DOI:10.47765/0869-7175-2020-10033

УДК 553.81:551.24
© А.Н.Барышев, Г.К.Хачатрян, 2020

Геодинамика, тектоника алмазоносных систем и минерагения

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

Приведена оригинальная геодинамическая концепция развития всего комплекса процессов и структур, обеспечивающих образование и перемещение источников углерода для роста кристаллов алмаза в мантии, доставку алмазоносной среды к земной поверхности. Геодинамической основой образования алмаза служит погружение экзогенного источника в древних зонах субдукции, которые развиваются по краям конвективных ячей. Доставка осуществляется в адвективной системе, в которой важнейшую роль играет транстенсия в сочетании с конвекцией. Показаны периодичность размещения кустов трубок в пространстве, тектонофизическая закономерность этого явления. На основе геодинамики предложено совершенствование таксономической схемы алмазоносной системы в связи с её фрактальной структурой от минерагенической провинции до куста трубок. На конкретных примерах показаны главные структурные элементы алмазоносных таксонов (систем) и закономерности их образования. Рассмотрены острые дискуссионные вопросы природы кимберлитов.
Ключевые слова: кимберлиты, алмаз, геодинамика, конвекция, адвекция, транстенсия, минерагеническая провинция, зона, поле, куст трубок, тектонические напряжения.

Барышев Александр Николаевич
доктор геолого-минералогических наук — alexbargeol@mail.ru

Хачатрян Галина Карленовна
доктор геолого-минералогических наук — khachatryan_g_k@mail.ru

Geodynamics, diamondiferous system tectonics and minerageny

A.N.BARYSHEV, G.K.KHACHATRYAN (Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals)

The paper presents a unique geodynamic evolution concept of all processes and structures ensuring carbon source formation and movement for diamond crystals growth in the mantle, and diamondiferous medium supply to the surface. Geodynamic basis for diamond formation is exogenetic source sinking in old subduction zones evolving along convection cell edges. The supply is ongoing in an advection system, with transtension combined with convection playing a key role. The paper shows periods of spatial pipe cluster location and tectonophysical pattern of this phenomenon. Based on geodynamics, the authors suggest improving a taxonomical scheme of the diamondiferous system due to its fractal structure, from a mineragenic province to a pipe cluster. Specific examples are presented to highlight major structural elements of diamondiferous taxons (systems) and their formation patterns. Debatable issues of kimberlite nature are discussed.
Keywords: kimberlites, diamonds, geodynamics, convection, advection, transtension, minerageny province, zone, field, pipe cluster, tectonic stresses.

В геодинамике и тектонике алмазоносных систем существуют две главные проблемы: первая это условия, способствующие образованию алмаза, первичная структура алмазоносного пространства в мантии; вторая – условия доставки алмазоносной среды из глубин к поверхности Земли, их структурное выражение. Обстоятельный обзор взглядов на природу кимберлитов и алмазов содержится в литературе, однако далеко не все вопросы упомянутых проблем обсуждены в полной мере. Особенно это относится к работам, не принимающим во внимание процессы и структуры субдукции при формировании

фундамента платформ [31]. Наиболее распространёнными являются представления, согласно которым алмаз в глубоком докембрии кристаллизовался из магмы или при метасоматозе за счёт флюидных компонентов первичной мантии, а в палеозое и мезозое переносился кимберлитовой магмой к земной поверхности по разломам и трубообразным каналам, завершаясь взрывом поднятой массы. Для другой концепции о ксеногенности алмазов убедительной модели, каким образом они попали в кимберлиты, предложено не было». При рассмотрении роли субдукции в алмазообразовании большинством исследователей, вслед за У.Е.Шарпом [34], используется только её плейттектоническая модель. Но есть другая модель субдукции как краевого эффекта ячеистой неустановившейся конвекции, где показана возможность её применения к геологии алмаза [5, 7]. В неё вписываются особенности кристаллохимии алмазов, латеральная и вертикальная минерагеническая зональность популяций алмазов, закономерное сочетание кимберлитов с карбонатитами, участие экзогенного вещества в их источниках [9, 32].

Проблема геодинамических условий, способствующих образованию алмаза и структуры алмазоносного пространства в мантии, рассмотрена авторами настоящей статьи в ряде работ [6, 9, 10]. Кратко напомним их основные выводы, чтобы иметь полное представление о том, как были распределены алмазы на глубине перед их подъёмом к поверхности Земли.

Условия алмазообразования. При выявлении геодинамических условий образования алмазов важную роль сыграли исследования их кристаллов, объединённых в группы популяции, типы которых обладают определёнными содержаниями азота, входящего в кристаллическую решётку в виде двойных и четверных атомных кластеров, свидетельствующих о температуре роста алмаза. Главным же результатом было то, что по размещению популяций алмаза на Сибирской платформе установлена двусторонняя с элементами концентричности латеральная зональность: наиболее высокотемпературные популяции расположены в центре, а с меньшей температурой роста – соответственно, по краям. Принимая во внимание глубинный температурный градиент, следует вывод, что зональность характеризует увеличение глубины образования алмазов в направлении к центру минерагенической провинции. Характеристика структурных примесей азота и водорода в алмазе свидетельствует об общем для них источнике, который включал азотсодержащие органические вещества (например, с первичными РНК и ДНК). Часть алмазов имеет лёгкий изотопный состав углерода и присутствие в них следов углеводородов. Особенности распределения водорода в кристаллах способствовали тому выводу, что одним из источников алмаза были биогенные углеводороды, реагировавшие в мантии с оксидами углерода, приводя к высвобождению углерода, из которого образовался алмаз [32].

Исследование строения кристаллов алмаза показало влияние тектонических напряжений на механизм их роста, неодинаковый в разных направлениях, на уплощённость формы, на деформации с образованием трещин скалывания и отрыва в кристалле, прерывающими на время его рост. Всё это свидетельствует о том, что алмаз кристаллизовался в твёрдой, а не в расплавной среде, притом в активной тектонической обстановке при региональном метаморфизме пород [8]. Эти выводы послужили поводом для выбора геодинамической модели, которая обеспечивает погружение в мантию толщ, содержащих источник углерода алмаза. Комплексу требований более других соответствовала модель ячеистой неустановившейся конвекции с развитием зон субдукции в виде опрокинутых синклиналей, погружающихся от краёв к центру ячеи. Такая модель представлена на рис 1.

На последовательное развитие структур конвекции, соответствующих фазам 0°, 60°, 90°, 120°, 180° математической модели слоистой толщи [15], нанесены условные слои литосферы. На модели видны последовательное поднятие глубинных слоёв в центре конвективной ячейки и образование синклиналеобразных зон субдукции по краям. Такие же субдукционные синклинали (рис. 2) получены тектонофизическим моделированием при исследовании структур в обстановке гравитационной неустойчивости [26]. В современных зонах субдукции, например Курильской, поле очагов землетрясений имеет форму клина, сужающегося вниз, что более соответствует синклинали, а не плите. В пользу реальности именно такой морфологии зон субдукции в природе свидетельствует сходная синклинальная структура субдуцированных толщ регионально метаморфизованной офиолитовой ассоциации, извлечённой из глубин на юго-востоке Кубы [5].

Субдукционные зоны, образовавшиеся по краям модели конвективной ячеи, аналогичны зонам размещения популяций алмаза в глубинах Сибири (см. рис. 2). Именно субдукция толщ с рассеянным в них углеводородным (биогенным) источником вещества алмаза определяет позицию, первичную структуру и морфологию алмазоносного пространства в виде перевёрнутого конуса, образованного встречным сочетанием дугообразных зон субдукции. Всё вместе взятое позволяет сделать вывод о том, что

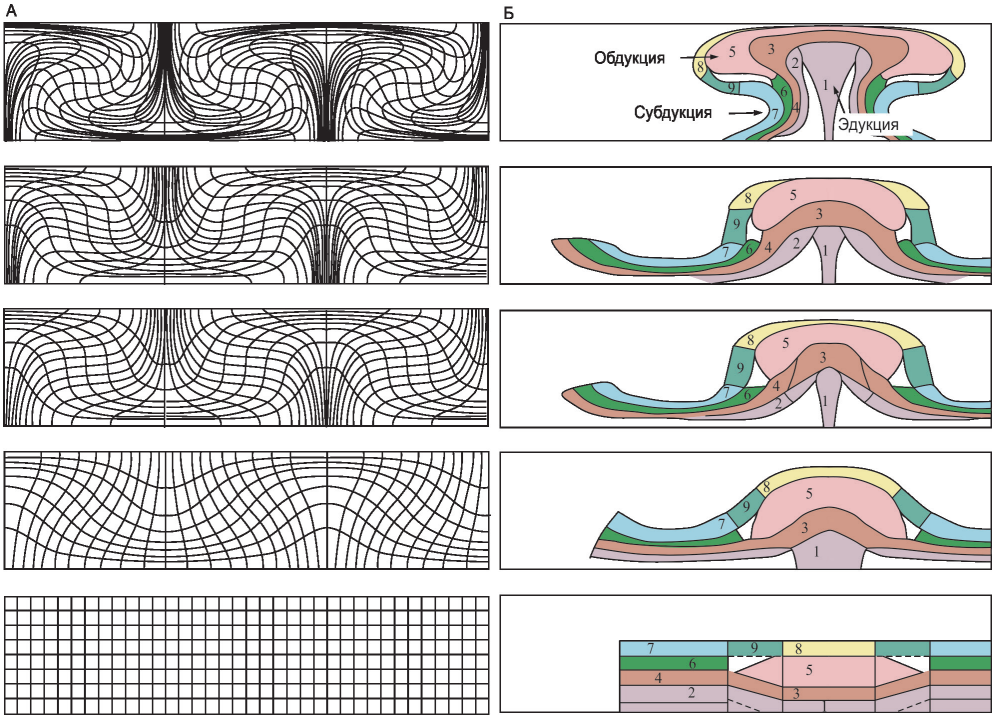


Рис. 1. Модель конвективной геодинамики корово-мантийной системы, образующей метаморфические толщи литосферы щитов (по краям) **и фундамента платформы** (в центре)**:**

А – математическая модель последовательных деформаций слоистой среды при конвекции, соответствующая (снизу вверх) фазам её развития 0°, 60°, 90°, 120°, 180°, по [15]; Б – геологическая модель ячеистой конвекции: слои древней литосферы нанесены на математическую модель в центре континентального, а по краям переходного и океанического типа; слои: 1, 2 – мантийные, 3, 4 – габбро-базальтоидные, 5 – гранит-метаморфические, 6 – эффузивных базальтов, 7, 8 – осадочные, 9 – переходных карбонатсодержащих фаций шельфа; субдукция слоёв 4, 6, 7, 9 формирует зеленокаменные толщи, а обдукция слоёв 3, 5 – гранулиты щитов

геодинамика, формирующая структуры, где образуется алмаз, определяется краевыми эффектами неустановившейся ячеистой конвекции.

Факторы и условия доставки. Доставка алмазоносных масс из глубин к поверхности Земли происходит не только значительно позже алмазообразования, но и при ином геодинамическом режиме. Вместе с тем общие физические особенности развития конвекции, не только краевой субдукционной её части, но и осевой восходящей, помогают лучше понять многие стороны процесса и геологических структур доставки. Помимо гравитационной неустойчивости, регулирующей конвекцию, на адвекцию глубинных масс влияет транстенсия. Для лучшего понимания их сути сначала рассмотрим тектонофизический аспект этих двух процессов.

Конвекция (лат. convectio – перенесение, принесение) означает перенос массы и теплоты движущейся средой, т. е. не обязательно выражает многократный циклический процесс, относящийся к установившейся конвекции. В геологии конвекция достигает лишь определённых фаз развития, т. е. в подавляющем большинстве случаев она неустановившаяся. Часть ограниченной по фазе конвекции именуют адвекцией (лат. advectio – доставка). Адвекцию как восходящую часть конвективной системы сопоставляют с диапиризмом. К диапиру (греч. διαπεϊρω – протыкать, пронзать) можно отнести кимберлитовую трубку. Что же касается иных поднятий, происходящих без «пронзания», за счёт пластических перемещений вещества, то используется термин адвективное поднятие.

Условия протекания конвекции в однородной среде при её гравитационной неустойчивости описываются уравнением Рэлея:

$$R = \frac{\rho \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot g \cdot H}{a \cdot \eta} \text{ или } R = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot H^3}{a \cdot \eta},$$

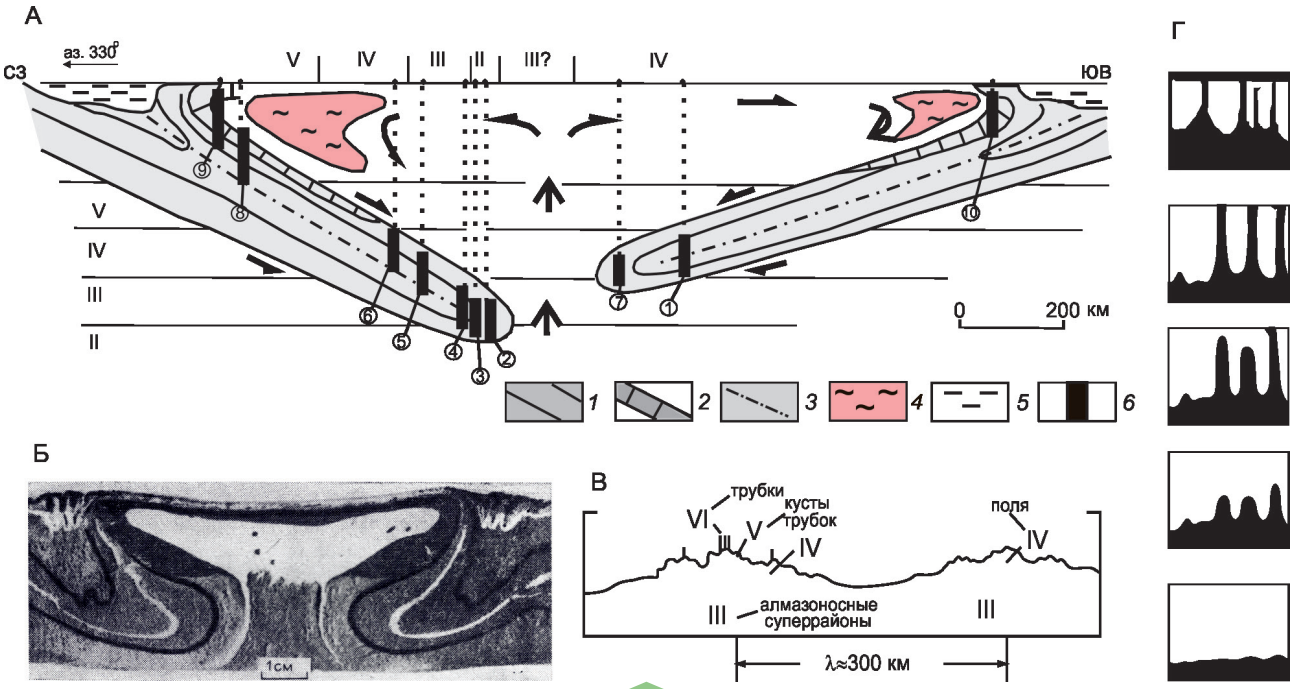


Рис. 2. Общая модель геодинамики алмазоносной системы:

А – формирование структуры алмазоносного пространства в фундаменте Сибирской платформы на рубеже раннего–среднего протерозоя (пресс-проекция на вертикальное сечение по аз. 330°); *1–2* – субдуцированные толщи краевых бассейнов с ультрабазит-базитовым основанием (*1*), шельфовые фации этих бассейнов (*2*); *3* – осевые поверхности субдуцированных синклиналей; *4* – архей-протерозойские толщи Анабарского и Алданского щитов; *5* – краевые бассейны; *6* – позиция вертикальных интервалов зоны субдукции, обеспечивающих алмазоносность кимберлитов в трубках (цифры в кружках): Мир (1), Удачная (2), Молодость (3), Поисковая (4), Ленинград (5), Мало-Куонапская (6), Накынского поля (7), Попигайской структуры (8), щелочно-мафит-карбонатитовых расслоенных и кольцевых массивов по периферии Анабарского (9) и Алданского (10) щитов; стрелками показано направление пластических течений масс в конвективной ячее; римскими цифрами обозначены типы популяций алмаза, их относительная позиция в латеральной зональности платформы и по глубине; вертикальный масштаб условный; Б – аналогичная по структуре модель, полученная при центрифугировании слоистой толщи из замазки, модельной глины и силикона, по [26]; В – фрактальная волновая структура подъёма алмазоносных масс из мантии, λ – длина волны; Г – последовательность развития и периодичность размещения ячеистых поднятий на адвективном валу, перерастание их в трубчатые тела (тектонофизическая модель адвекции битума под слоем патоки, по [29])

где R – критическое число Рэлея, ρ – плотность, ΔT – перепад температур в слое, β – коэффициент температурного расширения, g – ускорение силы тяжести, H – мощность конвектирующего слоя, a – коэффициент температуропроводности (скорости выравнивания температур) или релаксации напряжений, η – динамическая вязкость, $\Delta\rho$ – разуплотнение.

При достижении первого критического числа $R_1 \approx 1700$ конвекция осуществляется в виде вала (стоячей волны), а при втором числе $R_2 \approx 10^4$ – в виде ячеистого поднятия [15]. Возрастание гравитационной неустойчивости после условий, характеризуемых R_1, приводит к зарождению на гребне вала дополнительных волн двух других направлений, интерференция которых приводит к развитию гексагональных ячей (подобно ячейкам Бенара), а при достижении R_2 к конвекции в виде колонн. С учётом того, что вязкость геологических масс при подъёме уменьшается, вплоть до расплавов или алмазоносных флюидолитов, часть параметров конвективной системы меняется. В результате конвективная система приобретает фрактальную структуру, в которой на крупном поднятии образуется серия мелких, а на каждом из них – ещё более мелких, завершаясь, к примеру, трубками [3, 6].

Изменения параметров свойств во фрактальной структуре конвективной системы могут быть предсказаны и оценены [5]. Из уравнения Рэлея следует уравнение подобия разномасштабных систем конвекции: $\mathbf{C}_{\Delta\rho} \cdot \mathbf{C}_g \cdot \mathbf{C}_H^3 = \mathbf{C}_a \cdot \mathbf{C}_\eta$, где $\mathbf{C}$ – коэффициент подобия параметров, индекс которых соответствует обозначению переменных в уравнении Рэлея.

При малых вариациях разуплотнения $\Delta\rho$, температуропроводности горных пород $\alpha=(6\div13)\cdot10^{-3}$ см^2/с и ускорения силы тяжести g их коэффициенты подобия можно приравнять единице. Тогда $\mathbf{C_H^3\approx C_\eta}$. Иначе говоря, для принятых условий при уменьшении размера системы на один порядок вязкость в подобной системе должна быть на три порядка меньше. При этих условиях в природных конвективных системах с уменьшением размера системы на один порядок время протекания между её подобными фазами уменьшается на два порядка. То есть $\mathbf{C_t\approx C_l^2}$. Это следует из двух уравнений подобия: 1) медленных пластических деформаций: $\mathbf{C_\eta=C_\rho\cdot C_g\cdot C_a\cdot C_l\cdot C_t}$, где l – размерный параметр, как H, а C_t– коэффициент подобия времени [14], и 2) первого, подобия иных параметров, приведённого выше.

При адвекции в фактор гравитационной неустойчивости, определяемый инверсией плотности масс и горизонтальным градиентом литостатического давления, может вплетаться фактор градиента давления, связанного с особенностями поля тектонических напряжений – транстенсией. Приведём пояснения, которых мало в геологической литературе.

Транстенсия – превращение (trans) сдвиговой деформации в относительное растяжение (tension). Она возникает на участке изменения простирания разлома (или его сочленении с другим разломом) или по иным причинам при проявлении сдвиговых напряжений как до, так и после образования самого разлома. Сдвиг как бы тянет (pull) за собой один борт трещины и стремится в месте её изгиба отделить (apart) его от другого борта. Зону растяжения или бассейн именуют как пулл-апарт (pull-apart). Если сдвиг происходит в противоположном направлении, сжимая (press) ту же зону, то обстановку называют транспрессией (сдвиг преобразуется в сжатие). Поэтому для определения типа обстановки на изгибе разлома или его сочетания с другим нарушением необходимо представлять, в каком направлении может происходить сдвиг (правом, по часовой стрелке, или левом – против неё).

Транстенсия влечёт за собой важные следствия. Первое из них заключается в том, что она способствует адвекции за счёт создания градиента давления в среде, снижая всестороннее давление (оно равно одной трети от суммы трёх главных нормальных напряжений) в определенном объёме.

Вывод о роли транстенсии при адвекции легко подтвердить анализом размерностей в уравнениях. В уравнении Рэлея для конвекции (адвекции) числитель формулы $\Delta\rho\cdot g\cdot H^3$ представляет архимедову силу конвектирующего объёма, определяемого членом H^3. Те же члены, с теми же размерностями входят в уравнение закона Архимеда: выталкивающая сила $F=\rho_ж\cdot g\cdot V_т$, где $V_т$ – объём жидкости, вытесненный погружённым телом. Размерность градиента давления аналогична размерности произведения $[\Delta\rho\cdot g]=[г\cdot см^{-2}\cdot с^{-2}]$. Иначе говоря, градиент давления при транстенсии в поле тектонических напряжений играет ту же роль, что и разуплотнение в гравитационном поле при конвекции.

В больших объёмах горных пород транстенсия, поддерживаемая длительное время, нарушает баланс литостатического давления и может привести к пластическому выжиманию вверх объёма среды, обладающего пониженным давлением, и к подъёму снизу на его место плотных масс, так же как вода выжимает вверх поплавок в поле силы тяжести. Предел ползучести горных пород составляет всего лишь около 10 кг/см^2 или ещё меньше, то есть медленные пластические течения могут происходить при малых касательных напряжениях. В этой связи заметим, что эмпирически установленное правило Клиффорда в своей основе, вероятнее всего, имеет не столько возраст алмаза, сколько необходимость большой длительности времени для адвекции твёрдых масс из больших глубин мантии.

Природную модель адвекции мантии в результате транстенсии, но при иных условиях демонстрирует обстановка района озера Байкал. Байкальский рифт возник как бассейн pull-apart при левых сдвиговых перемещениях на концах разломов близширотного простирания вдоль р. Верхняя Ангара на севере и р. Иркут и р. Малый Енисей на юге озера. Наличие разломов фиксируется современными очагами землетрясений. Но главное то, что при пассивном рифтогенезе у Байкала транстенсия вызвала под ним подъём мантии, стремящейся к изостазии.

Весьма примечательно то, что области или зоны транстенсии, прилегающие к крупным сдвигам, занимают большую площадь, выражены чередованием относительно узких хребтов и впадин, ориентированных определённым образом относительно простирания сдвига в зависимости от того, левый он или правый (рис. 3). Транстенсия распространяется далеко за пределы бассейна pull-apart, причём с одной стороны от главного сдвига. К востоку от Байкала ширина области транстенсии достигает 600 км, с чередованием хребтов и впадин через расстояния около 60 км, ориентированных так же, как и озеро. Подобное явление сопровождает правый сдвиг Сан-Андреас с транстенсией, вызвавшей чередование «Бассейнов и Хребтов» (Большой бассейн, США) [2]. Малые по размеру сдвиги сопровождаются зонами транстенсии малой протяжённости и ширины.

Второе следствие транстенсии заключается в том, что при уменьшении величины сжимающей компоненты в главном нормальном напряжении σ_1 и

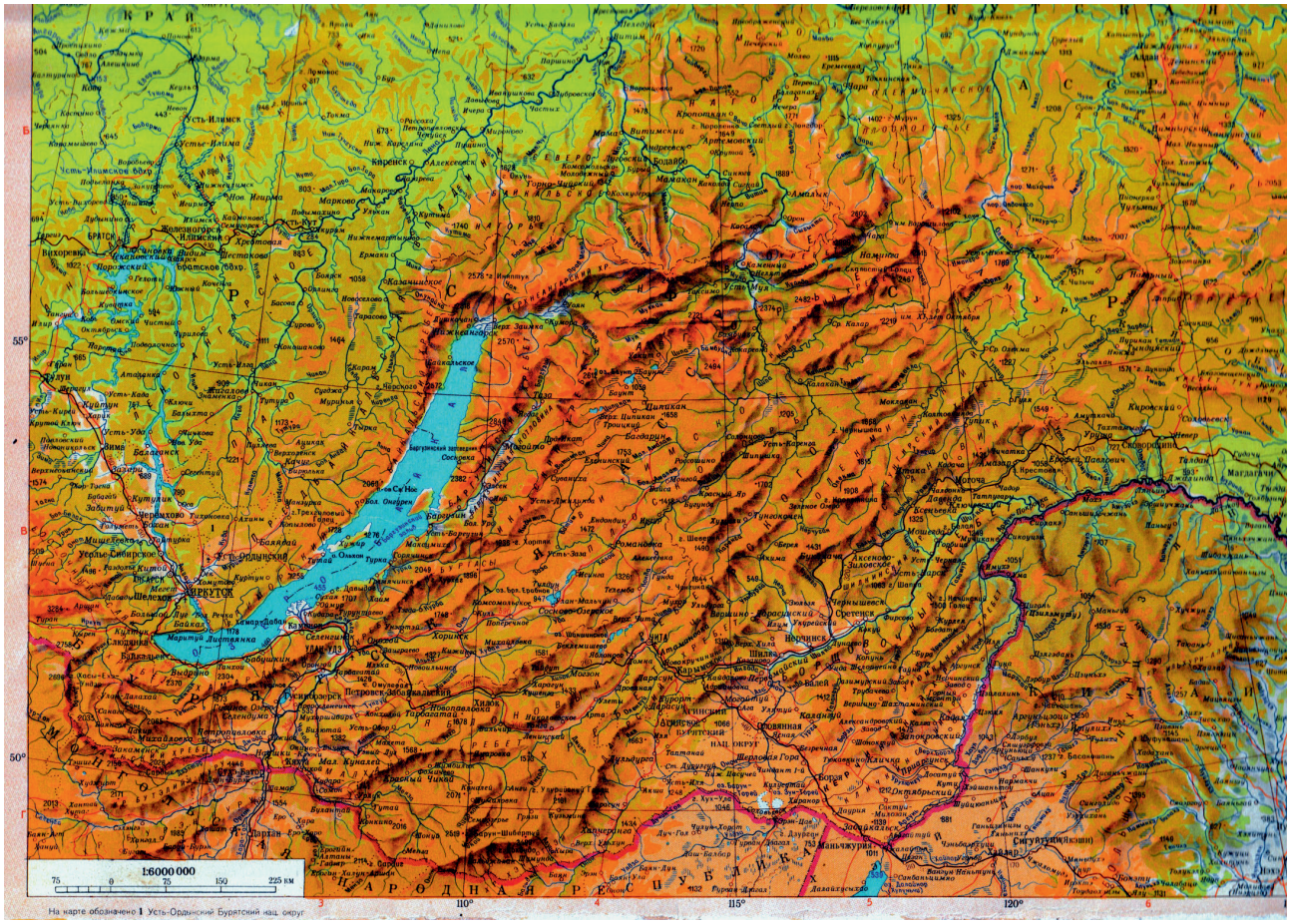


Рис. 3. Область транстенсии, выраженная бассейном пулл-апарт озера Байкал и чередованием прилегающих впадин и хребтов. *Из* [2, стр. 60]

сохранении величины наибольшего сжимающего главного нормального напряжения σ_3 возрастает максимальное касательное напряжение $\tau_{max}=1/2\cdot(\sigma_3-\sigma_1)$. Это приводит к дополнительным разрывным деформациям в преобразованном поле с изменённой ориентировкой осей главных нормальных напряжений. Причина появления новых разрывов показана на диаграмме Мора в данной статье при описании структуры Накынского поля.

Реализация адвекции за счёт транстенсии, в отличие от конвекции, развивающейся при постоянно действующей во всём пространстве гравитации, требует условий длительного поддержания напряжений в определённом объёме среды. Такое поддержание возможно в связи с напряжениями, возникающими в связи с общей геодинамикой Земли, например её ротационным режимом. С ним связывают регматическую (лат. regma – разрыв, разлом) сеть диагональных и ортогональных нарушений. Развитие диагональной пары сдвигов (правых северо-западного, левых северо-восточного простирания) может в определённой мере иметь связь с глобальным сжатием Земли (1/298,26) вдоль оси вращения. Вызванная сдвиговыми напряжениями транстенсия на большой площади может обеспечить образование близмеридиональных и широтных сдвигов. С такой комбинацией сдвигов четырёх направлений мы сталкиваемся на алмазоносных территориях. Но главная масса больших близширотных сдвигов Земли имеет иную природу. Подъём глубинных масс способствует их западному дрейфу из-за переноса ротационного момента инерции относительно малого, которым они обладали до этого. В результате ротационные силы за всё время существования Земли «закрутили, словно крышку банки» северные континентальные массы относительно южных примерно на 35°–40°. Достаточно взять в руки глобус, чтобы убедиться в этом.

Зоны транстенсии в природе обычно не имеют чётко выраженных границ. Поэтому необходимо отметить, что смещение условных границ этих зон

по разломам, показанное далее на рисунках настоящей статьи, не означает смещение осадочного слоя платформы на ту же амплитуду. Очевидно, что смещения отражают в большей мере древние осложнения адвективных валов фундамента, на которых зарождались кусты трубок, и наследуются позже. Выделение зон транстенсии и реконструкция тектонических полей напряжений проводились на основе сочетания линейного размещения трубок и их кустов, особенностей речной сети, которая наследует разрывную тектонику, на тектонофизических закономерностях полей напряжений вблизи разломов и сочетаний трещин разных направлений [3]. Иначе говоря, для закрытых территорий платформ приходится опираться на общие положения, которые сформулировал французский философ-материалист Клод Гельвеций (1715–1771): «Знание некоторых принципов легко возмещает незнание некоторых фактов».

Условия реализации факторов, способствующих доставке. Формула уравнения Рэлея в знаменателе содержит параметры вязкости и температуропроводность, стремящуюся снизить термическое расширение и разуплотнение масс, приводя к релаксации напряжений. Для условий доставки особо важна оценка переменного параметра вязкости. Она позволяет представить, как в процессе адвекции субдуцированные массы, в которых в условиях мантии образовался алмаз, «дошли до жизни такой», что превратились в кимберлиты трубок с протогенным алмазом. В этом могут помочь уравнения подобия конвекции. Но предварительно необходимо рассмотреть дискуссионные вопросы проблемы.

Особая проблема связана с представлениями о фазовом состоянии протокимберлитовой и кимберлитовой масс, как во время алмазообразования, так и при их подъёме из глубин. Кимберлиты предпочитают ячеистый диапиризм в виде трубок, практически не заполняя разломы, хотя присутствующие рядом явно магматические базальты эти разломы используют «весьма охотно». Эта особенность внедрений заставляет обратиться к сущности понятия «кимберлитовая магма», её фазовому состоянию и наиболее вероятным реологическим свойствам. С точки зрения этимологии, термин магма (итал., исп. magma – тесто, месиво) можно было бы принять, если вязкость кимберлитов до взрыва была порядка 10^4–10^7 пуаз (подобной техническому вазелину или в 1000 раз больше). Однако устоявшееся в геологии понятие магмы требует наличия расплава (частично или целиком) в её содержимом. Это ни в структуре, ни в текстуре кимберлитов явно не просматривается. Однако подавляющим большинством геологов магма подразумевается, а потом используется в модельных построениях процессов и геологических структур.

Магматическое (расплавленное) состояние кимберлитов для построения модели их подъёма вряд ли приемлемо, так как не имеет должного обоснования. Другое представление о фазовом состоянии кимберлитов – это флюидонасыщенная диспергированная масса твёрдых обломков разного размера и состава в сочетании с метаморфогенными минералами. Сомнения в существовании кимберлитовой магмы (расплава) нашло отражение во втором издании (2008) Петрографического кодекса, где указано, что представления о генезисе кимберлитов не установились [21]. В результате кимберлиты и лампроиты в Кодексе рассмотрены отдельно от типа магматических пород и выделены в самостоятельный тип (наиболее крупный таксон петрографической классификации). Вместе с тем кимберлиты не включены и в «новый тип эндогенных горных пород» флюидогенные породы (флюидолиты), хотя по всем своим свойствам, кроме ультраосновного состава, отвечают текстурно-структурным характеристикам пород этого петрографического типа. Следует заметить, что уже давно А.М.Портновым было указано на флюидный диапиризм как причину формирования кимберлитовых трубок и карбонатитовых массивов [23].

В пользу «флюидолитического», а не магматического состояния кимберлитов есть много доводов. В кимберлитах отсутствует (нигде не установлен) определённый порядок кристаллизации минералов именно из расплава, а не в процессе метаморфизма. Идиоморфные минералы в кимберлитах представлены метаморфогенными кристаллами (гранаты), в том числе перекристаллизованными (оливины). Келифитовые каймы у кристаллов и обломков не обязательно свидетельствуют о реакции их с расплавом, они могут образоваться при метаморфизме и реакции между минералами в твердофазной среде [17]. Эти выводы Н.А.Елисеева опираются на теоретические и экспериментальные исследования химических реакций в твёрдых телах (К.Хауффе, 1962) и на наблюдения келифитовых кайм у кристаллов в метаморфических породах (Дж.А.Данн, 1932). Многочисленные доводы о росте алмаза в твёрдой, а не расплавной среде, к тому же в обстановке стресса, приведены авторами в работе [9].

Масса кимберлитов, несмотря на ультраосновной состав, интенсивную серпентинизацию, при внедрении в осадочные толщи земной коры ведёт себя как среда достаточно большой вязкости (порядка 10^{11}–10^{13} пуаз, то есть подобно льду), что не характерно для основных и ультрабазитовых магм. Оценка вязкости проведена на основе сходства размеров диаметра трубчатых тел кимберлитов и корней колче-

дановосных кремнекислых экструзивов, сходства шага периодичности их размещения (2–3 км), морфологического сходства экструзивов и моделей, полученных при тектонофизических экспериментах с учётом условий подобия на эквивалентных материалах с определённой вязкостью [5, 25].

Несмотря на большую флюидность, в кимберлитах нет «рогульчатых» обломков, которые могли бы указывать на наличие газовых пузырей в магме перед взрывом. Чрезвычайная насыщенность кимберлитов обломками, по-видимому, связана не только с взрывом, но и с былыми деформациями пород уже при региональном метаморфизме в зоне субдукции до образования кимберлитов. Примечательно и то, что в трубках кимберлитов, как и в массивах карбонатитов, имеет место картина, когда центральные (а не периферические!) части овального сечения тела прорываются массой иного состава. Это трактуется как проявление другой фазы магматизма, а не адвективная структура расслоенной алмазоносной среды, нижние части которой по аналогии с ядром антиклинали поднимаются в центре, а далее происходит кимберлитовый диапиризм расслоенной среды. Иначе говоря, «любовь к концентрической зональности» у трубок – свидетельство адвекции расслоенной среды, а не последовательного разновременного внедрения разных по составу магм.

В качестве довода магматической природы кимберлитов иногда приводят наличие даек. Но это недоказывает магматическое состояние кимберлитов. Подобными бывают песчаные дайки среди осадочных толщ, изученные В.Н.Холодовым [33]. В кимберлитах присутствует обилие неоплавленных обломков чуждых пород, то есть не так, как бывает в палящих тучах вулканов. По периферии трубок кимберлитов нет следов термального метаморфизма, который можно было бы ожидать в связи расплавами.

Это ставит вслед за собой другой вопрос: почему протокимберлитовые массы, поступающие из больших глубин, где температура весьма высока, в верхних горизонтах не плавятся при декомпрессии, подобно тому, как это происходит в обстановке вулканоплутонических раннеорогенных поясов или при образовании трапповых очагов? И это при повышенной у кимберлитов флюидности, которая могла бы снизить температуру плавления! Причиной может быть то, что подъём нагретой на глубине протокимберлитовой массы происходит очень медленно из-за повышенной вязкости в системе малого размера. В этом случае релаксация температуры при обычном коэффициенте температуропроводности может опережать создание условий для плавления нагретой массы, несмотря на декомпрессию. При анализе тектоники платформ нельзя забывать об этих особенностях соотношений большой временной продолжительности действия относительно малых по величине касательных напряжений в «спокойном платформенном режиме».

О причинах адвекции алмазоносных масс и структурах их доставки. Причины и условия, побуждающие подниматься к поверхности алмазоносные мантийные массы Земли, исследованы недостаточно. Принимаемую рядом исследователей модель, в которой алмазоносная кимберлитовая магма поднимается с глубин 200–250 км со скоростью нескольких метров в секунду, только так сохраняя алмазы от их уничтожения в расплаве (модель О.Г.Сорохтина), нельзя отнести к реальным. Доставка алмазоносной среды из глубин в виде фрактальной конвективной системы с последовательным снижением вязкости представляется более обоснованной. Однако причина адвекции в связи увеличением вертикальной мощности разуплотненных слоёв, при изменении их угла падения во флексуре (подобно увеличению высоты поплавка), использованная ранее в модели [6], учитывает не все обстоятельства. На адвекцию алмазоносных систем и соответствующую им пространственную периодичность дополнительное влияние оказывает транстенсия.

Возможность подъема кимберлитовой массы («магмы») под действием выталкивающей силы в литературе по алмазоносным кимберлитам принято объяснять «повышенной проницаемостью» среды. Проницаемость считают функцией тектонической раздробленности, трещиноватости, возникающих в области пересечения разломов разного направления. Такой подход нельзя признать достаточно корректным. Проницаемостью в физике и гидрогеологии называют свойство среды, определяемое скоростью фильтрации через неё при градиенте давления. Но кимберлиты не фильтруются, а адвектируются сплошной массой. Речь должна идти об условной вязкости адвектирующей массы и окружающей среды. Разломы в большей степени являются лишь показателями поля напряжений при их образовании, чем путями движения кимберлитовой массы и их вместилищем. Разломы в такой ситуации появляются в конце процесса адвекции масс и после, имея протяжённость, ограниченную размерами зоны транстенсии. При этом в реконструированном поле напряжений зоны или области транстенсии ось наибольших сжимающих напряжений σ_3 может иметь ориентировку перпендикулярную или косую к простиранию гряды трубок, то есть неблагоприятную для приоткрывания разлома, параллельного гряде. Это лишний раз свидетельствует о том, что не разломы контролируют размещение трубок кимберлитов, а адвективные валы, развивающиеся при транстенсии.

Чем выше поднимается флюидизированная протокимберлитовая масса, тем более она расширяется, вновь и вновь компенсируя транстенсию. Происходит не только адвекция, но и дилатансия (расширение при сдвиге), увеличение диаметра трубки, что повышает разуплотнение. Лишь вверху адвективной колонны, когда прочность перекрывающей толщи не способна выдержать флюидное давление, происходит взрыв с образованием раструба (его морфология – это нижняя часть сферы). Трубки кимберлитовых брекчий весьма часто именуют трубками взрыва. Вместе с тем, геологической структурой, согласующейся с взрывом, является только верхняя часть тела в виде раструба (кратера, маара), а нижняя, трубообразная часть (диатрема) формируется до взрыва. Дело в том, что взрыв – весьма быстрое высвобождение свободной энергии с увеличением объёма, образует сферическую волну детонации [22]. Трубка не согласуется с этой волной. На морфологию трубок могут оказывать влияние разломы, но они не превращают их в протяжённые дайки. С волной детонации согласуются круглые или овальные в плане кратеры, где контакты кимберлитов имеют относительно пологие падения. Морфология трубки больше всего отвечает адвекции, подобно её выражению в тектонофизическом эксперименте (см. рис. 2, Г).

Дальнейшее обсуждение геодинамики и тектоники алмазоносных систем продолжим вместе с рассмотрением конкретных примеров их структур.

Элементы структур алмазоносных систем, их геодинамическая сущность и проблемы минерагенической таксономии. Проблемы таксономии неразрывно связаны с размерами, морфологией и структурой объектов. Они могут найти частичное решение при анализе генетической сущности объектов с позиций геодинамики. Объем понятия алмазоносное поле нельзя признать устоявшимся, который мог бы удовлетворять терминологии общей минерагении [20]. «Терминологическая опасность для науки – все равно, что туман для мореплавания», гласит крылатая фраза. Поэтому начнем с анализа геодинамики структурных элементов территорий, которые традиционно относят к алмазоносным полям.

Накынское поле (Якутия). Поле интересно тем, что для него, одного из немногих, была установлена важная роль сдвиговой тектоники и сопряжённой с ней транстенсии, предложена тектонофизическая интерпретация разрывной структуры [18]. Учитывая возникающее при транстенсии преобразование поля напряжений, предлагаем модель тектонофизического развития структурных элементов (рис. 4), несколько отличную от их интерпретации, данной П.И.Игнатовым. Основу структуры поля представляет зона транстенсии вдоль Диагонального разлома, возникшая за счёт левых сдвиговых усилий вдоль Ботуобинского разлома. Принимая за первичное поле напряжений то, которое было на северо-востоке Ботуобинского разлома (см. рис. 4, А, врезка а), мы вправе ожидать изменение осей напряжений при возникшей транстенсии (см. рис. 4, А, врезка б). При этом уменьшение всестороннего давления и за счёт этого возрастание касательных напряжений, достигающих предела длительной прочности кривой, «огибающей большие круги Мора» (см. рис. 4, А, врезка в), приводят к развитию новых разломов с соответствующими направлениями перемещений. С намеченной тектонофизической картиной вполне согласуются общие и частные черты структуры Накынского поля. Главной чертой является то, что вдоль линейной зоны транстенсии образовалась гряда кимберлитовых тел. Основными структурными элементами для неё явились не дайки в разломах, а трубки. Вместе с тем в Мархинском и Ботуобинском телах имеют место элементы жилообразной морфологии. Кроме того, трубка Майская после своего образования была смещена по близмеридиональному разлому как по левому сдвигу, входящему в зону Диагонального разлома (см. рис. 4, А, врезка г). Прерывистость его простирания может быть связана с близширотными правыми сдвигами. Эти новообразованные разломы, вероятно, потому и короткие, что зона транстенсии имеет ограниченную ширину.

Периодичность появления кустов трубок в пространстве имеет место, но осложнена наличием трещинных структур. Сближенные тела Д-96 и Ботуобинское с расстоянием между ними около 0,5 км следует рассматривать в составе одного куста. При этом одно из тел, используя трещину при внедрении, «размывает» чёткость длины волны в адвективной системе. Позиция жильного тела Мархинское может отвечать дополнительному телу, подобно полученному в тектонофизическом эксперименте в качестве поднятия второй генерации на расстоянии в полволны от волны периодичности трубок (см. рис. 2, Г). Появление трубок второй генерации можно считать вполне естественным. При адвекции в ограниченном, стеснённом пространстве появляются волновые гармоники более высокого порядка, приводящие к эффекту, который в теории нелинейных волн называется «инверсионной заселённостью». Это приводит к образованию сближенных и слившихся трубок в кустах. Если учесть отмеченные осложнения общей структуры, то выявится картина, характерная для кустов трубок в иных полях, а именно чередование с длиной волны около 2,7 км между кустами: однотрубочным Нюрбинским, «двухтрубочным»

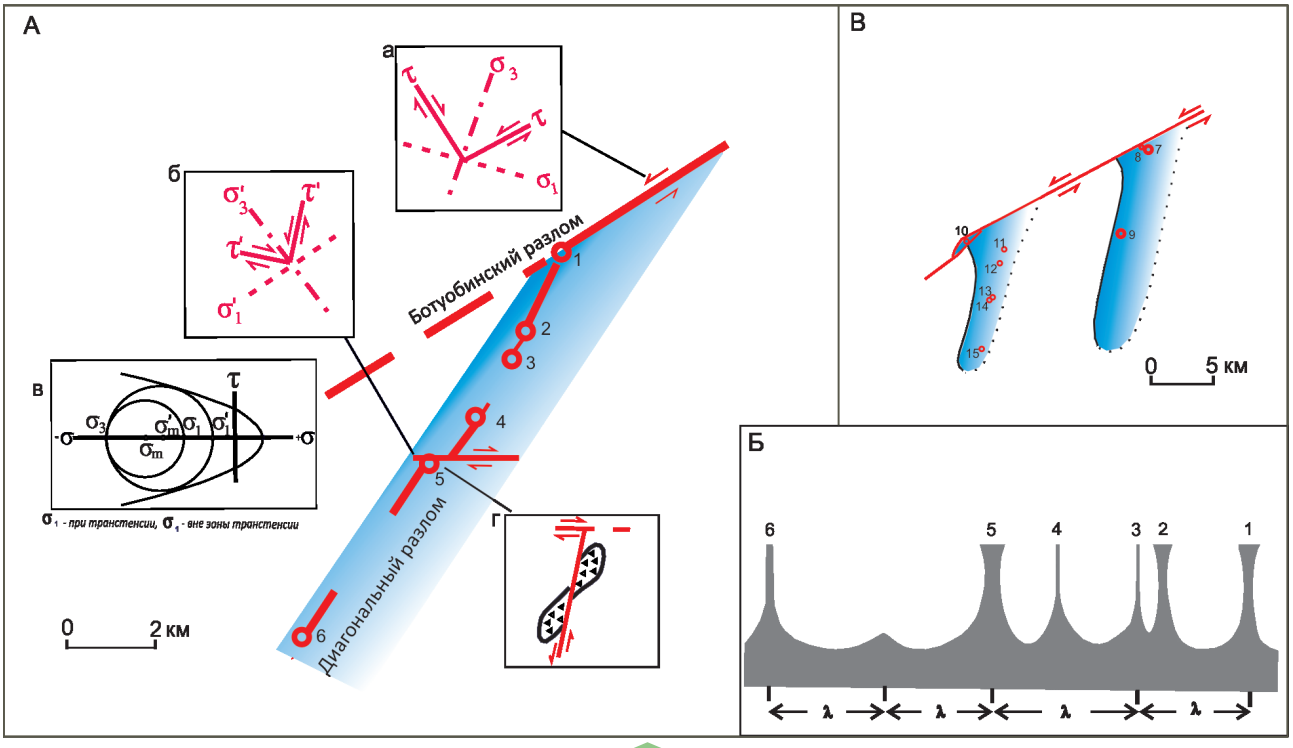


Рис. 4. Схема структуры и геодинамики алмазоносных полей Накынско-Мирнинской минерагенической зоны. *Составлена с использованием материалов* [18, 24]**:**

А – Накынское поле: цветом выделена проекция зоны транстенсии с её максимальной интенсивностью (тёмная часть); стрелки на разломах – направление сдвиговых усилий; врезки: а, б – поля тектонических напряжений: а – первичного, б – вторичного, преобразованного в зоне транстенсии, в – диаграмма Мора (огибающая большой круг – предел прочности); главные нормальные напряжения: σ_3 – алгебраически наименьшие (наибольшие сжимающие), σ_1 – алгебраически наибольшие, τ – касательные напряжения (штрихом обозначены напряжения вторичного поля); г – смещения трубки Майской по сдвигам; Б – схема развития гряды кустов трубок кимберлитов с волновой периодичностью (λ – длина волны) на адвективном валу мантийной массы; В – Мирнинский узел с двумя зонами-полями (грядами кустов трубок); кружки – кимберлитовые трубки и уплощённые тела: Нюрбинская (1), Д-96 (2), Ботуобинская (3), Мархинская (4), Майская (5), Озерная (6), Мир (7), Спутник (8), Дачная (9), Интернациональная (10), им. XXIII съезда КПСС (11), Амакинская (12), Ан-21 (13), Южная (14), Таёжная (15)

Д-96-Ботуобинским и Майским. К юго-западу от последнего на расстоянии двух волн (около 5,2 км) расположен Озерный куст. Это даёт основание к заключению, что главным фактором зарождения основания куста служили адвективные ячеи, расположенные по волновому закону через 2,6–2,7 км на валообразном поднятии (рис. 4 Б).

В Мирнинском районе (узле) ситуация напоминает соседство двух полей, аналогичных Накынскому, отстоящих друг от друга на 10 км, содержит близмеридианальный ряд трубок и кустов (см. рис. 4 В). Здесь от линии северо-восточного простирания, соединяющей трубки Интернациональная и Мир, которая соответствует позиции разлома с транстенсией вдоль него, распространены к югу две полосы шириной около 3 км с повышенной мощностью ранепалеозойских толщ [24]. Эти полосы могут отражать зоны транстенсии. К западной полосе приурочены кусты трубок Интернациональный, им.XXIII съезда, Амакинский, Южный, Таёжный, а к восточной – Мирный и Дачный. Расстояния между кустами составляют от 3,2 до 3,7 км в западной полосе, а в восточной 7,3 км, т. е. в два раза больше, отражая, очевидно, две волны.

Отмеченный ряд особенностей тектоники и геодинамики её развития присущ западной части Зимнебережной («Архангельской») минерагенической области, с той лишь разницей, что главными усилиями, обеспечивающими транстенсию, являются правые сдвиговые вдоль нарушений северо-западного направления, а не левые северо-восточные как в Якутии. С учётом продуктивности область может

рассматриваться в качестве суперрайона [6]. Традиционно на этой территории (рис. 5) выделялись алмазоносные поля Золотицкое (на западе), Черноозерское (с трубкой им. Гриба), Верхотинское (к востоку от него). Остальная часть территории относилась к Кепинскому полю. Из рисунка видно, что первые три поля соответствуют определённой зоне транстенсии, а Кепинская территория включает множество таковых.

Золотицкое поле имеет линейную форму с грядой кустов и трубок, подобно Накынскому полю. Оно представлено протяжённой на расстояние 14 км серией трубок, часть которых группируется в кусты, а другую часть составляют уединённые трубки («однотрубочные кусты»). Поле может соответствовать зоне транстенсиии и определяемому ею адвективному валу. От вала поднимается гряда кимберлитовых кустов (с севера на юг): 1) состоящий из трёх тел «трубок»: Первомайской, Белой, Кольцовской; далее однотрубочные: 2) Ломоносовский, 3) Поморский; 4) двухтрубочный Пионерский; 5) трёхтрубочный Карпинский; однотрубочные: 6) Архангельский, 7) Снегурочки. В телах кустов Пионерском и Карпинском присутствуют слившиеся воедино трубки. Расстояние между кустами с первого по пятый составляют по 2,3 км, а далее 1,8 и 2 км. Данные о размещении трубок заимствованы из рисунков работы [13]. Транстенсия способствует образованию разломов, которые влияют на морфологию трубок, вмещая короткие апофизы или приводя к удлинению трубок в плане. Вытянутость в близмеридианальном (север-северо-восточном) направлении имеют трубки Пионерская, Кольцовская, Белая, Поморская. Кроме того, от некоторых из трубок отходят апофизы в том же направлении (в трубках Снегурочка, Архангельская, Карпинского I, Карпинского II, Первомайская) [1]. При общем близмеридианальном простирании зоны кустов имеют место «скачки» её северных отрезков к западу, а южных к востоку. Это может указывать на возможные близширотные левые сдвиги или подобный по морфологии кулисообразный ряд зон транстенсии. При этом в близширотной гряде лишь трубка Октябрьская имеет слабовыраженное удлинение в этом направлении, а остальные тела изометричны. Из этого следует, что разломы не контролируют размещение трубок и кустов, а развиваются после их образования, отражая лишь поле напряжений в зонах транстенсии.

Общая структура всех полей даёт основание предполагать наличие общей транстенсии на территории Зимнебережного района. Транстенсия может быть связана с крупным правосторонним сдвигом северо-западного простирания, проходящим вдоль прямой линии, которая ограничивает с северо-востока Кольский полуостров, с юго-запада Мезенскую губу, уходит к юго-востоку вдоль нижнего течения р. Мезень, далее р. Вашка. К юго-западу от такого сдвига ширина зоны транстенсии может составить не менее 200 км, способствуя развитию кустов и трубок. На юге с ней же, вероятно, связаны киммеллититы Ижмозерского поля. В такой обстановке на территории Зимнебережного района в области транстенсии ось главных нормальных напряжений σ_1 генерализованного поля напряжений будет ориентирована в северо-западном направлении, а траектории максимальных касательных напряжений τ_{max} ориентированы в близмеридианальном (правые сдвиги) и близширотном (левые сдвиги) направлениях. Помимо сдвигов в них могла присутствовать обстановка растяжения и транстенсия.

Изложенное позволяет вернуться к обсуждению проблемы таксономии. Существующая систематизация алмазоносных таксонов недостаточно учитывает геодинамику как алмазообразования, так и подъёма глубинных масс к поверхности Земли. Подъём происходит во фрактальной системе, когда на одном поднятии вырастает серия более мелких, а на каждом из них – серия ещё более мелких, заканчивающихся трубками, сопровождаясь последовательным снижением вязкости во фракталах. При минерагеническом анализе желательно определять, какому фракталу генетически детерминированной системы соответствует таксон определённого масштаба. В то же время в минерагенической таксономии присутствуют другие таксоны, выделенные по чисто прагматическому принципу, соответствующие системы которого не обладают закономерностями структуры и размещения первых. Рассмотрим таксоны от мелких фракталов системы к крупным.

В.И.Ваганов отмечал, что разработке прогнозно-поисковой модели куста «уделялось явно недостаточно внимания» [12] При этом к единому кусту относилась вся Золотицкая группа трубок, которую мы (как и ранее А.Д.Харькив, В.К.Гаранин) представили в качестве поля-зоны, или серии ячей на адвективном валу. Рассмотрим проблему подробнее. Соотношение куста и трубки может быть разным. На одной адвективной ячее, определяющей куст, может вырасти две, даже три сближенных или слившихся трубки, при адвекции дающие апофизы в разломы, например, тела Пионерская, им. Карпинского-2 в Золотицком поле, Айхал в Якутии. Именно такому кластеру трубок более всего подходит термин куст (по аналогии с кустом смородины с одним или сближенными корнями). Трубки в кусте могут объединяться в единое с пережимами уплощённое тело. Позицию куста в ряде случаев может занимать всего

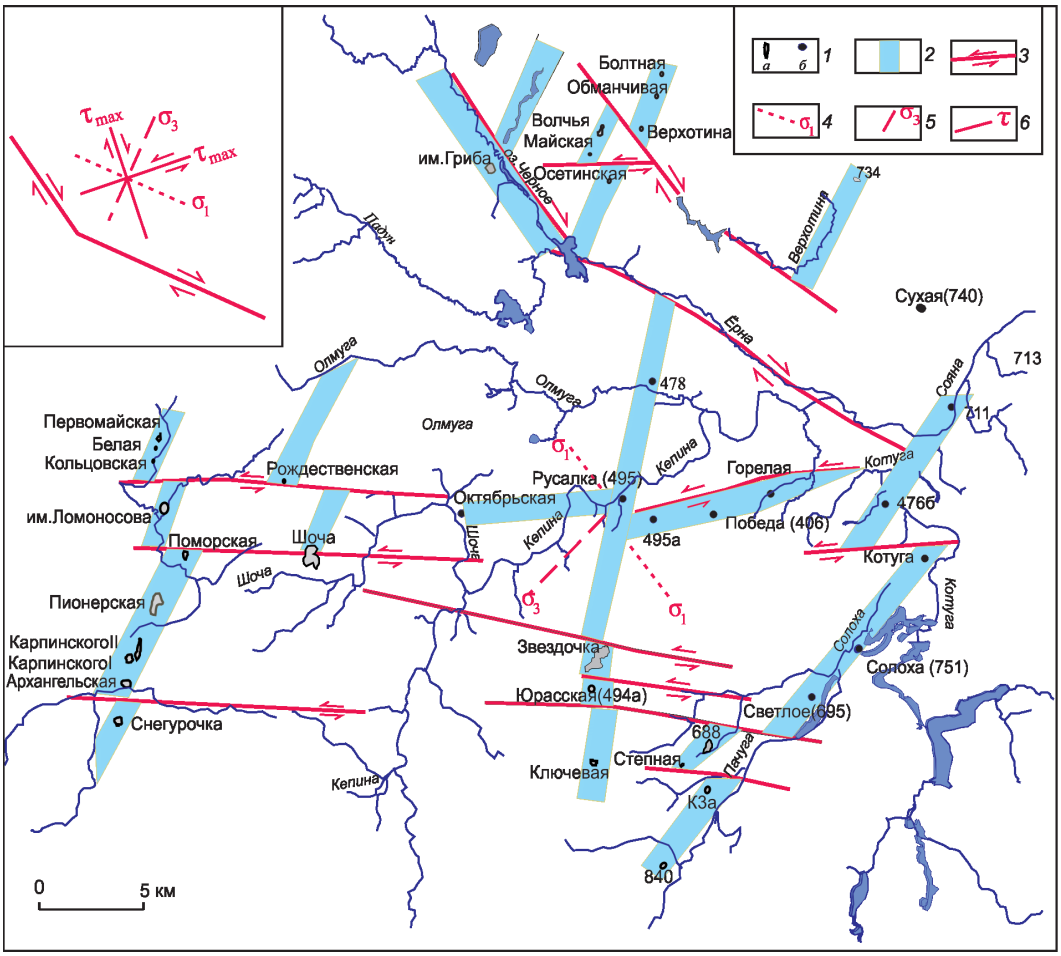


Рис. 5. Схема структуры и геодинамики Зимнебережного алмазоносного суперрайона. *Составлена с использованием материалов* [1, 13]**:**

1 – кимберлитовые тела с указанием их морфологического контура (*а*) и без (*б*); *2* – проекции зоны транстенсии в фундаменте (в условных границах); *3* – разломы и направление сдвиговых усилий: *4–5* – траектории осей главных нормальных напряжений: *4* – алгебраически наибольших («растягивающих»), *5* – алгебраически наименьших (наибольших сжимающих); *6* – траектории наибольших касательных напряжений; на врезке: схема поля напряжений при транстенсии, возникшей в результате правосдвиговых усилий по разлому р. Ёрна вблизи трубки им. Гриба

лишь одна трубка («однотрубочный» куст). Такое деление мелких алмазоносных таксонов необходимо принять. Иначе, изучая волновую периодичность размещения, мы будем измерять расстояния между системами разного масштаба. Куст – аналог месторождения, а в нём отдельные трубки как рудные тела, имеющие природные ограничения. Не всегда такой принцип используется на практике. В Золотицком поле месторождение им. Ломоносова включает серию удалённых трубок, объединённых вместе по экономическим соображениям. Экономический принцип не соответствует минерагеническому, учитывающему геодинамику.

Изложенный материал показывает, что для всех территорий Якутии и Архангельской области характерной чертой кимберлитовых кустов является их периодическое повторение вдоль линий через расстояния порядка 2–3 км или кратное ему. Учитывая трубчатую, а не дайковую морфологию тел, можно утверждать, что данное явление обусловлено волнообразным размещением ячеистых поднятий на линейном адвективном валу. Процесс связан, прежде всего, с декомпрессией и дилатансией поднимающихся кимберлитовых флюидолитов в обстановке транстенсии до вулканического взрыва. То есть зарождение куста фиксирует обстановку адвекции,

соответствующей переходу от первого критического числа Рэлея ко второму. Этот физический рубеж, или синергетическая точка бифуркации, в смене типа структур адвекции (линейной на ячеистую), то есть новой закономерности в размещении трубок, вполне заслуживают того, чтобы принять за переход минерагенических таксонов от поля (зоны) к кустам трубок (ячей). Иначе говоря, термин куст не следует применять, если серия трубок образует гряду протяжённостью более 3–4 км.

Особую проблему в минерагеничекской таксономии алмазоносных систем вызывает подход к выделению алмазоносного поля и вытекающая из этого его сущность. Например, В.И.Ваганов [12] алмазоносное поле определил как естественную группировку пространственно сближенных кимберлитовых тел, связанных происхождением с единой вертикальной «стволовой» зоной повышенной проницаемости (флюидно-магматической колонной). В качестве примера предложил Алакит-Мархинскую территорию протяжённостью 80 км, которая в центре обладает минимальной температурой с двумя максимумами по сторонам.

Другой принцип использован при разделении области Зимнего берега на территории с эндогенными образованиями разных петрохимических серий железо-титанистой в Кепинском, Черноозерском, глиноземистой в Золотицком и Верхотинском полях [13, 28]. При этом независимо от петрохимии пород месторождения присутствуют в Золотицком (им. Ломоносова) и Черноозерском (им. Гриба), а убого алмазоносные в других полях обладают столь же разной петрохимией. Такое деление правомерно и интересно, но присвоение территориям статуса алмазоносного поля не для всех территорий приемлемо, прежде всего, по их размерному параметру. Например, Кепинское поле имеет площадь порядка 1200 км^2, Черноозерское около 240 км^2 [13]. Такие площади нарушат масштабный подход к объектам в прогнозно-поисковых работах, основательно противореча параметрам рудного поля. В Словаре [27] рудное поле определяется как рудоносная площадь с месторождениями, объединёнными общностью происхождения и единством геологической структуры. Площадь рудных полей колеблется от нескольких до десятков км^2.

В существующей таксономии алмазоносных объектов недостаточно используется критерий, позволяющий более определённо связать структуру вмещающей среды с локализацией алмаза. Указание на пересечение разломов как на повышенную проницаемость недостаточно. Для традиционного алмазоносного поля типа Кепинского более подходит наименование узел или алмазоносный район как сочетание нескольких зон-полей размером до 10–15 км, в каждом из которых присутствуют кусты трубок, закономерно чередующиеся вдоль одного или нескольких направлений. Это не противоречит принципу общей минерагенической таксономии при объединении сближенных полей в узел или район [6, 20]. То есть в качестве основного геодинамического фактора образования алмазоносного поля надо признать транстенсию, а её выражением структуры пулл-апарт в сочетании с системой разрывов, характерных для её поля напряжений на территории с протяжённостью до 10–15 км.

Сложную структуру распределения кустов кимберлитовых трубок имеет Далдыно-Алакитский район Якутии. Территории, названные Далдынским (30×35 км) и Алакитским (25×40 км) алмазоносными полями, по своим размерам соответствуют двум или более узлам, а внутри них кластеры трубок могут объединяться в поля со своими контролирующими их структурными элементами (рис. 6). Узлы характеризуются сочетанием нескольких зон разного простирания, вдоль которых размещаются гряды трубок. Общая площадь такого сочетания может быть ограничена условным овальным контуром. Его природа точно не определена. Вероятнее всего, она соответствует начальным фазам ячеистой адвекции, подобно гнейсовым куполам. По размерам и продуктивности территория этих двух узлов вполне удовлетворяет требованиям, чтобы отнести её к суперрайону [6]. Здесь намечаются три главных направления линеаментов: северо-восточного и близмеридианального простирания, по которым происходят левые сдвиги (подобно Накынскому полю), и близширотные с неясной геодинамикой. Длина волны между кустами меняется, но даёт статистический максимум около 3 км, что сходно с иными рассмотренными полями.

Узлы образуют гряды вдоль крупных линейных зон, которые соответствуют понятию «минерагеническая зона». Наиболее ярким их примером служит Далдыно-Оленёкская зона, простирающаяся по азимуту 34° на северо-востоке и примерно 40° на юго-западном (Чадобецко-Далдынском) продолжении, имея среднюю ширину около 100 км (рис. 7). К юго-востоку от неё проходит аналогичная Накынско-Мирнинская зона, имеющая азимут простирания 33° на северо-востоке и примерно 41° на юго-западном своём продолжении. Это изменение простирания зон приводит к важным следствиям. При левых сдвиговых усилиях в их северо-восточных частях создаётся обстановка транстенсии, подобно pull-apart. Именно к этим северо-восточным отрезкам зон приурочены многочисленные кимберлитовые поля. Кроме того, в этой обстановке естественно появление иных зон транстенсии, где северо-восточные левые сдвиги сочетаются с нарушениями близ-

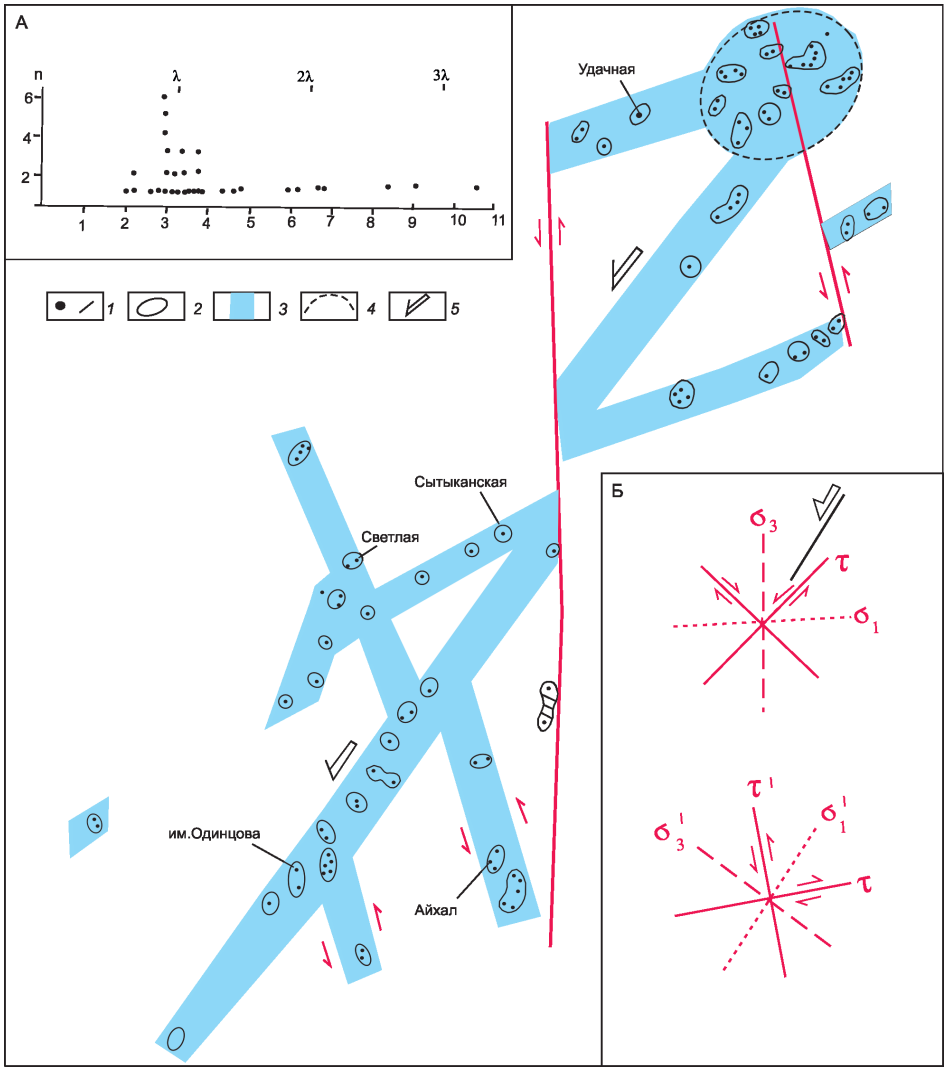


Рис. 6. Схема структуры и геодинамики Далдыно-Алакитскго суперрайона Якутии. *Составлена с использованием материалов* [19, 30]**:**

1 – трубки (а), дайки (б); условные контуры: *2* – кустов трубок, *3* – зон транстенсии, *4* – алмазоносного поля трубки Зарница; *5* – направление сдвиговых перемещений в Далдыно-Оленёкской зоне; см. условн. обозн. к рис. 5; врезки: А – гистограмма расстояний между кустами трубок (*n* – число наблюдений, λ – длина адвективной волны), Б – схема полей напряжений: вверху первичного, внизу вторичного, обусловленного транстенсией при левосдвиговых усилиях вдоль Далдыно-Оленёкской зоны

меридианального простирания. Судя по тектонике Анабарского щита, в архейских толщах много разломов север-северо-западного (близмеридианального) простирания. Их наследование вполне могло обеспечить транстенсию, определившую адвекцию глубинных алмазоносных масс. Это и привело к появлению многочисленных кимберлитовых полей в Муно-Попигайской зоне с азимутом её простирания около 335°. Весьма примечательно, что к югу от Мунского поля, там, где могла продолжаться эта зона, между Далдыно-Оленёкской и Накынско-Мирнинской зонами, алмазоносных кимберлитовых полей не установлено. И не случайно. Промежуток между этими зонами соответствует той части мантии, куда не доходили зоны субдукции с алмазоносными массами (см. рис. 2, А). То есть транстенсия здесь может быть, но отсутствуют разуплотнённые массы с экзогенным источником алмаза, принудительно погруженные при субдукции. Наоборот, наиболее погруженные части зон субдукции при инверсии, инициированной восходящей ветвью конвекции, и последующей адвекции превращаются

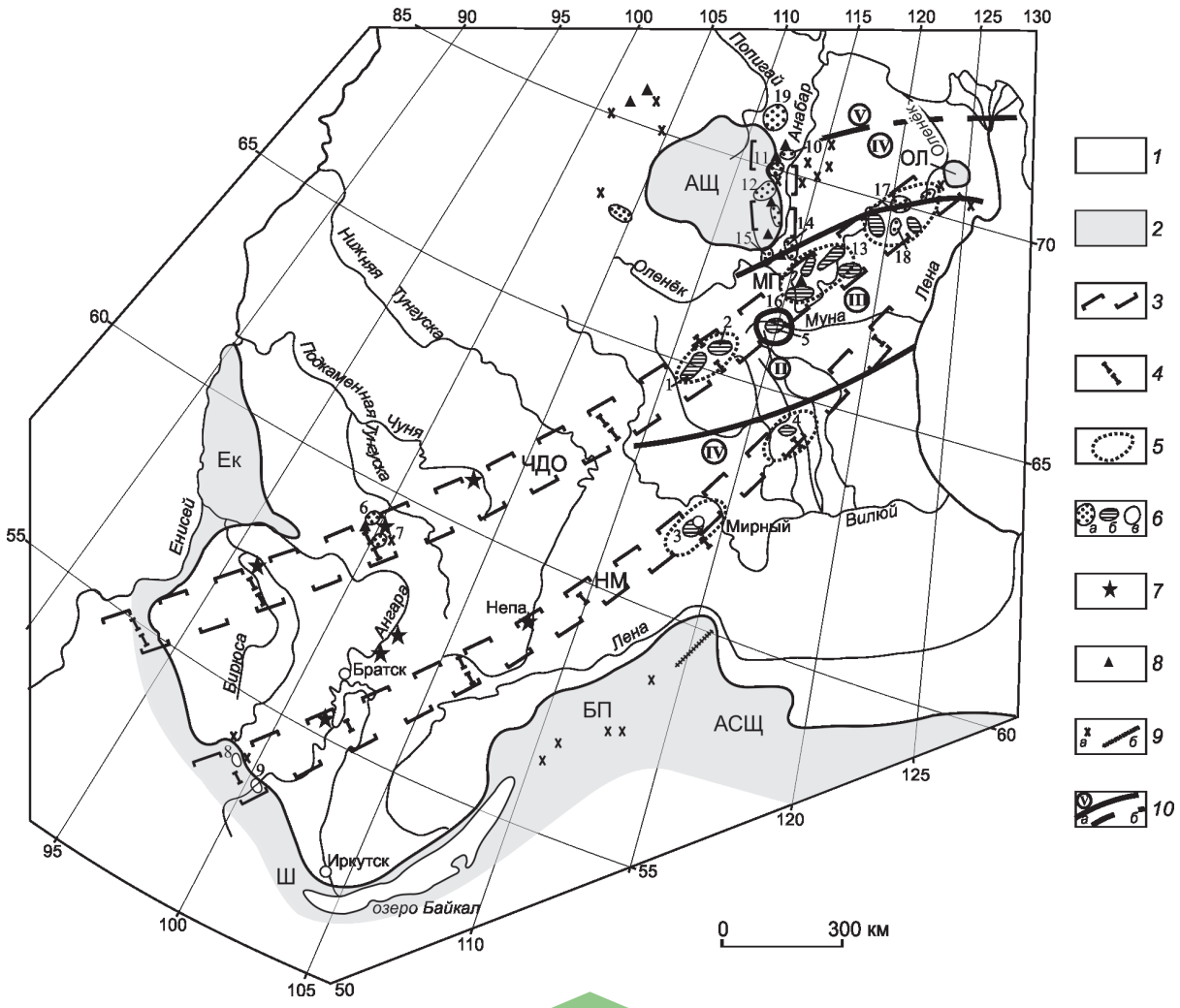


Рис. 7. Схема позиции и структуры Якутской минерагенической провинции в Сибирской мегапровинции:

1 – чехол Сибирской платформы; *2* – области выходов архей-раннепротерозойских гранулитов и гранит-зеленокаменных блоков (щиты и их фрагменты): Анабарский (АЩ), Оленёкский фрагмент (ОЛ), Алдано-Становой (АСЩ), Шарыжалгайский (Ш), фрагмент Енисейского кряжа (Ек); Байкало-Патомский шарьяж докембрийских толщ (БП); *3* – контуры минерагенических зон: Чадобецко-Далдыно-Оленёкской (ЧДО), Накынско-Мирнинской (НМ), Муно-Попигайской (МП); *4* – наиболее благоприятная позиция для проявления адвекции мантийных масс в минерагенических зонах при длине волны λ≈300 км; *5* – приблизительные контуры суперрайонов; *6* – контуры алмазоносных районов и полей с кимберлитами и родственными породами мезозойского (*а*), палеозойского (*б*), допалеозойского (*в*) возрастов: (Алакит-Мархинского (1), Далдынского (2), Мирнинского (3), Накынского (4), Мунского (5), Тайчикуно-Нембинского (6), Чадобецкого (7), Белозиминского (8), Окинского (9); Орто-Ыаргинского (10), Нижнекуонапского (Староречeнского (11), Среднекуонапского (12), Восточно-Укукитского (13), Западно-Укукитского (14), Куранахского (Малокуонапского) (15), Чомурдахского (16), Куойского (17), Молодинского (18), Попигайского (19); *7* – присутствие алмазов в аллювии; *8* – тела карбонатитов; *9* – тела щелочного и щелочно-ультраосновного составов: *а* – массивы, *б* – пояс даек лампрофиров средне-позднекаменноугольного возраста; *10* – условные границы зон, в которых главные популяции алмаза из тел кимберлитов (*а*) и из россыпей (*б*) характеризуются наиболее высокими (II), промежуточными (III, IV) и относительно низкими (V) температурами образования

в минерагенические зоны. Их удлинённая морфология свидетельствует о валообразной адвекции (при первом критическом числе Рэлея), то есть малой величине неустойчивости, а отсюда малой скорости подъёма. Но на адвективном валу появлялись волнообразные короблення, подобно тому, как в тектонофизической модели адвекции в начальные её фазы (см. рис. 2, Г). Об этом же свидетельствуют всплески кимберлитового вулканизма или проявления их признаков (алмазы в россыпях) через сходные расстоя-

ния около 300 км. Примером тому служат расстояния между суперрайонами Мирнинский и Накынский в Якутии, серединами областей Зимнего и Терского берега в Европе и иные [6, 10]. С учётом этого в 300 км к юго-востоку от Зимнего берега можно предполагать наличие проявлений кимберлитового вулканизма, скрытых под карбон-триасовыми толщами в бассейне р. Пинега (см. рис. 8). При чередовании других фракталов длина волны будет заведомо меньшей: в процессе развития адвекции и подъёме алмазоносной массы к основанию алмазоносных узлов порядка 60 км, а между полями порядка 10–15 км или при иной длине волны. На этих стадиях процесса конвекции (адвекции) возрастает неустойчивость системы, превышая первое R_1 критическое число Рэлея, но ко второму числу R_2 приближается лишь при адвекции от основания кустов в виде трубок, то есть при длине волны порядка 2–4 км.

Крупные фракталы алмазоносной системы, зарождающиеся в связи с волновым развитием адвекции, но при относительно малых амплитудах волн, могут быть оконтурены только условно в соответствии с присущей им длиной адвективной волны, если не имеется убедительного материала по конкретным проявлениям кимберлитов с алмазами. Обратим внимание на некоторые особенности наиболее крупных систем, а именно провинций, их позицию, геодинамическую сущность в тектонике платформ.

В существующей алмазоносной таксономии термин провинция чрезвычайно расплывчат. Провинция обычно сопоставляется с территорией платформы [12], но при этом порой рассматривается в масштабах всего континента (Африка), а в других случаях провинцией называют весьма малую часть платформы («Архангельская алмазоносная провинция») [1, 11]. Как показано в начале статьи, алмазоносной минерагенической провинции соответствует та часть платформы, которая расположена над одной из нескольких конвективных ячей фундамента платформы, при развитии которой в связи с субдукцией произошло образование алмаза. Этим минерагеническая провинция отличается от просто алмазоносной, на территории которой могут присутствовать алмазы в россыпях, принесённые издали. Минерагеническая алмазоносная провинция может быть оконтурена по проявлениям карбонатитов с УЩК, которые в её зональной структуре занимают периферическую позицию [9].

Провинциальный ранг минерагенических таксонов по их размерам предлагается делить на три условные категории: первая – минерагеничские мегапровинции с размером 2–3 тыс. км (Сибирская, Восточно-Европейская платформы); вторая – минерагенические провинции размером. 0,8–2 тыс. км (Беломоро-Северодвинская, Якутская). Они входят в мегапровинции как их составные части, например, в Восточно-Европейскую мегапровинцию входит Беломоро-Северодвинская (рис. 8) и расположенная к западу от неё алмазоносная Висла-Ботническая провинции [10]. Сибирскую платформу (мегапровинцию) чаще рассматривают как минерагеническую провинцию [12]. Однако другие знатоки алмазной геологии выделяли в ней на северо-востоке Якутскую алмазоносную минерагеническую провинцию [16, 31]. Западная часть платформы выделится в провинцию Тунгусской синеклизы, а на юге Ангарскую. Разделение мегапровинций и провинций важно тем, что, проводя прогнозно-минерагенические исследования, необходимо учитывать, что в фундаменте платформ находятся образования разных конвективных ячей со своими особенностями минерагении и между ячеями нет оснований ожидать наличия алмазов в трубках кимберлитов.

Третья категория провинциального ранга таксонов – минерагенические субпровинции размером 400–600 км. К ним относится особый тип алмазоносных систем с очень мелкими алмазами, рассеянными в апоосадочных метаморфических толщах (месторождение Кумды-коль, Северный Казахстан). Особенность субпровинции не только в вещественном составе алмазоносной среды и типе алмазов, но и в позиции. Тенгизская субпровинця (названа по наименованию озера в её центре) расположена на севере Казахстанской провинции, которая не является платформенной. Ордовикские толщи с алмазами фактически являются фундаментом по отношению к среднепалеозойской ячеистой провинции. Особенности субпровинции, сочетающие взаимосвязь её размера (0,5–0,6 тыс. км), глубины субдукции и времени развития, повлиявшие на главные черты алмазной минерагении, рассмотрены ранее [3]. Проблемы образования алмаза из его источника напрямую связаны с проблемами происхождения фундамента минерагенических провинций и субпровинций.

Последующий транспорт алмаза вверх происходит сначала в крупных структурах. Среди них главную роль играют линейные адвективные поднятия (валы), признаки которых фиксируются по минерагеническим зонам. Такие зоны располагаются параллельно и вблизи длинной оси эллипсовидного контура провинции: в Якутской провинции имеют северо-восточное простирание, а в Беломоро-Северодвинской – северо-западное. В зависимости от простирания первые две зоны левосдвиговые, а вторые две правосдвиговые. Правосдвиговые усилия вдоль нарушений северо-западного простирания приводят к транстенсии, в которой образуются близщи-

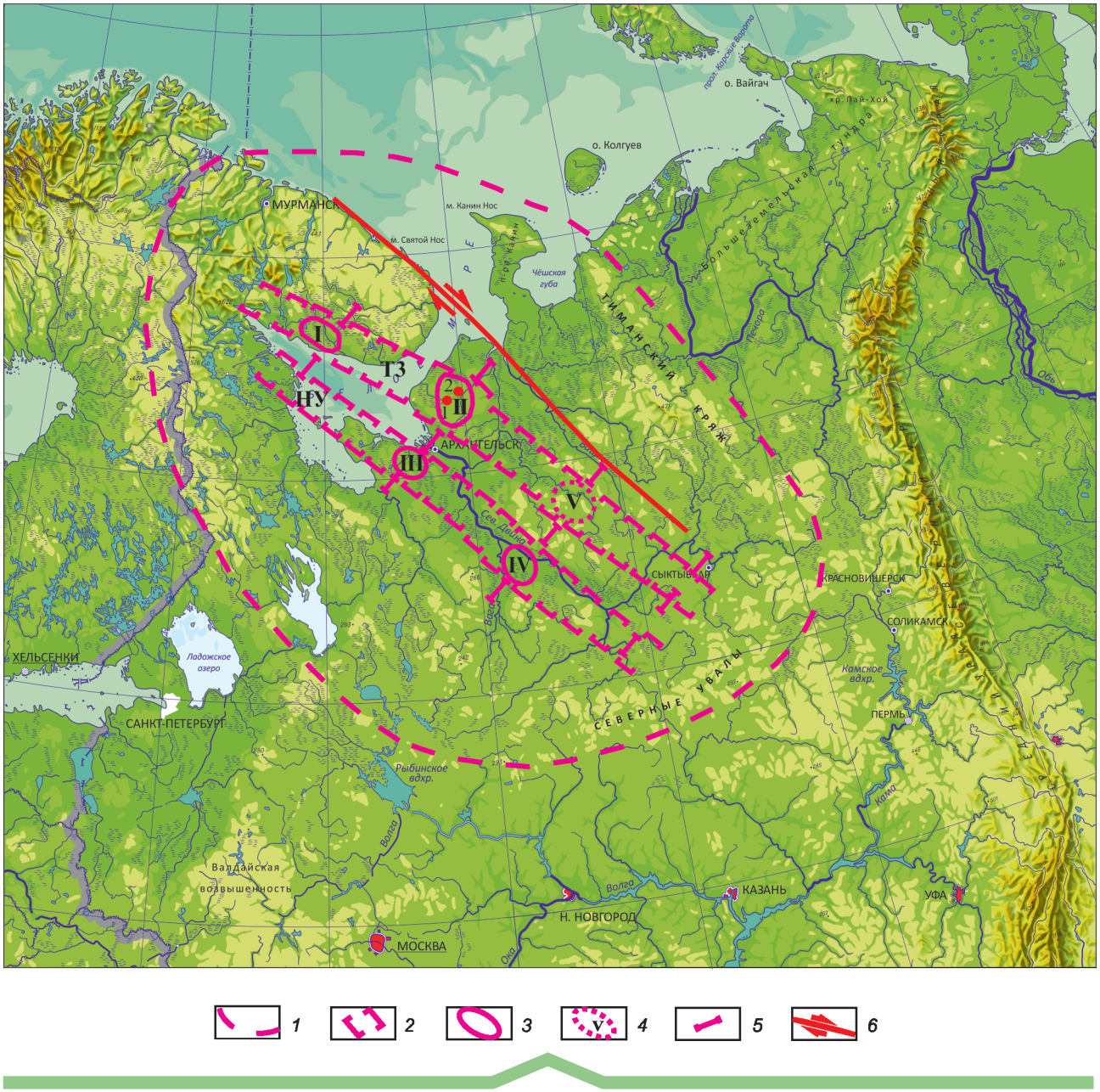


Рис. 8. Схема позиции и структуры Беломоро-Северодвинской минерагенической провинции:

1 – контур провинции; *2* – минерагенические зоны: Терско-Зимнебережная (ТЗ), Нёнокско-Устьянская (НУ); *3* – контуры алмазоносных районов и суперрайонов: Терского (I), Зимнебережного (II) с месторождениями им. Ломоносова (1) и им. Гриба (2), Нёнокского (III), Устьянского (IV); *4* – позиция прогнозного района (V) под карбон-триасовой толщей; *5* – наиболее благоприятная позиция для проявления адвекции мантийных масс в минерагенических зонах; *6* – сдвиг, инициирующий транстенсию в Зимнебережном суперрайоне

ротные левые и близмеридианальные правые сдвиги. Это отчётливо отражается на резких поворотах коротких близмеридианальных и близширотных отрезков рек Северная Двина, Пинега (кроме низовий), имеющих в целом северо-западное направление русел. Они же, как показано выше, намечены в Зимнебережном районе по смещениям гряд кустов в алмазоносных полях.

Примечательно и другое. Минерагенические зоны образуют пары. В Якутии это Далдыно-Оленёкская и Накынско-Мирнинская, а в Беломоро-Северодвинской провинции – Терско-Зимнебережная и Нёнок-

ско-Устьянская. Каждую пару вместе с разделяющей их зоной предложено выделять в качестве минерагенического пояса или мегапояса: Кандалакшско-Двинский пояс в Беломоро-Северодвинской провинции, Усть-Илимск-Нижнеленский мегапояс в Сибирской мегапровинции [10]. При этом обе минерагенические зоны Усть-Илимск-Нижнеленского мегапояса при левых сдвиговых усилиях создают обстановку транстенсии по механизму пулл-апарт там, где их простирание отклоняется в сторону меридиана. Кроме того, позиция каждой из минерагенических зон фиксирует глубинный контрастный переход нисходящих мантийных масс краевых зон субдукции в восходящие движения центральной (осевой) части конвективной системы. Зона восходящих масс между минерагеническими зонами характеризуется двумя особенностями. Во-первых, в ней отсутствуют алмазоносные кимберлиты, что уже отмечалось выше по ситуации к югу от Мунского поля, обладающего наиболее глубинными в Якутии алмазами [10]. Во-вторых, в Беломоро-Северодвинской провинции её осевая зона характеризуется рифтогенезом, который за счёт изостатической компенсации восходящего притока плотных глубинных масс приводит к углублению дна Белого моря вдоль Кандалакшской губы. Массы осевой зоны блокируют зоны субдукции, подходяшие к ним с двух сторон, вовлекают их в восходящий поток первичную геодинамическую основу доставки алмаза главных минерагенических зон провинции.

Последующие сдвиговые усилия или перемещения по главным зонам создают обстановку пулл-апарт, которая способствует развитию транстенсии и развитию структур близмеридианального простирания. Такой обстановке соответствует Мунско-Попигайская алмазоносная минерагеническая зона Якутии. Примечательно, что именно в этой зоне кимберлитовый вулканизм начался лишь в мезозое, тогда как в основной зоне Далдыно-Оленёкской, в которой сдвиговые усилия определили начальное развитие транстенсии, кимберлитовый вулканизм проявился уже в среднем палеозое. Очевидно, что адвекция в Далдыно-Оленёкской зоне началась раньше, и это связано с тем, что подъём алмазоносных масс развивается сначала рядом с восходящими массами конвективной ячеи, с которой были связаны зоны субдукции. Транстенсия наступает позже, при сдвиговых усилиях, способствуя всё больше и больше адвекции глубинных масс по мере их подъёма.

Итак, в сложнейшей от природы геологии алмаза, скрытой на больших глубинах от наблюдателя, геодинамический подход позволяет ближе подойти к решению многих проблем минерагении, к генезису не только алмазов, но и карбонатитов, находящихся в определённых соотношениях с ними. Построение моделей доставки алмаза из глубин, включая причины, условия их подъёма, структуру транспортирующей системы, необходимо сопровождать тектонофизическим анализом. Такой анализ помогает не только глубже познать сущность исследуемого объекта, но и уберечь от неоправданных допущений, например, предположений о наличии алмазоносных кимберлитов во внешнем контуре зоны карбонатитов Сибири. Исследование геодинамики фрактальной структуры алмазоносных систем даёт возможность совершенствовать их минерагеническую таксономию и конкретизировать её терминологию, используемую в прогнозно-поисковых целях при районировании территорий и применении критериев прогноза. К одному из них относится критерий пространственной периодичности алмазоносных систем, имеющий под собой волновую геодинамическую основу и выражение в реальной геологии. Его, особенно в отношении кустов трубок, следует шире использовать в практике, учитывая при этом возможные естественные осложнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андросов Е.А., Вержак В.В., Ларченко В.А., Минченко Г.В.* О структурном контроле размещения кимберлитовых тел (на примере Архангельской алмазоносной провинции) // Геология алмазов – настоящее и будущее. – Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 2005. – С. 31–43.
2. *Атлас* офицера. – М.: Военно-топографическое управление, 1974. – 394 с.
3. *Барышев А.Н.* Иерархия конвективных геологических систем и их минерагеническое значение // Отечественная геология. – 2017. – № 1. – С. 19–27.
4. *Барышев А.Н.* О критериях сопряженности трещин при реконструкции тектонических полей напряжений // Известия АН СССР серия геологическая. – 1979. – № 10. – С. 145–150.
5. *Барышев А.Н.* Периодические геодинамические и металлогенические системы, их развитие и взаимодействие. – М.: ЦНИГРИ, 1999. – 263 с.
6. *Барышев А.Н.* Периодическое размещение алмазоносных систем и смежные проблемы геологии алмазов // Отечественная геология. – 2006. – № 6. – С. 20–35.
7. *Барышев А.Н.* Субдукция и проблемы ее палеореконструкций // Отечественная геология. – 2004. – № 2. – С. 50–62.
8. *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.

9. *Барышев А.Н., Хачатрян Г.К.* Минерагеническое и геодинамическое значений типов популяций алмаза // Отечественная геология. – 2017. – № 6. – С. 3–13.
10. *Барышев А.Н., Хачатрян Г.К.* Минералого-геохимический и геодинамический системный подход к анализу алмазоносности и минерагеническому районированию платформ // Отечественная геология. – 2018. – № 4. – С. 90–103.
11. *Богатиков О.А.,Гаранин В.К., Кононова В.А.* и др. Архангельская алмазоносная провинция. – М.: Изд-во МГУ, 1999. – 522 с.
12. *Ваганов В.И.* Алмазные месторождения России и мира (основы прогнозирования). – М.: ЗАО Геоинформмарк, 2000. – 371 с.
13. *Гаранин В.К, Криулина Г.Ю., Гаранин К.В., Самосоров Г.Г.* Архангельские алмазы. Новые данные. – М.: ИП Скороходов В.А., 2018. – 232 с.
14. *Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975. – 536 с.
15. *Гончаров М.А.* Инверсия плотности в земной коре и складкообразование. – М.: Недра, 1979. – 246 с.
16. *Дукардт Ю.А., Борис Е.И.* Контроль кимберлитового вулканизма Якутской алмазоносной провинции палеорифтовыми структурами // Отечественная геология. – 1996. – № 10. – С. 28–34.
17. *Елисеев Н.А.* Метаморфизм. – М.: Недра, 1963. – 428 с.
18. *Игнатов П.А.* Методы обнаружения скрытых рудоконтролирующих структур в осадочных толщах на примере месторождений урана и алмазов // Фундаментальные проблемы геологи полезных ископаемых и металлогении. – М.: Изд-во МГУ, 2010. – Т. 1. – С. 169–187.
19. *Илупин И.П.* Кимберлиты Якутии – линейное расположение трубок и вещественный состав // Руды и металлы. – 2003. – № 5–6. – С. 60–68.
20. *Обзор* геологических понятий и терминов в применении к металлогении // Под ред. Е.Т.Шаталова. – М.: Изд-во АН СССР. – 1963. – 182 с.
21. *Петрографический* кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. Издание второе, переработанное и дополненное. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2008. – 200 с.
22. *Покровский Г.И.* Взрыв. – М.: Недра, 1973. – 182 с.
23. *Портнов А.М.* Флюидный диапиризм как причина формирования кимберлитовых трубок и карбонатитовых массивов // Докл. АН СССР. – 1979. – Т. 246. – С. 416–420.
24. *Проценко Е.В.* Структурно-тектонические закономерности локализации алмазоносных кимберлитовых полей в пределах Вилюйско-Мархинской минерагенической зоны (Западная Якутия) // Автореф. дисс. … канд. геол.-минер. наук. – М., 2020. – 23 с.
25. *Рамберг Х.* Моделирование деформаций земной коры с применением центрифуги. – М.: Мир, 1970. – 224 с.
26. *Рамберг Х.* Сила тяжести и деформации в земной коре. Перевод с англ. // Под ред. В.В.Белоусова, А.Б.Ефимова. – М.: Изд-во Недра, 1985. – 399 с.
27. *Российский* металлогенический словарь. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2003. – 320 с.
28. *Саблуков С.М.* Вулканизм Зимнего Берега и петрологические критерии алмазоносности кимберлитов // Автореф. дисс. … канд. геол-минер. наук. – М., 1995.
29. *Сычева-Михайлова А.М.* Механизм тектонических процессов в обстановке инверсии плотности горных пород. – М.: Изд-во Недра, 1973. – 136 с.
30. *Харькив А.Д., Зинчук Н.Н. Крючков А.И.* Коренные месторождения алмазов мира. – М.: Изд-во Недра, 1998. – 555 с.
31. *Харькив А.Д., Зуенко В.В., Зинчук Н.Н., Крючков А.И., Уханов В.А., Богатых М.М.* Петрохимия кимберлитов. – М.: Изд-во Недра, 1991. – 304 с.
32. *Хачатрян Г.К.* Азот и водород в алмазах мира как индикаторы их генезиса и критерии прогноза и поисков коренных алмазных месторождений // Автореф. дисс. … д-ра геол.-минер. наук. – М., 2016. – 48 с.
33. *Холодов В.Н.* Песчаный диапиризм – новая сторона катагенетических процессов. Ст. II. Механизм образования и геологическое значение песчаных даек и «горизонтов с включениями» в миоцене Восточного Предкавказья // Литология и полезные ископаемые. – 1978. – № 5. – С. 52–63.
34. *Sharp W.E.* A plate tectonic origin for diamond-bearing kimberlites // Earth and Planetary Science Letters. – 1974. – Vol. 21. – № 4. – P. 351–354.

REFERENCES

1. *Androsov Ye.A.., Verzhak V.V. Larchenko V.A., Minchenko G.V.* O strukturnom kontrole razmeshcheniya kimberlitovykh tel (na primere Arkhangel'skoy almazonosnoy provintsii) [On structural control of the placement of kimberlite bodies (on the example of the Arkhangelsk diamondiferous province)]. Geologiya almazov – nastoyashcheye i budushcheye. Voronezh: Izd-vo Voronezhskogo un-ta publ. 2005. P. 31–43.
2. *Atlas* ofitsera [Officer's Atlas]. Moscow, Voyenno-topograficheskoye upravleniye, 1974. 394 p.
3. *Baryshev A.N.* Iyerarkhiya konvektivnykh geologicheskikh sistem i ikh mineragenicheskoye znacheniye [Hierarchy of convective geological systems and their mineragenic significance]. Otechestvennaya geologiya. 2017. No. 1. P. 19–27.
4. *Baryshev A.N.* O kriteriyakh sopryazhennosti treshchin pri rekonstruktsii tektonicheskikh poley napryazheniy [On the criteria for conjugation of cracks in the reconstruction of tectonic stress fields]. Izvestiya AN SSSR seriya geologicheskaya. 1979. No. 10. P. 145–150.
5. *Baryshev A.N.* Periodicheskiye geodinamicheskiye i metallogenicheskiye sistemy, ikh razvitiye i vzaimodeystviye [Periodic geodynamic and metallogenic systems, their

development and interaction]. Moscow, TSNIGRI, 1999. 263 p.
6. *Baryshev A.N.* Periodicheskoye razmeshcheniye almazonosnykh sistem i smezhnyye problemy geologii almazov [Periodic placement of diamondiferous systems and related problems of diamond geology]. Otechestvennaya geologiya. 2006. No. 6. P. 20–35.
7. *Baryshev A.N.* Subduktsiya i problemy yeye paleorekonstruktsiy [Subduction and problems of its paleoreconstructions]. Otechestvennaya geologiya. 2004. No. 2. P. 50–62.
8. *Baryshev A.N., Khachatryan G.K.* Vliyaniye tektonicheskogo polya napryazheniy na mekhanizm rosta, strukturu almaza v svyazi s obshchey geodinamikoy almazoobrazovaniya. [Influence of the tectonic stress field on the growth mechanism, the structure of diamond in connection with the general geodynamics of diamond formation]. Otechestvennaya geologiya. 2015. No. 12. P. 46– 60.
9. *Baryshev A.N., Khachatryan G.K.* Mineragenicheskoye i geodinamicheskoye znacheniy tipov populyatsiy almaza [Mineragenic and geodynamic values of types of diamond populations]. Otechestvennaya geologiya. 2017. No. 6. P. 3–13.
10. *Baryshev A.N., Khachatryan G.K.* Mineralogo-geokhimicheskiy i geodinamicheskiy sistemnyy podkhod k analizu almazonosnosti i mineragenicheskomu rayonirovaniyu platform [Mineralogical-geochemical and geodynamic systems approach to the analysis of diamond content and mineragenic zoning of platforms]. Otechestvennaya geologiya. 2018. No. 4. P. 90–103
11. *Bogatikov O.A.,Garanin V.K., Kononova V.A.* et al. Arkhangel'skaya almazonosnaya provintsiya [Arkhangelsk diamondiferous province]. Moscow, MGU publ. 1999. 522 p.
12. *Vaganov V.I.* Almaznyye mestorozhdeniya Rossii i mira (osnovy prognozirovaniya) [Diamond Deposits in Russia and the World (Forecasting Basics)]. Moscow, ZAO Geoinformmark publ. 2000. 371 p.
13. *Garanin V.K, Kriulina G.YU., Garanin K.V., Samosorov G.G.* Arkhangel'skiye almazy. Novyye dannyye [Arkhangelsk diamonds. New data]. Moscow, IP Skorokhodov V.A. publ. 2018. 232 p.
14. *Gzovskiy M.V.* Osnovy tektonofiziki [Foundations of tectonophysics]. Moscow, Nauka publ. 1975. 536 p.
15. *Goncharov M.A.* Inversiya plotnosti v zemnoy kore i skladkoobrazovaniye [Density inversion in the earth's crust and folding]. Moscow, Nedra publ. 1979. 246 p.
16. *Dukardt Yu.A., Boris Ye.I.* Kontrol' kimberlitovogo vulkanizma Yakutskoy almazonosnoy provintsii paleoriftovymi strukturami [Control of kimberlite volcanism of the Yakut diamondiferous province by paleorift structures]. Otechestvennaya geologiya. 1996. No. 10. P. 28–34.
17. *Yeliseyev N.A.* Metamorfizm [Metamorphism]. Moscow, Nedra publ. 1963. 428 p.
18. *Ignatov P.A.* Metody obnaruzheniya skrytykh rudokontroliruyushchikh struktur v osadochnykh tolshchakh na primere mestorozhdeniy urana i almazov [Methods for detecting hidden ore-controlling structures in sedimentary strata on the example of uranium and diamond deposits]. Fundamental'nyye problemy geologi poleznykh iskopayemykh i metallogenii. Moscow, Izd-vo MGU publ. 2010. V. 1. P. 169–187.
19. *Ilupin I.P.* Kimberlity Yakutii – lineynoye raspolozheniye trubok i veshchestvennyy sostav [Kimberlites of Yakutia - linear arrangement of pipes and material compositio]. Rudy i metally. 2003. No. 5–6. P. 60–68.
20. *Obzor* geologicheskikh ponyatiy i terminov v primenenii k metallogenii [Review of geological concepts and terms as applied to metallogeny]. Pod red. Ye.T.Shatalova. Moscow, AN SSSR publ. 1963. 182 p.
21. *Petrograficheskiy* kodeks Rossii. Magmaticheskiye, metamorficheskiye, metasomaticheskiye, impaktnyye obrazovaniya [Petrographic Code of Russia. Magmatic, metamorphic, metasomatic, impact formations]. Izdaniye vtoroye, pererabotannoye i dopolnennoye. St. Petersburg, VSEGEI publ. 2008. 200 p.
22. *Pokrovskiy G.I.* Vzryv [Explosion]. Moscow, Nedra publ. 1973. 182 p.
23. *Portnov A.M.* Flyuidnyy diapirizm kak prichina formirovaniya kimberlitovykh trubok i karbonatitovykh massivov [Fluid diapirism as the cause of the formation of kimberlite pipes and carbonatite massifs]. Dokl. AN SSSR. 1979. V. 246. P. 416–420.
24. *Protsenko Ye.V.* Strukturno-tektonicheskiye zakonomernosti lokalizatsii almazonosnykh kimberlitovykh poley v predelakh Vilyuysko-Markhinskoy mineragenicheskoy zony (Zapadnaya Yakutiya) [Structural and tectonic regularities of localization of diamondiferous kimberlite fields within the Vilyui-Markhinskaya mineragenic zone (Western Yakutia)]. Avtoref. diss. … kand. geol.-miner. nauk. Moscow. 2020. 23 p.
25. *Ramberg Kh.* Modelirovaniye deformatsiy zemnoy kory s primeneniyem tsentrifugi [Modeling crustal deformations using a centrifuge]. Moscow, Mir publ. 1970. 224 p.
26. *Ramberg Kh.* Sila tyazhesti i deformatsii v zemnoy kore [The force of gravity and deformation in the earth's crust]. Perevod s angl. Pod red. V.V.Belousova, A.B.Yefimova. Moscow, Nedra publ. 1985. 399 p.
27. *Rossiyskiy* metallogenicheskiy slovar' [Russian metallogenic dictionary]. St. Petersburg, VSEGEI publ. 2003. 320 p.
28. *Sablukov S.M.* Vulkanizm Zimnego Berega i petrologicheskiye kriterii almazonosnosti kimberlitov [Volcanism of the Zimny Coast and petrological criteria for the diamond content of kimberlites]. Avtoref. diss. … kand. geol-miner. nauk. Moscow. 1995.
29. *Sycheva-Mikhaylova A.M.* Mekhanizm tektonicheskikh protsessov v obstanovke inversii plotnosti gornykh porod [The mechanism of tectonic processes in an environment of inversion of rock density]. Moscow, Nedra publ. 1973. 136 p.
30. *Khar'kiv A.D., Zinchuk N.N. Kryuchkov A.I.* Korennyye mestorozhdeniya almazov mira [Kryuchkov Primary diamond deposits of the world]. Moscow, Nedra publ. 1998. 555 p.
31. *Khar'kiv A.D., Zuyenko V.V., Zinchuk N.N., Kryuchkov A.I., Ukhanov V.A., Bogatykh M.M.* Petrokhimiya kimberlitov [Petrochemistry of kimberlites]. Moscow, Nedra publ. 1991. 304 p.

32. *Khachatryan G.K.* Azot i vodorod v almazakh mira kak indikatory ikh genezisa i kriterii prognoza i poiskov korennykh almaznykh mestorozhdeniy [Nitrogen and hydrogen in diamonds of the world as indicators of their genesis and criteria for forecasting and prospecting for primary diamond deposits]. Avtoref. diss. … d-ra geol.-miner. nauk. Moscow. 2016. 48 p.
33. *Kholodov V.N.* Peschanyy diapirizm – novaya storona katageneticheskikh protsessov. St. II. Mekhanizm obrazovaniya i geologicheskoye znacheniye peschanykh dayek i «gorizontov s vklyucheniyami» v miotsene Vostochnogo Predkavkaz'ya [Sandy diapirism is a new side of catagenetic processes. Art. II. The mechanism of formation and geological significance of sand dikes and "horizons with inclusions" in the Miocene of the Eastern Ciscaucasia]. Litologiya i poleznyye iskopayemyye. 1978. No. 5. P. 52–63.
34. *Sharp W.E.* A plate tectonic origin for diamond-bearing kimberlites. Earth and Planetary Science Letters. 1974. Vol. 21. No. 4. P. 351–354.

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.