранат. Кроме гроссуляра, являющегося наиболее кальциевым гранатом в парагенезисе с коэситом (см. рис. 2), в серии алмазов указанных россыпей выявлен еще один образец с индивидуальным включением еще более кальциевого граната [14], содержащего 87 % гроссуляра, а также серия алмазов с почти бесцветными включениями клинопироксенов, содержащих от 0,93 до 3,22 % Na₂O (6,6—22,7 мол.% жадеита) и 100Ca/(Ca + Mg + Fe) — от 49,0 до 51,6 %. Ввиду высокой роли CaO и SiO₂ в выявленном парагенезисе, его предложено назвать известково-силикатным [14], что было принято и включено в общую классификацию парагенезисов природных алмазов [52]. В дальнейшем, дополнительными исследованиями, этот подход был полностью подтвержден [34].

Другим достаточно редким для глубинных ксенолитов, но типичным для коэситсодержащих эклогитов следует считать парагенезис кианитовых эклогитов и особенно гроспидитов. Гроспидиты, оригинальная характеристика которых основана на образцах тр. Загадочная (Якутия) [53, 54] и в дальнейшем обнаруженные в тр. Робертс Виктор (ЮАР) и Удачная (Якутия), составляют, судя по особенностям состава граната, более 15 % коэситсодержащих ксенолитов (см. рис. 2).

Пожалуй, наибольшую редкость представляет парагенезис диопсид, энстатит, коэсит, установленный лишь в одном алмазе тр. Докольной (ЮАР) [36]. Хотя гранат в данном алмазе и не обнаружен, сам парагенезис, вебстеритовый, позволяет предположить, что вероятный гранат должен содержать не более 3,5—4,0 мас.% CaO и соответствовать группе А [52] (см. рис. 2). Клинопироксен, представленный практически чистым диопсидом, занимает положение также в группе А [53] (см. рис. 3). Близкий по со-

Рис. 3. Особенности состава клинопироксенов, ассоциирующих с коэситом.

1 — из алмазов, 2 — из алмаза в ассоциации с ортопироксеном, 3 — из ксенолитов коэситовых эклогитов из кимберлитов, 4 — из известково-силикатного парагенезиса. Группы составов А, В и С в соответствии с классификацией [53]. Штриховой линией оконтурена область состава пироксенов из ксенолитов различных эклогитов в кимберлитах. Заштриховано поле составов пироксенов известково-силикатного парагенезиса [14, 34, 35].

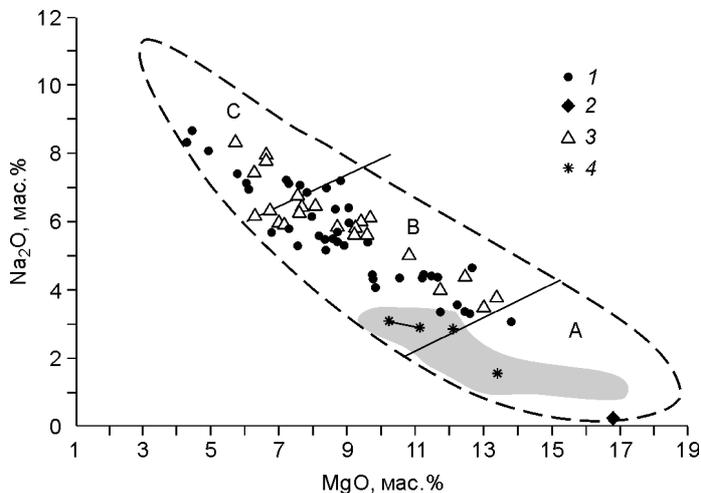


Таблица 2. Представительные анализы (мас.%) гранатов и пироксенов, ассоциирующих с коэситом в алмазах и ксенолитах эклогитов, и гроспидита из кимберлитов

Компонент	D-1363 [37]		AR-20 [14]	AR-21 [14]	AR-27* [14]	R-71 [27]		75/29 [5]		Gm-54 [31]		SRV-1 [6]	
	Срх	Орх	Срх	Ga	Срх	Ga	Срх	Ga	Срх	Ga	Срх	Ga	Срх
SiO ₂	52,3	56,2	54,9	39,0	54,4	41,8	56,6	39,3	54,6	39,5	56,0	40,3	56,6
TiO ₂	0,39	0,26	0,42	1,79	0,39	0,04	0,14	1,03	0,77	0,45	0,56	0,17	0,07
Al ₂ O ₃	1,49	0,99	5,33	20,0	4,81	23,2	8,44	20,5	6,77	21,7	10,6	21,9	17,0
Cr ₂ O ₃	0,13	—	—	0,09	0,09	0,11	0,17	0,09	0,04	0,05	0,08	0,14	0,04
FeO _{сум}	8,36	9,35	4,39	6,22	3,71	12,3	2,86	18,5	6,76	17,6	4,62	10,3	1,56
MnO	0,19	0,19	—	0,15	<0,1	0,30	—	0,36	0,03	0,36	0,06	0,29	0,00
MgO	16,8	31,4	12,1	2,83	13,4	18,5	12,1	7,91	9,79	8,44	8,67	7,57	6,24
CaO	19,26	1,17	20,3	28,7	21,9	3,73	15,3	1,6	16,5	10,8	13,1	18,9	11,6
Na ₂ O	0,21	0,20	2,86	0,30	1,57	—	5,13	0,25	4,10	0,27	5,71	0,07	7,23
K ₂ O	—	—	0,28	0,00	0,15	—	—	—	0,18	—	0,79	—	0,20
Сумма	99,13	99,76	100,58	99,08	100,42	99,92	100,77	99,54	99,54	99,17	100,19	99,64	100,58
Mg#	78,2	85,7	83,1	44,8	86,5	72,8	88,3	43,2	72,1	46,1	77,0	56,8	87,7
Ca#	39,2	2,24	50,1	78,8	50,4	9,60	44,5	32,8	46,6	30,7	45,5	51,1	53,9

Примечание. Обр. R-71 и SRV-1 — ксенолиты коэситового эклогита и гроспидита соответственно; Ca# — $[100Ca/(Ca + Mg + Fe)]$; Ga — гранат, Срх — клинопироксен, Орх — ортопироксен. Цифры в квадратных скобках — источник данных.

* В ассоциации с кварцем.

ставу гранат содержится в ксенолите коэсит-санидинового эклогита обр. R-71 (см. табл. 2) из кимберлитовой тр. Робертс Виктор (ЮАР).

На рис. 2 и 3 четко видно, что положение точек состава гранатов и пироксенов, ассоциирующих с коэситом в алмазах и ксенолитах, соответствует положению соответствующих составов наиболее глубоких эклогитовых парагенезисов, включая алмазоносные эклогиты и включения Э-типа парагенезиса в алмазах. Гранаты широкой серии эклогитовых составов характеризуются значениями Mg# в интервале 80 и 35 с минимальным значением Ca# 8—10. Область состава пироксенов глубоких эклогитов ограничена штриховой линией (см. рис. 3).

Как известно, все достоверные находки коэсита в метаморфических породах земной коры относятся к широкой серии пород, в состав которых неизменно входит гранат [9—12, 18—22]. Часть этих пород представлена эклогитами, гранаты которых имеют типичный для глубоких эклогитов группы В состав. В то же время в ряде пород гранаты имеют экзотический состав. К таким гранатам относится практически чистый пироп из кварцитов Дора Майра (Западные Альпы) [9], пироп-спессартиновый гранат из метаморфизованных марганцовистых кварцитов, Западные Альпы [18], а также пироп-альмандиновый гранат с низким содержанием кальция из метапелитов Кокчетавского массива (Казахстан) [20]. Именно быстрая эксгумация метаморфических пород способствует сохранению таких экзотических составов, которые в кимберлитах и алмазах не встречены. Объяснением этой особенности может быть полное плавление пород кислого состава в процессе субдукции и длительного пребывания в области температур порядка 1000—1200 °С. Здесь только фиксируются все известные парагенезисы эклогитов и близких к ним пород в широком диапазоне составов: от вебстеритов (пироксенитов) до кианитовых эклогитов и гроспидитов. Наиболее типичные, широко распространенные составы соответствуют группе В и С.

Ранее, на основании анализа первой находки коэсита в алмазе и предположения его эклогитового парагенезиса, была выделена коэситовая фация верхней мантии [55], а также обосновано предположение о происхождении коэситсодержащих глубоких эклогитов за счет субдукции океанических базальтов [56, 57]. Базировавшееся на особенностях необычного изотопного состава алмазов, содержащих известково-силикатный парагенезис включений, а именно, близкий к изотопному составу углерода морских карбонатов [57], это предположение получило новые веские подтверждения и на основании данных по изотопному составу азота австралийских алмазов [34], оказавшемуся очень близким к изотопному составу азота кокчетавских алмазов, образовавшихся в метаосадочных породах земной коры [58].

Исключительное разнообразие алмазов эклогитового (Э) типа Гуаньямо (Венесуэла) наряду с очень высокой ролью в них коэситсодержащих парагенезисов (см. табл. 1) послужило основанием для предположения об их образовании в результате субдукции древней океанической коры [31]. Дополнительные подтверждения этому предположению получены в результате изучения изотопии кислорода коэсита из этих алмазов [59, 60]. Впервые получены значения $\delta^{18}O$ от 10 до 15 ‰.

Дополнительным подтверждением близости условий образования некоторых метаморфических пород сверхвысоких давлений земной коры, в частности, в Кокчетавском массиве (Казахстан) и коэситсодержащих парагенезисов кимберлитов могут служить данные по составу флюидов, изученных в алмазах кимберлитов [61] и известково-силикатных пород Кокчетавского массива [62]. В обоих случаях среди флюидов преобладает С—О—Н флюид с высоким (до 50—60 %) содержанием K_2O и заметным содержанием Si и CO_2 . Эти данные свидетельствуют о возможности рассмотрения метаморфических пород сверхвысоких давлений Кокчетавского массива в качестве своеобразной модели для понимания особенностей состава и флюидного режима глубинных зон континентальной литосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате обобщения всех доступных по состоянию на середину 2005 г. материалов по находкам коэсита в алмазах различных месторождений земного шара и ксенолитов эклогитов с коэситом, можно сделать следующие выводы.

1. Включения коэсита установлены в алмазах практически во всех разрабатываемых коренных и россыпных месторождений мира. Исключение пока составляют только алмазы Индии, вероятно, вследствие недостаточной изученности.

2. Ни в одном ксенолите эклогитов, содержащих вплоть до 6 об.% неизмененного коэсита, ни алмаз, ни графит не обнаружены.

3. Парагенезисы коэсита как в алмазах, так и в эклогитах соответствуют исключительно широкой серии эклогитовых составов — от магнезиальных вебстеритов до кианитовых эклогитов гроспидитов и известково-силикатных составов.

4. Разнообразие коэситсодержащих парагенезисов и составов, представленных широкой серией эклогитов, а также имеющиеся данные по изотопному составу кислорода коэсита, углерода и азота алмазов, содержащих включения коэсита, подтверждают предположение об образовании глубинных коэситсодержащих эклогитов за счет субдуцированных пород древней океанической коры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Coes L. A new dense crystalline silica // *Science*, 1953, v. 118, p. 131—132.
2. Chao E.C.T., Shoemaker E.M., Madsen B.M. First natural occurrence of coesite from Meteor Crater, Arizona // *Science*, 1960, v. 132, p. 220—222.
3. Harris J.W. The recognition of diamond inclusions. Part I: Syngenetic mineral inclusions // *Industr. Diam. Rev.*, 1968, v. 28, p. 402—410.
4. Соболев Н.В. О минералогических критериях алмазоносности кимберлитов // *Геология и геофизика*, 1971, № 3, с. 70—80.
5. Соболев Н.В., Ефимова Э.С., Коптиль В.С. и др. Включения коэсита, граната и омфациита в якутских алмазах — первая находка парагенезиса коэсита // *Докл. АН СССР*, 1976, т. 230, с. 1442—1444.
6. Smyth J.R., Hatton C.J. A coesite-sanidine grosspydite from the Roberts-Victor kimberlite // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1977, v. 34, p. 284—290.
7. Пономаренко А.И., Специус З.В., Любушкин В.А. Кианитовый эклогит с коэситом // *Докл. АН СССР*, 1977, т. 236, с. 215—219.
8. Kennedy C.S., Kennedy G.C. The equilibrium boundary between graphite and diamond // *J. Geophys. Res.*, 1976, v. 81, p. 2467—2470.
9. Chopin C. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the western Alps: a first record and some consequences // *Contr. Miner. Petrol.*, 1984, v. 86, p. 107—118.
10. Smith D.C. Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics // *Nature*, 1984, v. 310, p. 641—644.
11. Coleman R.G., Wang X. (Eds). *Ultrahigh pressure metamorphism*. Cambridge, Cambridge University Press, 1995, 528 p.
12. Wain A. New evidence for coesite in eclogite and gneisses: defining an ultrahigh-pressure province in the Western Gneiss Region of Norway // *Geology*, 1997, v. 25, p. 927—930.
13. Чесноков Б.В., Попов В.А. Увеличение объема зерен кварца в эклогитах Южного Урала // *Докл. АН СССР*, 1965, т. 62, с. 909—910.
14. Соболев Н.В., Ефимова Э.С., Лаврентьев Ю.Г., Соболев В.С. Преобладающая известково-силикатная ассоциация кристаллических включений в алмазах из россыпных месторождений Юго-Восточной Австралии // *Докл. АН СССР*, 1984, т. 274, с. 130—135.
15. Добрецов Н.Л., Добрецова Л.В. Новые данные по минералогии эклогит-глаукофансланцевого максютовского комплекса (Южный Урал) // *Докл. АН СССР*, 1988, т. 300, с. 195—200.

16. **Соболев Н.В., Шацкий В.С., Вавилов М.А., Горяйнов С.В.** Включение коэсита в цирконе из алмазосодержащего гнейса Кокчетавского массива — первая находка коэсита в метаморфических породах на территории СССР // Докл. РАН, 1991, т. 321, с. 184—188.
17. **Соболев Н.В., Шацкий В.С., Вавилов М.А., Горяйнов С.В.** Циркон высокобарических метаморфических пород складчатых областей как уникальный контейнер включений алмаза, коэсита и сосуществующих минералов // Докл. РАН, 1994, т. 334, с. 488—492.
18. **Reinecke T.** Very-high pressure metamorphism and uplift of coesite-bearing metasediments from the Zermatt-Saas zone, Western Alps // *Eur. J. Miner.*, 1991, v. 3, p. 7—17.
19. **Parkinson C.D., Katayama I., Liou J.G., Maruyama S.** (Eds). The diamond-bearing Kokchetav massif, Kazakhstan. Universal Academy Press Inc-Tokyo, Japan, 2002, 527 p.
20. **Шацкий В.С., Теннисен К., Добрецов Н.Л., Соболев Н.В.** Новые свидетельства метаморфизма сверхвысоких давлений в слюдяных сланцах участка Кулет Кокчетавского массива (Северный Казахстан) // *Геология и геофизика*, 1998, т. 39, № 8, с. 1039—1044.
21. **Корсаков А.В., Шацкий В.С., Соболев Н.В.** Первая находка коэсита в эклогитах Кокчетавского массива // Докл. РАН, 1998, т. 360, с. 77—81.
22. **Korsakov A.V., Shatsky V.S., Sobolev N.V., Zayachkovsky A.A.** Garnet-biotite-clinozoisite gneiss: a new type of diamondiferous metamorphic rock from the Kokchetav Massif // *Eur. J. Miner.*, 2002, v. 14, p. 915—928.
23. **Schertl H.-P., Neuser R.D., Sobolev N.V., Shatsky V.S.** UHP-metamorphic rocks from Dora Maira/Western Alps and Kokchetav / Kazakhstan: new insights using cathodoluminescence petrography // *Eur. J. Miner.*, 2004, v. 16, p. 49—57.
24. **Шертл Г.-П., Меденбах О., Нойзер П.Д.** Ультрабарические метаморфические породы массива Дора-Майра, Западные Альпы: катодолуминесцентный анализ кремнезема и двойникования коэсита // *Геология и геофизика*, 2005, т. 46, № 12, с. 1345—1351.
25. **Prinz M., Manson D.V., Hlava P.F., Keil K.** Inclusions in diamonds. Garnet lherzolite and eclogite assemblages // *Phys. Chem. Earth*, 1975, v. 9, p. 797—815.
26. **Спеццус З.В.** Мегаксенолит коэситового эклогита из кимберлитовой трубки Удачная // Докл. АН СССР, 1990, т. 313, с. 153—157.
27. **Schulze D.J., Helmstaedt H.** Coesite-sanidine eclogites from kimberlite: products of mantle fractionation or subduction? // *J. Geology*, 1988, v. 96, p. 435—443.
28. **Sobolev N.V., Fursenko B.A., Goryainov S.V. et al.** Fossilized high pressure from the Earth's deep interior: coesite-in-diamond barometer // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2000, v. 97, p. 11875—11879.
29. **Jaques A.L., Hall A.E., Sheraton J. et al.** Composition of crystalline inclusions and C-isotopic composition of Argyle and Ellendale diamonds // *Kimberlite and related rocks / J. Ross et al. (eds.): Special Publ. GSA*, v. 2. Blackwell, Oxford, 1989, p. 66—89.
30. **Соболев Н.В., Галимов Э.М., Смит К.Б. и др.** Сравнительная характеристика морфологии, включений и изотопного состава углерода алмазов аллювиальных отложений Кинг Джордж Ривер и лампроитового месторождения Аргайл (Западная Австралия) // *Геология и геофизика*, 1989, № 12, с. 3—19.
31. **Sobolev N.V., Yefimova E.S., Channer D.M.DeR et al.** Unusual upper mantle beneath Guaniamo, Gyana shield, Venezuela: evidence from diamond inclusions // *Geology*, 1998, v. 26, p. 971—974.
32. **Sobolev N.V., Logvinova A.M., Yefimova E.S. et al.** Polymineralic eclogitic inclusions in Guaniamo diamonds, Venezuela: evidence for variable diamond growth conditions // *Ext. Abstracts, 8 Int. Kimb. Conf. Victoria, Canada*, 2003, FLA-0144.
33. **Sobolev N.V., Sobolev V.N., Snyder G.A. et al.** Significance of eclogitic and related parageneses of natural diamonds // *Intern. Geol. Rev.*, 1999, v. 41, № 2, p. 129—140.
34. **Мейер Х.О.А., Милледж Х.Дж., Сазерлэнд Ф.Л., Кенневел П.** Необычные алмазы и уникальные включения из Нового Южного Уэльса, Австралия // *Геология и геофизика*, 1997, т. 38, № 2, с. 289—314.
35. **Davies R.M., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Andrew A.S.** Unusual diamond inclusions and carbon isotopes of alluvial diamonds from Bingara, eastern Australia // *Lithos*, 2003, v. 69, p. 51—66.
36. **Davies R.M., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Doyle B.J.** Mineral inclusions and geochemical characteristics of microdiamonds from the DO27, A154, A21, A418, DO18, DD17 and Ranch Lake kimberlites at Lac de Gras, Slave Craton, Canada // *Lithos*, 2004, v. 77, p. 39—55.
37. **Daniels L.R.M., Gurney J.J.** Diamond inclusions from the Dokolwayo kimberlite, Swaziland // *Proceedings of the 7th International Kimberlite Conference / Eds. J.J. Gurney, J.L. Gurney, M.D. Pascoe, S.H. Richardson. Cape Town, Red Roof Design*, v. 1, 1999, p. 134—142.

38. **Appleyard C.M., Viljoen K.S., Doble S.R.** A study of eclogitic diamonds and their inclusions from the Finsch kimberlite pipe, South Africa // *Lithos*, 2004, v. 77, p. 317—332.
39. **Kenna N.Mc., Gurney J.J., Klump J., Davidson J.M.** Aspects of diamond mineralization and distribution at the Helam mine, South Africa // *Lithos*, 2004, v. 77, p. 193—208.
40. **Sobolev N.V., Logvinova A.M., Zedgenizov D.A. et al.** Mineral inclusions in microdiamonds and macrodiamonds from kimberlites of Yakutia: a comparative study // *Lithos*, 2004, v. 77, p. 225—242.
41. **Schulze D.J., Valley J.W., Spicuzza M.J.** Coesite eclogites from the Roberts Victor kimberlite, South Africa // *Lithos*, 2000, v. 54, p. 23—32.
42. **Соболев Н.В., Тэйлор Л.А., Зуев В.М. и др.** Особенности экологитового парагенезиса алмазов кимберлитовых трубок Мир и Удачная (Якутия) // *Геология и геофизика*, 1998, т. 39, № 12, с. 1667—1678.
43. **Spetsius Z.V.** Petrology of highly aluminous xenoliths from kimberlites of Yakutia // *Lithos*, 2004, v. 77, p. 525—538.
44. **Sobolev N.V., Taylor L.A., Snyder G.A., Sobolev N.V.** Diamondiferous eclogites from the Udachnaya pipe, Yakutia // *Int. Geol. Rev.*, 1994, v. 36, p. 42—64.
45. **Berg G.W.** Secondary alteration in eclogites from kimberlite pipes // *Amer. Miner.*, 1968, v. 53, p. 1336—1346.
46. **Taylor L.A., Keller R.A., Snyder G.A. et al.** Diamonds and their mineral inclusions and what they tell us: a detailed „pull-apart“ of a diamondiferous eclogite // *Int. Geol. Rev.*, 2000, v. 42, p. 959—983.
47. **Taylor L.A., Anand M.** Diamonds: time capsules from the Siberian mantle // *Chemie der Erde*, 2004, v. 64, p. 1—74.
48. **Соболев В.С., Соболев Н.В., Лаврентьев Ю.Г.** Включения в алмазе из алмазоносного экологита // *Докл. АН СССР*, 1972, т. 207, с. 164—167.
49. **Meyer H.O.A.** Inclusions in diamond // *Mantle xenoliths* / P.H. Nixon (ed.). Wiley, Chichester, England, 1987, p. 501—502.
50. **Бобриевич А.П., Смирнов Г.И., Соболев В.С.** К минералогии ксенолитов гроссуляр-пироксендистеновой породы (гроспидита) из кимберлитов Якутии // *Геология и геофизика*, 1960, № 3, с. 18—24.
51. **Sobolev N.V., Kuznetsova I.K., Zyuzin N.I.** The petrology of grosspydite xenoliths from Zagadochnaya kimberlite pipe in Yakutia // *J. Petrol.*, 1968, v. 9, p. 253—280.
52. **Coleman R.G., Lee E.D., Beatty L.B., Brannock W.W.** Eclogites and eclogites: their differences and similarities // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1965, v. 76, p. 483—508.
53. **Taylor L.A., Neal C.R.** Eclogites with oceanic crustal and mantle signatures from the Bellsbank kimberlite, South Africa. Part 1: Mineralogy, petrology and whole-rock chemistry // *J. Geology*, 1989, v. 97, p. 551—567.
54. **Sobolev N.V., Shatsky V.S.** Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks: a new environment for diamond formation // *Nature*, 1990, v. 343, p. 742—745.
55. **Соболев В.С., Добрецов Н.Л., Соболев Н.В.** Классификация глубинных ксенолитов и типы верхней мантии // *Геология и геофизика*, 1972, № 12, с. 37—42.
56. **Соболев В.С.** Коэситовые (кварцевые) экологиты как источник мантийных магм, богатых кремнеземом // *Проблемы глубинного магматизма*. М., 1977, с. 7—11.
57. **Соболев В.С., Соболев Н.В.** Новые доказательства погружения на большие глубины экологитизированных пород земной коры // *Докл. АН СССР*, 1980, т. 250, с. 683—685.
58. **Cartigny P., De Corte K., Shatsky V.S. et al.** The origin and formation of metamorphic microdiamonds from the Kokchetav massif, Kazakhstan: a nitrogen and carbon isotopic study // *Chem. Geol.*, 2001, v. 176, p. 265—281.
59. **Schulze D.J., Harte B., Valley J.W. et al.** Extreme crustal oxygen isotope signatures preserved in coesite in diamond // *Nature*, 2003, v. 423, p. 68—70.
60. **Schulze D.J., Harte B., Valley J.W., Channer D.M.DeR.** Evidence of subduction and crust-mantle mixing from a single diamond // *Lithos*, 2004, v. 77, p. 349—358.
61. **Navon O.** Formation of diamonds in the Earth's mantle // *Proceedings of the 7th International Kimberlite Conference* / Eds. J.J. Gurney, J.L. Gurney, M.D. Pascoe, S.H. Richardson. Cape Town, Red Roof Design, v. 1, 1999, p. 584—604.
62. **Hwang S.L., Shen P., Chu H.T. et al.** Crust-derived potassic fluid in metamorphic microdiamond // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2005, v. 231, p. 295—306.

*Поступила в редакцию
30 августа 2005 г.*