

# Камуфлетные взрывы как причина формирования структур, индицирующих алмазоносные районы (по материалам дистанционных и геофизических методов)

В.И. Горный<sup>1</sup>, Н.А. Караев<sup>2</sup>, Дж. Л. Ван Гендерен<sup>3</sup>, В.С. Фролов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН (НИЦЭБ РАН)

197110 Санкт-Петербург, ул. Корпусная, 18

E-mail: [img@at1895.spb.edu](mailto:img@at1895.spb.edu)

<sup>2</sup> ФГУНПП «ГЕОЛОГОРАЗВЕДКА»

193019, Санкт-Петербург, ул. Книповича, д.11, корп.2

E-mail: [virg@lek.ru](mailto:virg@lek.ru)

<sup>3</sup> International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC)

The Netherlands, 7500 AA Enschede, P.O.Box 6

E-mail: [genderen@itc.nl](mailto:genderen@itc.nl)

<sup>4</sup> ООО «Нефтегазгеодезия»

195112, Санкт-Петербург, Уткин пр., 15, литера А

E-mail: [mail@ngg.ru](mailto:mail@ngg.ru)

Комплексный анализ цифровых космических и геофизических материалов выявил закономерные иерархические системы овальных, кольцевых и линейных структур, индицирующих ряд алмазоносных районов России. Специфическая форма этих структур указала на то, что они могли быть сформированы сериями камуфлетных (подземных) взрывов. Анализ космических изображений и геолого-геофизических материалов, полученных на площади полигонов, где производились подземные ядерные взрывы, выявил подобие структур, возникающих при подземных ядерных взрывах и структур, индицирующих алмазоносные районы. С помощью методов подобия, применяемых в механике, выполнена количественная оценка глубины и энергии камуфлетных взрывов, которые могли создать структуры, индицирующие алмазоносные районы. Полученные значения соответствуют диапазону глубин самопроизвольной детонации тяжелых углеводородов. Это подтверждает гипотезу об образовании коренных месторождений алмазов под действием камуфлетных взрывов эндогенной природы. На этой основе предложены новая трактовка алмазоносных таксонов.

## Введение

Механизм формирования коренных месторождений алмазов до сих пор является дискуссионным вопросом. Уникальные свойства алмаза, высокие термодинамические условия его формирования привлекают внимание многих исследователей. Предложено множество гипотез происхождения коренных месторождений алмазов [1-13]. Эти гипотезы могут быть объединены в несколько групп:

1) Гипотезы, базирующиеся на идее быстрого подъема кимберлитовой магмы с глубин более 180 км в приповерхностные части коры [6-8; 10; 12]. В соответствии с этим механизмом, на глубине более 180 км существует слой, где температура и давление соответствуют условиям стабильности алмаза. Высокая скорость подъема кимберлитовой магмы необходима для предотвращения фазового перехода алмаза в графит за пределами условий его стабильности. По минералогическим данным скорость такого подъема оценена в 3.5 – 20 м/с [7; 12], а при наличии кавитации [1] - в диапазоне от 300-500 м/с до 1200 м/с.

2) «Взрывные» гипотезы, в соответствии с которыми алмазы формируются в результате подземных взрывов, которые создают необходимые для этого термодинамические условия [2- 5; 8; 11; 13]. Существуют два варианта этих гипотез. Первый - опирается на эндогенную природу взрывов. Он предполагает серию подземных взрывов при самопроизвольной детонации тяжелых углеводородов, поступающих в кору из мантии. Эти подземные взрывы создают необходимые для формирования алмаза давление, температуру и высокую скорость транспортировки продуктов взрывов в верхнюю часть коры [3;

8; 12]. Второй вариант - предполагает экзогенную природу энергии взрывов при формировании алмазов - "астроблемная" гипотеза [5; 13].

Для выявления истинных механизмов формирования коренных месторождений алмазов необходима детальная проверка вышеприведенных гипотез.

Большинство коренных месторождений алмазов сосредоточено в телах трубчатого типа, верхняя часть которых выполнена брекчиями кимберлитов/лампроитов с включениями ксенолитов мантийных пород [12]. Диаметр таких трубок обычно составляет несколько сотен метров. Некоторые из них разведаны горными выработками до глубин в 1 км [12]. Принимая во внимание, что условия стабильности алмаза должны существовать на значительно больших чем 1 км глубинах, учитывая наличие в алмазоносных трубках мантийных ксенолитов можно предположить, что такие трубки являются только приповерхностными проявлениями мощных процессов, которые начинаются в верхней мантии. Поэтому, естественно предполагать, что характерные размеры поверхностных проявлений подобных процессов должны быть одного порядка с мощностью литосферы. В связи с этим, для решения проблемы происхождения природных алмазов необходимо исследовать значительно более обширные территории, чем те, которые находятся в непосредственной близости от алмазоносных тел. Представляется, что подобное исследование нескольких алмазоносных районов позволит выявить закономерности в их проявлениях и найти последствия высокоэнергетичных процессов, сформировавших месторождения алмазов. Учитывая предполагаемые значительные пространственные размеры структур, контролирующих коренные месторождения алмазов (не менее, чем 150-200 км), космические и геофизические материалы представляются наиболее подходящими для решения данной задачи.

### **Структуры, контролирующие алмазоносные районы (по результатам анализа космических и геофизических материалов)**

*Космические материалы, использованные для выявления структур,  
контролирующих алмазоносные районы*

С помощью космических снимков среднего разрешения Ю.Н.Сорокуров и В.Калмыков [14-17] исследовали проявления алмазоносных районов Севера Европы, Восточной Сибири, Южной Африки и Индостана. Ими обнаружено, что алмазоносные районы контролируются кольцевыми структурами, диаметр которых может достигать 200 км.

Для исследования детального строения этих структур нами использовались цифровые изображения, полученные со спутника NOAA(AVHRR). Выбор этих материалов объясняется чрезвычайно высокой чувствительностью датчиков, установленных на этом спутнике. Для анализа, в масштабе 1:1 000 000 были подготовлены следующие материалы:

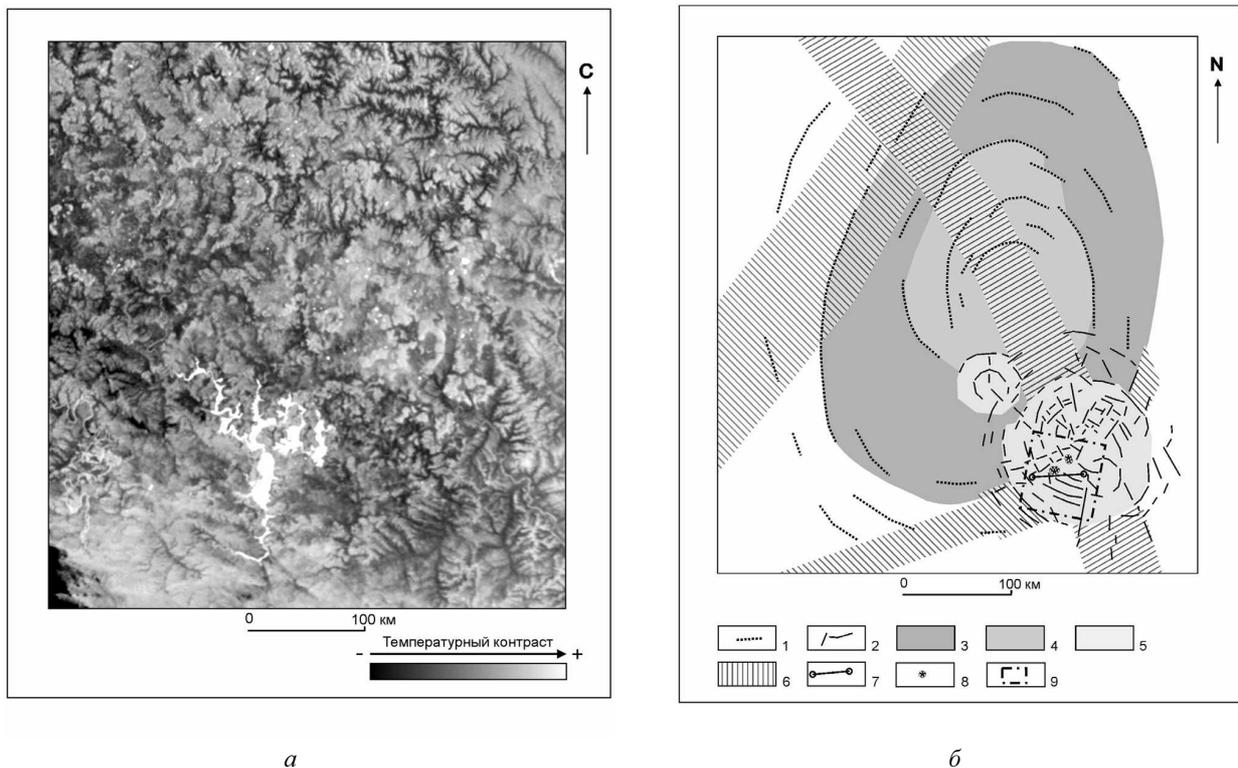
- карты ночных температурных контрастов и карта конвективного теплового потока для Архангельского алмазоносного района (Рис. 1а и рис. 2а).
- цветные композиты, совмещающие карты ночных температурных контрастов или конвективного теплового потока (красный цвет) с коэффициентами спектральной яркости в ближнем ИК диапазоне (0.70-1.10 мкм) (зеленый цвет) и цифровые модели рельефа (синий цвет). Рельеф дневной поверхности на цветных композитах был подчеркнут ложной подсветкой, что улучшило выраженность рельефа дневной поверхности на подготовленной дистанционной основе.
- для всей территории Европейской части России, Урала и Западной Сибири и для Мирнинского алмазоносного района в Якутии по единой технологии были подготовлены уравненные цифровые мозаики масштаба 1:2 500 000.

*Региональные структуры, индицирующие алмазоносные районы*

На региональных дистанционных материалах были выявлены гигантские кольцевые структуры (~ 1400 км в диаметре с концентрическим центром диаметром ~ 300 км) и овальные структуры (длина большой оси

~ 800-1000 км с ядерными областями диаметром ~ 300-400 км) [18-20]. Центры гигантских кольцевых структур были интерпретированы как позиции и палеопозиции центров мантийных плюмов, образовавшихся в верхней мантии (в соответствии с терминологией В.П.Трубицина [21; 22]). Овальные структуры – как палеопозиции “горячих точек”, созданных “горячими мантийными струями”, поднимавшимися от поверхности Земного ядра к подошве литосферы. Обусловленные движением литосферной плиты субпараллельные цепочки таких овальных палеопозиций, были выявлены на Восточно-Европейской и Западно-Сибирской и Сибирской платформах [18-20]. Отмечено, что на севере Восточно-Европейской платформы, на Южном Урале [18] и в Якутии (район г. Мирный) все известные кимберлитовые и лампроитовые тела располагаются во внешних зонах палеопозиций “горячих точек” или центров мантийных плюмов (наиболее плотно в областях их пересечений). Классическим примером может служить выявленная в Якутии региональная овальная структура с хорошо развитой внешней зоной, включающая коренные месторождения в район г. Мирный (Рис.1).

По результатам анализа космических материалов отмечено: - богатые месторождения контролируются региональными овальными структурами – палеопозициями “горячих точек” (Рис.1, 2); - кимберлитовые и лампроитовые тела Финляндии и Карелии с непромышленным содержанием алмазов [23,24] – палеопозициями центров мантийных плюмов.



а

б

Рис. 1 а. Карта ночных температурных контрастов региона Мирнинского кимберлитового поля (Якутия), полученная по данным космической съемки спутником NOAA(AVHRR).

Рис.1б. Схема дешифрирования элементов тектонических структур на карте ночных температурных контрастов: А. Простого строения (“спутники”), Б. Сложного строения с низким конвективным тепловым районом Мирнинского кимберлитового поля. Дуговые элементы региональной овальной структуры – палеопозиции “горячей точки”. 2.

Дуговые и линейные элементы кольцевых структур. 3. Внешняя зона региональной овальной структуры.

4. Ядерная часть региональной овальной структуры. 5. Кольцевые структуры. 6. Зоны сжатия и корреляции линеаментов. 7. Сейсморазведочный профиль № 28. 8. Кимберлитовые тела.

9. Положение сцены высокого геометрического разрешения (спутник Terra (ASTER))

Дешифрирование цифровой дистанционной основы масштаба 1:1 000 000 показало, что общим признаком всех алмазоносных районов является их индикация кольцевыми структурами второго порядка, с четко выраженным радиально-концентрическим строением. Отмечено, что вблизи этих структур наблюдаются кольцевые структуры того же или меньшего диаметра с более простым внутренним строением, названные нами – “спутниками”. Форма и внутренняя структура центральных кольцевых структур напоминает паутину (Рис. 1,2). Поэтому такие структуры названы нами структурами типа “паутинка”. Часто такая структура типа “паутинка” располагается в пересечении региональных линейных зон (Рис.1,2). Диаметр таких структур и их “спутников” варьирует от 50 км до 200 км. Иногда “спутники” вытягиваются вдоль региональных линейных зон (см. “S” на Рис. 2б). В целом, система кольцевых структур, состоящая из центральной кольцевой структуры типа “паутинка” и “спутников” выглядит как цветок. Поэтому, в дальнейшем такая система нами будет называться структура типа “каменный цветок”. Характерным примером такой структуры, является структура, индицирующая Архангельский алмазоносный район (Рис.2). Размер всей Архангельской структуры достигает 300 км. Две структуры типа “паутинка” диаметром около 50 км расположены в центре Архангельской структуры типа “каменный цветок”. Западная структура типа “паутинка” проявлена более четко, чем восточная. Кроме того, западная структура характеризуется отрицательным конвективным тепловым потоком и расположена она в области пересечения региональных линейных зон (Рис. 2). Несколько “спутников” располагается вдоль региональной линейной зоны Юго-Восточного направления. Остальные “спутники” окружают центральные структуры типа “паутинка”. Внутри Архангельской структуры типа “каменный цветок” выявлено множество трубчатых тел основного и ультраосновного состава, но трубки с алмазами располагаются, в основном, в периферии западной структуры типа “паутинка” (Рис. 2б).

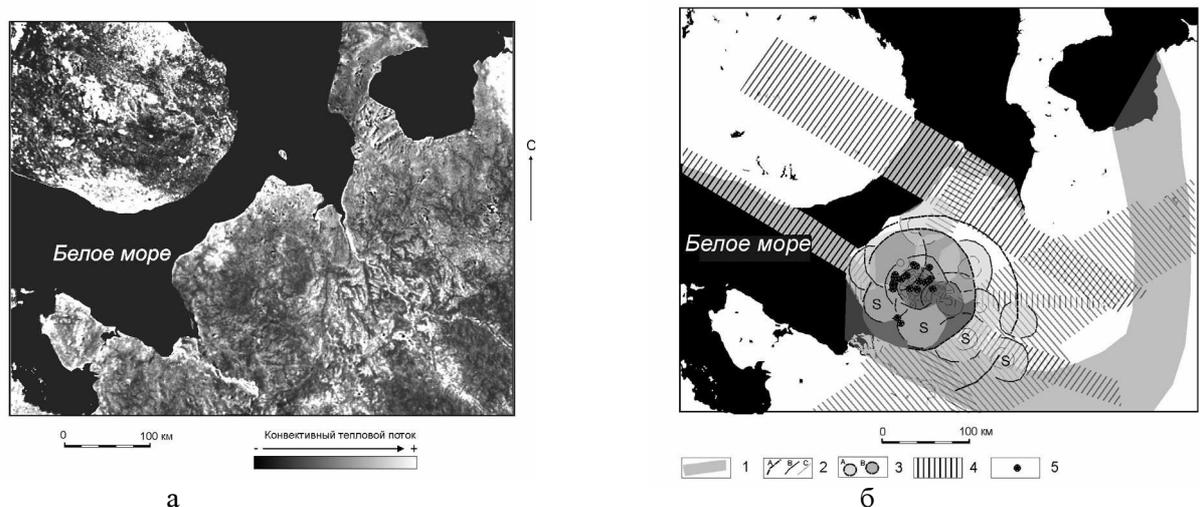


Рис. 2 а. Карта конвективного теплового потока на площадь Архангельского алмазоносного района (по материалам съемок спутником NOAA (AVHRR)).

Рис.2 б. Схема дешифрирования элементов тектонических структур на карте конвективного теплового потока Архангельского алмазоносного района. Участок внешней зоны Мезской региональной овальной структуры.  
 2. Дуговые и линейные элементы: А. Первого, Б. Второго, В. Третьего порядка. 3. Кольцевые структуры потоком.  
 4. Зоны сгущения и корреляции линеаментов. 5. Кимберлитовые тела

Диаметр Мирнинской структуры типа “паутинка” в Якутии достигает 100 км (Рис.1). Эта структура пересечена региональной линейной зоной субмеридионального направления и широкой дуговой зоной, представляющей собой внешнюю зону региональной овальной структуры - палеопозиции “горячей точки”.

В южной и западной периферии Мирнинской структуры типа “паутинка” выявлено несколько меньших по диаметру “спутников” (Рис.1). Кимберлитовые трубки располагаются внутри структуры типа “паутинка” в области между ее центром и западной границей этой структуры. Все трубки расположены вдоль внутренней границы внешней зоны региональной овальной структуры.

### Глубинное строение структур типа “паутинка”

Анализ сейсморазведочного профиля (Рис.3), пересекающего район кимберлитовой трубки выявил особенности глубинного строения Мирнинского алмазоносного района. Прежде всего, обращает на себя внимание несколько контрастных субпараллельных наклонных сейсмических границ (Рис.3), выявленных ранее Я.Я. Биезайсом и др. [25]. Сопоставление сейсморазведочного профиля с картой ночных температурных контрастов земной поверхности, составленной по материалам спутника NOAA позволило соотнести наклонные сейсмические границы с системой концентрических дуговых элементов, структуры типа “паутина”. В результате была предложена трехмерная модель строения Мирнинского алмазоносного района, представляющая собой систему со-осных вогнутых параболоидов. По данным сейсморазведки эти параболоиды сформированы поверхностями повышенной трещиноватости [25]. Дистанционные данные подтверждают этот вывод, т.к. дуговые элементы структуры типа “паутинка”, индицирующие наклонные сейсмические границы, в рельефе выражены системой долин в рельефе дневной поверхности. Известно, что подобные долины индицируют тектонические нарушения или зоны повышенной трещиноватости, более подверженные эрозии, чем окружающие монолитные породы. Необходимо отметить, что в геофизических полях Мирнинская структура типа “паутинка” выражена отрицательными аномалиями поля силы тяжести и магнитного поля. Этот факт ранее был интерпретирован как следствие высокой трещиноватости пород [25].

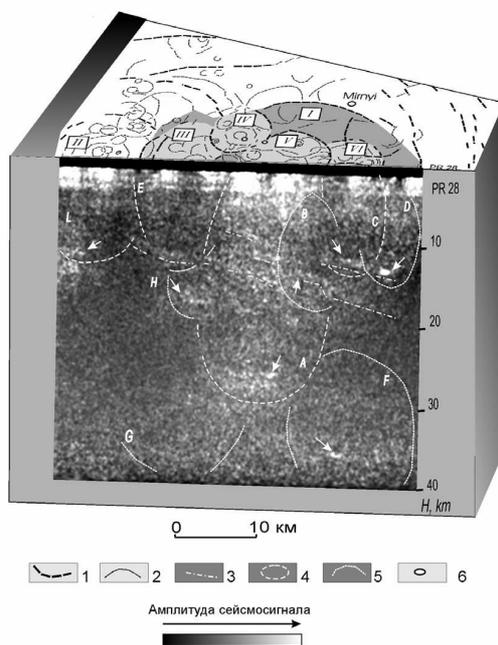


Рис. 3. 3-х мерная модель Мирнинского кимберлитового поля, построенная по данным космической съемки спутником Terra (ASTER) и сейсморазведки. Сейсморазведочный профиль №28 показан на фронте модели. 1, 2. Кольцевые структуры первого и второго порядков, отделиффрированные на материалах спутника Terra (ASTER) (горизонтальная часть модели). 3. Линейные сейсмические границы. 4. Овальные структуры на сейсморазведочном профиле, индицирующие локальными кольцевыми структурами на дневной поверхности. 5. Овальные структуры на сейсморазведочном профиле не выраженные на дневной поверхности. 6. Кимберлитовые тела. Стрелками на сейсморазведочном профиле показаны интенсивные отражения сейсмических волн внутри овальных структур

Изучение выраженности кимберлитовых полей на материалах дистанционных и геофизических съемок было выполнено на основе анализа цифровых изображений высокого разрешения спутника Terra (ASTER) и сейсморазведочных данных, полученных на территорию Мирнинского алмазоносного района. Для этого на основе комбинации изображений, видимого, ближнего ИК и тепловых каналов спектрорадиометра ASTER был подготовлен цветовой композит. В результате, в пределах кимберлитового поля отдешифрованы несколько локальных кольцевых структур. Самая большая кольцевая структура (I на Рис.3) имеет центр диаметром 12 км (V на Рис.3). По данным тепловых каналов спектрорадиометра ASTER этот центр характеризуется пониженной температурой поверхности и положительной формой рельефа дневной поверхности (+30м - +40м по данным цифровой модели рельефа, построенной по стереопарам спектрорадиометра ASTER). В то же время, кольцевая структура III (Рис.3) в рельефе выражена в форме слабой депрессии.

Детальный комплексный анализ цветового композита (ASTER) с сейсмическим разрезом выявил на сейсмическом разрезе серию овальных и кольцевых структур (A-L на Рис.3). Размеры этих структур варьируют от 8 км до 16 км по латерали и от 10 км до ~ 30 км по глубине. Характерными чертами этих структур являются: - наличие интенсивного отражения сейсмических волн в нижней части овальных и кольцевых структур (Рис.3); - нижние части этих структур касаются наклонных контрастных сейсмических границ; -концентрическая текстура сейсмических сигналов внутри овальных структур.

Несколько овальных структур на сейморазрезе (A, C, E и G на Рис. 3) индицируются на поверхности локальными кольцевыми структурами (соответственно V, VI, III и II на Рис. 3). Необходимо подчеркнуть, что центральная, наиболее контрастно проявленная на сейморазрезе овальная структура A, индицируется на поверхности центром V кольцевой структуры I (Рис. 3). Кимберлитовые тела расположены в районе пересечения поверхностных кольцевых структур IV, III и V, также как и в районе пересечения на сеймопрофиле овальных структур A и E (Рис. 3). Кимберлитовые трубки, расположенные в районе г. Мирный находятся на внешней границе поверхностной кольцевой структуры I (Рис. 3).

Таким образом, региональные и детальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Алмазоносные районы и кимберлитовые поля индицируются иерархической системой овальных и кольцевых структур, выявляемых по материалам космических съемок. Эта иерархическая система состоит из гигантских овальных или кольцевых структур с хорошо выраженной внешней зоной (палеопозиции “горячих точек” или центры мантийных плюмов с характерными размерами ~ 300 – 1000 км). Во внешних зонах этих структур располагаются индицирующие алмазоносные районы системы кольцевых структур типа “каменный цветок” с центральной кольцевой структурой типа “паутинка” (характерный диаметр 50 - 200 км). Расположенная внутри структуры типа “паутинка” система локальных кольцевых структур с характерным размером 15-30 км включает в себя кимберлитовые/лампроитовые тела.

2. Алмазоносные районы, содержащие богатые промышленные коренные месторождения алмазов, расположены в пределах внешней зоны региональных овальных структур - палеопозиций “горячих точек”.

### **Механизм формирования структур типа “паутинка”**

Таким образом, наш анализ космических и геофизических материалов подтвердил вывод Ю.Н. Серокурова и В.Д. Калмыкова о том, что алмазоносные районы индицируются кольцевыми структурами, диаметр которых достигает 200 км.

В дополнение к этому нами отмечено, что алмазоносные районы индицируются специфическими системами кольцевых структур – структурами типа “каменный цветок”, в центральной части которых расположена кольцевая структура типа “паутинка”. Обычно структуры типа “паутинка” характеризуются пониженной ночной температурой поверхности или отрицательным конвективным тепловым потоком. Наличие в пределах Мирнинской структуры типа «паутинка» отрицательных гравитационной и магнитной

аномалий и специфика отраженных сейсмических сигналов указывают на значительную нарушенность недр под структурами типа “паутинка”. Совмещение карты ночных температурных контрастов с сейсмическим разрезом позволило построить 3-х мерную модель Мирнинской структуры типа “паутинка” в виде системы, вложенных одна в другую вогнутых поверхностей вращения, представляющих собой системы трещиноватости пород.

Таким образом, нахождение физического механизма, который может сформировать такую систему трещиноватости пород в массиве может стать ключом к пониманию процессов формирования кольцевых структур типа “паутинка”.

Кольцевые структуры эндогенного происхождения могут быть сформированы при различных процессах. Прежде всего, такие структуры могут формироваться при внедрении интрузивных тел в верхние горизонты коры. Другим таким процессом являются подземные (камуфлетные) взрывы. Кроме того, такие структуры могут формироваться в результате импактных событий [5]. Каждый из этих высокоэнергетических процессов ведет к высокой трещиноватости пород. Внедрение магматических интрузий обычно сопровождается изменениями вмещающих горных пород (включая систему трещиноватости), которые представляют собой выпуклые поверхности вращения. В то же время, внутри Мирнинской структуры типа “паутинка” в коре выявлена система трещиноватости в форме вогнутых поверхностей вращения. В связи с этим, есть основания для проверки гипотезы о том, что структуры типа “паутинка” сформированы подземными взрывами (эндогенного или экзогенного генезиса).

Импактная гипотеза противоречит выявленной нами закономерности преимущественного расположения алмазоносных районов в областях пересечений палеопозиций структур восходящей мантийной конвекции – палеопозиций “горячих точек” или центров мантийных плюмов [18, 19]. Трудно предположить, что импактные события происходили столь целенаправленно по отношению к этим палеопозициям. Более того, детальные петрологические исследования указывают на эндогенный генезис кольцевых структур, которые ранее рассматривались как импактные [4]. Поэтому мы провели проверку гипотезы подземных (камуфлетных) взрывов, при которых могут создаваться как необходимые для формирования алмазов условия, так и происходить их быстрая транспортировка в верхние горизонты коры.

Один из способов проверки выдвинутой гипотезы – дешифрирование и анализ изображений, полученных с космических и авиационных носителей на территорию полигонов на которых производились подземные ядерные взрывы, где, как будет показано ниже, возникающие после взрывов структуры аналогичны тем, которые индицируют алмазоносные районы (см. Рис.1 и Рис.3). Различие заключается только в масштабе явлений. Известно, что многие геологические и геофизические процессы различного масштаба являются подобными, но только относительно недавно к этому вопросу появился практический интерес. В результате, в геологической литературе появилось множество новых идей, изменяющих имевшиеся представления о геосистемах [27, 28, 29]. Например, недавно Nikoga и Goring показали [30], что самоподобие или масштабная инвариантность геологических явлений является скорее правилом, чем исключением.

На Рис.4а показано, полученное спутником SPOT панхроматическое цифровое изображение эпицентра подземного ядерного взрыва, проведенного в скважине на индийском ядерном полигоне в пустыне Раджастан в 1974 г. Панорамный аэрофотоснимок этого эпицентра приведен на Рис. 4б. Космический снимок зафиксировал хорошо проявленную кольцевую структуру, индицирующую провалившийся кратер, сформировавшийся в результате подземного ядерного взрыва. Строение кратера характеризуется хорошо развитой системой радиальных и концентрических трещин (Рис. 4б).

Основные закономерности формирования кратеров провала, возникающих в эпицентрах подземных (камуфлетных) ядерных взрывов детально исследованы в работах выполненных под руководством Е. Теллера (E.Teller) [31] и В.Н.Родионова и др. [32]. На Рис. 5 показана зависимость формы структур, возникающих в результате камуфлетных взрывов от глубины заложения ядерных зарядов. В зависимости от соотношения глубины и мощности зарядов форма структур в разрезе, возникающих после взрывов варьирует от простого кратера на поверхности (I-III на Рис. 5а) к овальной (в разрезе) структуре,

незначительно проявленной в форме повышения на поверхности (IV на Рис. 5а), до сложной структуры, включающей кратер провала на поверхности, столб обрушения, заполненный дробленой породой и сферическую полость (V-VI на рис. 5а). При значительных глубинах взрыва наблюдаются простейшие структуры, когда формируется только сферическая полость и вокруг нее шарообразная зона трещиноватости (VIII-XI на Рис. 5а). Случаи IV, V и VI (Рис. 5а) более типичны для камуфлетных (подземных) взрывов. Структуры, формируемые подземными ядерными взрывами детально исследованы с применением сейсмического и радиоактивного каротажа скважин [31, 33] и с помощью термических и аэродинамических наблюдений, проведенных с применением тепловой аэросъемки и термометрических измерений по профилям, пересекающим эпицентры взрывов [34]. Сейсмическим каротажем выявлена овальная область высокой трещиноватости и разрушения пород, вытягивающаяся кверху от точки взрыва [33]. В нижней части первоначальной сферической полости обычно наблюдается застывшая стеклообразная масса. Иногда наблюдаются системы жил, выполненные застывшим расплавом, инжестированным из полости во вмещающие породы (Рис. 5а) [31]. Тепловой аэросъемкой и наземными термометрическими наблюдениями доказано, что контакт столба обрушения и вмещающих пород является наиболее проницаемой областью [34] и направление движения флюидов в этой зоне высокой проницаемости зависит от сезона года. В результате граница столба обрушения индицируется на поверхности положительными температурными аномалиями в холодное время года и отрицательными летом [34].

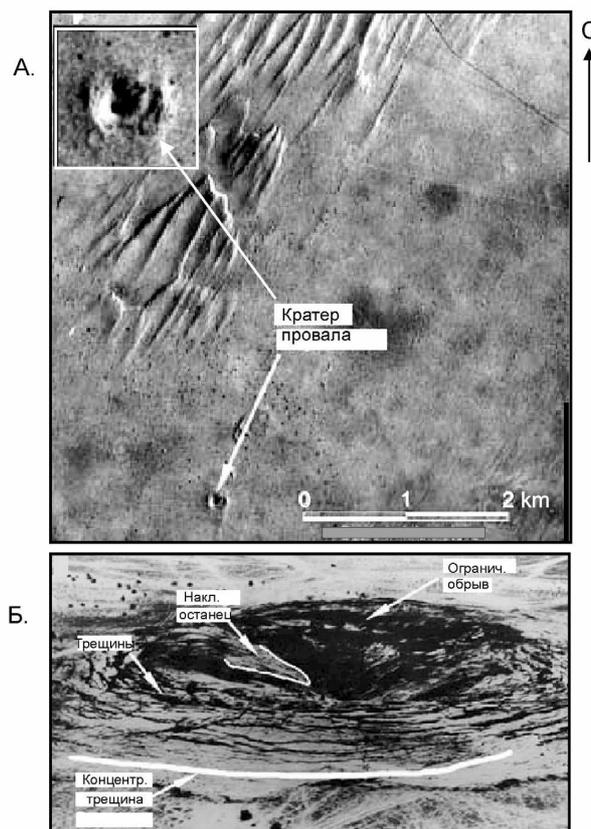


Рис. 4. А. - Космическое изображение кратера от подземного ядерного взрыва (18.05.74) на индийском полигоне в пустыне Раджастан, полученное спутником Spot (25.03.95). Б. - Перспективный аэроснимок кратера, образовавшегося в эпицентре подземного ядерного взрыва в пустыне Раджастан, проведенного Индией 18.05.74

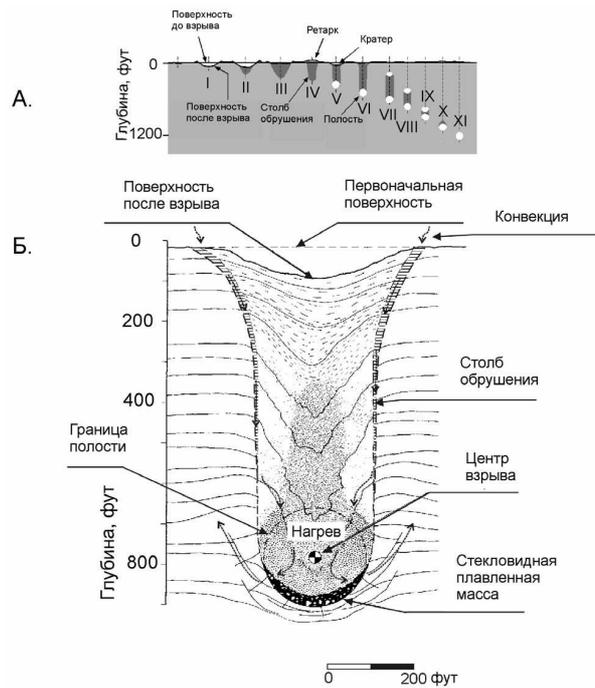


Рис. 5. А. - Модельный ряд структур, возникающих при проведении на различной глубине в туфах подземных ядерных взрывах мощностью 1 кт ТНТ. При глубине взрыва 170 м образуется столб обрушения пород и кратер провала. При большей глубине взрыва наблюдаются меньшие изменения дневной поверхности. Ретарк (Retarc) это возвышенность, формируемая в эпицентре подземного взрыва (по Wallace, 1998) при определенном соотношении глубины и мощности заряда. Б. - Геологический разрез типичного кратера в аллювии со столбом обрушения пород, сформировавшимся в результате подземного ядерного взрыва. Штриховкой показаны нарушения целостности пород в столбе обрушения. Направление конвективных потоков соответствует теплomu сезону года (По Teller et al., 1968 и Бусыгин и др., 1999)

Сравнение космического изображения эпицентра подземного ядерного взрыва и структур типа “паутинка”, индицирующих алмазоносные районы (см. Рис. 1, 2 и 4а), не смотря на значительные различия в размерах, показывает поразительное сходство форм и строения этих объектов. Это сходство особенно наглядно для Архангельской структуры типа “паутинка” и кольцевой структуры, образовавшейся над местом подземного ядерного взрыва в пустыне Раджастан (Рис. 2а и Рис. 4а).

Таким образом, наблюдается подобие структур и процессов, возникающих в эпицентрах подземных ядерных взрывов и структур типа “паутинка”, индицирующих алмазоносные районы.

Как было показано выше, комплексный анализ дистанционных и сейсморазведочных материалов для Мирнинского алмазоносного района выявил овальные структуры на сейсмическом разрезе и их проявление на поверхности в форме кольцевых структур. Сравнение этих овальных структур (Рис.3) со структурами, сформированными подземными ядерными взрывами (Рис. 5) опять демонстрирует высокое подобие этих объектов. Например, “неглубинная” структура Е на Рис. 3 выглядит как кратер III на Рис. 5а, сформированный заглубленным или глубинным взрывом. Структуры А, В, С и D подобны структурам IV-VII на Рис. 5а, сформированным полностью глубинными взрывами. Такое подобие подчеркивается локальным изометричным повышением рельефа над овальной (в разрезе) структурой А, проявленной на дневной поверхности в виде кольцевой структуры V (Рис.3). “Глубинные” овальные (в разрезе) структуры F, G и H (Рис. 3) выглядят как структуры IX-XI на Рис. 5а и могут индицировать сферические полости и зоны высокой трещиноватости пород вокруг этих полостей. Отмеченные выше интенсивные сейсмические отражения в нижних областях овальных структур (Рис. 3) расположены аналогично застывшим стекловидным массам в нижней части сферических полостей, возникающих при подземных взрывах и могут индицировать породы, подвергшиеся интенсивному давлению и плавлению (Рис. 5б).

В результате, отмеченные выше качественные признаки подобия структур, контролирующих алмазоносные районы и структуры, сформированные подземными ядерными взрывами позволяют сделать вывод о том, что структуры типа “паутинка”, индицирующие алмазоносные районы вызваны камуфлетными взрывами эндогенного генезиса.

Как следует из теорий подобия [27, 30, 35, 36], механические процессы являются подобными при одинаковых безразмерных критериях. Форма и взаимное положение элементов этих структур, внутреннее строение - подобны. Поэтому есть основание предположить, что структуры типа “паутинка”, индицирующие алмазоносные районы также сформированы идентичными процессами – камуфлетными взрывами. Хотя, безусловно, при формировании алмазоносных районов мощность и глубина таких взрывов должны были бы быть значительно выше, чем при ядерных взрывах. Согласно [32] для подземных взрывов для больших времен с момента взрыва -  $t$ , подобие радиусов кратеров -  $R$  и глубин взрывов -  $H$  дается выражением (1):

$$\varepsilon / (\rho g H^4 + H^3 \sigma) = const \quad (1)$$

и выражением (2), связывающих глубины взрывов и радиусы кратеров простым масштабным соотношением:

$$H_2/H_1 = R_2/R_1 \quad (2)$$

где:  $\varepsilon$ - энергия заряда, Дж (часто энергия заряда выражается в килотоннах тринитротолуола – *кт ТНТ*);  $\rho$  – плотность пород,  $кг/м^3$ ;  $\sigma$ – модуль сжатия (предельное давление разрушающее породу), Па.

Согласно выражениям (1, 2), если радиус кратера, глубина и энергия заряда подземного ядерного взрыва (прототипа) известны, то становится возможным оценить ТНТ эквивалент и глубину взрыва, который сформировал структуру типа “паутинка”, индицирующую алмазоносный район.

Примем случай III на Рис. 5а как наиболее близкий к трехмерной модели, построенной для Мирнинской структуры типа «паутинка» (Рис.1). В качестве прототипа для Мирнинской и Магнитогорской кольцевых структур [18] примем подземный ядерный взрыв, произведенный на полигоне штата Невада (США) (Таб. 1), а, учитывая подобие кратеров, для Архангельского алмазоносного района в качестве прототипа примем взрыв Pokhram 1974 г на индийском ядерном полигоне.

Таблица 1. Параметры подземных ядерных взрывов, проведенных на полигоне в штате Невада (США), использованные в качестве прототипов (по Teller, E. et al.)

Название взрыва	Породы	Средняя плотность пород над зарядом $\rho$ , $кг/м^3$	Модуль упругости пород над зарядом $\sigma$ , Па	Мощность заряда $Y$ , кт TNT	Глубина взрыва $H$ , м	Радиус кратера $R$ , м
Sedan	Аллювий	1552	$0.1 \cdot 10^8$	100.0	194.0	183
Neptune	Туф	1890	$1.0 \cdot 10^8$	0.115	30.5	30.5
Danny Boy	Базальт	2730	$1.0 \cdot 10^8$	0.42	33.5	32.6
Pokhram 1974	Аллювий	1552	$0.1 \cdot 10^8$	12.0	107.0	60.0

В результате, для Мирнинской, Магнитогорской и Архангельской структур оценки энергии взрывов, которые могли сформировать эти структуры имеют один и тот же порядок величины. Вариации, полученных значений энергий не велики и могут быть вызваны незнанием многих факторов. Оценки

глубин дают меньший разброс значений и показывают, что взрыв, который мог сформировать Мирнинскую кольцевую структуру типа «паутинка» мог произойти на глубине ~50 км (Табл. 2).

Необходимо отметить, что сейсмопрофиль “Уралсейс” зафиксировал под Магнитогорской кольцевой структурой - контрастную овальную структуру [18]. Размеры этой овальной структуры, измеренные на сейсмопрофиле составляют ~ 50 км по латерати и 60 км по глубине. Центр ее расположен на глубине ~ 60 км. На поверхности эта овальная структура индицируется хорошо выраженной кольцевой структурой диаметром 120-150 км. Внутри этой кольцевой структуры в железорудном карьере обнаружена дайка лампроитов [37]. Внешняя зона этой поверхностной кольцевой структуры маркируется интенсивной кольцевой положительной магнитной аномалией, а внутренняя часть – обширным понижением магнитного поля [38]. Магнитогорская кольцевая структура расположена внутри региональной положительной аномалии поля силы тяжести, но сама структура характеризуется слабым локальным понижением этого поля [38]. Все это указывает на то, что Магнитогорская кольцевая структура и овальная структура, зафиксированная под ней на сейсмопрофиле контролируют область разрушения и трещиноватости пород в коре (случай XI на Рис.5 а). В этом случае место взрыва должно соответствовать центру овальной структуры, зафиксированному на сейсмопрофиле на глубине ~ 60 км. Оценка же глубины возможного взрыва, выполненная для Магнитогорской кольцевой структуры на основе подобия с радиусом кратера подземного ядерного взрыва лежит в диапазоне 60-80 км (Табл. 2). Полученный таким образом диапазон глубин хорошо совпадает с глубиной центра овальной структуры по данным сейморазведки. Поэтому оценки глубин взрывов, которые могли сформировать Мирнинскую и Архангельскую структуры типа “паутинка” можно считать обоснованными.

Таблица 2. Оценка параметров природных камуфлетных взрывов, сформировавших кратеры, контролирующие алмазоносные районы

<i>Название района</i>	<i>Ядерный взрыв - прототип/ Страна</i>	<i>Мощность заряда Y, кт TNT</i>	<i>Глубина взрыва H, км</i>	<i>Радиус кольцевой структуры типа “паутинка” - кратера R, км</i>	<i>Эффективный радиус скопления сдетанировавших тяжелых углеводородов R, км</i>
Мирнинский	Sedan, Neptune, Danny Boy/США	$2.3 \cdot 10^{10}$	~50	50	~ 20
Архангельский	Pokhram 1974/ Индия	$0.6 \cdot 10^{10}$	~40	23	~ 10
Магнитогорский	Sedan, Neptune, Danny Boy/США	$4.9 \cdot 10^{10} - 1.7 \cdot 10^{11}$	~60 - 80	60 - 75	~ 30 - ~ 40

Вывод о том, что поверхностные структуры, индицирующие алмазоносные районы сформированы подземными взрывами позволяет поставить следующие вопросы:

1. Какова природа этих взрывов?
2. Могут ли такие взрывы формировать алмазы?

Природа подземных взрывов, которые могли бы сформировать алмазоносные районы может быть выявлена на основе анализа известного парагенезиса месторождений алмазов и проявлений нефти и газа. Достаточно отметить, что выходы метана наблюдаются на многих разрабатываемых кимберлитовых трубках. В.А.Милашев [8] отметил ранее, что причиной подземных взрывов, формирующих кимберлитовые трубки, может быть самопроизвольная детонация тяжелых углеводородов. И.К.Карповым и др. [2] детально исследовано поведение системы углерод-водород (С-Н) при подъеме от верхней мантии в верхнюю кору. Авторы пришли к выводу, что метастабильные тяжелые углеводороды при определенных РТ-условиях могут самопроизвольно детонировать в отсутствие кислорода. В результате такой детонации тяжелые углеводороды распадаются на метан и твердый углерод (графит или алмаз). Диапазон глубин такого фазового перехода 30-90 км. В результате взрыва давление может достигать 210 кбар, а температура 4800 °С. Выделившаяся энергия при таком фазовом переходе, происшедшем на глубине 62 км при радиусе сферической области, занимаемой тяжелыми углеводородами от ~ 2 м – 40 м сравнима с энергией, выделяющейся при землетрясениях, соответственно ~ 10<sup>11</sup> – 10<sup>15</sup> Дж или ~ 20 т – 1.9\*10<sup>5</sup> т ТНТ [2]. Эти данные, вместе с полученными выше значениями энергий подземных взрывов (Таб. 2), которые могли сформировать Магнитогорскую, Мирнинскую и Архангельскую кольцевые структуры позволяют оценить (на основе теории подобия) эффективные радиусы областей, которые должны занимать тяжелые углеводороды, взрыв которых, может сформировать кратеры, индицирующие алмазоносные районы.

Масштабный коэффициент в этом случае может быть представлен как [32]:

$$\mathcal{R}_2 = \mathcal{R}_1(Y_2/Y_1)^{1/3} \quad (3)$$

где:  $\mathcal{R}_1$ ,  $\mathcal{R}_2$  и  $Y_1$ ,  $Y_2$  соответственно, радиусы и энергии взрывов двух областей, заполненных тяжелыми углеводородами.

В результате, (Табл. 2) -  $\mathcal{R}_2 = \sim 20$  км для Мирнинской структуры,  $\mathcal{R}_2 = \sim 10$  км для Архангельской структуры типа “паутинка”,  $\mathcal{R}_2 = \sim 30$  км - 40 км для Магнитогорской кольцевой структуры. Полученные значения радиусов углеводородных скоплений меньше радиусов соответствующих кратеров. В соответствии с теорией подземного взрыва и результатами наблюдений структур, возникающих после таких взрывов [31] радиус кратера должен быть больше радиуса полости, возникающей в результате подземного взрыва. Соответственно, радиус области, заполненной зарядом должен быть меньше радиуса, сформированного взрывом кратера. Полученные для Мирнинского, Архангельского и Магнитогорского районов оценки эквивалентных радиусов скоплений тяжелых углеводородов не противоречат теории. Более того, наличие интенсивных сейсмических отражений (показано стрелками на Рис.3) от наклонных зон трещиноватости, которые могли быть каналами для флюидов, указывает на возможную генетическую связь этих наклонных зон высокой трещиноватости и овальных структур, зарегистрированных на сейсмопрофиле.

Таким образом, наши оценки глубины камуфлетных взрывов, которые могли сформировать Мирнинскую  $H = \sim 50$  км, Архангельскую  $H = \sim 40$  км структуры типа “паутина” и Магнитогорскую кольцевую структуру  $H = \sim 60 - 80$  км (Табл. 2) находятся в середине интервала глубин самопроизвольной детонации тяжелых углеводородов (30-90 км). Более того, оценки размеров скоплений тяжелых углеводородов оказались меньше чем размеры соответствующих структур типа “паутинка”. Это позволяет сделать вывод, что структуры типа “паутинка” индицируют кратеры, которые могли быть сформированы при камуфлетных взрывах, вызванных самопроизвольной детонацией тяжелых углеводородов. Подтверждением возможности формирования коренных месторождений алмазов за счет самопроизвольной детонации мантийных тяжелых углеводородов является находка В.С.Фроловым макровключений битумов в массивных кимберлитах подземного рудника на трубке Айхал.

Необходимо отметить, что овальные структуры на сейсмопрофиле (Рис. 3), зарегистрированные на глубинах менее 30 км (5-30 км) также напоминают структуры, формируемые камуфлетными взрывами (Рис.5), но эти глубины слишком малы для самопроизвольной детонации тяжелых углеводородов. Это указывает на возможность иных механизмов для камуфлетных взрывов на малых глубинах. Представляется, что возможны два механизма “малоглубинных” взрывов внутри алмазоносных районов:

1) Когда разогретое при детонации тяжелых углеводородов вещество верхней мантии или нижней коры быстро транспортируется в верхние, обводненные горизонты коры, где при контакте с водонасыщенными породами могут происходить взрывоподобные явления [12].

2) Взрывоподобный процесс выделения энергии при нестабильной паро-водяной конвекции, инициируемой дополнительным прогревом водонасыщенных разломов и зон трещиноватости [39].

В.С.Панфилов [39] показал, что, выделяемая при нестабильной паро-водяной конвекции энергия может достигать  $10^{14}$  Дж или  $\sim 40$  *кт ТНТ* при плотности теплового потока Земли в  $\sim 50$  *Вт/м<sup>2</sup>*, проходящем через поверхность площадью  $\sim 10 \times 10$  км в течении 100 лет. Для овальной структуры *E* на Рис.3 радиусом  $R = 6.5$  км (*III* на Рис.3) оценка выделившейся энергии (на основе выражения (3)) дает значения порядка  $Y = \sim 10^7$  *кт ТНТ*. Это на пять порядков выше, чем оценки Панфилова. Но полный тепловой поток из земных недр в конвективной системе, возникающей после детонации тяжелых углеводородов может быть, по меньшей мере, на 3-4 порядка выше ( $200 - 400$  *Вт/м<sup>2</sup>*), чем нормальные значения теплового потока земли [40, 41], принятые при проведении оценки В.С.Панфиловым, площадь сбора энергии может быть больше, чем  $10 \times 10$  км (см. Кольцевую структуру *I* на Рис.3), а период между активными фазами разгрузки паро-водяной смеси (период накопления энергии) может быть значительно больше 100 лет. Поэтому полученные нами оценки энергий могут быть обеспечены за счет нестабильной паро-водяной конвекции.

Необходимо подчеркнуть, что нестабильная паро-водяная конвекция характеризуется двумя состояниями системы: - фазой разгрузки паро-водяной смеси; - продолжительной фазой накопления энергии, когда конвективная система всасывает флюиды после ее разгрузки. Возможно, что отмеченные в пределах Архангельской, Мирнинской и финских структур типа “паутинка” низкие значения температуры поверхности или конвективного теплового потока отражают направления движения подземных флюидов, сохранившиеся после остывания конвективной системы, возникшей при активной фазе кимберлитового магматизма.

Следующая проблема, которая должна быть исследована – это причина формирования структур типа “каменный цветок”. Ответ на этот вопрос дает сравнение Рис.1 и Рис.5. Центральные структуры типа “паутинка” отражают случай III-VI на Рис.5 а, когда камуфлетный взрыв проявляется на поверхности в виде кратера. “Спутники”, обрамляющие структуру типа “паутинка” являются результатом полностью заглубленного камуфлетного взрыва (случаи VII-XI на Рис.5 а), которые характеризуются высоким отношением глубина/энергия взрыва. Эта ситуация видна на Рис.3, где на сейсморазведочном профиле отчетливо видна центральная овальная структура *A* и вокруг нее - несколько овальных структур меньшего размера, проявленных на поверхности в виде кольцевых структур простого строения – “спутников”. Можно предположить, что структуры типа “каменный цветок” формируются как результат многократных камуфлетных взрывов различной мощности, произошедших на различных глубинах (к этому заключению ранее пришли А.А. Маракушев и В.Ф.Белый на основе изучения петрологических особенностей пород, слагающих взрывные структуры [4]. Структуры типа “паутинка” индицируют не полностью заглубленные камуфлетные взрывы при которых на поверхности формируется кратер (III-VI на Рис.5а). “Спутники” – полностью заглубленные камуфлетные взрывы, при которых формируется только полость и зона трещиноватости вокруг нее (VII-XI на Рис.5). В этом случае, продукты взрыва и мантийного вещества могут транспортироваться в верхние горизонты коры только “малоглубинными” камуфлетными взрывами в месте образования кратеров (внутри структуры типа “паутина”). Это и наблюдается в пределах исследованных нами алмазоносных районов (Рис.1, 2) и это же справедливо для Мирнинского кимберлитового поля (Рис.3).

Необходимо снова отметить, что мы встречаем опять подобие геологических структур на двух масштабных уровнях исследований, когда структуры типа “каменный цветок” индицируют одни и те же механические процессы, различающиеся только масштабом явления.

Таким образом, на основе хорошо известной теории подобия мы делаем вывод о том, что геолого-геофизические характеристики алмазоносных районов подобны структурам, возникающим при подземных ядерных взрывах. В Таб. 3 сведены признаки подобия этих явлений.

Таблица 3. Сравнение специфических особенностей структур, возникающих над подземными ядерными взрывами и структур типа “паутинка”, контролирующих алмазоносные районы

<i>Подземные ядерные взрывы</i>	<i>Структуры типа “паутинка”</i>
Кратер провала на поверхности.	Радиально-концентрические структуры, индицирующие систему вогнутых, вложенных друг в друга тел вращения, сформированных зонами высокой трещиноватости – кольцевые структуры типа “паутинка”.
Столб обрушения пород и и полость, заполненные нарушенными породами	Овальные структуры на сейсморазведочном профиле. Низкие значения поля силы тяжести и магнитного поля над нарушенными взрывом породами, положительные аномалии над внешним обрамлением кольцевых структур.
С возрастанием глубины столб обрушения пород переходит в подземную изометричную полость, окруженную сферическими зонами трещиноватости.	Эксцентриситет овальных структуры на сейсморазведочных профилях уменьшается с глубиной.
“Лужа” расплавленных пород на дне сферической полости.	Интенсивные сейсмические отражения от нижней части овальных структур.
Кольцевые зоны пониженной температуры на границе столба обрушения пород, индицирующие зоны высокой трещиноватости и конвекцию флюидов.	Область пониженной температуры поверхности и отрицательного конвективного теплового потока в пределах кольцевой структуры типа “паутинка” и область высокого конвективного потока в ее окружении указывают на конвекцию и симметрию в системе трещиноватости.
Радиус заряда меньше радиуса образующейся в результате взрыва подземной сферической полости.	Эффективный радиус скопления тяжелых углеводородов меньше радиуса структур типа “паутинка”, индицирующих кратеры провала на поверхности.

Вторым важным моментом является ответ на вопрос: “Могут ли подземные взрывы привести к формированию алмаза?” Фазовый переход, возникающий при самопроизвольной детонации тяжелых углеводородов (С-Н система) ведет к их превращению в метан и твердый углерод. И.К.Карпов и др. [2] рассчитали давление и температуры, которые возникают при самопроизвольной детонации тяжелых углеводородов. Полученные им РТ условия показывают, что стабильность алмаза достигается при самопроизвольной детонации тяжелых углеводородов на глубинах 30-90 км. Выше отмечалось, что взрыв может быть использован для получения искусственных алмазов [2, 8]. Алмазы, сформировавшиеся при таких природных камуфлетных взрывах могут быстро транспортироваться в верхние горизонты коры.

Таким образом, представляется, что может быть предложена следующая качественная модель формирования алмазов: - первоначально алмазы формируются в верхней мантии, где на глубинах более 180 км имеются условия для его стабильности [10]. Но температура мантийного вещества на этих глубинах в нормальных условиях на ~ 200°С ниже точки солидуса. В местах, где возникают структуры восходящей мантийной конвекции (“горячие струи” или центры мантийных плюмов) температура мантийного вещества повышается на 150 – 200° С [42]. В результате достигается точка плавления и возникшие алмазы могут

быть перенесены в более верхние горизонты мантии и в низы коры. Этот процесс может сопровождаться самопроизвольной детонацией углеводородов. На этой стадии транспортировки алмазов в верхние горизонты коры часть алмазов (возможно и все кристаллы) могут испытать фазовый переход и перейти в графит.

Восходящие мантийные конвективные структуры типа “горячих струй” или мантийных плюмов являются высокоэнергетичными структурами. Поэтому, с позиций механики их можно рассматривать как низкоскоростные взрывы, которые формируют аналогичные показанным на Рис. 5 структуры, но значительно большего размера. Как отмечено выше, внешняя зона таких структур является областью наибольшей проницаемости коры. Поэтому эти внешние зоны наиболее благоприятны для внедрения мантийного вещества в кору. Скопления тяжелых углеводородов, формирующиеся над восходящими потоками мантийного вещества могут детонировать на глубинах 90-30 км. Последовательные многократные взрывы тяжелых углеводородов формируют на поверхности структуры типа “каменный цветок”. В результате детонации тяжелых углеводородов на глубинах 90-30 км, снова могут достигаться РТ условия стабильности алмаза и образовываться вторая генерация алмазов. В результате таких камуфлетных взрывов, первая и последующие генерации алмазов могут быть быстро вынесены в верхние водонасыщенные горизонты коры, где может происходить взрывоподобная диссипация энергии раскаленных продуктов взрывов (“малоглубинные взрывы”), которые вновь формируют на поверхности структуры типа “каменный цветок” и транспортируют мантийное вещество и алмазы к поверхности.

### Заключение

Выявление закономерных иерархических систем овальных и кольцевых структур, контролирующих кимберлитовые/лампроитовые тела, объяснение причин их формирования дает возможность с генетических позиций дать новое понимание алмазоносных таксонов, обусловленных структурами восходящей мантийной конвекции:

**Алмазоносная провинция:** Полоса в пределах которой за время существования восходящей мантийной конвективной структуры, вследствие движения литосферной плиты, последовательно формировались палеопозиции центров мантийных плюмов или “горячих точек”.

**Алмазоносная субпровинция:** - палеопозиция структуры восходящей мантийной конвекции (центра мантийного плюма или “горячей” струи), в пределах которой происходило внедрение расплавленного мантийного вещества в верхние горизонты коры.

**Алмазоносная зона:** внешняя зона палеопозиции центра мантийного плюма или палеопозиции “горячей точки” - зона высокой проницаемости литосферы.

**Алмазоносный район:** участок алмазоносной зоны, где внедрение в литосферу мантийных тяжелых углеводородов и их самопроизвольная детонация на глубинах 90-30 км сформировали структуру типа “каменный цветок” с характерным размером 200-300 км..

**Кимберлитовое поле:** область алмазоносного района, где серия камуфлетных взрывов, произошедших на глубинах менее 50 км, привела к транспортировке мантийного вещества и продуктов взрывов в верхние горизонты коры и сформировала структуру второго порядка типа “каменный цветок” с характерным размером первые десятки километров.

### Литература

1. *Галимов Е.М.* Кавитация как механизм происхождения алмазов // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1973. № 1. С. 22-37.
2. *Карпов И. К. и др.* Детонация тяжелых углеводородов в мантийных потоках // Геология и геофизика, 1998. Т.39. №. 6. С. 754-762.

3. *Лямкин А.И. и др.* Получение алмазов из взрывчатых веществ // ДАН СССР. 1988. Т. 302. №3. С.611-613.
4. *Маракушев А.А., Белый В.Ф.* Эндогенная природа Логойской взрывной структуры в Белоруссии // ДАН. 2002. Т. 383. № 4. С. 512-515.
5. *Masaïtis В.Л.* Геология астроблем // Л: Недра, 1980. 230 с.
6. *Милашев В.А.* Физико-химические условия образования кимберлитов // Л: Недра, 1972. 175 с.
7. *Милашев В.А.* Кимберлиты и глубинная геология // Л: Недра, 1990. 167 с.
8. *Милашев В.А.* Среда и процессы образования природных алмазов // С-Петербург: Недра, 1994. 142 с.
9. *Ороветский Ю.П., Коболев В.П.* Мантийный диапиризм и проблема эндогенного алмазообразования на Украинском щите // Геофизика. 2000. № 6. С. 52-56.
10. *Сорохтин О.Г., Митрофанов Ф.П., Сорохтин Н.О.* Происхождение алмазов и перспективы алмазоносности восточной части Балтийского щита // Апатиты: Геологический институт Кольского научного центра, 1996. 143с.
11. *Creiner N.R.* Diamonds in detonation soot // Nature. 1988. Vol. 333. P. 440-442.
12. *Kirkley M. B., Gurney J. J. and Levinson A. A.* Age, Origin, Emplacement of Diamonds Scientific Advances in the Last Decade // Gems&Gemology. 1991. Spring. P. 3-25.
13. *Wright J.P.* Interstellar diamonds: Rich picking for a astroblems // Nature. 1992. Vol. 360. P. 20.
14. *Серокуров Ю.Н., Калмыков В.Д.* Факторы контроля провинции, субпровинции и районов проявления алмазоносных пород // Рудное и нерудное минеральное сырье. 1994. С. 3-8.
15. *Серокуров Ю.Н., Калмыков В.Д.* Структурная позиция кимберлитов на Сибирской платформе по данным изучения космических материалов // Изв. Высших учебных заведений. Геология и разведка. 1994. №5. 1994. С. 74-80.
16. *Серокуров Ю.Н., Калмыков В.Д., Л.С.Смирнова.* Перспектива алмазоносности Российской части Восточно-Европейской платформы по материалам дистанционного зондирования // Геология и разведка. №6. 1997. С. 18-26.
17. *Серокуров Ю.Н., Калмыков В.Д., Л.С.Смирнова.* Отражение площадей проявления алмазоносного магматизма в приповерхностных структурах земной коры // Геология и разведка. 1998. №3. С. 62-70.
18. *Горный, В.И. и др.* Модель мантийно-литосферного взаимодействия по данным комплексирования на геотраверсе Уралсейс сейсморазведки и дистанционного геотермического метода // Глубинное строение и геодинамика Южного Урала (проект Уралсейс). Тверь: ГЕРС, 2001. 286 с.
19. *Gorny V.I.* The mantle convection and the drift of Euro-Asian plate (according the remote geothermal method) // Proceedings of IGARSS 2002 & 24-th Canadian Symposium on Remote Sensing, 24-28 June 2002. Toronto, Canada. 0-7803-7537-8/02/\$17.00©. Vol IV. P. 2029-2035.
20. *Gorny V.I.* A mantle convection and Eurasian plate geodynamic (on the base of remote geothermal method) // Proceedings of International conference “ The Earth’s thermal field and related research methods.. Moscow. June 17-20, 2002. P. 93-97.
21. *Трубицин В.П. и Рыков В.В.* Мантийная конвекция и глобальная тектоника Земли // Труды теоретического семинара Проблемы глобальной геодинамики и металлогении. El-Pub © VESTNIK OGGGN RAN © No 1(3)'98. 1998.
22. *Trubitsyn V. P. and Rykov V. V.* A Self-Consistent 2D Model of Mantle Convection with a Floating Continent // Russian Journal of Earth Sciences. Vol 1. No. 1. July 1998.
23. *O'Brien, H.E, Tuni M.* Geology and mineralogy of kimberlites and related rocks from Finland: Preliminary results // Mineral deposits. Rotterdam, Ealkema: Papunen (ed). 1997. P. 781-783.
24. *Tuni M.* Diamonds prospecting in Finland – A review. Mineral deposits. Rotterdam, Ealkema: Papunen (ed). 1997. pp. 789-792.
25. *Биезайс Я. Я., Рудницкая Д. И., Романов Н. Н.* Структура коры в окрестностях Мирнинского кимберлитового поля по сейсморазведочным данным // Геофизика. 2000. №1. С. 40-42.
26. *Караев Н.А., Биезайс Я.Я., Лебедкин П.А.* Сейсмическая гетерогенность кимберлит формирующих систем. Геофизика. 2000. № 6. С. 17-22.

27. *Barenblatt, G. I.* "Similarity, self similarity and intermediate asymptotes". New York: Plenum Press, 1979. 218 p.
28. *Turcotte D. L.* Fractals and chaos in geology and geophysics // Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 398 p.
29. *Turiel A. Mato G. and Parga N.* Self similarity properties of natural images resemble those of turbulent flows // *Physical Review Letters*. 1998. Vol. 80 (5). P 1098 – 1101.
30. *Nikora V. I. and Goring D. G.* Extended selfsimilarity in geophysical and geological applications // *Mathematical Geology*. 2001. Vol. 33. No. 3. P 251 – 271.
31. *Teller E. et al.* The constructive uses of nuclear explosives // New York: Mc Graw-Hill Book Company, 1968. 315 p.
32. *Родионов В.Н. и др.* Механический эффект подземного взрыва // М: Недра, 1971. 224с.
33. *Колесников, Е.В., Ермолаева, Г.М.* Исследование сейсморазведкой зоны нарушения, сформированной подземным взрывом // *Разведочная геофизика*. 1971. Вып.47. С. 21-26.
34. *Бусыгин, В. П., Андреев А. И. и Косолапов С. А.* Термический режим поверхности в эпицентральной зоне подземных ядерных взрывов // *Физика Земли*. 1999. №11. С. 68-74.
35. *Лаврентьев М.А., Шабат Б.В.* Проблемы гидродинамики и их математические модели // М: Наука, 1977. 408 с.
36. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике // М: Наука, 1977. 440 с.
37. *Лукьянова и др.* Коренные источники уральских алмазов // *Региональная геология и металлогения*. 1997. №7. С. 88-97.
38. *Берзин Р.Г., Аккуратова Л.Л., Керимова И.К.* Тектонофизическая модель земной коры
39. Южного Урала по геотраверсу Уралсейс // *Глубинное строение и геодинамика Южного Урала (проект Уралсейс)*. Тверь: ГЕРС, 2001. 286 с.
40. *Панфилов В.С.* Гидрогеотермические явления в генезисе сейсмичности // *Физика Земли*. 1994. № 2. С. 79-87.
41. *White D. E.* Rapid heat-flow surveying of geothermal areas, utilizing individual snowfalls as calorimeters // *Journal of Geophysical Research*. 1969. Vol.74. No. 22. P. 5191-5201.
42. *Sekioka M. and. Yuhara K.* Heat Flux Estimation in Geothermal Areas Based on the Heat Balance of Ground Surface // *Journal of Geophysical Research*. 1974. Vol. 79. No14. P. 2053-2058.
43. *Yang Shen et al.* Seismic evidence for a lower-mantle origin of Iceland plume // *Nature*. 1998. No 3. Vol. 395. P. 62-65.
44. *Михайлов М.В. и др.* Перспективы обнаружения на Русской платформе новых среднепалеозойских месторождений алмазов // *Региональная геология и металлогения*. 2000. № 12. С. 158-177.
45. *Wallace. T.C.* The May 1998 India and Pakistan Nuclear Tests. *Seismological Research Letters*. 1998. Vol 69. No 5. P. 386-393.