DOI: 10.24411/0869-7175-2018-10009

УДК 553.81:551.242.5
© А.Н.Барышев, Г.К.Хачатрян, 2018

Минералого-геохимический и геодинамический системный подход к анализу алмазоносности и минерагеническому районированию платформ

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)

Обосновываются условия образования алмаза в зонах субдукции, в которых экзогенные источники вещества алмаза погружались в мантию по краям конвективной ячеи в докембрии. Конвекция обусловила структуру алмазоносного пространства в мантии в виде перевёрнутого конуса, а на уровне чехла платформы – латеральную зональность тел от кимберлитов в центре к лампроитам, карбонатитам и ультрамафитовым щелочным комплексам (УЩК) по периферии, латеральные ограничения минерагенической провинции. Структуры доставки мантийной среды к поверхности развиваются в платформенный этап вдоль линеаментов, имеющих фрактальную структуру с периодическим чередованием кимберлитовых районов, полей, кустов трубок через определённый шаг. За пределами минерагенической провинции коренные месторождения алмаза отсутствуют, но на этой территории могут присутствовать промышленные россыпи за счёт дальнего экзогенного переноса алмазов. Предложены вещественные, геодинамические и геоморфологические критерии оконтуривания минерагенической алмазоносной провинции. Показан пример подтверждения прогноза кустов трубок, ранее выделенных на основе критерия периодичности их размещения.
Ключевые слова: алмаз, зональность, кимберлит, конвекция, линеамент, минерагения, популяция, районирование, субдукция, фрактальность.

Барышев Александр Николаевич
Хачатрян Галина Карленовна



khachatryan_g_k@mail.ru

Mineralogical-geochemical and geodynamic system approach to analysis of diamond-bearing and mineragenic division into district of platforms

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

The conditions of diamond formation in the subduction zones in which exogenous sources of chemical elements of diamond immersed in the mantle along the rims of the convective cell in the Precambrian are substantiated. Convection caused the structure of the diamond-bearing space in the mantle in the form of an inverted cone, lateral zoning of the bodies at the level of the platform cover and the lateral limits of a mineragenic province. The structures of the mantle medium delivery to the surface developed at a platform phase along the lineaments having a fractal structure with periodic alternation of kimberlite regions, fields, bunches of pipes with a certain interval. Beyond the mineragenic province, no primary diamond deposits occur but economic placers can exist in this area because of the far exogenous diamond transfer. The real, geodynamic and geomorphological criteria of the mineragenic diamondiferous province delineation are offered. In addition, the authors showed an example confirming the forecast of the pipe bunches previously identified based on their space periodicity criteria.
Key words: diamond, zonality, kimberlite, convection, lineament, minerageny, population, geographical demarcation, subduction, fractality.

В системе принципов прогнозно-минерагенического районирования алмазоносных территорий недостаточно учитывается существенное различие факторов, определяющих, с одной стороны, условия образования алмаза, а с другой, геодинамические особенности его доставки к поверхности Земли. В прогнозно-поисковых моделях коренных месторождений среди геологических критериев главное внимание сосредоточено на структурах доставки кимберлитов, а среди поисковых признаков – на составе минералов-спутников. Соотношение алмазов с кимберлитами дискутируется: одни исследователи рассматривают алмазы как имеющие прямую генетическую связь с кимберлитами, другие считают их ксеногенными, третьи протогенными.

С учётом того, что подавляющая часть кимберлитовых трубок не содержит алмазов, остро встают вопросы о природе источников алмаза и факторах, определяющих их позицию в глубинной геологической структуре Земли. Не менее важен вопрос: почему на ряде территорий, содержащих значительное количество россыпных алмазов, поиски кимберлитовых трубок в течение многих десятилетий не приводят к их обнаружению? Для обоснования существующих генетических и прогнозно-поисковых моделей и их совершенствования необходимо рассмотреть отдельно специфику условий образования алмаза и его доставки к земной поверхности. Этому посвящены тезисы настоящего сообщения*, их обоснование и вытекающие практические выводы.

1. *К главным условиям образования глубинной алмазоносной структуры и кристаллов алмаза относятся*:

- ***погружение экзогенных источников его вещества совместно с вмещающими толщами в зонах субдукции, обусловленных краевыми эффектами ячеистой конвекции, и рост кристаллов алмаза в мантийной среде*;**
- ***центростремительное погружение зон субдукции к ядру конвективной ячеи, что определяет концентрическую зональность типов популяций алмаза в минерагенической провинции, геологическую структуру и ограничения алмазоносного пространства в фундаменте будущей платформы в виде перевёрнутого конуса***.

Обоснованием тезиса служит ряд следующих фактов и теоретических положений. Распределение структурных примесей азота изучено методом ИК-спектроскопии в более чем 5,5 тыс. кристаллов алмаза из 96 объектов (трубок и россыпей) мира [27, 28]. Определено общее содержание азота, его концентрации в виде двойных (А) и четверных (В) атомных кластеров в кристаллической решётке алмаза. Согласно диаграмме Тейлора-Милледж [33], разные соотношения этих параметров отражают разные относительные температуры кристаллизации алмаза. По этим соотношениям в каждом объекте выделены главная (>50%) и второстепенная (≥25%) популяции алмаза как статистически значимые группы кристаллов. Проведена общая типизация алмазных популяций, которые образуют шесть групп (типов популяций), дополнительно характеризуемых составом минеральных включений в кристаллах, отражающих состав среды алмазообразования [27, 28].

В результате установлено, что в ряду популяций от типа V к типу I имеет место тенденция (или тренд) уменьшения содержания азота в алмазе и увеличения его агрегации (%B) при увеличении температуры алмазообразования. Минимальным содержанием азота и наиболее высокой температурой образования обладают кристаллы популяции типа I, которые содержат включения высокобарических минералов (мейджорита, вюстита и др.). Это характеризует вертикальную зональность популяций от типа V к наиболее глубинному типу I с учётом того, что с глубиной нарастают давление и температура.

Установлено, что разноглубинные популяции на платформе имеют своеобразное размещение: на Сибирской платформе размещение главных популяций имеет двустороннюю (с элементами концентричности) латеральную зональность, в которой наиболее высокотемпературные популяции расположены в центре, а наименее, соответственно, по периферии [28]. Из вертикальной и латеральной зональности следует вывод, что главная геолого-структурная зона (или сочетание зон) фундамента платформы, где происходил рост кристаллов алмаза, имеет трёхмерную морфологию, подобную перевёрнутому эллипсовидному конусу.

Для расшифровки генетической сущности такой структуры необходимо обратиться к свойствам самих алмазов, а именно, к особенностям их состава и к геодинамическим условиям роста кристаллов.

В составе кристаллов установлены: 1) остатки органического вещества; 2) образование структурной примеси водорода в алмазе за счёт органики; 3) уменьшение концентрации органического вещества в среде в процессе роста кристалла алмаза. В сочетании с лёгким изотопным составом углерода, характерным для биомассы, всё это свидетельствует об участии биогенного вещества в образовании алмаза.

Отсюда следует вывод, что, по крайней мере, часть углерода, послужившего источником вещества алмаза, сначала была субдуцирована в глубины Земли, что инициировало рост кристаллов алмаза. Главным химическим фактором образования алмазов является, по-видимому, реакция углеводородов с оксидами углерода. Распределение углеводородной составляющей источника в субдуцируемых толщах, вероятнее всего, зависит от колониального размещения древнейшей биомассы, с чем может быть связана одна из главных причин отсутствия алмазов во многих трубках кимберлитов, несмотря на наличие минералов-спутников.

Геодинамические условия роста алмазов отражены в морфологии и структуре их кристаллов. На рост кристаллов алмаза в условиях твёрдой среды, а не из расплава и часто при стрессе указывают следующие факты: 1) уплощённость формы кристаллов, лишающая их двух осей симметрии L_4, несмотря на кубическую сингонию; 2) их деформации во время роста с образованием трещин скалывания, не выходящих во внешние зоны кристалла; 3) наличие трещин отрыва в кристалле, заполненных алмазным веществом последующей генерации; 4) обломки алмаза в алмазе;

* Статья излагает содержание доклада авторов на VIII Международной научно-практической конференции «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов», 17 апреля 2018 г. – М.: ЦНИГРИ.

5) разный механизм роста (нормальный и тангенциальный) на разных гранях одного кристалла, что согласуется с его ориентировкой относительно нормальных и касательных напряжений; 6) нередко встречающееся резкое изменение механизма роста и морфологии внутренних частей алмаза, которые отражают поворот растущего кристалла вместе с пластически деформируемой вмещающей средой, что возможно при землетрясениях и в их предшествии [6]. Ещё один факт, указывающий на кристаллизацию алмаза не из раствора и не из расплава, заключается в том, что в ряде кристаллов внешние зоны их роста образовались при большей температуре, чем внутренние [31].

Стресс – главный фактор регионального метаморфизма. Поэтому закономерно, что контуры латеральной зональности популяций алмаза и контуры древних толщ с возрастом регионального метаморфизма 1,8–2,0 млрд. лет, которые концентрически обрамляют Сибирскую платформу, параллельны. Примечательно и то, что простирание зон популяций на платформе не согласуется с близмеридиональным простиранием архейских структур, несмотря на явное участие структур этого направления в локализации палеозойских и мезозойских кимберлитовых трубок. То есть возраст большинства алмазов Сибири раннепротерозойский [29].

Все отмеченные факты должны находить место как в модели алмазообразования, так и в модели последующей доставки кимберлитов к поверхности Земли. То есть при районировании платформ с целью прогноза коренных месторождений алмаза необходимо проведение двух процедур. Во-первых, ограничить пространство, где алмазы в фундаменте могут присутствовать, а где нет и, во-вторых, выделить типы структур, которые способствуют доставке алмазов к поверхности. Эти модели, опирающиеся на рассмотренные свойства алмазов и их популяций, с учётом тектонофизических теоретических и экспериментальных разработок, показаны на рис. 1.

Коническая морфология главной геолого-структурной зоны (или сочетания зон), где происходило образование алмаза в фундаменте платформы, аналогична концентрическим субдукционным зонам, которые развиваются по краям ячеи неустановившейся незавершенной конвекции (см. рис. 1, В). Важно отметить, что зоны субдукции, обрамляющие ячею, существенно отличаются рядом признаков от зон субдукции, которые принято рассматривать по модели тектоники плит, во-первых, геологической структурой – не в форме плит, а в виде сжатой лежачей синклинали, ядро которой подвержено стрессу, а во-вторых, парностью и встречным падением. В ядрах сжатых субдукционных синклиналей толщи расплющиваются, а породы подвергаются региональному метаморфизму с развитием кристаллизационной сланцеватости, которая в глубинных алмазоносных толщах является важным фактором снижения их эффективной вязкости, способствующей последующему пластическому перемещению, а также дроблению на мелкие осколки при взрывах в конце кимберлитового вулканизма, обеспечивающих обломочную структуру кимберлитов.

Кроме того, как видно из модели, в центре ячеи с нарастанием фаз конвекции происходит подъём глубинных симатических масс, а по периферии – увеличение мощности сиалической коры (щиты, «кратоны»). И это явление влечёт за собой ещё два следствия.

Первое следствие модели вещественное. Такой зональности соответствует общая тенденция смены области кимберлитов в центре зонами, несущими черты лампроитов, ближе к периферии платформы. Далее они сменяются карбонатитами и массивами ультращелочных магматических комплексов (УЩК). С этим согласуется и то, что для лампроитов, по сравнению с кимберлитами, свойственно в целом усиление геохимических черт, в большей мере отвечающих континентальной литосфере [14]. На основе большого числа признаков, характеризующих сходную тенденцию, А.Д.Харькив с соавторами делит Далдыно-Оленёкскую зону Якутии на части, принадлежащие двум областям: Вилюйской и Анабаро-Оленёкской [26]. От Мунского поля в направлении к Анабарскому щиту в кимберлитах возрастает роль флогопита, монтичеллита, появляется нефелин, снижается доля высокохромистого пиропа при увеличении доли пикроильменита; возрастает роль Ti, P, Al, K, снижается магнезиальность пород.

В отличие от моделей субдукции литосферных плит, в конвективной модели субдуцируют и шельфовые фации с континентальным типом земной коры. Среди таких фаций большую роль играют карбонаты, фосфорсодержащие осадки. Как видно из модели, толщи этих фаций при субдукции переворачиваются кровлей вниз. Будучи затянутыми конвективным процессом под породы верхней части мантии, они оказываются в обстановке гравитационной неустойчивости. Дальнейшая реализация неустойчивости при особых условиях приводит к карбонатитовому и щелочному фосфороносному магматизму. Для Сибирской платформы, как и для юга Африки, по данным Р.Митчелла, характерно размещение карбонатитов и щелочных интрузивных пород ближе к периферии платформы относительно кимберлитов. Иначе говоря, происхождение карбонатитов во многом определяется предшествующей субдукцией карбонатсодержащих толщ шельфовых фаций. По геохимическим чертам состав алмазоносной среды бывает близким к толщам шельфовых фаций. Например, алмазы района Жуина в Бразилии содержат включения карбонатов, фосфатов, фторидов [32].

В работе [7] авторами показано, что в фундаменте Сибирской платформы присутствуют толщи окружающих ячею бассейнов, субдуцированные к центру будущей платформы в виде сжатых синклиналей, а не литосферной плиты (рис. 2). Наиболее алмазоносной частью мантии служит весьма ограниченный

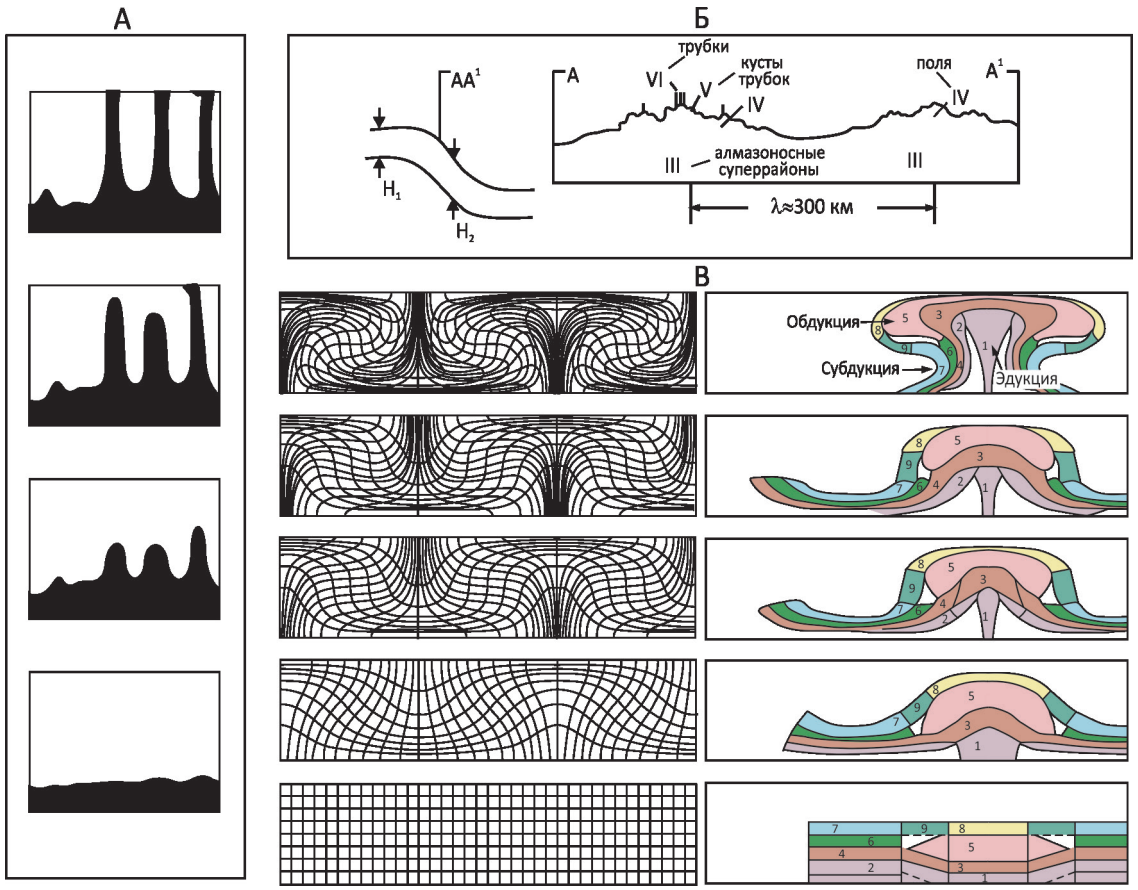


Рис. 1. Модели геодинамического развития алмазоносных структур:

А – модель образования кимберлитовых трубок и их кустов; эксперимент всплывания битума под покрывающим слоем патоки, по работе [23]; Б – модель фрактальной структуры поднимающейся алмазоносной среды (слева флексура, увеличивающая «высоту поплавка», справа – разрез глубинной среды вдоль линеамента); В – геодинамическая модель образования фундамента алмазоносной провинции в связи с мантийно-коровой конвекцией: слева – математическая модель последовательного развития деформаций слоистой среды при фазах ячеистой конвекции, по работе [10]; справа – модель фазового преобразования структуры древней литосферы со слоями континентального (1, 3, 5, 8) и субконтинентального (2, 4, 6, 7) типов, нанесённых на математическую модель: 1–2 – слои мантии; слои земной коры: 3–4 – габбро-базальтоидные («базальтовый слой»), 5 – гранит-метаморфический, 6 – эффузивных базальтов, 7–8 – осадочные, 9 – переходных фаций шельфа; вертикальный масштаб модели существенно увеличен относительно природной геологической системы

вертикальный интервал субдуцированной литосферы, особенно тот, который близок к ядрам субдукционных сжатых синклиналей, представляющий зону главных популяций алмаза. Этот интервал меняет свою глубину, создавая латеральную зональность популяций. Верхние и нижние части продуктивного интервала обеспечивают наличие в трубках второстепенных популяций алмаза, сходных по своим характеристикам со смежными по латерали главными популяциями. Иначе говоря, зональность популяций алмаза позволяет рассматривать позицию проявлений карбонатитового и щелочного магматизма с их оруденением на периферии платформы как закономерную в той же общей концентрической минерагенической зональности. Таким образом, зона карбонатитов и УЩК является периферической при оконтуривании овальной минерагенической алмазоносной провинции. Платформенные территории её внешнего контура с алмазами, привнесёнными в результате экзогенных процессов, могут располагаться за пределами минерагенической провинции и не содержать коренных месторождений алмазов.

Второе следствие модели структурное. Над восходящими глубинными массами большой плотности в силу изостазии образуется депрессия, которая сохраняется долгое время, позволяя использовать геоморфологию, намечая центр конвективной ячеи – главного

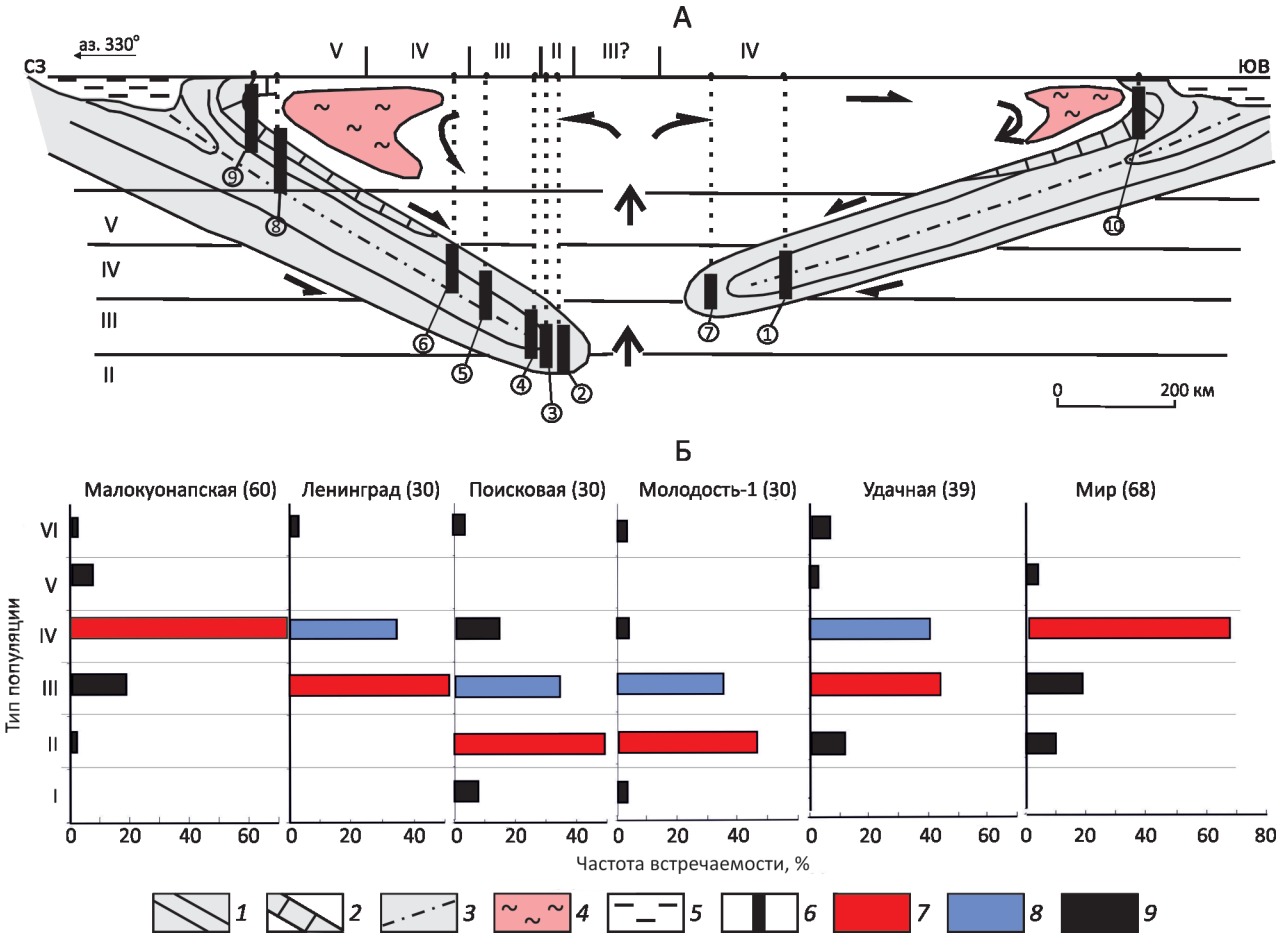


Рис. 2. Модель глубинной структуры Сибирской платформы, обеспечившей преобладание типов популяций алмаза в кимберлитовых трубках. *По работе* [7] *с изменениями*:

А – модель ячеистой конвекции с образованием алмазоносных зон субдукции 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 субдукционных синклиналей (зоны наиболее интенсивного метаморфизма); *4* – архей-протерозойские толщи щитов; *5* – краевые бассейны; *6* – позиция вертикальных интервалов зон субдукции (цифры в кружках), которые обеспечивают: алмазоносность кимберлитов в трубках: 1 – Мир, 2 – Удачная, 3 – Молодость, 4 – Поисковая, 5 – Ленинград, 6 – Малокуанапская, 7 – Накынского поля, 8 – алмазы Попигайской структуры взрывных брекчий, 9–10 – щелочно-мафит-карбонатитовые расслоенные массивы периферии Анабарского (9) и Алданского (10) щитов; стрелками показано направление пластических течений масс в конвективной ячее; римскими цифрами обозначены типы популяций алмаза, их относительная первичная глубинная позиция и латеральная зональность на платформе; Б – типы алмазных популяций в трубках, захваченные с разных глубин; популяции: *7* – главная, *8* – второстепенная, *9* – малая доля алмазов, аналогичная популяциям иных трубок; в скобках число кристаллов в проанализированной выборке из трубки

геодинамического фактора, определяющего глубинную структуру минерагенической провинции. По периферии ячеи, куда от центра смещаются массы коры, образуются поднятия, орогены, кряжи на платформах. За их пределами маловероятно встретить коренные месторождения алмаза. Разумеется, что тектономагматическая активизация территорий (например, при трапповом магматизме) может вносить свои изменения в структуру и геоморфологию платформ. Их надо анализировать совместно с геодинамическими следствиями древнейшей конвекции, формирующей фундамент платформ. К важной стороне структурного следствия может быть отнесено и то, что в самом центре провинции, над восходящей ветвью конвекции (осью плюма), трубки с алмазами могут отсутствовать за неимением субдуцированных толщ.

2. ***Подъём глубинной алмазоносной среды в платформенный этап развития территории начинается вдоль линеаментов, фиксируемых на поверхности относительно прямолинейными зонами, в которых сосредоточены районы и поля кимберлитов, а также проявления некимберлитового магматизма. Линеаменты имеют фрактальную структуру, в которой кимберлитовые суперрайоны, поля, кусты трубок периодически повторяются через шаг, определённый для каждого ранга минерагенических таксонов (фракталов). Кусты кимберлитовых трубок как фракталы, контролируемые разломами, в разных полях повторяются через шаг от 2 до 4 км или кратно этим величинам, образуя гряды кустов.***

В подавляющем большинстве геологических моделей, описанных в литературе, доставка алмазов осуществляется кимберлитами с глубин 150–200 км и даже более. При этом декларируется очень большая скорость извлечения масс из глубины, обеспечивающая сохранность алмазов [22]. Анализ общей фрактальной структуры геодинамических систем с учётом ряда тектонофизических положений позволяет предложить иную трактовку условий подъёма алмазоносных масс к поверхности Земли, заново взглянуть на ряд закономерностей в размещении кимберлитовых трубок и их систем в полях и районах.

Сначала о наиболее крупных структурах доставки – линеаментах, соответствующих рудоносным или минерагеническим зонам (поясам). Термин линеамент, введенный в геологию в 1904 г. американским исследователем У.Г.Хоббсом, в настоящее время, согласно Е.Е.Милановскому, используется для выраженных в скрытой (латентной) форме геологических структур, геофизических полей, изменения параметров географической среды, которые отражают разломы, валы, флексуры и прочие линейные деформации и неоднородности Земли [20]. Не все линеаменты платформы контролируют алмазоносные кимберлиты. Это зависит от особенностей их позиции, геологической структуры и геодинамических условий развития.

Общая позиция линеаментов с кимберлитовыми полями, трубками палеозоя и мезозоя на Сибирской платформе приведена в работе [3]. Часть линеаментов фиксируется зонами сгущений тел не только кимберлитов, но и мезозойских траппов, что отчётливо видно на государственных геологических картах обзорного масштаба. Два таких линеамента имеют северо-восточное простирание: один (Накынско-Мирнинский) упирается на юго-западе в Восточные Саяны, другой (Чадобецко-Далдыно-Оленёкский) – в Канскую глыбу. Третий линеамент близмеридионального простирания проходит чуть западнее Анабарского щита и фиксируется вытянутыми в этом направлении телами траппов. Другой линеамент такого же простирания проходит восточнее этого щита, но выражается лишь цепочкой кимберлитовых проявлений.

Одним из необходимых условий алмазоносности линеамента является его позиция над древними зонами субдукции, обрамляющими восходящую область (плюм), или ось ячеистой конвективной системы. Однако, как видно из рисунков 1 и 2, над самой осью плюма, куда на глубине не доходят субдуцированные массы, мало шансов ожидать наличие тел алмазоносных кимберлитов. Этим может быть обусловлено то, что в Сибири в промежутке между зоной с Алакит-Мархинским и Далдынским полями и зоной с Мирнинским и Накынским полями алмазоносные трубки до сих пор не обнаружены.

Об особенностях структуры и геодинамического развития линеаментов можно судить по ряду косвенных фактов. Приуроченность алмазоносных полей и районов к вытянутым полосам, рассматриваемым в качестве минерагенических зон, отмечалась многими. Природа этих полос трактуется по-разному. Их определяют как рифтогены или используют для их обозначения термин авлакоген, как особую разновидность узких платформенных впадин с повышенной тектонической активностью. Ю.А.Дукардтом и Е.И.Борисом «на основе изучения тектонических закономерностей размещения кимберлитов всех известных геологических возрастов на всех платформах мира… было установлено общее эмпирическое правило: алмазоносные кимберлиты внутри авлакогенов не встречаются, но располагаются по их периферии» [12, стр. 30].

Вывод упомянутых исследователей, «что в пределах авлакогенов над сводом мантийного выступа… нет места для кимберлитовых магм» [11, стр.33], может указывать на то, что образование кимберлитов не связано напрямую с повышенным тепловым потоком, подобно тому, как это происходит при магматизме и вулканизме в рифтогенах срединно-океанических хребтов. Об этом же свидетельствует и то, что кимберлиты не обладают значительной тепловой энергией, они не сопровождаются кремнекислыми магмами, которые могли бы выплавляться из сиаля континентальной литосферы. На это же указывает и обилие неоплавленных обломков чуждых пород, вопреки тем, которые наблюдаются в палящих тучах вулканов. То есть подъём глубинных нерасплавленных масс, ставших алмазоносными кимберлитами, не требует больших скоростей их перемещения для того, чтобы сохранить алмазы от сгорания или полного растворения. Понимание сущности структуры алмазоносной среды и её преобразований в процессе доставки к поверхности необходимо для корректной геологической интерпретации материалов геофизических исследований, построения априорных моделей.

Причины и условия, определяющие подвижность алмазоносных масс и их доставку к поверхности, следует искать не в зарождении магматизма. Подъём глубинных масс определяется, прежде всего, архимедовыми силами, а его скорость – вязкостью. Внедрение крупных масс с большой вязкостью в разломы – случай

маловероятный. Почти всегда подъём таких масс осуществляется, благодаря пластическим течениям в виде вала или ячеи. Архимедовой силе способствует, с одной стороны, разуплотнение алмазоносной среды, в которую могут входить субдуцированные серпентинизированные магматические породы и осадки дна бассейна, а с другой, − постоянно возрастающая вертикальная мощность разуплотнённой массы подобно увеличению высоты поплавка. Начало возрастанию «высоты поплавка» (см. рис. 1, Б) может быть положено образованием смыкающего крыла флексуры на краю рифтогена или авлакогена, как и полагали Ю.А.Дукардт и Е.И.Борис. Так зарождается адвективный вал вдоль простирания линеамента. Подъём вала наращивает его вертикальную мощность. При этом более нагретые в глубине массы, попадая в область пониженного литостатического давления, снижают свою вязкость. До этого снижению вязкости способствует развитие кристаллизационной сланцеватости в ядрах субдукционных синклиналей, а также широко проявленная серпентинизация пород.

Обстановка декомпрессии в верхних частях поднимающихся глубинных масс приводит к возрастанию объёма флюидов, что способствует снижению вязкости при разуплотнении, то есть тому, что ещё более провоцирует подъём. Распределение структур адвекции (ограниченной по фазе конвекции) подчиняется волновым законам. Это явление неизбежно в силу того, что тела обладают собственной частотой колебаний, которая, согласно Х.Рамбергу, при зарождении адвекции определяет длину доминирующей стоячей автоволны. Выбор системой длины волны на границе сред соответствует «резонансному возбуждению» [4]. Поднятие вала вдоль его простирания происходит не с одинаковой амплитудой. На вершине вала возникают волнообразные поднятия, подобные тем, которые образуются при тектонофизических экспериментах в моделях (см. рис. 1, А–Б).

Установлено, что в подобных конвективных системах уменьшение вязкости на три порядка приводит к возможности зарождения конвекции в слое, мощность которого на один порядок меньше. Кроме того, в подобной системе, имеющей размер на порядок меньше, время достижения подобной фазы конвекции уменьшается на два порядка [2, 4]. То есть скорость подъёма нарастает снизу вверх, и массы на большой глубине не перемещаются так быстро, как предполагается в ряде моделей, например в [22]. В результате на поднятии вырастает серия более мелких, а на них – серия ещё более мелких поднятий, верхние из которых превращаются в кимберлитовые трубки.

Возникновению декомпрессии способствует не только подъём масс в области меньшего литостатического давления, но и обстановка транстенсии (косого растяжения с образованием сдвиго-раздвига), или pull-apart. Такой механизм проявляется в Восточной Сибири при сочетании ротационных сдвиговых сил Земли с регматической сетью трещин. Подобно алмазоносным линеаментам, в кайнозое так образовалась впадина оз. Байкал при левых сдвигах по близширотным разломам вдоль рек Верхняя Ангара, Малый Енисей, Иркут [5]. Как следствие, под озером фиксируется поднятие астеносферы, вызванное декомпрессией. В связи с постоянством действия ротационных сил Земли, сходством с Байкалом позиции и простирания Чадобецко-Далдыно-Оленёкского и Накынско-Мирнинского линеаментов есть все основания допускать участие транстенсионной геодинамики в их развитии.

Последовательное снижение вязкости в поднимающейся нерасплавленной массе – один из главных факторов, приводящий к фрактальности алмазоносных систем. Вдоль алмазоносных линеаментов Сибири и севера Восточно-Европейской платформы с шагом около 300 км или кратно этой величине намечаются периодически повторяющиеся области с повышенной ролью кимберлитового вулканизма [3]. Эти области, заложенные на глубине, отражаются на поверхности как кимберлитовые алмазоносные районы или суперрайоны.

Фактор периодического размещения кустов кимберлитовых трубок как отражения волновой закономерности появления поднятий (камер, фракталов) в апикальной части поднятой мантийной среды может представлять одну из важных характеристик прогнозно-поисковой модели куста, разработке которой, как отмечал В.И.Ваганов, «уделялось явно недостаточно внимания» [8]. Основание кустов и трубок начинается в виде адвективного вала, перерастающего выше в дайку. Переход трубчатых структур на глубине в дайки отмечался многими исследователями. Последовательно возрастающий вертикальный интервал разуплотнённых флюидизированных масс во время подъёма приводит вверху к волнообразным всплескам (фракталам). Из них при адвекции развиваются трубки. Взрывные раструбы, венчающие их, свидетельствуют о существенном превышении в них давления флюидного над литостатическим. Как видно из тектонофизических моделей (см. рис. 1, А), не все «всплески» на вершине адвективного вала или дайки заканчиваются трубками. Поэтому расстояние между трубками может составлять величину кратную нескольким шагам. Превращение алмазоносной среды на этапе подъёма в кимберлит позволяет считать алмаз не ксеногенным, а протогенным по отношению к кимберлиту.

Возможность прогноза кустов трубок на основе периодичности их размещения вдоль разломов демонстрирует пример Зимнебережного района Архангельской области. В 2006 г. была опубликована статья [3], в которой предложена схема прогнозных кустов трубок на основе концепции периодического размещения алмазоносных систем через определённый шаг в линеаментах (зонах) близширотного и близмеридионального простираний (рис. 3). В 2007 г. в Зимнебережном и Кепинском полях были обнаружены трубки и силлы [15]. Из трёх трубок, выявленных в Кепинском поле, две

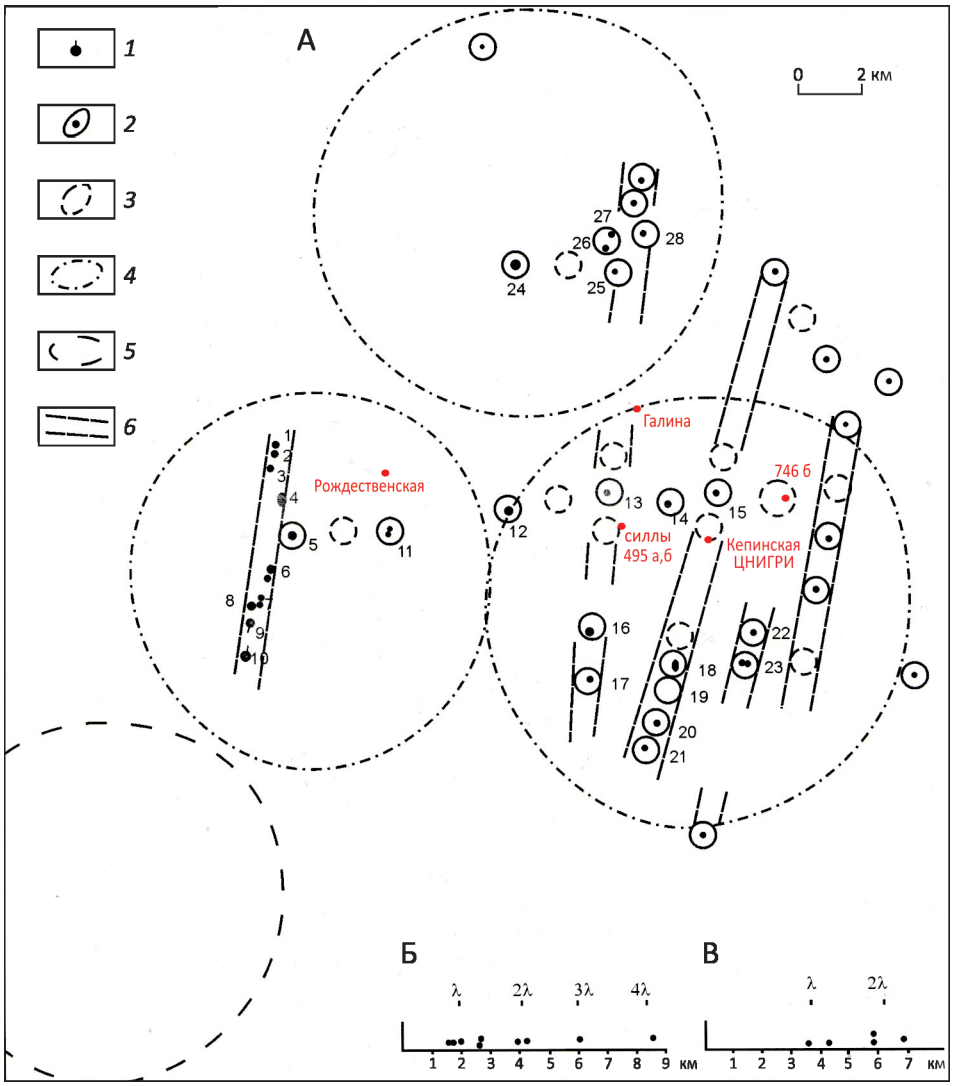


Рис. 3. Размещение кустов и трубок кимберлитов в Зимнебережном алмазоносном районе (А); периодичность кустов, число наблюдений расстояний между их центрами в зонах близмеридионального (Б) и близширотного (В) простираний:

1 – трубки кимберлитов и родственных им пород; *2* – кусты трубок и предполагаемые проекции питающих глубинных камер; *3* – прогнозируемые кусты; *4* – предполагаемые контуры адвективных поднятий (узлов) мантийных масс перед превращением их в кимберлиты; *5* – контур прогнозируемого узла; *6* – разломные и флексурные зоны, влияющие на адвекцию кимберлитов в виде даек и трубок; λ – размер шага (длина адвективной волны); трубки и их номера: 1 – Первомайская, 2 – Белая, 3 – Кольцовская, 4 – Ломоносовская, 5 – Поморская, 6 – Пионерская, 7 – Карпинская I, 8 - Карпинская II, 9 – Архангельская, 10 – Снегурочка, 11 – Шочинская, 12 – Октябрьская, 13 – Русалка (№ 495), 14 – Победа (№ 406), 15 – Горелая, 16 – Юрасская (№ 494+Звездочка), 17 – Ключевая, 18 – Степная (№ 688), 19 – № 693, 20 – № 697, 21 – № 840, 22 – № 695, 23 – № 687, 24 – им. Гриба, 25 – Осетинская, 26 – Майская, 27 – Волчья, 28 – Верхотина; чёрным цветом обозначены известные к 2006 г. трубки, по [1, 16], и прогнозируемые кусты и узлы, по [3], красным цветом – трубки и «силлы», выявленные в 2007 г., по [15]

(№746б и Кепинская ЦНИГРИ) оказались на территории, соответствующей кустам, прогнозируемым на основе их периодического размещения, а два новых тела, трактуемых в качестве силлов (№495а и 495б), установлены в непосредственной близости от края ещё одного прогнозируемого куста. Аналогичная периодичность размещения кустов характерна для Далдыно-Алакитского суперрайона Якутии [3]. Эти факты подтверждают правомерность прогноза кустов трубок на основе критерия периодичности их размещения.

Итак, фрактальность алмазоносных систем, периодичность фракталов, обусловленная тектонофизическими причинами, – важнейшие черты структуры минерагенической провинции.

3. ***В основах прогнозно-минерагенического районирования платформ наряду с традиционными геолого-минералогическими и геофизическими критериями необходимо шире использовать критерии генетические и геодинамические, отражающие, с одной стороны, условия алмазообразования, а с другой, условия доставки мантийной алмазоносной среды к поверхности Земли.***

Обсуждая вопросы районирования, направленные на прогноз месторождений, необходимо отметить, что используемая в литературе минерагеническая таксономия алмазоносных территорий несколько отличается от общепринятой металлогенической таксономии, зафиксированной в Геологическом словаре и в работе [17]. В качестве куста рассматривается сближенная серия трубок, обладающих сходным составом [8, 13]. По В.И.Ваганову [8], алмазоносное поле – естественная группировка пространственно сближенных кимберлитовых тел, связанных происхождением с единой вертикальной «стволовой» зоной повышенной проницаемости (флюидно-магматической колонны). Алмазоносный район – естественная группировка пространственно сближенных кимберлитовых полей, приуроченная к пересечению минерагенической зоны с крупными поперечными поднятыми блоками или зонами глубинных разломов. Алмазоносная минерагеническая зона – линейная структура, активизирующая процессы коро-мантийного энергомассопереноса, длиной до 500–600 км, шириной порядка 50 км. В этих определениях превалирует интерпретация позиции таксона без конкретизации его размера, за исключением последнего. В связи с этим среди известных специалистов в геологии алмаза существуют разногласия. Так, например, одними крупная алмазоносная территория Зимнего Берега в Архангельской области рассматривается в ранге кимберлитового поля, а её Золотицкая группа трубок общей протяжённостью около 14 км – в качестве куста [8]. Другими исследователями та же Золотицкая группа рассматривается как кимберлитовое поле в составе Зимнебережного кимберлитового района [1, 21, 26]. В отличие от кустов изометричной конфигурации Золотицкую группу можно называть зоной или грядой трубок. Им соответствует месторождение им. Ломоносова.

В Якутии в Далдыно-Алакитском алмазоносном районе Алакит-Мархинскую территорию протяжённостью около 80 км выделяют в качестве одного поля [8, 26]. Такие размеры в таксономии систем рудных месторождений присущи не полям, а районам, объединяющим не менее трёх рудных узлов [2].

Рассмотрение алмазоносной минерагении, входящей в общую зональность платформ, а также районирование в целях прогноза побуждают использовать при этом унифицированные принципы минерагенической таксономии. Двумя основными её принципами, согласно работе [17], являются форма (субизометричная или линейно вытянутая) и размер таксонов. Форма и размер выбраны не только как требующие своеобразной методики для выявления и анализа таксона, но и как отражающие, с одной стороны, форму конвекции (валообразную или ячеистую), а с другой, последовательно развивающуюся фрактальность систем. В соответствии с этими принципами предлагается развёрнутая схема таксономии с положением в ней главных алмазоносных таксонов (см. таблицу). В глобальном ранге планетарная субпровинция, например Африканская, состоит из множества ячей, в том числе алмазоносных. В провинциальном ранге минерагенических систем с учётом количества и разного размера ячеистых структур предлагается выделять минерагенические мегапровинции, провинции и субпровинции. Сибирскую платформу одни исследователи [8] относили к металлогенической провинции, а другие выделяли в ней Якутскую алмазоносную минерагеническую провинцию [11]. В соответствии с принципами таблицы последний вариант более приемлем. Западная часть платформы выделится в провинцию Тунгусской синеклизы. Похожее разделение платформы было предложено в работе [14]. Такое разделение оправдано и с точки зрения особого триасового тектономагматического (траппового) развития этой территории, и с позиций проявления фрактальности конвективных геологических систем, подобной разделению надвое ячеи Чёрного моря [4]. Сибирская платформа, таким образом, должна отойти в категорию мегапровинции. На северо-востоке и в центре Европы следует выделить провинции Беломоро-Северодвинскую, а к западу от неё – Висла-Ботническую (Балтийскую с осевым поясом вдоль низовий р. Висла – Ботнический залив). В Северном Казахстане относительно небольшой (0,5–0,6 тыс. км) размер ячеи, осложняющий Казахстанскую провинцию, побуждает отнести её территорию к Тенгизской (по названию озера в центре) субпровинции. Для неё связь особенностей алмазов месторождения Кумды-Коль с геодинамикой затронута в работе [7]. Ранги ячеистых геодинамических и минерагенических систем, их взаимосвязь рассмотрены в работе [4].

Необходимо обратить внимание на то, что при использовании термина провинция в литературе не всегда учитывается принципиальное различие сущности двух её определений «металлогеническая» (или минерагеническая) и «рудоносная». *Минерагеническая* провинция имеет определённую площадь (сотни тысяч–миллионы квадратных километров), относительно изометричную форму (Геологический словарь) [17]. *Рудоносная (или рудная)* провинция (например, алмазоносная, золоторудная), используемая в отраслевой геологии полезных ископаемых, не имеет таких строгих ограничений. К рудоносным провинциям относят разные по масштабам территории – от металлогенической провинции, субпровинции, металлогенической зоны [19] до минерагенической области, например, «Архангельская кимберлитовая провинция» в работах ряда

Иерархическая схема минерагенических таксонов полного масштабного ряда соответственно рангам геодинамических систем (в скобках примеры)

Ранг (порядок)	Субизометричные		Линейно вытянутые		Масштабы карт*
	Таксоны	Размер поперечника (км)	Таксоны	Размер длины (км)	
I. Глобальный	**Планетарная минерагеническая провинция** (Тихого океана, Атлантического океана, Евразийская)	>10 000	**Планетарный минерагенический пояс** (Западно-Тихоокеанский, Восточно-Тихоокеанский, Средиземноморско-Гималайский)	≥10 000	1:50 000 000 1:10 000 000
	Планетарная минерагеническая субпровинция (Северо-Американская, Южно-Американская, Африканская)	3 000–7 000	**Планетарный минерагенический субпояс** (Средиземноморский, Кордильерский, Андийский)	5 000–7 000	
II. Провинциальный	**Минерагеническая мегапровинция** (Сибирской платформы, Восточно-Европейской платформы, Западно-Сибирская, Анадырско-Верхояно-Колымская,)	2 000–3 000	**Минерагенический мегапояс** (Усть-Илимск-Нижнеленский, Уральский, Сихотэ-Алиньско-Охотско-Чукотский)	2 000–3 000	Обзорные 1:5 000 000 1:2 50000 (1:1 000 000)
	Минерагеническая провинция (Беломоро-Северодвинская, Якутская, Тунгусской синеклизы, Казахстанская)	800–2 000	**Минерагенический пояс** (Кандалакшско-Двинский, Верхоянский, Курильский островодужный, Сихотэ-Алиньский, Алтае-Саянский)	1 000–2 000	
	Минерагеническая субпровинция (Тенгизская Северного Казахстана, Алтае-Саянская, Колымская)	400–600	**Минерагенический субпояс или субпровинция** (Западно-Саянский, Восточно-Саянский, Енисейского кряжа, Прибалхашский)	400–600	
III. Региональный	**Минерагеническая область** (Архангельская Зимнего Берега)	~300	**Минерагеническая зона**	300 и более	Мелкие 1:1 000 000 1:500 000
	Рудный район	~100	**Рудная зона**	~100	Средние 1:200 000 1:100 000
IV. Очагово-узловой	**Магматогенно-рудный узел, кимберлитовое поле**	~30			
	Рудное поле			~10	Крупные и детальные 1:50 000 1:10 000
V. Локальный (камерный)	**Месторождение, куст трубок**			2–4	
VI. Апофизный (мелкий шток)	**Рудное тело, залежь, небольшая трубка**				1:5 000 и крупнее

Примечание. *Масштабы карт: вверху – при выделении, внизу – при анализе таксона.

исследователей. Рудоносную провинцию выделяют и оконтуривают по известным проявлениям полезного ископаемого определённого типа, в том числе перенесённого потоками от коренного источника на значительные расстояния. Рудоносная провинция в большей мере геолого-экономическая, чем минерагеническая. Минерагеническая провинция для своего выделения и оконтуривания требует анализа факторов, определяющих образование (генезис) полезного ископаемого, их тектонического выражения, что должно учитываться

при прогнозе коренных месторождений. Для отделения минерагенической алмазоносной провинции, в которой присутствуют коренные месторождения, от территорий, где алмазы лишь принесены экзогенными потоками (водными, грязевыми селями, лахарами), необходимо использование фактора геодинамики алмазообразования.

Вопросы выделения и оконтуривания алмазоносной минерагенической провинции в северной части Европы практически не разработаны. Роль субдукции в алмазообразовании по модели тектоники плит применительно к Архангельской территории отмечена О.Г.Сорохтиным [22]. Однако при этом не определено, откуда и куда конкретно погружалась плита. Некоторые особенности геологического строения докембрийских комплексов Фенноскандии, с одной стороны, и геоморфологические особенности территорий, перекрытых фанерозойскими толщами юго-восточнее, с другой, позволяют наметить здесь контуры ячеистой структуры минерагенической алмазоносной провинции, которая определяла позицию субдукционных зон, где росли алмазы.

Архей-раннепротерозойские гранулит-гнейсовые толщи и ассоциирующие с ними зеленокаменные пояса Кольского полуострова и Карелии образуют полуовал, по отношению к которому радиально расположен Кандалакшский подвижный пояс [9, 30]. Полуовал может соответствовать северо-западному замыканию ячеи, тем более, что вдоль подвижного пояса в направлении от Зимнебережной области к Терскому Берегу переходим от кимберлитов к лампроитам и далее к УЩК [14]. К юго-востоку от этой территории, в пределах собственно Восточно-Европейской платформы, фиксируются лишь структуры доставки докембрийских алмазоносных масс среди фанерозойских толщ. О докембрийских структурах можно судить лишь по геофизическим данным, а также по особенностям геоморфологии, обусловленным древней мантийной конвекцией (рис. 4). Внешнему контуру ячеи, вероятнее всего, соответствует полоса, проходящая от Карелии к Северным Увалам, далее по Тиману к северу Кольского полуострова. Северные Увалы фиксируют весьма важный структурный элемент Восточно-Европейской платформы, являясь водоразделом бассейнов Белого и Каспийского морей.

Контур намеченной Беломоро-Северодвинской провинции имеет овальную форму. Длинная ось овала протягивается от Кандалакшской губы к юго-востоку вдоль р. Северная Двина. Вдоль оси проходит Кандалакшско-Двинский авлакоген, который фиксируется по рифейским толщам и претерпел активизацию в среднем палеозое [18]. Унаследованность древних структур авлакогена и его северо-восточного борта в более молодых толщах отражается к юго-востоку от Зимнего Берега простиранием долин низких порядков крупных рек Северная Двина, Вашка. Долины высоких порядков, которые, согласно принципам морфоструктурного анализа, отражают молодые тектонические структуры, в верхнем течении этих рек не подчиняются юго-восточному направлению. То есть геоморфологические признаки дальнейшего продолжения Кандалакшско-Двинского авлакогена к юго-востоку отсутствуют. Однако, на его продолжении, но за пределами провинции, на территории Урала, присутствуют несвойственные Уралу проявления карбонатитов и щелочных интрузивных пород [3].

Если юго-восточная граница рассматриваемой ячеи действительно соответствует границе металлогенической провинции, то позиция приуральской территории с алмазами в россыпях окажется за её пределами. На Урале присутствуют россыпи алмазов, но, несмотря на поиски в течение многих десятилетий, алмазоносных трубок не найдено, вероятнее всего, по причине их отсутствия в природе. Подобная ситуация с такими же типами алмазов может иметь место на территории крайнего севера Якутии.

Сопоставляя позицию авлакогена в контурах Беломоро-Северодвинской провинции с моделью центра конвективной ячеи, можно предположить совпадение его оси с осью восходящей ветви (плюма), куда субдукционные зоны с алмазами с северо-востока и юго-запада на глубине не доходили. Наиболее перспективными с позиций модели являются глубинные зоны, обрамляющие плюм, а на поверхности им соответствуют плечи авлакогена (две ветви пояса): с северо-востока зона, к которой приурочены суперрайоны Зимнего Берега и Терского Берега, а с юго-запада зона, где расположены Нёнокское поле Летнего Берега и Устьянский район (р. Устья в правобережье р. Вага) (см. рис. 4). Последний район обоснованно выделен С.М.Саблуковым с соавторами как особо перспективный [24]. Примечательно, что все упомянутые районы расположены вдоль оси авлакогена с северо-запада на юго-восток через шаг около 300 км: Терский Берег – Зимнебережный и Нёнокский на одной поперечной линии – Устьянский.

Из изложенного следует, что районирование территорий в пределах линеаментов целесообразно проводить на основе их фрактальной структуры с учётом периодического размещения фракталов. Линеаменты, в том интервале по простиранию, где они находятся в пределах минерагенической провинции, представляют собой минерагенические зоны.

Не разработан вопрос о принципе и возможности выделения более крупных, линейно вытянутых таксонов, какими являются алмазоносные минерагенические пояса. Рассмотренный пример Кандалакшско-Двинского авлакогена, состоящего из двух параллельных минерагенических зон, расположенных над глубинными зонами, обрамляющими осевую восходящую часть конвективной системы, а на поверхности соответствующими плечам («перифериям» по Ю.А.Дукардту и Е.И.Борису) авлакогена, показывает, что этот структурный элемент



Рис. 4. Позиция Беломоро-Северодвинской минерагенической провинции и алмазоносных районов:

красные линии: пунктир – приблизительный внешний контур провинции как отражение древней ячеистой конвекции глубинных масс в современной геоморфологии; сплошные– контуры алмазоносных районов: Терского Берега (I), Зимнего Берега (II), Нёнокского (III), Устьянского (IV); штрих-пунктир – оси положительных фаз волн, определивших наиболее интенсивную адвекцию глубинных масс и центры суперрайонов в Кандалакшско-Двинском минерагеническом поясе

можно относить к минерагеническому поясу. Общая ширина Кандалакшско-Двинского пояса, включающего две упомянутые ветви, составляет 250–300 км.

В Якутской провинции подобно таким ветвям могут рассматриваться упомянутые кимберлитоконтролирующие Чадобецко-Далдыно-Оленёкский и Накынско-Мирнинский линеаменты [3]. Расстояние между их осями составляет от 200–250 км на северо-востоке до 350–400 км на юго-западе. С учётом масштабности минерагенических поясов в общей таксономии обе ветви могут рассматриваться как единый Устьилимск-Нижнеленский минерагенический пояс (см. таблицу). Название поясу дано по географической позиции промежутка между линеаментами на юго-западе у г.Усть-Илимск и низовий р. Лена на северо-востоке.

Таким образом, осевые части минерагенических поясов могут не содержать кимберлитов. Алмазоносные кимберлиты приурочены к боковым частям поясов – минерагеническим зонам, а их наиболее перспективные территории к фракталам – суперрайонам.

Аналогичная ситуация с разными ветвями и периодической повторяемостью в них кимберлитовых районов через расстояние около 300 км имеет место в Западной Африке вдоль «кимберлитоконтролирующих зон» северо-восточного простирания, например, зоны Лукапа и смежной Кунене-Кубанго в 300 км к юго-востоку от неё [25]. Линеаменты рассекают Центрально-Африканскую провинцию, обрамляемую щитами Габон-Камерунским на северо-западе, Бому-Кибалийским на северо-востоке, Угандским и Ангольским на юго-востоке. Западная часть провинции не сохранилась, будучи отрезанной Атлантикой и смещённой вместе с континентом Южной Америки. В связи с этим алмазоносный линеамент Лукапа к юго-западу переходит в неалмазоносный линеамент Китового хребта Атлантики. Продолжением западной, перемещённой части Центрально-Африканской провинции может быть Восточно-Бразильский щит с кимберлитовыми полями Диамантика, Коромандель и расположенный к западу от них пояс карбонатитовых массивов.

Подводя итоги, необходимо отметить следующее. При районировании алмазоносных территорий в прогнозно-поисковых целях необходимо отдельно учитывать структуры алмазообразования, относящиеся к докембрийскому формированию фундамента платформ, и структуры фанерозойской тектонической и тектономагматической активизации, определяющие доставку алмазоносной среды к поверхности Земли.

Критериями для оконтуривания минерагенической провинции могут служить её зональность, обусловленная ячеистой конвекцией (от кимберлитов в центре к лампроитам, далее к карбонатитам и УЩК по периферии), а также зональность популяций алмаза. Дополнительным критерием может быть геоморфологическое выражение древней ячеистой конвекции: депрессии в центре и окаймление поясами возвышенностей.

Россыпи алмазов, имеющие даже промышленное значение, могут находиться за пределами минерагенической провинции, где коренные месторождения отсутствуют. Такая ситуация может иметь место на Урале, в Приуралье и на территории крайнего севера Якутии.

Фактор геодинамики доставки среды алмазообразования к поверхности, определяющий фрактальную структуру линеаментов и периодичность размещения алмазоносных таксонов через определённый шаг, в том числе периодическое размещение кустов трубок вдоль разломов или их гряд, следует включать в прогнозные карты разного масштаба. При этом необходимо иметь в виду, что линеаменты могут выходить за контуры минерагенической провинции, где нет коренных месторождений алмазов.

При прогнозно-минерагеническом районировании платформ требуется чёткое разделение понятий, отражающих генетический и прагматический подходы: минерагеническая провинция и алмазоносная провинция. Без тщательного анализа ограничения алмазоносного пространства в глубинах Земли, выделения минерагенической провинции в структуре платформы с использованием комплекса тектонофизических (геодинамических), петрологических, минералогических, геоморфологических факторов мы можем попасть в ситуацию, когда будем безуспешно искать коренные месторождения алмазов на территориях, где их в реальности нет, а присутствуют только россыпи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алмазоносность* кимберлитов и родственных им пород Зимнего Берега / В.А.Ларченко, В.П.Степанов, Г.В.Минченко, И.А.Кечик // Вестник Воронежского ун-та. Геология. 2004. № 2. С. 134–147.
2. *Барышев А.Н.* Периодические геодинамические и металлогенические системы, их развитие и взаимодействие. – М.: ЦНИГРИ, 1999.
3. *Барышев А.Н.* Периодическое размещение алмазоносных систем и смежные проблемы геологии алмазов // Отечественная геология. 2006. № 6. С. 20–35.
4. *Барышев А.Н.* Иерархия конвективных геологических систем и их минерагеническое значение // Отечественная геология. 2017. № 1. С. 19–27.
5. *Барышев А.Н.* Геологическая позиция и генезис золоторудных месторождений Байкало-Патомской территории в связи с геодинамикой Центральной Азии // Отечественная геология. 2017. № 4. С. 98–108.
6. *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.
7. *Барышев А.Н., Хачатрян Г.К.* Минерагеническое и геодинамическое значение типов популяций алмаза // Отечественная геология. 2017. № 6. С. 3–13.
8. *Ваганов В.И.* Алмазные месторождения России и мира (основы прогнозирования). – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2000.
9. *Глубинное* строение, эволюция и полезные ископаемые раннедокембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы. Интерпретация материалов по опорному профилю 1-ЕВ, профилям 4В и Татсейс. / М.В.Минц, А.К.Сулейманов и др. – М.: ГЕОКАРТ, ГЕОС. 2010. Т. 1–2.
10. *Гончаров М.А.* Инверсия плотности в земной коре и складкообразование. – М.: Недра, 1979.
11. *Дукардт Ю.А., Борис Е.И.* Контроль кимберлитового вулканизма Якутской алмазоносной провинции палеорифтовыми структурами // Отечественная геология. 1996. № 10. С. 28–34.
12. *Дукардт Ю.А., Борис Е.И.* Авлакогенез и кимберлитовый магматизм. – Воронеж, 2000.
13. *Илупин И.П.* Кимберлиты Якутии – линейное расположение трубок и вещественный состав // Руды и металлы. 2003. № 5–6. С. 60–68.
14. *Карбонатиты* и кимберлиты (взаимоотношения, минерагения, прогноз) / А.А.Фролов, А.В.Лапин, А.В.Толстов и др. – М.: НИА-Природа, 2005.

15. *Новые тела* кимберлитов Зимнебережного поля (Архангельск): Петрография, прогнозные оценки / О.А.Богатиков, В.А.Ларченко, В.А.Кононова и др. // Доклады РАН. 2008. Т. 418. № 1. С. 81–85.
16. *О структурном* контроле размещения кимберлитовых тел (на примере Архангельской алмазоносной провинции) / Е.А.Андросов, В.В.Вержак, В.А.Ларченко, Г.В.Минченко // Геология алмазов – настоящее и будущее. – Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 2005. С. 31–43.
17. *Обзор* понятий и терминов в применении к металлогении / Под ред. Е.Т.Шаталова. – М.: Изд-во АН СССР, 1963.
18. *Прусакова Н.А.* Геолого-геофизическая прогнозно-поисковая модель Зимнебережного кимберлитового поля. // Автореф. ... канд. геол-минер. наук. – М.: ЦНИГРИ, 2004.
19. *Российский* металлогенический словарь. – С-Пб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2003.
20. *Ротационные* процессы в геологии и физике / Отв. ред. Е.Е.Милановский. – М.: КамКнига, 2007.
21. *Саблуков С.М.* Вулканизм Зимнего Берега и петрологические критерии алмазоносности кимберлитов // Автореф. … канд. геол.-минер. наук. – М.: ЦНИГРИ, 1995.
22. *Сорохтин О.Г., Митрофанов Ф.П., Сорохтин Н.О.* Глобальная эволюция Земли и происхождение алмазов. – М.: Наука, 2004.
23. Сычева-*Михайлова А.М.* Механизм тектонических процессов в обстановке инверсии плотности горных пород. – М.: Недра, 1973.
24. *Уникальные* перспективы алмазоносности Устьянского района в свете новых геологических данных компании «Архангельские алмазы» / С.М.Саблуков, Н.С.Ермаков, А.В.Белов и др. // Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов. Сборник докладов VIII Международной научно-практической конференции. – М.: ЦНИГРИ, 2018. С. 143.
25. *Устинов В.Н.* Условия формирования мезозойских и кайнозойских коллекторов алмазов Северо-Восточной Анголы // Отечественная геология. 2017. № 6. С. 40–51.
26. *Харькив А.Д., Зинчук Н.Н. Крючков А.И.* Коренные месторождения алмазов мира. – М.: Недра, 1998.
27. *Хачатрян Г.К.* Азотные и водородные центры в алмазе, их генетическая информативность и значение для решения прогнозно-поисковых задач // Руды и металлы. 2009. С. 73–80.
28. *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.
29. *Хачатрян Г.К.* Значение геологических моделей развития алмазоносных систем при оценке возраста алмаза // Руды и металлы. 2017. № 4. С. 112–117.
30. *Geological* map of the Fennoscandian shield / Geological Surveys of Finland, Norway and Sweden and the North-West Department of Natural Resources of Russia // Main compilers: T.Koistenen, M.B.Stephens, V.Bogachev et al. Helsinki. 2001.
31. *Kaminsky F.V., Khachatryan G.K.* The relationship between the distribution of the nitrogen impurity centres in diamond crystals and their internal structure and mechanism of growth // Lithos. 2004. Vol. 77. Nos. 1–4. P. 255–271.
32. *Kaminsky F.V.,Wirth R., Schreiber A.* Carbonatitic inclusions in deep mantle diamond from Juina, Brazil: new minerals in the carbonate-halide association // Jornal of the mineralogical association of Canada. 2013. Vol. 51. Part 5. P. 669–688.
33. *Taylor W.R., Milledge H.J.* Nitrogen aggregation character, thermal history and stable isotope composition of some xenolith-derived diamonds from Roberts Victor and Finch // Sixth Internat. Kimberlite Conf. Extended Abstr. – Novosibirsk, 1995. P. 620–622.