



## ЗНАЧЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАЗВИТИЯ АЛМАЗОНОСНЫХ СИСТЕМ ПРИ ОЦЕНКЕ АБСОЛЮТНОГО ВОЗРАСТА АЛМАЗА

*Оценки абсолютного возраста алмаза кимберлитов по составу его минералов-узников варьируют от нескольких сотен миллионов до 3,5 млрд лет и зависят от возрастных соотношений включений с минералом-хозяином. Охарактеризованы основные черты геолого-генетических моделей образования алмаза и их роль при определении его возраста. С использованием конвективной геологической модели развития алмазоносной системы для большинства якутских алмазов обосновывается наиболее вероятный возраст 1,8–2,0 млрд лет. Эти значения согласуются с датировками регионального метаморфизма пород фундамента Сибирской платформы, а также с изотопным возрастом включений граната в кристаллах алмаза.*

*Ключевые слова: алмаз, абсолютный возраст, изотопное датирование, минеральные включения, геологические модели, региональный метаморфизм.*

Одним из дискуссионных вопросов минерогении алмаза является абсолютный возраст образования кристаллов алмаза, позже выносимых к земной поверхности кимберлитами и лампроитами. Наиболее достоверные и воспроизводимые датировки возраста алмазов по включениям силикатов (Sm-Nd метод) и сульфидов (Re-Os метод) обобщены в работе [16]. Представленные в ней данные охватывают кристаллы из около двух десятков месторождений мира и показывают вариации изотопного возраста минералов-узников от 1 до 3,5 млрд лет. При этом вариации возраста минералов даже из одной и той же трубки нередко достигают 1,5 млрд лет. Такой значительный разброс прежде всего характерен для кристаллов алмаза с разным составом минералов-узников. Алмазы с минералами-узниками ультраосновной ассоциации чаще оказываются более древними, чем алмазы с узниками эклогитовой ассоциации. Кроме того, для одной и той же трубки датировка алмазов по включенным в них сульфидам демонстрирует больший разброс и в целом более древний возраст, чем по включениям силикатов.

Отмеченные разные оценки абсолютного возраста алмаза в значительной мере обусловлены тем, что существующие изотопные методы не позволяют проводить прямую датировку самого алмаза. Датируются лишь минералы, возраст которых нередко иной, чем у алмаза. В публикациях, как правило, не содержатся обоснования сингенетичности алмаза с его включениями. Эта проблема заслуживает самостоятельного исследования, сочетающего собственно минералогические критерии условий роста алмаза, природы его включений с тектоническими факторами развития алмазоносной системы в масштабе провинции. Рассмотрим это на примере Сибирской платформы, используя как

### Хачатрян Галина Карленовна

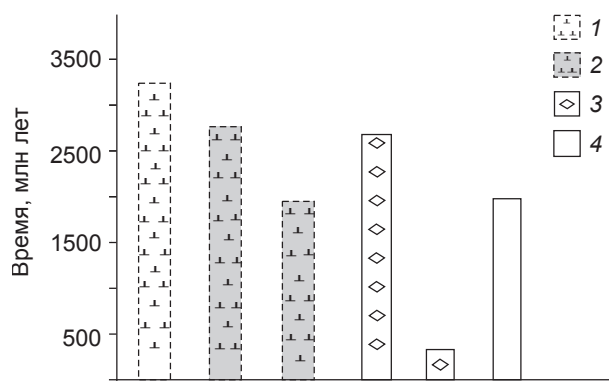
доктор геолого-минералогических наук  
старший научный сотрудник  
khachatryan\_g\_k@mail.ru

ФГУП Центральный  
научно-исследовательский  
геологоразведочный институт  
цветных и благородных металлов,  
г. Москва

изотопные датировки минералов из литературных источников, так и ранние наши разработки по ряду вопросов алмазообразования [1, 2, 14].

*Изотопная датировка алмазов Сибирской платформы.* По сравнению с алмазами Африки абсолютный возраст якутских алмазов относительно мало изучен. Исключение составляют алмазы трубки Удачная, датировке которых посвящён ряд работ [4, 9, 15, 18, 21, 22, 24 и др.]. Обзор имеющихся в литературе данных, касающихся алмазов трубок Удачная, Мир, Айхал и Сытыканская, проведён А.И.Зайцевым [6]. В этой публикации суммированы результаты определений изохронного и модельного возрастов (Sm-Nd-, Re-Os-, Pb-Pb методы) алмазов с включениями минералов ультраосновной и эцлогитовой ассоциаций, а также алмазосодержащих ксенолитов из трубки Удачная. Наиболее интересны, с нашей точки зрения, определения изохронного возраста алмаза Sm-Nd методом по включениям граната и клинопироксена. В работе [22] на основе статистически представительных данных (более 150 включений пироповых гранатов гарцбургитовой ассоциации) установлен изохронный возраст алмаза из трубки Удачная, составивший  $2010 \pm 60$  млн лет. Аналогичный возраст алмаза из этой трубки получен Г.П.Булановой с соавторами [4] Pb-Pb-методом по центральным включениям пентландита перидотитовой ассоциации.

Датировки, выполненные по гранату в алмазонасных ультраосновных и эцлогитовых ксеноли-



**Рис. 1. РЕЗУЛЬТАТЫ Sm-Nd ДАТИРОВАНИЯ ПО ГРАНАТУ АЛМАЗОНОСНЫХ КСЕНОЛИТОВ (1–3) И АЛМАЗА (4) ИЗ ТРУБКИ УДАЧНАЯ, ПО ДАННЫМ РАБОТ [9, 18, 19, 21]:**

1, 2 – модельные возраста соответственно перидотитового и дунитового ксенолитов; 3, 4 – изохронные возраста соответственно эцлогитовых ксенолитов и алмаза

тах из кимберлитов трубки Удачная, характеризуются значительным разбросом от 3000 до 340 млн лет (рис. 1). На рис. 1 приведены Sm-Nd изохронные и модельные возраста ксенолитов перидотитов, являющихся самыми древними, дунитов, эцлогитов и включений в алмазе граната ультраосновной ассоциации. В большинстве случаев гранат включений моложе или равен по возрасту гранату материнских пород. Однако в отдельных эцлогитовых ксенолитах гранат по возрасту существенно более молодой – 340 млн лет (см. рис. 1). Он близок к возрасту самой трубки и, по-видимому, не связан с кристаллизацией алмаза. Из этого следует, что более достоверные результаты дают гранаты включений, «законсервированных» внутри кристалла алмаза, тогда как к датировкам алмаза по гранатам алмазонасных пород необходимо относиться с осторожностью.

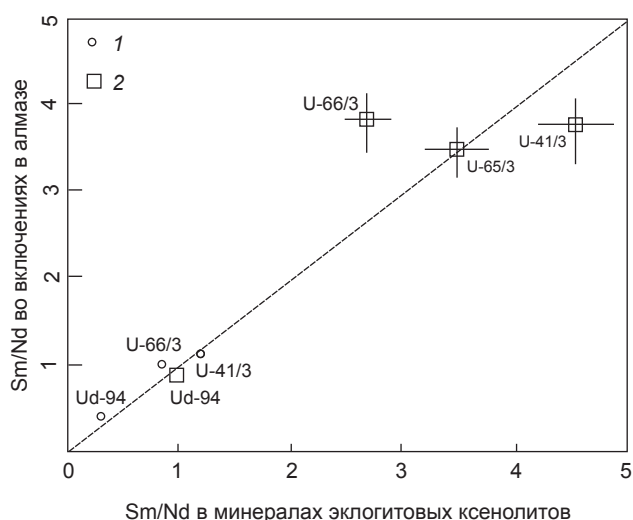
В работе [17] проанализированы Sm-Nd соотношения в клинопироксенах и гранатах из алмазонасных эцлогитовых ксенолитов и соответствующих минералов-узников алмаза трубки Удачная. Как показали исследования, датировки по минеральным включениям клинопироксена в алмазе наиболее согласуются с данными по возрасту ксенолитов (рис. 2). Кроме того, делается вывод, что именно клинопироксены позволяют определять возраст древнего протолита эцлогитов, составляющий  $2930 \pm 61$  млн лет. Всё это ещё раз демонстрирует, что возраст алмазов одной и той же трубки, определённый по включениям разных минералов, может существенно различаться. Включения клинопироксенов во многих случаях – существенно более древние по сравнению с алмазом, а включения граната в алмазах с большой долей вероятности – сингенетичны с ними.

*Основные черты существующих геолого-генетических моделей алмазообразования и их следствия.* Трактовка возрастных соотношений алмаза и его минералов-узников в значительной мере зависит от концептуальной геолого-генетической модели алмазообразования. Поддерживая наиболее обоснованную и принятую большинством исследователей точку зрения на докимберлитовый возраст алмазов, остановимся на двух принципиально различных группах концепций.

К первой, наиболее распространённой, собственно магматогенной группе концепций относятся представления, что все минералы ультрабазитовой и базитовой ассоциаций являются собствен-

но магматическими. По одной из концепций этой группы все минералы, в том числе и алмаз, кристаллизовались из единой магмы, т.е. были практически сингенетичными. Согласно другой концепции, базиты кристаллизовались из магмы, а ультрабазиты представляли рестит. Минералы рести́та в этом случае могут быть существенно более древними. Без учёта данного обстоятельства появилось широко распространённое мнение о том, что алмазы, сопровождаемые ультрабазитовой ассоциацией минералов, значительно древнее алмазов эклогитовой ассоциации.

Вторая группа концепций учитывает современные мобилистские геотектонические представления, а именно погружение толщ в зоны субдукции. Субдукции подвергаются толщи бассейнов, дно которых сложено базитами, гипербазитами и углеродсодержащими осадками. Одна концепция группы рассматривает субдукцию по модели тектоники плит. Субдукция толщ на глубине в ходе декомпрессии сменяется образованием из них кимберлитовой магмы, которая при извержении захватывает образовавшиеся ранее магматогенные или флюидогенные алмазы, далее вынося их к поверхности Земли [11]. Эта модель предусматривает одностороннюю зональность ультращелочно-лампроитового и кимберлитового магматизма.



**Рис. 2. САМАРИЙ-НЕОДИМОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ В КЛИНОПИРОКСЕНАХ (1) И ГРАНАТАХ (2) ТРУБКИ УДАЧНАЯ ИЗ ВКЛЮЧЕНИЙ В АЛМАЗЕ И ЭКЛОГИТОВЫХ КСЕНОЛИТОВ В КИМБЕРЛИТАХ, ПО ДАННЫМ РАБОТЫ [17]:**

U41/3, U65/3, U66/3, Ud94 – номера образцов

Другая концепция рассматривает субдукцию вне связи с тектоникой плит, а как краевой эффект ячеистой конвекции в масштабе провинции [1, 2]. Центральная часть конвективной системы формирует верхнюю часть фундамента платформы со щитами по периферии. С боков системы под фундамент, в сторону центра платформы, субдуцируют толщи смежных бассейнов, что в итоге определяет наличие двусторонней зональности условий алмазообразования в фундаменте платформы. Принципиальное отличие конвективной модели от плейт-тектонической состоит в том, что субдукция осуществляется не в виде плиты, а в виде сжатой почти лежащей синклинали, в ядре которой толщи расплющиваются и породы подвергаются региональному метаморфизму. Из этого следует, что магматические минералы могли находиться в древних толщах, которые значительно позже были субдуцированы и метаморфизованы. А возраст алмаза, как и граната, омфаци́та (в эклогитах), соответствует возрасту метаморфизма.

Многочисленные литературные [10, 23, 25] и данные автора [14] об участии биогенного углерода в процессе мантийного алмазообразования свидетельствуют о связи алмазообразования с погружением экзогенных соединений углерода на большие глубины совместно с базитами и ультрабазитами. Рассмотрим более подробно аргументы в пользу развиваемой нами модели алмазообразования [1, 2, 14] при погружении осадочных углеродсодержащих толщ и их базит-гипербазитового фундамента на краю конвективной геодинамической системы. На основе этой модели можно оценить возраст алмазов в масштабах кимберлитовой провинции, сопоставляя геологические данные с изотопным датированием минералов пород и минералов-узников в алмазах.

*Зональное размещение типов алмазных популяций на Сибирской платформе.* В основу конвективной модели алмазообразования [1, 2, 14] положены разработки по вертикальной и горизонтальной зональности размещения популяций алмаза на платформе. Были выделены популяции алмаза и их типы – группы алмаза – с определёнными соотношениями концентрации примесей азота и степени агрегации азота в кристаллической решётке алмаза. Типы популяций образуют ряд, позволяющий судить об относительной температуре и глубине возникновения алмаза. Для якутской территории Сибирской платформы уста-

новлено, что популяции имеют латеральную концентрическую зональность, характеризующуюся увеличением температуры и глубины алмазообразования от периферии платформы к её центральной части. Дополнительной особенностью рассматриваемой модели является вопрос о фазовом состоянии среды алмазообразования.

*Минералогические признаки алмаза, свидетельствующие о его кристаллизации в твёрдой среде при региональном динамо-термальном метаморфизме.* Нами было показано, что вопреки распространённому мнению об алмазообразовании в магматическом расплаве кристаллы алмаза растут в условиях стресса в твёрдой среде при метаморфизме, обусловленном субдукцией толщ. Вместе с толщами погружались углеродсодержащие (в том числе биогенные) вещества, за счёт которых на больших глубинах образовался алмаз [2]. Точка зрения на рост алмаза в твёрдой среде ранее высказывалась Г.Мейером и Ф.Р.Бойдом [20], В.В.Бескровановым [3], Б.А.Мальковым [8]. На примере изучения нескольких тысяч кристаллов алмаза из кимберлитов автором были установлены минералогические признаки кристаллизации алмаза в твёрдой анизотропной среде.

К ним относятся:

диссимметризация кристаллов. Она выражается неоднородностями роста алмаза в разных направлениях, что противоречит кристаллизации из расплава или раствора, где отсутствует разность напряжений. Природные октаэдрические кристаллы алмаза часто имеют уплощённую (по оси  $L_3$ ), удлинённую (по оси  $L_2$ ) и сложно искажённую формы. Это служит признаком того, что кристаллизация происходила не в изотропной (газовой или жидкой) среде;

включения в «алмазе-хозяине» обломанных кристаллов алмаза и их осколков. Такое раскалывание алмаза может происходить только при деформации твёрдой среды и быть связанным с шокowymi ситуациями, кратковременно прерывающими рост алмаза при древних землетрясениях. Подобные осколки алмаза в алмазе обнаружены в кристаллах россыпей Урала и трубок Архангельской области [2];

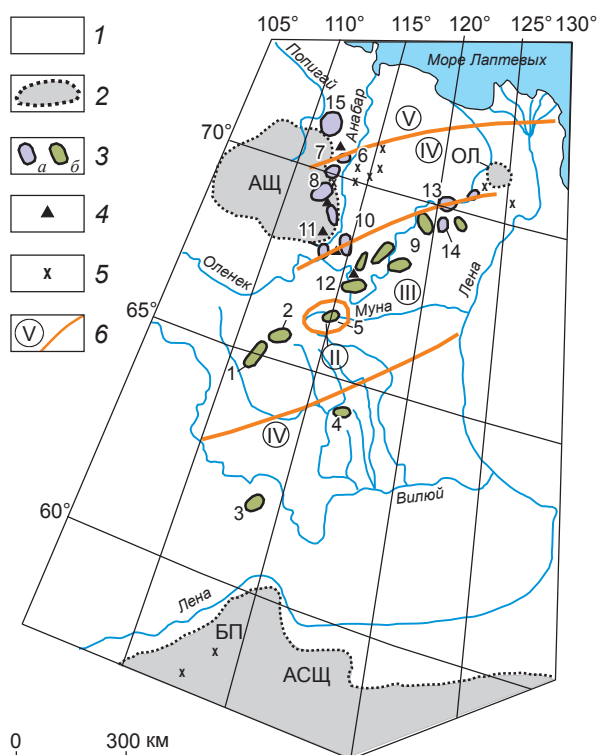
микросдвиговые деформации, не затрагивающие внешнюю зону растущего кристалла. Описаны в работах [3, 5, 23], а впоследствии наблюдались нами [2] в алмазах из кимберлитов. В малоподвижной жидкости или расплаве, где отсутствуют тан-

генциальные напряжения, образование сдвигов не происходит.

*Соотношение возраста метаморфических толщ фундамента платформы и возраста алмазов.* Как следует из модели развития ячеистой конвекции [1], субдуцирование окружающих толщ под ячею сопровождается компенсационным извлечением из глубины нагретых масс, надвигающихся на погружающиеся массы. Первые соответствуют зеленосланцевым («зеленокаменным»), а вторые гранулит-гнейсовым блокам вблизи щитов. Завершение их формирования фиксируется резкими региональными стратиграфическими и структурными несогласиями. Таким образом, по несогласиям и времени гранулитового метаморфизма можно с известной долей вероятности судить о возрасте конвективного процесса и, следовательно, о времени начала роста кристаллов алмаза.

Выявленной нами двусторонней (с элементами концентричности) зональности популяций алмазов на Сибирской платформе соответствует концентрическое окружение платформы поясами гранулитов (рис. 3), абсолютный возраст которых определялся с помощью методов изотопного датирования. Согласно работам ряда исследователей, обобщённым В.Е.Хаиным [13], гранулит-гнейсовые пояса конца раннего протерозоя, сопровождаемые гранитоидами с возрастом 1,8–2,0 млрд лет, присутствуют в Становом мегаблоке Алдано-Станового щита, Хапчанском блоке Анабарского щита, где гранитоиды (1,9–1,85 млрд лет) образуют серию массивов вдоль линии северо-восточного направления. К востоку от Анабарского щита находится Оленёкский блок. Архейские и нижнепротерозойские толщи блока надстроены раннепротерозойской вулканоплутонической ассоциацией (Экитский вулканоплутонический пояс).

Юго-западным обрамлением Сибирской платформы служит Присянская полоса. В её Иркутском блоке гранитоиды Саянского и Таракского комплексов имеют возраст 2,0–1,8 млрд лет [12]. Крупным фрагментом Присянской полосы является Бирюсинский блок, сложенный архейскими гнейсами амфиболитовой и гранулитовой фаций, глинозёмистыми сланцами, мраморами и амфиболитами. Архейский комплекс в северо-восточном обрамлении блока несогласно перекрыт нижнепротерозойской обломочной толщей, метамор-



**Рис. 3. СТРУКТУРА АЛМАЗОНОСНОЙ ПРОВИНЦИИ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ [2]:**

1 – чехол Сибирской платформы; 2 – области и пояса с выходами архей-раннепротерозойских гранулитов и гранит-зеленокаменных блоков (щиты и их фрагменты): АЩ – Анабарский, ОЛ – Оленёкский, АСЩ – Алдано-Становой, БП – Байкало-Патомский; 3 – алмазоносные районы и поля с кимберлитами и родственными породами мезозойского (а), палеозойского (б) возрастов (1 – Алакит-Мархинский, 2 – Далдынский, 3 – Мирнинский, 4 – Накынский, 5 – Мунский, 6 – Орто-Ыаргинский, 7 – Нижне-Куонамский (Старореченский), 8 – Среднекуонамский, 9 – Восточно-Укукитский, 10 – Западно-Укукитский, 11 – Куранахский (Малокуюнамский), 12 – Чомурдахский, 13 – Куойский, 14 – Молодинский, 15 – Попигайский); 4 – тела карбонатитов; 5 – массивы щелочного и щелочно-ультрасоснового составов; 6 – условные границы зон, в которых главные популяции алмаза характеризуются наиболее высокими (II), промежуточными (III, IV) и относительно низкими (V) температурами образованиями

физованной в зеленосланцевой или низкотемпературной амфиболитовой фации. Возраст прорывающих их гранитоидов 1,9 млрд лет. В отношении восточного допалеозойского обрамления платформы нет определённых данных, так как оно скрыто под пермскими и мезозойскими толщами. В целом, по заключениям О.М.Розена, В.Е.Хаина, кратонизация платформы завершилась во второй половине раннего протерозоя, в основном к 1,9–1,8 млрд лет [7, 13].

Всё вместе взятое позволяет считать наиболее обоснованным временем образования алмазов Сибирской платформы промежуток между 1,8–2,0 млрд лет, который соответствует возрасту гранатов [22], встреченных в составе минералов-узников в кристаллах алмаза. Вместе с тем, нельзя полностью отрицать возможность образования части алмазов в архее, как считают О.М.Розен с соавторами [7] и другие исследователи.

В аспекте изложенного вернёмся к обсуждению возраста алмазов наиболее изученной трубки Удачная. Изотопный возраст её алмазов составляет примерно 2 млрд лет [4, 22]. Это хорошо согласуется с оценками возраста алмазообразования на Сибирской платформе, основанными на конвективной модели алмазоносных систем. Это

же, с одной стороны, подтверждает необходимость взаимного контроля разных методов геохронологии алмаза, а с другой – говорит о корректности принятой нами модели геодинамики алмазоносных систем.

Дополнительными следствиями вышеизложенного являются ограничения в использовании минералов-узников для изотопного датирования алмаза. Согласно принятой нами модели, алмаз – метаморфогенный минерал. Поэтому более вероятно, что алмазу сингенетичны гранаты – типичные минералы метаморфизма и, прежде всего, гранаты эклогитовой ассоциации. Возраст минералов ультраосновных пород, включённых в алмаз, может отражать возраст древнего рестита, образовавшегося при магматогенной дифференциации мантии, определившей её расслоение. Датирование алмаза по таким минералам вряд ли корректно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышев А.Н. Периодическое размещение алмазоносных систем и смежные проблемы геологии алмазов // Отечественная геология. 2006. № 6. С. 20–35.
2. Барышев А.Н., Хачатрян Г.К. Влияние тектонического поля напряжений на механизм роста, структуру кри-

- сталлов алмаза в связи с общей геодинамикой алмазообразования // Отечественная геология. 2015. № 1. С. 46–60.
3. Бескрованов В.В. Онтогенез алмаза. – Новосибирск: Наука, 1992.
  4. Буланова Г.П., Барашков Ю.П., Тальникова С.Б., Смелова Г.Б. Природный алмаз – генетические аспекты: монография. – Новосибирск: Наука, 1993.
  5. Варшавский А.В. Аномальное двупреломление и внутренняя морфология алмаза. – М.: Наука, 1968.
  6. Зайцев А.И. Возраст алмазов Якутской алмазоносной провинции // Отечественная геология. 2008. № 5. С. 79–85.
  7. Земная кора Якутской алмазоносной провинции: состав, структура, формирование / О.М.Розен, А.В.Мананов, В.Д.Суворов и др. // Геология алмазов – настоящее и будущее. Воронеж, 2005. С. 158–188.
  8. Мальков Б.А. Геология и петрология кимберлитов: монография. – СПб.: Наука, 1997.
  9. Мегакристаллические пироповые перидотиты в литосфере Сибирской платформы: Минералогия, геохимические особенности и проблема происхождения / Н.П.Похиленко, Н.В.Соболев, Ф.Р.Бойд и др. // Геология и геофизика. 1993. № 1. С. 71–84.
  10. Соболев В.С., Соболев Н.В. Новые доказательства погружения на большие глубины эклогитизированных пород земной коры // ДАН СССР. 1980. Т. 250. № 3. С. 683–685.
  11. Сорохтин О.Г., Митрофанов Ф.П., Сорохтин Н.О. Глобальная эволюция Земли и происхождение алмазов. – М.: Наука, 2004.
  12. Туркина О.М., Урманцева Л.Н., Бережная Н.Г., Сублов С.Г. Формирование и мезоархейский метаморфизм гиперстеновых гнейсов в Иркутском гранулитогнейсовом блоке (Шарыжалгайский выступ Сибирской платформы) // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 1. С. 122–137.
  13. Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов (год 2000). – М.: Научный мир, 2001.
  14. 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.
  15. *Diamondiferous eclogites from Siberia: Remnants of Archaean oceanic crust* / D.E.Jacob, E.Jagoutz, D.Lowry et al. // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1994. Vol. 58. № 5. P. 5191–5207.
  16. *Diamonds and Geology of Mantle Carbon* / S.B.Shirey, P.Cartigny, D.J.Frost et al. // *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. 2013. Vol. 75. P. 355–421.
  17. *Eclogitic inclusions in diamonds: Evidence of complex mantle processes over time* / L.A.Taylor, G.A.Snyder, G.Crozaz et al. // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1996. Vol. 142. P. 535–551.
  18. *Jacob D.E., Jagoutz E., Sobolev N.V., Sorowka A. Isotopic analysis (Sm-Nd, Rb-Sr and U-Pb) of single subcalcic garnet grains from Yakutian kimberlites* // 6th International Kimberlite Conference Long Abstract. Novosibirsk, 1995. P. 257–259.
  19. *Jagoutz E. Sm-Nd systematic in eclogites from Siberia* // 4th International Kimberlite Conference Long Abstract. Geol. Soc. Of Australia, 1986. P. 265–266.
  20. *Meyer H.O.A., Boyd F.R. Inclusions in Diamond* // *Carnegie Institute of Washington Year Book*. Washington, DC: 1969. Vol. 68. P. 315–324.
  21. *Re-Os, Sm-Nd and Rb-Sr evidence for thick Archaean lithosphere beneath Siberia modified by multistage metasomatism* / D.G.Pearson, S.B.Shirey, S.W.Carlson et al. // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1995. Vol. 59. № 5. P. 959–971.
  22. *Richardson S.Y., Harris J.W. Antiquity of peridotitic diamonds from the Siberian craton* // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1997. Vol. 151. P. 271–277.
  23. *Schulze D.J., Harte B., Valley J.W., Channer D.M. Extreme geochemical variation accompanying diamonds growth, Guaniamo, Venezuela* // 8th International Kimberlite Conference Long Abstract. Victoria. Canada. 2003. # 0187.
  24. *Single crystal Re-Os isotope study of sulphide inclusions from a Siberian diamond* / D.G.Pearson, S.B.Shirey, G.P.Bulanova et al. // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1999. Vol. 63. № 5. P. 703–711.
  25. *The application of C isotope measurements to the identification of the sources of C in diamonds* / M.B.Kirkley, J.Gurney, M.Otter et al. // *Appl. Geochem.* 1991. Vol. 6. P. 477–494.

## SIGNIFICANCE OF GEOLOGICAL MODELS OF DIAMONDIFEROUS SYSTEM DEVELOPMENT FOR EVALUATION OF DIAMOND ABSOLUTE AGE

G.K.Khachatryan (TsNIGRI)

*Estimates of the absolute age of kimberlite diamond by its captive mineral composition range from hundreds Ma to 3,5 Ga and depend on inclusion age relations to host mineral. The main features of geological-genetic models of diamond formation are characterized as well as their role in its age determination. Most Yakut diamonds are dated at 1,8–2,0 Ga using a convective geological model of diamondiferous system development. These ages correlate with dating of regional metamorphism for the Siberian platform's basement rocks and isotope age of garnet inclusions in diamonds.*

*Keywords: diamond, absolute age, isotope dating, mineral inclusions, geological models, regional metamorphism.*