УДК 553.81.078
© А.Н.Барышев, Г.К.Хачатрян, 2017

# Минерагеническое и геодинамическое значение типов популяций алмаза

А.Н.БАРЫШЕВ, Г.К.ХАЧАТРЯН (Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов (ФГУП ЦНИГРИ); 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1)

Рассмотрен принцип выделения популяций алмаза, их типизация, пространственные закономерности размещения, значение популяций для реконструкции глубинной структуры минерагенической провинции до кимберлитового вулканизма. Показана роль популяций в обосновании глубинной конвективной геодинамики, формирующей фундамент платформ, связь с ней субдукции, общей минерагении. Предложен путь дальнейшего развития теоретических основ алмазообразования.
*Ключевые слова*: алмаз, кристаллизация, агрегация азота, популяция, зональность, минерагения, геодинамика, конвекция, субдукция.

Барышев Александр Николаевич
Хачатрян Галина Карленовна
khachatryan_g_k@mail.ru

# Mineragenic and geodynamic importance of diamond population types

A.N.BARYSHEV, G.K.KHACHATRYAN (Federal State Unitary Enterprise Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, FSUE TsNIGRI)

Principle of diamond populations definition, their type classification, 3D distribution, populations role in reconstruction of mineragenic province deep structure before kimberlite volcanism were considered. Role of populations was shown in justification of deep convective dynamics as a factor of platform basement formation, subduction and general metallogeny linked with it. The way was offered for further development of diamond genesis theoretical foundations.
*Key words*: convection, crystallization, diamond, geodynamics, nitrogen aggregation, minerageny, population, subduction, zoning.

«Только путем синтеза наук о Земле мы можем отыскать «истину», т.е. восстановить ту картину, которая наилучшим образом представит нам совокупность известных фактов и поэтому сможет претендовать на наибольшую вероятность, но и тогда мы должны постоянно помнить, что каждое новое открытие, к какой бы отрасли науки оно не принадлежало, может изменить сделанные нами выводы».

*Альфред Вегенер, ноябрь 1928 г.* [6]

Исследование минерагении алмазов традиционно проводится на материале геологического строения и состава среды, в которой они встречаются вблизи земной поверхности, термобарометрии и изотопного возраста включений, а также состава изотопов углерода в алмазе. В то же время не исчерпана полностью возможность исследований самого алмаза и его групп для получения новой информации по ряду проблем общей минерагении и связи ее с процессами, формирующими фундамент платформ.

Проведенное Г.К.Хачатрян изучение более 5,5 тысяч кристаллов алмаза из 96 трубок и россыпей практически всех алмазоносных провинций мира побудило выбрать рациональный принцип группировки алмазов в каждом объекте (кимберлитовой трубке, россыпи) для характеристики его свойств, дающих возможность сопоставлять месторождения по условиям их образования [17–19]. Для этого было использовано понятие «популяция» как «совокупность предметов, индивидов, на которых строятся статистические выводы» [8].

В основу выделения популяций алмаза положены его характерные признаки, отражающие термодинамические условия и особенности химизма среды алмазообразования. В ряду таких признаков важнейшими являются примеси, входящие в кристаллическую решетку алмаза, которые сингенетичны с ним. Среди примесей весьма важен азот, который выявляется и анализируется методом ИК-спектроскопии. Преимуществом использования этой примеси при типизации кристаллов алмаза из разных месторождений является возможность экспрессного количественного определения концентраций структурного азота в кристаллах без их разрушения. С помощью ИК-спектроскопии в нескольких тысячах кристаллов алмаза из трубок и

россыпей разных алмазоносных провинций мира определено содержание азота в А- и В-формах, что соответствует двойным и четверным атомным кластерам азота, общее содержание структурного азота в кристаллах (Ntot) и относительное его содержание в форме В (%NB). По этим параметрам выделялись группы кристаллов – популяции, доминирующие среди индивидов каждой трубки или россыпи. Обычно в одной трубке присутствует одна (главная) или две (главная и второстепенная) популяции кристаллов. Доля кристаллов основных популяций в трубке, как правило, составляет не менее 50–75%. В россыпях наличие более двух популяций кристаллов может быть обусловлено множественностью их коренных источников.

Выделение популяций проводилось с помощью построения кривых распределения алмазов одной выборки по общему содержанию азота (Ntot) и степени его агрегации (%NB), а также диаграмм в координатах Ntot–%NB. Если распределение каждого из параметров одномодальное, то к одной популяции относилась совокупность кристаллов, группирующаяся вокруг модальных значений Ntot и %NB, составляющая не менее половины от всей выборки. При двумодальном распределении кристаллов в выборке выделить две популяции можно графическим способом по областям наибольшей плотности фигуративных точек с координатами Ntot–%NB. Таким образом выделяются главная и второстепенная популяции, доля второстепенной в выборке составляет обычно не менее 25% от общего числа кристаллов.

Усредненные значения Ntot и %NB для популяций алмаза по 96 изученным объектам нанесены на диаграмму В.Р.Тэйлора [24], на которой проведены характерные для этих соотношений изотермы, определенные для «условного возраста» алмаза 2 млрд. лет (рис. 1). Представленные на диаграмме популяции алмаза дополнительно характеризуются Г.К.Хачатрян типом минеральных включений в кристаллах, отражающих состав среды алмазообразования. По характеристикам популяций алмаза из месторождений мира проведена общая их типизация.

Таким образом, популяция является множественной (по числу кристаллов) ассоциацией с определенным комплексом свойств алмазов, характеризующих ее тип. Главная популяция алмаза может использоваться в качестве принципа типизации месторождения (трубки кимберлитов, россыпи). Популяция является следующим иерархическим системным таксоном за минеральным индивидом, так же, как формационный тип рудного месторождения следует за типом руд, которых на месторождении может быть несколько. Согласно приведенному определению, незначительное для месторождения число алмазов с иными свойствами, отличными от главной или второстепенной популяций, к популяциям объекта, строго говоря, не относится. Однако они по своим свойствам могут сопоставляться с алмазами иного типа популяции, преобладающего на другом объекте.

Для кимберлитов и лампроитов земного шара Г.К.Хачатрян выделила 6 типов популяций. Среди них алмазы с включениями эклогитовой ассоциации оказались более азотсодержащими («высокоазотными»), чем соответственно с включениями ультраосновной (см. рис.1). На рисунке показаны два тренда (тенденции) изменчивости свойств алмазов в популяциях разных типов.

В ряду популяций от типа V к типу I имеет место тенденция уменьшения содержания азота и увеличения степени его агрегации (от парной к четырехатомной конфигурации атомов) в кристаллической решетке алмаза, что соответствует увеличению температуры алмазообразования. Минимальное содержание азота присуще кристаллам популяций типа I, содержащих включения высокобарических минералов (мейджорита, вюстита и др.). Все это указывает на связь отмеченных изменений содержания и степени агрегации азота с давлением и температурой, а отсюда с глубиной, характеризуя вертикальную зональность популяций [19]. Кроме того, намечается изотермический тренд зависимости степени агрегации азота от его общей концентрации, проявленный от популяции III к популяции VI.

Приведенные общие свойства популяций отвечают на многие вопросы, связанные с условиями алмазообразования. Они дополнительно могут быть использованы для совершенствования концепций минерагении, обоснования представлений о глубинной геодинамике, решая их вопросы, например:

каковы закономерности размещения популяций алмаза в трехмерном пространстве минерагенической провинции?

какие геологические и геодинамические процессы определяют сочетание факторов, приводящих к алмазообразованию?

почему на территории алмазоносной провинции около 90% кимберлитовых трубок не содержат алмазы, хотя в трубках присутствуют минеральные ассоциации значительных глубин, сопоставимых с глубинами алмазообразования?

как условия образования и размещения популяций алмаза могут быть использованы для раскрытия общих закономерностей развития минерагенической провинции?

Ответить на эти вопросы можно на основе системного анализа, соединяя подходы с общих и частных позиций. В аспекте общего подхода важным представляется получение трехмерной характеристики распределения популяций в минерагенической провинции. Имеющийся фактический материал позволил это сделать для Сибирской провинции. Отмеченная выше закономерность смены типов популяций с глубиной была дополнена исследованием латеральной зональности типов популяций алмаза из трубок и россыпей. Было

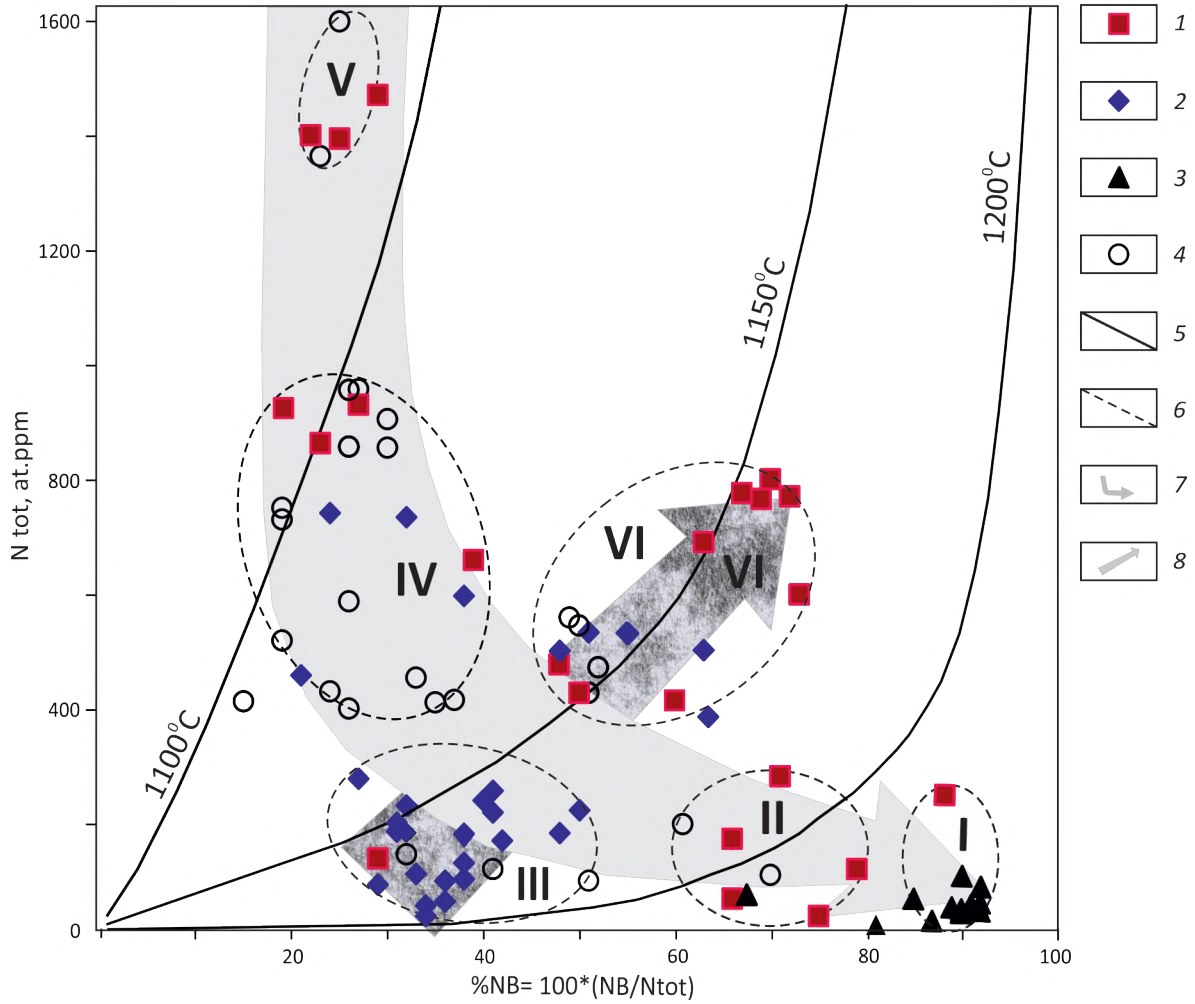



**Рис. 1. Популяции алмаза и тренды изменчивости их свойств:**

точки главных популяций месторождений, в алмазах которых включения относятся к ассоциациям: *1* – эклогитовой, *2* – ультрабазитовой, *3* – высокобарических минералов, *4* – данные отсутствуют; *5* – изотермы для условного возраста алмаза 2 млрд. лет по [24]; *6* – условные границы типов популяций; *7* – тренд увеличения %NB и снижения Ntot при росте температуры кристаллизации и давления; *8* – изотермический тренд возрастания %NB при возрастании Ntot; римские цифры – типы популяций; Ntot - общая концентрация азота в кристалле алмаза; %NB – доля азота, агрегированного в B-форме, относительно общего содержания

выявлено, что размещение главных популяций алмаза, формировавшихся при разных температурах, в пределах минерагенической провинции характеризуется двусторонней с элементами концентричности латеральной зональностью: наиболее высокотемпературные популяции расположены в центре провинции, а наименее – соответственно по периферии (рис. 2) [18].

Иллюстрация наличия разных популяций в трубках, занимающих разную позицию относительно центра их зональности в Сибирской провинции, приведена на рис. 3. В центре (трубки Молодость, Поисковая) главная популяция относится к наиболее глубинному типу II, в трубках Удачная и Ленинград, расположенных соответственно южнее и севернее – к типу III, а ближе к периферии платформы (трубки Мир и Малокуонапская) – к менее глубинному типу IV.

Сочетание вертикальной и латеральной зональности главных популяций алмаза дает общее представление о трехмерной морфологии главной геолого-структурной зоны (или сочетания зон), где происходил рост кристаллов алмаза. Важно подчеркнуть, что речь идет не о современной структуре этой зоны в фундаменте платформы, а о структуре, которая была в раннем докембрии. Подход к расшифровке алмазоносных структур через зональность популяций принципиально отличается от геофизических интерпретаций, отражающих

современное состояние фундамента платформы. Это обусловлено тем, что древняя глубинная структура и геофизические свойства фундамента Сибирской платформы могут быть преобразованными под воздействием мощнейшего сибирского траппового магматизма в конце палеозоя–начале мезозоя.

Для выявления геодинамических условий алмазообразования и происхождения древней зональной структуры провинции требуется учитывать свойства алмазных кристаллов и, прежде всего, состав изотопов углерода в алмазе.

Изотопный состав углерода в алмазе варьирует от значений $\delta^{13}C$ –42 до +3‰ с максимумом около –5,5‰ и позволяет судить о природе источников углерода алмаза. В ряде месторождений, например, в кимберлитовых трубках Ягерсфонтейн (Южная Африка), Джерико (Канада), пластообразных телах района Гуаниамо (Венесуэла), подавляющее большинство алмазов имеют $\delta^{13}C$ от –42 до –11‰. Это свидетельствует о существенной роли органического вещества, а в сумме с другими фактами приводит к выводу об участии экзогенных продуктов в качестве источников роста алмаза [19]. Такой вывод согласуется с отмеченной выше характеристикой популяций, отражающей обогащенность азотом алмазов с базитовой (эклогитовой) ассоциацией минеральных включений, относительно популяций с включениями ультрабазитовой ассоциации. Как показывают наблюдения в современных бассейнах, развитию биоты, содержащей азот, способствуют теплые условия при проявлении базальтового вулканизма. Главным вещественным фактором образования алмаза в области его термодинамической стабильности является реакция оксидов углерода или карбонатов с углеводородами [15].

Все изложенное выше вызывает необходимость рассмотрения и обоснования условий тектонического перенесения экзогенных источников алмаза в глубины Земли. Простое вертикальное опускание толщ земной коры только под их собственным весом на глубины, соответствующие кристаллизации алмаза, невозможно. Отсюда следует неизбежный вывод о реальности субдукции, то есть о подведении толщ (лат. sub – под, ductio – ведение) под земную кору фундамента платформы в составе более крупных масс литосферы. На причины субдукции и ее механизм имеются разные точки зрения. Сторонники тектоники плит главную роль отводят сочетанию горизонтального перемещения литосферной плиты от срединно-океанического хребта с ее последующим потоплением под собственным весом, возросшим при остывании во время спрединга (субдукция типа Б, по имени Беньофа). Другие основной причиной субдукции считают погружение литосферы на краю конвективной ячеи, независимо от литосферной плиты (субдукция типа А, по имени А.Амштутца, первого, кто ввел этот термин в геологию при рассмотрении тектоники Пеннинских Альп) [2]. При обсуждении субдукции в геологии алмазов необходимо учитывать

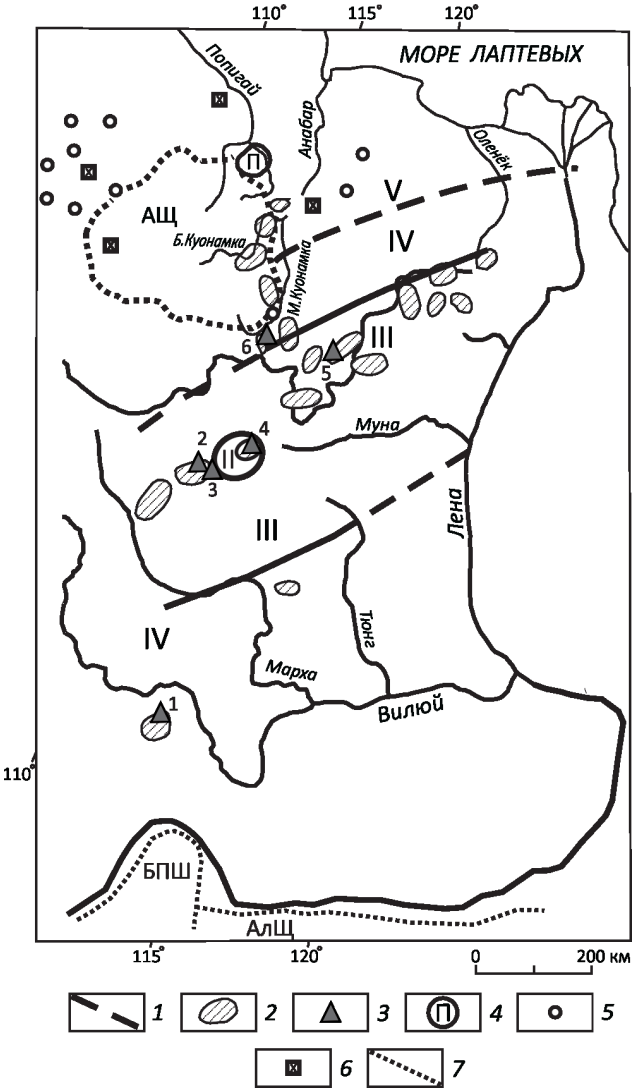



**Рис. 2. Схема латеральной зональности типов популяций в минерагенической провинции Сибирской платформы.** *Составлена по работе* [18] *с упрощениями и дополнениями*:

*1* – границы зон разных типов популяций алмаза; *2* - контуры алмазоносных полей; *3* - алмазоносные трубки: Мир (1), Удачная (2), Молодость (3), Поисковая (4), Ленинград (5), Малокуанапская (6); *4* – Попигайская структура взрывных брекчий; *5* – массивы карбонатитов; *6* – кольцевые массивы щелочных ультрамафитовых пород и карбонатитов; *7* – контуры блоков с архей-протерозойскими толщами: АЩ – Анабарский щит, АлЩ – Алданский щит, БПШ – Байкало-Патомский шарьяж

данные по динамическим условиям роста кристаллов алмаза и зональности его популяций. Важно знание и того, шла ли кристаллизация из магмы или рост алмаза происходил в твердой среде.

На рост алмаза в твердой среде в обстановке стресса указывает ряд особенностей его кристаллов. Об этом

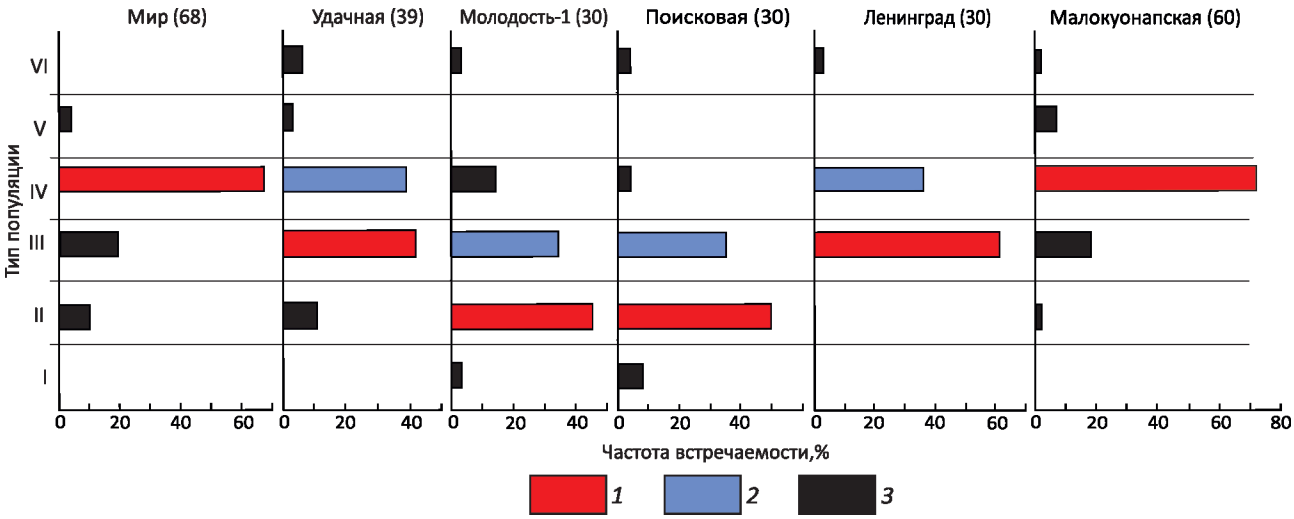



**Рис. 3. Распределение типов популяций алмаза в якутских кимберлитовых трубках:**

*1* – главная, *2* – второстепенная и *3* – малая доли алмазов, аналогичных популяциям иных трубок; в скобках - число кристаллов в проанализированной выборке из трубки

свидетельствует уплощенность формы кристаллов, их деформации во время роста с образованием трещин скалывания, не выходящих во внешние зоны кристалла, наличие трещин отрыва в кристалле, заполненных алмазным веществом последующей генерации. Подобное не могло происходить в расплаве или растворе. Отмечается резкое изменение механизма роста и морфологии внутренних частей алмаза, фиксируемое как перерыв однородного роста. Всему этому причиной может служить поворот растущего кристалла вместе с его пластически деформируемой вмещающей средой в преддверии и во время землетрясений, характерных для зон субдукции. Изменение ориентировки осей главных нормальных напряжений в среде при дальнейшем росте кристалла, естественно, приводит к новой ориентировке кристаллографических осей в соответствии с принципом симметрии Кюри [5].

В отличие от субдукции по модели тектоники плит, приводящей к однонаправленной зональности изменения свойств или возраста алмазов [12, 13, 15], субдукция как краевой эффект ячеистой конвекции имеет ряд важных характерных свойств, позволяющих найти в ней место ряду реальных геологических явлений и структур. Во-первых, субдуцируется не плита, а толщи окружающих ячею бассейнов, погружающиеся к центру будущей платформы в виде сжатых синклиналей [2, 3]. Толщи в ядрах краевых сжатых синклиналей расплющиваются, а породы подвергаются региональному метаморфизму с развитием кристаллизационной сланцеватости. В плейттектонических моделях субдукции, в отличие от конвективной модели, существенные стрессовые напряжения не должны возникать и им, естественно, должного внимания не уделяется. Метаморфизм рассматривается, как правило, лишь в аспекте соотношений температуры и давления [9]. Так же в таких моделях не рассматриваются напряжения в зоне субдукции применительно к алмазам [15, 20].

Выделение популяций позволило установить важную особенность алмазов, а именно потерю общего содержания азота, сопровождаемое возрастанием степени агрегации азота при увеличении температур роста кристаллов. Это вполне согласуется с нарастанием степени метаморфизма при кристаллизации алмаза. Однако в отношении роли регионального метаморфизма алмазоносных базит-гипербазитовых толщ до вовлечения их в кимберлитовый вулканизм нет единой точки зрения. Одни исследователи отводят ему существенную роль [5, 21], другие считают это явление малозначительным, хотя отмечают его как частный случай, например, для ксенолита дистенового алмазоносного эклогита трубки Удачная [11]. Недостаточно яркая выраженность регионального метаморфизма обломков пород в кимберлитах, по мнению авторов данной статьи, может быть связана с тем, что при взрывном кимберлитовом вулканизме породы интенсивно разрушаются по поверхностям сланцеватости, особенно тогда, когда имеется несколько поверхностей разных направлений. Этим, в частности, может объясняться преимущественно мелкообломочная текстура кимберлитов.

Контуры латеральной зональности популяций алмаза на Сибирской платформе конформны контурам, объединяющим блоки толщ, метаморфизм которых имеет возраст 1,8–2,0 млрд. лет. Информация о блоках суммирована в работах [5, 16]. Эти сведения, наряду с серией

соответствующих изотопных датировок минералов-узников в кристаллах алмаза, позволили сделать вывод о преобладании в Якутии алмазов того же возраста [5]. Вместе с тем, резкое несогласие контуров зональности популяций относительно близмеридионального простирания зон архейских толщ противоречит существующему представлению о значительной роли архейских алмазов в недрах Сибири. Мнение об архейском возрасте значительной части алмазов Сибири опирается на определение изотопного возраста их минералов-узников ультрабазитовой ассоциации. Однако при этом не учитывается, что ультрабазиты могли представлять архейские реститы при более поздней дифференциации пород и расслоении толщ мантии.

Учитывая все отмеченное, можно с большим основанием делать общие заключения на основе особенностей положения алмазных популяций в глубинах Земли до их доставки к земной поверхности кимберлитами. По данным вертикальной и латеральной зональности популяций построен схематический разрез структуры фундамента Сибирской платформы и ее периферии (рис. 4). Этот разрез детализирует те представления и выводы об образовании структуры фундамента в связи с ячеистой конвекцией, пластическими течениями твердых масс, которые авторы статьи изложили ранее, а также использует особенности рисунка 3. Теоретическая позиция главных геологических структур провинции в соответствии с графическим вариантом М.А.Гончарова математической модели неустановившейся конвекции на разных фазах ее развития, в том числе с зарождением зон субдукции, показана на рисунках в работах [3, 5]. Верхняя часть разреза конвективной системы соответствует расходящейся в стороны сиалической части литосферы (Анабарский и Алданский щиты на краях ячеи), периферическая чашеобразная часть – зонам субдукции. Низ центральной части разреза показан в предшествии перемещения субдуцированных толщ вверх, в связи с восходящей ветвью конвективной системы (плюма), то есть позиции толщ, соответствующей их переходу от прогрессивного метаморфизма к регрессивному.

Весьма сложным является вопрос, в каком месте на глубине и под каким углом подходят друг к другу толщи, субдуцированные с разных сторон конвективной ячеи, то есть с юга и с севера провинции. Можно лишь предполагать (учитывая тенденцию дрейфа литосферы к экватору под действием центробежных сил в ротационном поле Земли), что зона субдукции с севера на юг под Анабарский щит имела более крутое падение, чем субдуцированные толщи с юга на север под Алданский щит. Влияние ротационных сил на горизонтальные перемещения земной коры к экватору было теоретически предсказано Л.Этвёшем в 1913 г., подтверждено геологическими данными и физическим моделированием А.Вегенером [6], а влияние переноса ротационного количества движения при конвекции земных масс на крутизну падения зон субдукции – А.Н.Барышевым [1]. Вследствие этого и иных причин крупные конвективные геологические системы практически всегда бывают асимметричными. Это явление учтено на схематическом разрезе. Оно соответствует меньшей ширине зон типов популяций на севере по сравнению с южной частью их реальных проекций на поверхность. В разрез не включены древние толщи Байкало-Патомского шарьяжа, присутствующие на рис. 2. В современную позицию эти толщи попали в силуре–девоне в результате перемещения их с юга.

Разрез показывает, кроме того, проблематичность глубинной структуры той части зоны популяций III, которая расположена к юго-востоку от полей Верхне-Мунского (с трубкой Поисковая) и Далдынского (с трубками Молодость и Удачная). Зона III здесь намечена по алмазам из россыпей при отсутствии трубок. Отсутствие субдуцированых толщ вблизи оси восходящей ветви модели конвективной ячеи позволяет предполагать, что алмазоносные кимберлитовые трубки в указанной части зоны III не обнаружены до сих пор по причине их реального отсутствия в природе.

В целом разрез может быть интерпретирован и как механизм формирования, по крайней мере, части литосферного киля, выявленного под Сибирской платформой А.В.Манаковым на основе магнитотеллурического зондирования (МТЗ) [12]. Представленные авторами данной статьи субдукционные зоны, имеющие падение навстречу друг другу, ограничивают по краям клинообразный блок мантии. Расплющивание толщ, образование кристаллизационной сланцеватости в зонах субдукции неизбежно приводят к снижению эффективной вязкости. Пониженная вязкость – главный фактор в общих представлениях об астеносфере. Сланцеватость и повышенное содержание флюидов в зонах субдукции по краям киля могут в значительной мере определять отличие электромагнитных свойств этих зон от остальной части мантии, фиксируемых МТЗ. В отличие от геофизического метода, анализ зональности популяций алмаза в сочетании с тектонофизическими закономерностями позволяет дать интерпретацию, по крайней мере, части литосферного киля в связи с определенным геологическим процессом протерозойской геодинамики. Это не относится к структурам киля, имеющим близмеридиональное простирание, согласное с архейскими структурными зонами.

Что касается предлагаемой О.М.Розеном интерпретации литосферного киля, как обусловленного коллизией плит, и развиваемых взглядов на источник и геодинамику образования алмазов в статьях [12, 13], то коллизионная и предложенная авторами модели существенно различаются. В модель О.М.Розена, в которой субдукция происходит только с юго-запада на северо-восток, не укладывается двусторонняя зональность популяций алмаза.

Критика представлений о формировании структуры фундамента древних платформ, как о результате

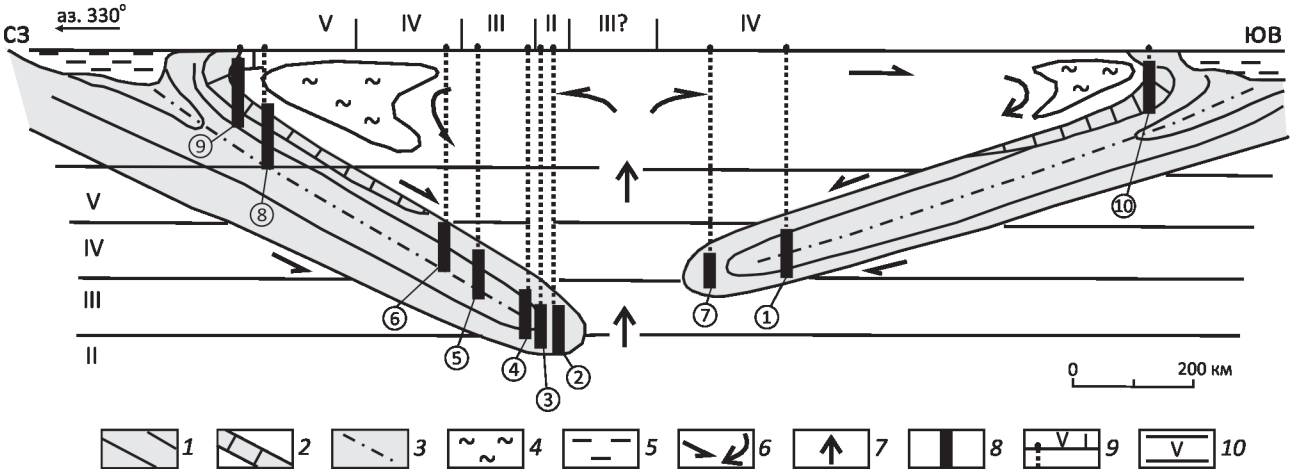



**Рис. 4. Позиция алмазоносных зон субдукции в литосфере Сибирской провинции в конце раннего–начале среднего протерозоя**. *Пресс-проекция на сечение по линии аз.* 330°**:**

*1–2* – субдуцированные толщи краевых бассейнов с ультрабазит-базитовым основанием (*1*), шельфовые фации этих бассейнов (*2*); *3* – осевые поверхности субдукционных синклиналей; *4* – архей-протерозойские толщи Алданского и Анабарского щитов; *5* – краевые бассейны; *6* – направление конвекции масс верхней части литосферы; *7* – направление восходящей ветви (плюма) конвекции мантии; *8* – позиция вертикальных интервалов зоны субдукции, которые обеспечивают: алмазоносность кимберлитов в трубках Мир (1), Удачная (2), Молодость (3), Поисковая (4), Ленинград (5), Малокуанапская (6), Накынского поля (7), алмазы Попигайской структуры взрывных брекчий (8), щелочно-мафит-карбонатитовые расслоенные и кольцевые массивы периферии Анабарского (9) и Алданского (10) щитов; *9* – проекция трубок и массивов, соответствующих зонам популяций; *10* - глубинные уровни формирования типов популяций алмаза (римские цифры); вертикальный масштаб разреза условный

коллизии гранулит-гнейсовых и гранит-зеленокаменных террейнов, создающих литосферный киль, приведена Л.Л.Перчуком [10]. Метаморфические толщи в фундаменте платформы он рассматривает в связи с конвективным перераспределением пород в докембрийской континентальной коре. В обоснование таких условий формирования верхней части литосферы Л.Л.Перчук приводит тесты: структурно-геологический, литологический, геохимический, петрологический, термодинамический (*P-T* тренды), анализ флюидного режима и другие доводы. Данные А.Н.Барышева и Г.К.Хачатрян по трехмерной зональности алмазных популяций Сибирской платформы, связи их со встречными зонами субдукции дополняют тесты, подтверждающие правомерность конвективной, а не коллизионной модели фундамента платформы.

Коллизионная модель О.М.Розена не вполне корректна и с позиций тектоники и тектонофизики. Модель включает многократную субдукцию, в том числе в палеозое под стабильную Сибирскую платформу. Современные сейсмофокальные зоны на земном шаре под стабильными платформами отсутствуют. Кроме того, субдукция плит до ядра Земли, осуществляемая неоднократно, как считает О.М.Розен, и за очень короткий промежуток времени, невозможна. Согласно расчетам, учитывающим весьма большую вязкость нижней мантии, на подобное явление требуется времени больше, чем возраст нашей планеты [4]. Отсутствие сейсмофокальных зон землетрясений глубже 700 км подтверждает отсутствие субдукции литосферных плит до ядра Земли.

Из разреза (см. рис. 4) следует, что наиболее алмазоносной частью мантии служит весьма ограниченный вертикальный интервал субдуцированной литосферы, особенно тот, который близок к ядрам субдукционных сжатых синклиналей, представляющий зону главных популяций алмаза. Этот интервал меняет свою глубину, создавая латеральную зональность популяций. Верхние и нижние части продуктивного интервала обеспечивают наличие в трубках второстепенных популяций алмаза, смежных по своим характеристикам с главными популяциями. То же следует из графиков рис. 3. Они показывают примечательную картину: в пределах одной трубки второстепенная популяция чаще относится к меньшей глубине, чем главная. Это вполне закономерно, так как при подъеме алмазоносной среды перед образованием кимберлитов, часть кристаллов алмаза может образоваться на меньших глубинах, соответствующих иным популяциям. При кимберлитовых извержениях вынос алмазов через трубку начинается тоже с меньших глубин. Вынос с глубин больших, чем глубины главной популяции, очевидно, менее значителен и реже встречается (трубка Мир).

Необходимым условием продуктивности трубок, кроме того, является наличие в захватываемом ими интервале мантии экзогенных, в частности биогенных, углеводородов, участвующих в реакции с окисными формами углерода, приводящей к образованию алмаза. Без этого кимберлитовый вулканизм даже с продуктивного интервала вынесет к поверхности Земли мантийные породы с карбонатами, но без алмазов, а также породы остальных частей мантии, не относящихся к зоне субдукции. Следствием всего этого является реальная продуктивность лишь одной десятой части кимберлитовых трубок из общего их числа в провинции.

Описанные выше условия образования и размещения популяций алмаза дополнительно проливают свет на ряд общих закономерностей развития минерагенической провинции.

Зональность популяций не только детализирует природу общей минерагенической зональности в центральной части платформы, но и своим наличием подтверждает конвективную природу геодинамики, формирующей фундамент будущей платформы. Такая геодинамика позволяет рассматривать позицию проявлений карбонатитового и щелочного магматизма на периферии платформы как закономерную в той же общей концентрической зональности. Однако не только в этом ее значение. Модели тектоники плит не предусматривают субдукцию шельфовых фаций литосферы. Литосферные плиты, обладающие океаническим типом земной коры, субдуцируют под континент или островную дугу перед глубоководным желобом. В отличие от этого, в конвективной модели субдуцируют и шельфовые фации с континентальным типом земной коры. Среди таких фаций, как известно, большую роль играют карбонаты, фосфорсодержащие осадки. Как видно из рисунка 4, при субдукции толщи с этими фациями переворачиваются кровлей вниз. Будучи затянутыми конвективным процессом под породы верхней части мантии, они оказываются в обстановке гравитационной неустойчивости. Дальнейшая реализация неустойчивости при особых условиях приводит к карбонатитовому и щелочному фосфороносному магматизму. И это явление согласуется с двумя важными обстоятельствами.

Во-первых, часть карбонатитов сопровождается алмазами, на что обращали внимание Л.Н.Когарко и И.Д.Рябчиков [7]. Опубликованные недавно данные по включениям в алмазах района Жуина (Бразилия) [22] указывают на то, что в состав алмазоносной среды входят вещества (это и карбонаты, и фосфаты, и фториды), близкие к геохимическим чертам толщ шельфовых фаций. Для Сибирской платформы, как и для юга Африки, по данным Р.Митчелла [23] характерно размещение карбонатитов и щелочных интрузивных пород ближе к периферии платформы относительно кимберлитов.

Во-вторых, наличие в зоне субдукции толщ как в нормальном, так и перевернутом залегании, согласуется с двумя противоположными (центробежной и центростремительной) зональностями, отмеченными В.И.Смирновым в кольцевых массивах, сочетающих щелочные ультрамафиты и карбонатиты [14]. Разная зональность является следствием поднятия (адвекции) расслоенного комплекса в виде колонны: при залегании ультрамафитов внизу приведет к первой, а при перевернутом залегании – ко второй картине латеральной зональности пород в массиве. По той же причине в отдельных кимберлитовых трубках может проявиться разный тренд в размещении алмазных популяций, ассоциирующих с эклогитами и ультрабазитами. В одних случаях популяции, сформировавшиеся в ультрабазитовой среде, более высокотемпературны по сравнению с популяциями алмазов, кристаллизующихся среди апобазитовых эклогитов, в других случаях наоборот. Второй тренд выявлен в африканских трубках, например, Ягерсфонтейн [19].

После субдукции история разных частей алмазоносных толщ литосферы различна. Пологая нижняя часть может надолго остаться под наплывшими сиалическими массами (щитами) и в фундаменте платформ. Модели механизмов извлечения из глубины пород зон субдукции, в том числе алмазоносных, превращаемых в кимберлиты, описаны одним из авторов ранее [3]. Подъем алмазоносной среды происходит в виде фрактальной системы: сначала на крупном волнообразном поднятии субдуцированных толщ вырастает серия мелких поднятий, а далее на мелком – серия еще более мелких, в конечном итоге переходящих в кимберлитовые трубки.

Кимберлитовый вулканизм оторван во времени от образования алмазов в глубинах Земли и сопряжен с иной геодинамикой. Один из главных факторов развития кимберлитового вулканизма – гравитационная неустойчивость в смыкающих крыльях линеаментных флексур, осложняющих геологическую структуру субдуцированных толщ. Другим фактором может быть снижение давления в обстановке присдвиговой транстенсии (типа pull-apart). Среди структур, способствующих зарождению кимберлитового вулканизма, на Сибирской платформе могут быть намечены линеаменты не менее чем двух направлений: север-северо-западного (близмеридионального) и северо-восточного. Из линеаментов близмеридионального направления наиболее ярко выражен тот, который протягивается с юга от Накынского кимберлитового поля к Попигаю на севере. Линеамент контролирует размещение как палеозойских, так и мезозойских кимберлитовых трубок. Геологические структуры этого направления наиболее ярко проявлены в архейских толщах Анабарского и Алданского щитов. Такое направление не характерно для средне- и позднепротерозойских толщ, залегающих несогласно на архей-раннепротерозойских толщах Анабарского щита, и Станового, примыкающего с юга к Алданскому щиту. Не соответствует это направление и простиранию зон популяций алмазов на Сибирской

платформе. То есть структуры, определяющие алмазообразование, и структуры, способствующие кимберлитовому вулканизму, разные. Последние могут наследовать возрожденные структуры фундамента, даже те, которые образовались значительнее ранее алмаза.

Процессы подъема алмазоносных толщ и кимберлитовый вулканизм проявились неоднократно при тектономагматической активизации Сибирской платформы. Подъем среды существенно не нарушил общую латеральную зональность главных популяций алмаза.

Изложенный материал в той или иной мере позволил ответить на поставленные в статье вопросы. Наиболее важным, с точки зрения авторов статьи, является обоснование неразрывной связи алмазообразования и его особенностей с конвективной геодинамикой. Единая зональность главных популяций алмаза на Сибирской платформе позволила анализировать ее в аспекте единой геодинамической системы минерагенической провинции. Трехмерная зональность популяций алмаза в минерагенической провинции дает реальный вещественный фактический материал для подтверждения конвективной модели развития фундамента платформы, то есть той модели, которая до этого строилась на основе общих тектонических и тектонофизических положений. Заключение о возрасте алмаза в провинции следует делать с учетом согласия простирания зон популяций с зонами датированного регионального метаморфизма толщ.

В заключение, в русле закономерной пространственной эволюции свойств алмазных популяций [17–19], а также разработок по иерархии конвективной геодинамики [1, 3, 4], предлагается для обсуждения один из путей дальнейшего развития теоретических основ алмазообразования: *взаимосвязь формирования типов алмазных популяций с масштабами и временными характеристиками конвективных геологических систем.* К этому побуждают дополнительный фактический материал по геологии алмазов, изложенный ниже, и теоретические основы тектонофизики.

Алмазная популяция типа V имеет резко повышенное содержание азота и малую степень его агрегации в кристаллах в общем ряду типов популяций. Это в определенной мере сближает популяцию V с алмазами из апоосадочных метаморфических толщ, например, месторождения Кумды-Коль (Северный Казахстан) [17]. Однако разница месторождений по другим свойствам алмазов весьма большая. Алмазы Кумды-Коля чрезвычайно мелкие, содержание азота в них весьма высокое, а степень агрегации чрезвычайно низкая. Алмазоносные тела – не кимберлитовые трубки, а тектонические пластины метаморфических толщ. Есть еще одно важное отличие, на которое ранее не обращалось внимания: разный латеральный размер тектонических конвективных систем, которые определяют образование зон регионального метаморфизма и геодинамику алмазообразования.

Месторождение Кумды-Коль принадлежит Кокчетавскому району, расположенному в северной части Тенгизской тектонической ячеи (название по оз. Тенгиз в ее центре). Поперечный её размер составляет 0,5–0,6 тыс. км. Размер конвективной ячеи, определяющей развитие алмазоносных систем Сибирской платформы, составляет около 1,5–1,7 тыс. км, то есть в три раза больше. Размерные параметры ячей геологических масс, подверженных конвекции в гравитационном поле, весьма важны, так как они имеют определенные соотношения с вязкостью этих масс и величиной времени фазового развития [1, 4].

На основе уравнений Рэлея и Гзовского, описывающих соответственно конвекцию и медленные пластические деформации, были выведены уравнения подобия конвективных геодинамических систем, инициированных гравитационной неустойчивостью. Из уравнений следует, что в подобных системах уменьшению размерного параметра системы на один десятичный порядок должно соответствовать уменьшение вязкости вещества на три порядка, а время достижения одинаковых фаз конвекции уменьшается на два порядка. Упоминание о фазах обязательно, так как почти всегда в тектонических процессах не происходит полного круговорота масс, то есть конвекция неустановившаяся. Проверка упомянутой закономерности соотношений параметров конвекции путем ранжирования конкретных геологических систем по десятичным порядкам размеров (от первых тысяч до единиц километров) подтвердила изменение порядка вязкости. Опираясь на это, можно проанализировать различие условий развития Тенгизской и Сибирской ячей и отражение этих различий на условиях образования алмаза. То есть предлагается сравнить, с одной стороны, систему, несущую мелкие алмазы в апотерригенных метаморфических толщах, за которыми укоренилось наименование «метаморфогенные алмазы», а с другой – систему, включающую кимберлитовые алмазы, которые, как показано выше, тоже росли в условиях регионального метаморфизма.

Отношение величин вязкости в отмеченных двух системах прямыми методами установить не имеется возможности. Можно лишь с уверенностью утверждать, что вязкость толщ, насыщенных осадочными породами (кумдыкольский разрез Тенгизской системы), значительно уступала вязкости базит-гипербазитовых толщ, которые стали основой для кимберлитов. Если исходить из трехкратного различия размеров ячей, то отличие вязкости могло быть в $3^3$ раза, то есть примерно в 30 раз, или на один–два десятичных порядка.

Исходя из того же различия размеров ячей, можно предположить, что глубина субдукции, сопряженной с развитием Тенгизской ячеи, была приблизительно в два–три раза меньшей, по сравнению с субдукцией толщ под Сибирскую ячею, а отсюда – меньшее литостатическое давление и меньшая температура в первом случае. Субдукция, связанная с конвекцией в Тенгизской

ячее, вероятнее всего была коровой, вполне соответствующей типу А. Развитие конвекции приводило к последующему извлечению глубинных масс (эдукции), аналогично формированию метаморфического фундамента краевых поясов. Не случайно в Кокчетавском районе широко развиты более молодые, чем алмаз, месторождения золота и урана, характерные для краевых поясов, которых нет в зонах кимберлитового вулканизма Сибири.

Первые два условия приводят к несомненному выводу о том, что время функционирования Тенгизской ячеи было меньшим по сравнению со временем Сибирской ячеи в протерозое. Если соотношения первых двух параметров были аналогичны предполагаемым, то разница в продолжительности времени (для достижения аналогичных фаз конвекции) должна быть равной $3^2$, то есть в несколько (до десятка) раз меньше. С таким выводом согласуется и то, что пик метаморфизма алмазоносных кумдыкольских толщ был на границе венда и кембрия, и это служит препятствием к применению здесь правила Клиффорда, установленного для алмазов кимберлитов платформ.

С рядом этих геологических выводов логично увязываются минералогические особенности алмазов Кумды-Коля, отличные от кимберлитовых алмазов:

азот в алмазах Кумды-Коля, несмотря на большую его концентрацию, очень слабо агрегирован, что связано с меньшей глубиной, меньшими температурами и меньшим временем процесса роста алмаза;

размеры кристаллов алмаза Кумды-Коля очень мелкие. Большие концентрации углерода и азота органических веществ, имевшихся в среде кристаллизации, могли бы обеспечить дальнейший рост алмазов. Однако такого не произошло, и причинами прекращения роста могли быть разные факторы. Один из них тот, что чрезвычайно мелкие, точечные источники углеводородов (биогенного углерода) были до этого израсходованы на образование алмаза. Однако не менее вероятно и то, что углеродистые толщи осадочных пород при субдукции едва ли достигали верхней части уровня, соответствующего популяции V кимберлитовых алмазов, а вслед за этим в виде пластины извлекались вверх восходящей ветвью Тенгизской конвектиной ячеи на уровень, где *PT*-условия соответствовали переходу алмаз-графит, и выше. Начавшие расти мелкие кристаллы кумдыкольских алмазов, естественно, прекращали свой рост. Часть мелких алмазов до этого была капсулирована в гранатах.

Таким образом, популяция казахстанских алмазов существенно иная, чем любая популяция Сибири. Однако именно подход к казахстанским алмазам с позиций связи популяций с особенностями конвективной геодинамики позволяет найти объяснение ряду загадочных явлений. Кроме того, популяции, их типизация и тренды изменчивости позволяют связать образование весьма разных алмазов в разных геологических обстановках единой нитью регионального метаморфизма, обусловленного субдукцией. Разработка концепции популяций и их типов продвигает наше понимание проблем источника алмаза и условий его образования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Барышев А.Н.* Периодические геодинамические и металлогенические системы, их развитие и взаимодействие. – М.: ЦНИГРИ, 1999.
2. *Барышев А.Н.* Субдукция и проблемы ее палеореконструкций // Отечественная геология. 2004. № 2. С. 50–62.
3. *Барышев А.Н.* Периодическое размещение алмазоносных систем и смежные проблемы геологии алмазов // Отечественная геология. 2006. № 6. С. 20–35.
4. *Барышев А.Н.* Иерархия конвективных геологических систем и их минерагеническое значение // Отечественная геология. 2017. № 1. С. 19–27.
5. *Барышев А.Н., Хачатрян Г.К.* Влияние тектонического поля напряжений на механизм роста, структуру алмаза в связи с общей геодинамикой алмазообразования // Отечественная геология. 2015. № 12. С. 46–60.
6. *Вегенер Альфред.* Происхождение континентов и океанов. – Л.: Наука, 1984.
7. *Когарко Л.Н., Рябчиков И.Д.* Алмазоносность и окислительный потенциал карбонатитов // Петрология. 2013. Т. 21. № 21. С. 350–371.
8. *Комлев Н.Г.* Словарь иностранных слов. – М.: ЭКСМО, 2006.
9. *Миясиро А.* Метаморфизм и связанный с ним магматизм в свете положений тектоники плит // Новая глобальная тектоника (тектоника плит). – М.: Мир, 1974. С. 243–265.
10. *Перчук Л.Л.* Формирование и эволюция докембрийской коры: новые идеи и новые концепции // Смирновский сборник-2006. – М.: Фонд им. академика В.И.Смирнова, 2006. С. 23–52.
11. *Похиленко Н.П., Соболев Н.В., Ефимова Э.С.* Ксенолит катаклазированного дистенового эклогита из трубки «Удачная» // Докл. АН СССР. 1982. Т. 266. № 1. С. 212–216.
12. *Розен О.М., Манаков А.В., Суворов В.Д.* Коллизионная система Северо-Востока Сибирского кратона и проблема алмазоносного литосферного киля Якутской кимберлитовой провинции // Геотектоника. 2005. № 6. С. 42–67.
13. *Сибирский* суперплюм во времени и пространстве: уточнение региональных перспектив поисков алмазоносных кимберлитов / О.М.Розен, А.В.Манаков, Н.И.Горев, Н.Н. Зинчук // Смирновский сборник-2010. – М.: Фонд им. академика В.И.Смирнова, 2010. С. 424–432.
14. *Смирнов В.И.* Геология полезных ископаемых. – М.: Недра, 1982.
15. *Сорохтин О.Г., Митрофанов Ф.П., Сорохтин Н.О.* Глобальная эволюция Земли и происхождение алмазов. – М.: Наука, 2004.
16. *Хаин В.Е.* Тектоника континентов и океанов (год 2000). – М.: Научный мир, 2001.
17. *Хачатрян Г.К.* Азотные и водородные центры в алмазе, их генетическая информативность и значение для решения прогнозно-поисковых задач // Руды и металлы. 2009. С. 73–80.

18. *Хачатрян Г.К.* Азот и водород в кристаллах алмаза в аспекте геолого-генетических и прогнозно-поисковых проблем алмазных месторождений // Отечественная геология. 2013. № 2. С. 29–40.
19. *Хачатрян Г.К.* Азот и водород в алмазах мира как индикаторы их генезиса и критерии прогноза и поисков коренных алмазных месторождений // Автореф. дис. … д-ра геол.-минер. наук. – М., 2016.
20. *Diamonds* and Geology of Mantle Carbon / S.B.Shirey, P.Cartigny, D.J.Frost et al. // Reviews in Mineralogy & Geochemistry. 2013. Vol. 75. Pp. 355–421.
21. *Harte B.* Rock nomenclature with particular relation to deformation and recrystallization textures in olivine-bearing xenoliths // J. Geol. 1977. Vol. 85. Pp. 279–288.
22. *Kaminsky F.V.,Wirth R., Schreiber A.* Carbonatitic inclusions in deep mantle diamond from Juina, Brazil: new minerals in the carbonate-halide association // Journal of the mineralogical association of Canada. 2013. Vol. 51. Part 5. Pp. 669–688.
23. *Mitchell R.H.* Kimberlites: their mineralogy, geochemistry and petrology. – New York, 1986.
24. *Taylor W.R., Milledge H.J.* Nitrogen aggregation character, thermal history and stable isotope composition of some xenolith-derived diamonds from Roberts Victor and Finch. In: Sixth Internat. Kimberlite Conf. Extended Abstr. – Novosibirsk, 1995. Pp. 620–622.

**К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ**

Плата с авторов за публикацию (в том числе с аспирантов) не взимается. Гонорар не выплачивается. Автор, подписывая статью и направляя ее в редакцию, тем самым предоставляет редакции право на ее опубликование в журнале и размещение в сети «Интернет».
Направление в редакцию работ, опубликованных ранее или намеченных к публикациям в других изданиях, не допускается.

**По всем вопросам, связанными со статьями, следует обращаться в редакцию по тел. +7 (495)315-28-47, E-mail: ogeo@tsnigri.ru**

**Адрес редакции: 117545, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 129, корп. 1**