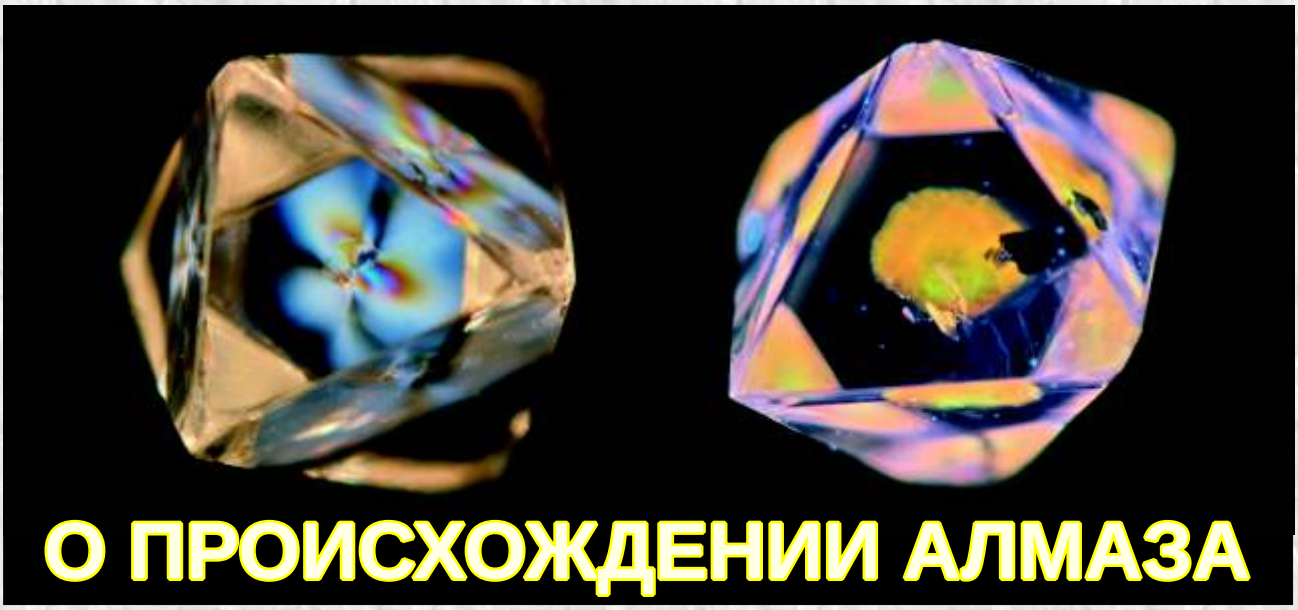


# О ПРОИСХОЖДЕНИИ АЛМАЗА

**В. С. Шкодзинский**

***Владимир Степанович Шкодзинский,***
*доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН.*

Алмаз, благодаря своим уникальным свойствам и широкому применению, давно привлекает внимание исследователей. В первых научных гипотезах XIX столетия предполагалось, что алмаз, как и другие минералы, содержащиеся в кимберлитах, образовался при малоглубинной кристаллизации исходных магм этих пород. Однако такому мнению противоречит отсутствие алмаза в других по составу магматических породах, несмотря на находки в них графита, состоящего, как и алмаз, из углерода. Расчеты, выполненные в тридцатых годах прошлого столетия О. Лейпунским и другими учеными, объяснили это противоречие. Оказалось, что для стабильного образования алмаза необходимо очень высокое давление, которое существует в земной мантии на глубине более 150 км.

Дальнейшие исследования показали, что алмаз нередко присутствует в обломках (ксенолитах) мантийных пород, содержащихся в кимберлитах. Включения минералов в алмазе часто имеют изотопный возраст, более древний чем вмещающие кимберлиты. На основе этих фактов была выдвинута гипотеза о ксеногенном происхождении алмаза. Она предполагает, что алмаз кристаллизовался не в кимберлитовых магмах, а в мантийных породах на ранней стадии эволюции Земли и случайно захватывался магмами при их подъеме на поверхность. Это гипотеза является наиболее распространенной до настоящего времени.

Однако в последние десятилетия получено большое количество данных, противоречащих и этой гипотезе. К числу их относятся: одинаковый с кимберлитами изотопный возраст некоторых включений в алмазах, свидетельствующий о формировании многих кристаллов этого минерала в кимберлитовых магмах; присутствие в алмазах включений карбонатных минералов и расплавов, типичных для кимберлитов, но не характерных для мантийных ксенолитов [1]; различие внутреннего строения алмазов из кимберлитов и мантийных ксенолитов [2]; сонахождение иногда в одном и том же кристалле включений минералов, характерных для разных по составу мантийных пород, свидетельствующее о кристаллизации алмаза в эволюционировавшей по составу среде, то есть в расплаве.

По современным представлениям, кристалломорфология алмаза определяется степенью пересыщения среды кристаллизации углеро-

*На фото вверху – якутские алмазы с включением минералов (трубка «Мир»). Слева – в поляризованном свете; справа – фотолюминесценция.*
*Фото А.Д. Павлушина.*

*Карьер трубки «Сытыканская» (Якутия). Фото А.Е. Васильевой.*

дом. С ее повышением рост октоэдрических кристаллов сменяется образованием додэдрических, затем кубических. Степень этого пересыщения возрастает с увеличением вязкости среды, поскольку при этом уменьшается скорость диффузии и, следовательно, замедляется сток углерода в кристаллизующиеся алмазы. Вязкость природных расплавов увеличивается с ростом содержания кремнекислоты примерно на 6 порядков с повышением ее концентрации от 25 до 60%. Поэтому при кристаллизации алмаза в родоначальных для кимберлитов расплавах с повышением содержания в них кремнекислоты должно уменьшаться, как отмечалось, количество октаэдрических кристаллов и возрастать – додекаэдрических и других разновидностей. К последним, по Ю.Л. Орлову, относятся желтые и зеленые (разновидность II), а также серые (III) кубы; кристаллы с мутной оболочкой, переполненной жидкими включениями (IV); кристаллы с прозрачным ядром и темно-серой оболочкой, содержащей графитовые включения (V); радиально-лучистые агрегаты алмаза (VI); сростки кристаллов разновидности V (VII); мелкозернистый борт* (VIII и IX) и микрозернистые агрегаты кристаллов алмаза – карбонадо (X) [3]. Наиболее распространенные октаэдрические, додекаэдрические и неокрашенные кубические кристаллы относятся к разновидности I.

Предпринятый автором этой статьи анализ опубликованных отечественных и зарубежных данных показал, что с ростом в кимберлитах содержания кремнекислоты в указанных выше пределах количество октаэдрических кристаллов алмаза действительно уменьшается в среднем от 40 до 7% (линия 1 на рис. 1), а количество додекаэдроидов (линия 2) увеличивается от 23 до 82% [4]. Сумма разновидностей II–VIII (линия 3), по Ю.Л. Орлову, в среднем возрастает с 4% при 25% $SiO_2$ до 23% при 45% $SiO_2$ [3].

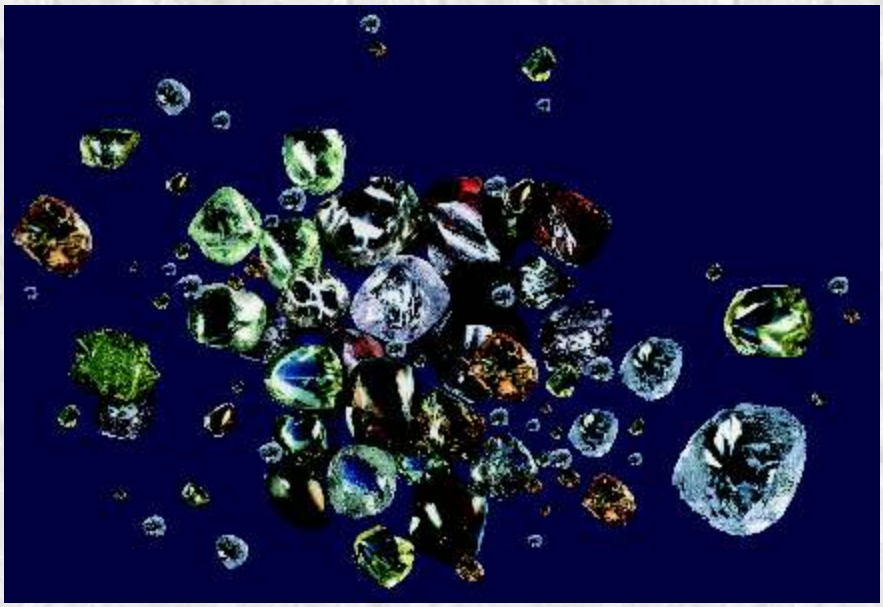
Значительное разнообразие кристалломорфологии алмаза и состава включений в нем в одной и той же трубке обусловлено эволюцией расплавов в процессе зарождения и кристаллизации этого минерала, сопровождающейся изменением их вязкости, степени пересыщения углеродом, морфологией образующихся алмазов и состава захватываемых ими включений. Эволюция состава расплавов и равновесных с ним минералов объясняет случаи сонахождения в одном и том же кристалле алмаза включений минералов, типичных для различных пород. При ксеногенном происхождении алмазов убедительно объяснить такое сонахождение невозможно, так как в твердой мантии растущие алмазы не могли бы перемещаться из одних пород в другие.

Для выяснения происхождения главных разновидностей алмаза важно иметь правильное представление о генезисе кимберлитовых магм. Их формирование трудно объяснить с позиций распространенного в настоящее время мнения об обособлении выплавок в слабо подплавленных (на десятые – сотые доли процента) мантийных породах, поскольку в мантии, вследствие высокого давления и температуры, не могут возникать открытые трещины и поры, необходимые для движения расплава. Кроме того, вязкость вещества мантии настолько высока (обычно оценивается в $10^{19}$–$10^{23}$ Па·с), что капли расплава радиусом 1 см за все время существования Земли (4,5 млрд. лет) всплыли бы в мантии только на первые миллиметры [5].

Все особенности происхождения кимберлитовых магм и алмаза хорошо объяснимы с учетом современных представлений о горячем образовании планет земной группы и существовании на них глобальных океанов магмы [6, 7 и др.]. Выполненные расчеты показали, что на завершающем этапе формирования Земли на ней существовал расслоенный по составу океан магмы глубиной около 240 км [5, 8]. Вследствие значительного увеличения плотности с глубиной в таком океане при остывании обширных конвективных потоков не возникало. Поэтому он очень медленно кристаллизовался сверху вниз преимущественно в результате кондуктивных теплопотерь. Верхний, богатый кремнекислотой (кислый), слой остывающей магмы 4,0–1,9 млрд. лет назад образовал породы кристаллической континентальной коры; нижний, богатый магнием и бедный кремнекислотой (перидотитовый), слой магматического океана 1,5–0,6 млрд. лет назад сформировал различные породы мантии и остаточные кимберлитовые и близкие к ним по составу (лампроитовые) расплавы (рис. 2). Это объясняет позднее (преимущественно 1,5 млрд. лет назад) появление в истории Земли кимберлитов и исключительно большое содержание в них расплавофильных компонентов – воды, углекислоты, редких земель и некоторых других.

Вследствие высокой (более 2000°С) первичной тем-

* Борт – агрегат мелких сросшихся кристаллов алмаза.



*Кристаллы алмаза из россыпи р. Маят.*
*(Из подборки фото, подготовленной пресс-службой ОАО «Алмазы Анабара» к его 10-летнему юбилею).*

пературы магматического океана при образовании континентальной коры и верхней части мантии (литосферы) сначала был устойчив графит (см. рис. 2). В процессе остывания мантии графит переходил в алмаз, что является причиной присутствия его включений в центрах роста некоторых кристаллов.

Выделено три стадии формирования алмаза [4]. На *первой стадии* при остывании придонного слоя магматического океана кристаллизовались наиболее ранние алмазы при еще очень высокой концентрации магния и низком содержании кремнекислоты в магме. Процессы образования таких алмазов протекали очень длительно (более 2 млрд. лет), так как скорость остывания глубинных частей магматического океана была невелика. Кристаллизация высокотемпературных минералов еще не привела к накоплению значительного количества кремнекислоты, летучих компонентов и щелочей. Это явилось причиной формирования крупных малодефектных ювелирных преимущественно октаэдрических кристаллов алмаза и объясняет происхождение изредка встречающихся в кимберлитах алмазов-гигантов (1 на рис. 2). Небольшое содержание летучих компонентов в расплаве, в том числе азота, обусловило широкое распространение ценных безазотных разностей среди крупных алмазов и пониженное содержание азота в центральных частях многих октаэдрических кристаллов.

По мере остывания и кристаллизации магматического океана содержание кремнекислоты и летучих компонентов в остаточных расплавах чаще всего увеличивалось. Это привело, в соответствии с установленными зависимостями (см. рис. 1), к уменьшению количества октаэдров и возрастанию содержания додекаэдроидов, а затем и кубов среди формировавшихся кристаллов алмаза. Такая смена октаэдрической огранки додекаэдрической и кубической характерна для зональных алмазов богатых кремнекислотой ар-хангельских кимберлитов.

Накопление в остаточных расплавах магмы кремнекислоты и летучих компонентов является причиной намного большего их содержания в виде примесей в додекаэдрических и особенно в кубических алмазах по сравнению с октаэдрическими, обилия жидких и солевых включений, а также высокой концентрации кремнекислоты (до 70%) в некоторых расплавных включениях в кубических кристаллах [1].

На *второй стадии* в последних остаточных расплавах (2, 4, 5 на рис. 2) кристаллизовались окрашенные, с большим количеством азота и дефектов, кубические алмазы разновидностей II и III, а также мутные периферические части алмазов разновидностей IV–V. Прозрачные ядра таких алмазов образовались на более ранней стадии кристаллизации, когда магматический расплав был еще беден кремнекислотой и летучими компонентами.

Формирование алмаза в пузырьках сжатого водно-

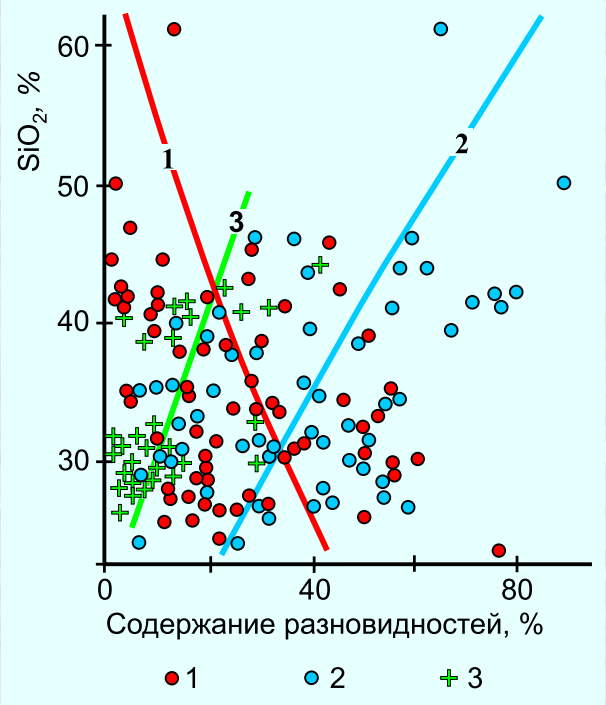



*Рис. 1. Соотношение среднего количества кремнекислоты в кимберлитовых трубках и содержания среди алмазов октаэдров (1), додекаэдроидов (2) и суммы разновидностей II–VIII (3), по Ю.Л. Орлову [3].*

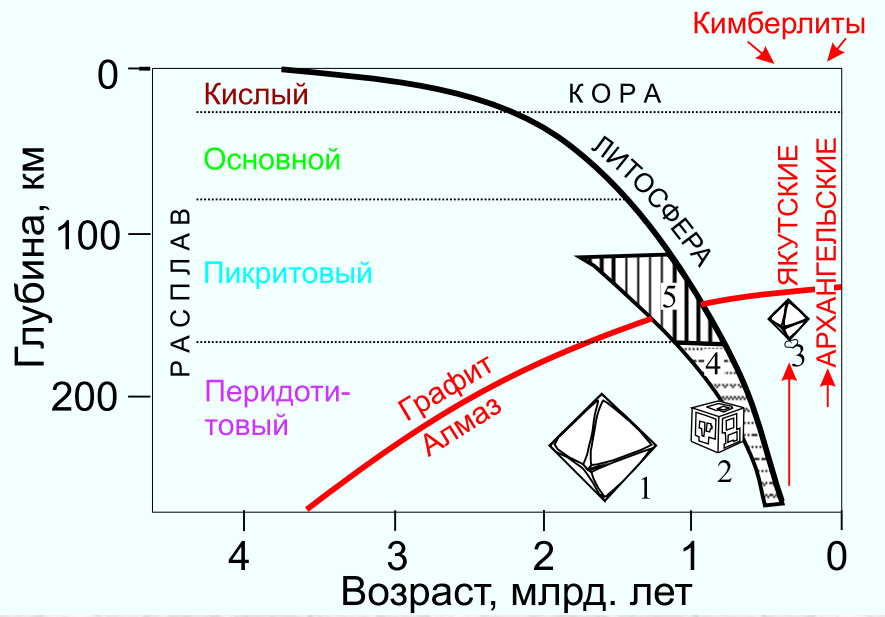



***Рис. 2. Схема кристаллизации расслоенного магматического океана. Условия образования ранних октаэдрических алмазов-гигантов (1); небольших додекаэдрических кристаллов и разновидностей II–VIII (2); поздних октаэдрических кристаллов алмаза (3); кимберлитовых (4) и лампроитовых (5) остаточных расплавов.***

метано-углекислотного газа, выделившихся на заключительной стадии кристаллизации остаточного расплава, происходило очень быстро вследствие высокой концентрации различных химических соединений углерода в газе и большой скорости протекания реакций между ними. Это привело к формированию поликристаллических сростков и агрегатов разновидностей VI–X. Возникновение мелкозернистых агрегатов после образования части относительно крупных кристаллов алмаза подтверждается явлениями нарастания на них борта [9].

Овальная форма и небольшой размер алмазных агрегатов обусловлены, видимо, их формированием в газовых выделениях. Это согласуется с присутствием пустот в борте [9] и карбонадо, а также с существованием прямой корреляции содержания агрегатов с суммарным количеством воды и углекислоты и с величиной потерь при прокаливании в кимберлитах (рис. 3).

Алмазы первых двух стадий имеют реститовое (остаточное) происхождение по отношению к позже возникшим кимберлитовым магмам. Такой генезис означает, что формирование кристаллов этого минерала происходило на этапе зарождения кимберлитовых по составу остаточных магматических расплавов и мантийных пород, тогда как при ксеногенном происхождении алмазы не имели бы никакого отношения к образованию кимберлитов.

На двух описанных стадиях алмаз кристаллизовался в процессе фракционирования магм, при котором происходила гравитационная отсадка зерен образующихся минералов. Это сопровождалось увеличением в остаточном расплаве отношения углеводородов к углекислоте, так как последняя частично связывалась кристаллизущимися карбонатными минералами.

При температуре 1000°C содержание тяжелого изотопа углерода $\delta C^{13}$ в метане примерно на 8‰ меньше, чем в углекислоте. Поэтому фракционирование приводило к облегчению изотопного состава углерода остаточных расплавов и соответственно алмазов. Это объясняет резкое уменьшение содержания тяжелого изотопа углерода от октаэдрических алмазов ($\delta C^{13}$ в среднем равно –4,7‰) к додекаэдрическим (–5,93‰), далее к кубическим (–14,7‰ в разновидности II) и особенно к агрегатам (–24,7‰ в карбонадо) [10]. Такое изменение величины $\delta C^{13}$ подтверждает рассматриваемую модель алмазообразования.

На *третьей стадии* алмаз формировался в ходе процессов образования магм путем плавления полузакристаллизованных кимберлитовых по составу мантийных пород под влиянием снижения давления при подъеме, что сопровождалось уменьшением содержания кремнекислоты в расплаве и увеличением концентрации магния [5, 8]. В соответствии с рассмотренными выше зави-

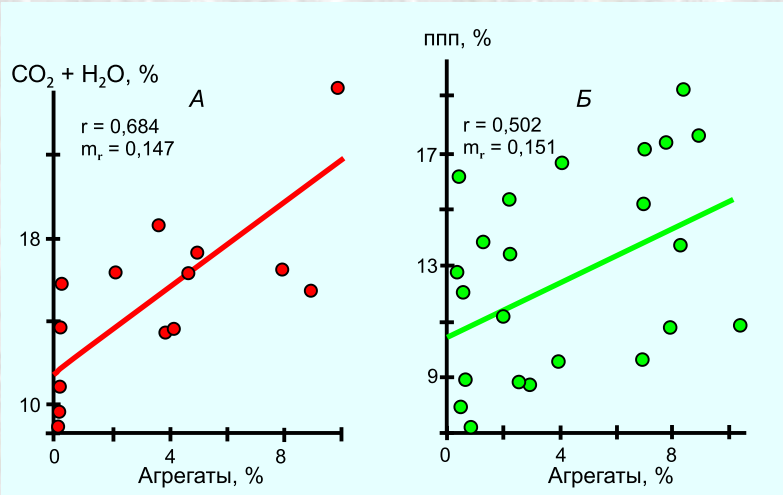



***Рис. 3. Прямая корреляция содержания агрегатов алмаза (разновидности VI–VIII) с суммарным количеством $H_2O$ и $CO_2$ (а) и величиной потерь при прокаливании (ппп, %) (б) в кимберлитах. r , $m_r$ – коэффициент корреляции и его ошибка, соответственно.***

симостями (см. рис. 1), это привело к кристаллизации сначала преимущественно кубов и додекаэдроидов, затем октаэдров на поздних стадиях плавления (3 на рис. 2) и согласуется с существованием такой последовательности зон в большинстве зональных кристаллов якутских кимберлитов [2]. Магмы этих кимберлитов, судя по составу включений в алмазах, зарождались глубже по сравнению с магмами архангельских. Это объясняет более широкое проявление в якутских кимберлитах третьей стадии алмазообразования и большее в среднем содержание в них алмазов. Сформировавшиеся на этой стадии алмазы являются раннемагматическими по отношению к кимберлитам. Их кристаллизация обусловлена резким снижением концентрации воды в расплаве при процессах плавления. Последнее приводило к ее образованию за счет восстановления углекислоты метаном и водородом с кристаллизацией выделявшегося углерода в виде алмаза [5, 8]. Случаи нарастания на борт относительно крупных кристаллов алмаза подтверждают существование данной стадии [9].

Таким образом, обобщение и анализ результатов изучения алмаза и содержащих этот минерал кимберлитов позволили выявить главные особенности процессов его образования. Большое значение при этом имело использование модели горячего происхождения Земли и существования на ней глобального магматического океана, что позволило понять генезис земной мантии и сущность протекающих в ней процессов. В то же время еще остаются неясными некоторые детали механизма образования разновидностей алмаза, скульптуры поверхности его кристаллов, дефектов кристаллической решетки и некоторые другие вопросы.

***Литература***

*1. Zedgenizov D.A., Kagi H., Shatsky V.S., Sobolev N.V. Carbonatitic melts in cuboid diamonds from Udachnaya kimberlite pipe (Yakutia): evidence from vibrational spectroscopy // Mineralogical Magazine. – 2004. – V. 68 (1). – P. 61–73.*

*2. Бескрованов В.В. Онтогения алмаза. – Новосибирск: Наука, 2000. – 264 с.*

*3. Орлов Ю.Л. Морфология алмаза. – М.: Наука, 1963. – 235 с.*

*4. Shkodzinskiy V.S., Zaitsev A.I. Constraints on Diamond Genesis from the Study of Dependence of Diamond Properties on the composition of Kimberlites and Lamproites // Russian Journal of Pacific Geology. – 2007. – V. 1, № 4. – P. 390–399.*

*5. Шкодзинский В.С. Происхождение кимберлитов и алмаза. – Якутск: Изд-во ЯНЦ, 1995. – 168 с.*

*6. Wood J.A., Diskey J.S., Marnin V.B., Powel B.H. Lunar anorthosits and geophysical model of Moon // Proc. Appolo XI Lunar Sci. Conf. Houston. – 1970. – V. 1. – P. 965–989.*

*7. Hofmeister A.M. Effect of hadean terrestrial magma ocean on crust and mantle evolution // J. Geophys. Res. – 1983. – V. B88, № 6. – P. 4963–4983.*

*8. Шкодзинский В.С. Проблемы глобальной петрологии. – Якутск: Сахаполиграфиздат, 2003. – 240 с.*

*9. Смелова Г.Б. Генезис агрегатов алмаза из кимберлитовых трубок Якутии. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1994. – 88 с.*

*10. Зинчук Н.Е., Коптиль В.И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. – М: Недра, 2003. – 603 с.*

## НОВЫЕ КНИГИ