

Возможности материалов дистанционного зондирования при выделении площадей перспективных для поисков кимберлитов

Ю.Н. СЕРОКУРОВ (Институт ДИОС)

Традиционно прогноз и поиски всех видов полезных ископаемых базируются на выявлении объективных закономерностей в их образовании и размещении в верхних горизонтах земной коры. С этой целью используются комплексы разнообразных методов, среди которых материалы космического зондирования поверхности планеты занимают все более заметное место, что связано с эффективностью их анализа при выделении как ранее известных, так и новых рудо-контролирующих факторов вследствие многих оригинальных свойств материала. В ряде случаев получаемая с их помощью информация ведет к пересмотру устоявшихся взглядов на структурный контроль искомого оруденения.

В настоящее время космические снимки поверхности планеты поставляются различного рода спектрометрами с разновысотных орбит и значительная часть такой информации находится в свободной продаже. Практически это единственно доступные материалы для всей поверхности планеты, и с ними не могут соперничать ни минералогические, ни геофизические, ни геохимические методы, так как площади проведения специализированных работ, как правило, ограничены, а результаты находятся в собственности многих фирм и часто конфиденциальны. Немаловажно и то, что использование космических материалов при оценке перспектив любых территорий не требует предварительного лицензирования.

Многokrатно доказано, что материалы дистанционного зондирования информативны в отношении выделения блоковых и разрывных структур земной коры разной глубинности и генезиса, фиксирующиеся по линейному, концентрическому или радиально-концентрическому расположению орографических, почвенных, растительных и прочих элементов ландшафта, текстурным, тоновым и цветовым особенностям изображения, обусловленным вещественным составом геологического субстрата. Специфические свойства используемых материалов позволяют систематизировать разрозненные данные и выделить ту его часть, которая в той или иной степени связана с процессами проникновения мантийных и коровых магм и флюидов к поверхности.

Цель настоящей работы — обобщение данных, полученных при анализе дистанционных материалов последних поколений, освещающих промышленно алмазные площади России, расположенные в Западной Якутии и Архангельской области. По результатам их изучения совершенствовались прогнозно-поисковые модели, позволяющие последовательно локализовать перспективные площади для локализации таксонов кимберлитового магматизма в ранге от *района* до *куста*.

Использованный материал и методика его анализа.

Из космоса оцениваемые территории многократно снимались начиная с 70-х годов прошлого века различными съемочными системами. Ранее изучались российские фото- и

сканерные снимки малого и среднего разрешения, получаемые геологами на бумажных носителях. Они дешифрировались преимущественно визуальными методами. В настоящее время стали доступны зональные съемки с американских, французских и индийских спутников Земли («NOAA», «Terra», «Landsat», «SPOT», «IRS»), разрешение которых колеблется от 1000 до 15 м/пиксел. К пользователям они поступают на цифровых носителях, что позволяет проводить компьютерную обработку изображений. В распоряжении геологов также появились цифровые модели рельефа, созданные по результатам радарных космических съемок и другие материалы, полезные при структурном анализе.

Кардинально изменились техническая база и программное обеспечение для компьютерной обработки изображений. Различные специализированные пакеты дают возможность получать разнообразные композиты, усиливающие те или иные стороны геологического строения территорий, устранять посторонние «шумы». Развивающиеся геоинформационные технологии (ГИС) способствуют формированию сопряженных в пространстве банков данных, содержащих множество пространственно ориентированных слоев различной информации, а затем проведению совместной обработки дистанционных и традиционных данных (рис. 1).

Современная методика прогнозирования с использованием материалов дистанционного зондирования базируется на принципах поэтапного минерагенического анализа, реализуемого на основе космических снимков разных уровней генерализации и данных геофизических съемок

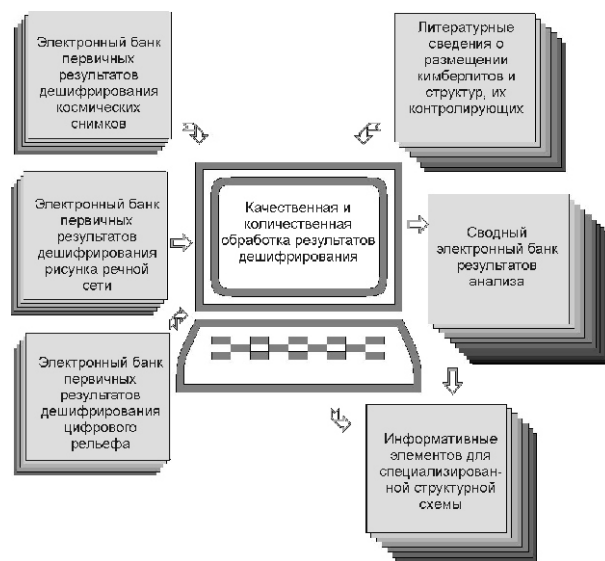


Рис. 1. Схема качественного и количественного анализа результатов первичного дешифрирования

все повышающейся детальности. Задача работ с материалами каждого уровня генерализации — изучение соразмерного с ними таксона, выбранного в качестве эталонного по минерагеническим, геофизическим, геохимическим и геоморфологическим данным; выявление информативных признаков, его характеризующих; формирование на этой основе прогнозно-поисковой модели; выделение участков на новых площадях, подобных эталонам.

Один из главных принципов выбора площадей, вмещающих эталонные объекты, — изучение достаточно обширной площади, что позволяет выявлять сквозные рудоконтролирующие структуры различного характера (блоковые, линейные, кольцевые и т.д.). Материалы глобального уровня генерализации дают возможность установить наиболее крупные структуры и понять их металлогеническую (минералогическую) специализацию для региона в целом, а континентального и регионального уровня — информативны при выделении структур и блоков, которые тем или иным образом контролируют таксоны в ранге *район* кимберлитового магматизма. Материалы более вы-

сокого разрешения несут информацию о деталях строения крупных структур, влияющих на локализацию таксонов в ранге *поле* и *куст* кимберлитового магматизма.

Дешифрирование (специализированный анализ различной дистанционной информации) проводилось с целью выделения только информативных элементов. Использовались компьютерные и визуальные методы. Анализ подверглись как первичные изображения, так и многочисленные композиты, полученные в результате предобработки изображений. Основное внимание обращалось на выяснение форм структурного контроля таксонов кимберлитового магматизма, главными индикаторами которого являются линеаменты, а также определенные сочетания цветовых и тоновых аномалий, формирующих образы искомым структур. Обработка результатов первичного дешифрирования проводилась качественными и количественными методами также с применением различных компьютерных программ (рис. 2).

В результате созданы специализированные структурные схемы изученных площадей соответствующих масштабов,

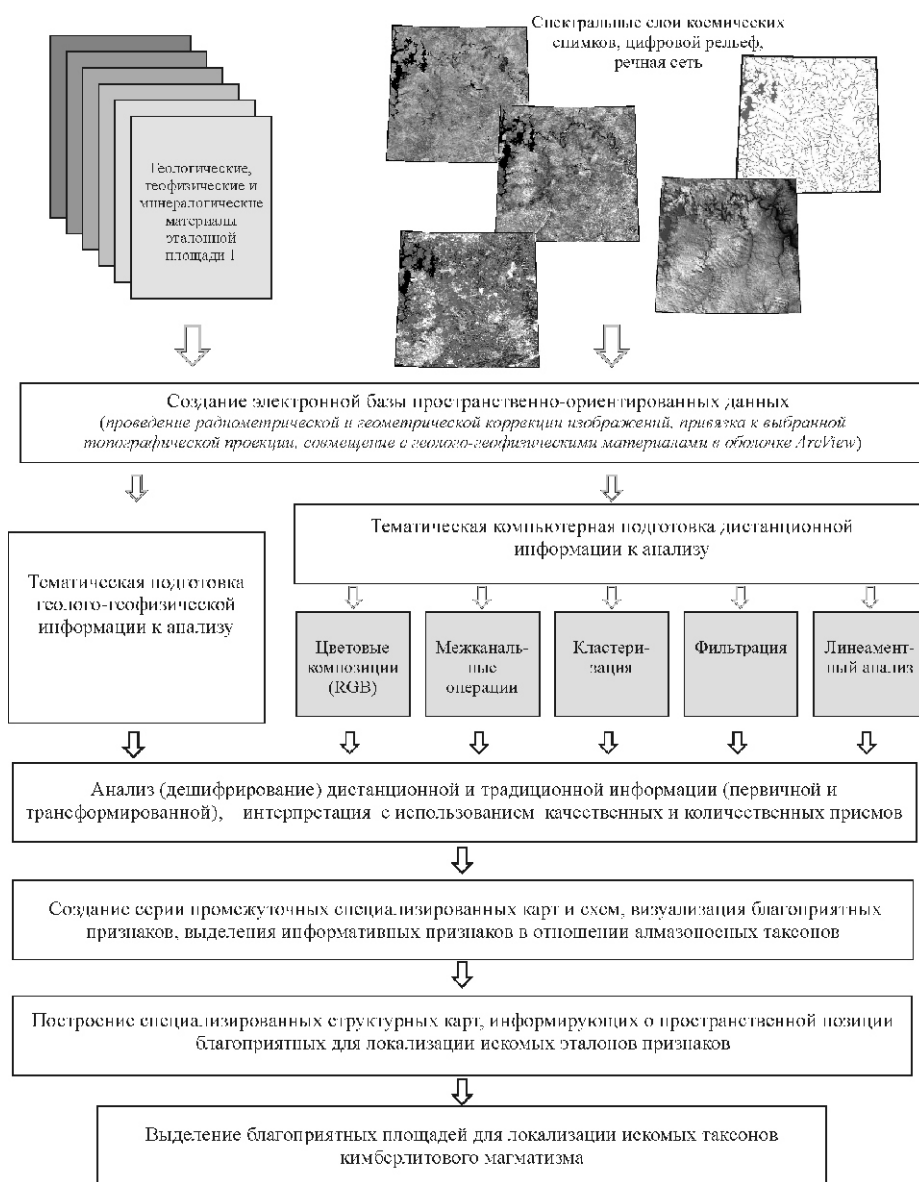


Рис. 2. Схема подготовки, обработки и анализа дистанционных материалов

где отражены только те благоприятные признаки, которые в совокупности способны контролировать участки проявления кимберлитового магматизма искомого ранга.

Дистанционные прогнозно-поисковые модели содержат признаки, имеющие площадную выраженность. Участки, благоприятные для локализации соответствующих таксонов кимберлитового магматизма, выделялись по пространственному совпадению этих признаков, что позволяет на уровне вероятности оценить степень соответствия вновь выделенных площадей эталонным.

Результаты региональных работ. На площади более 1 млн. км² в Западной Якутии было проведено дешифрирование фотоплана из космических снимков малого (1000—500 м/пиксел) разрешения «Modis» цифрового рельефа ГЕТОРО30 и рисунка речной сети. Установлено, что отчетливо выраженных («открытых») разломов в пределах большей части этой площади, принадлежащей Сибирской платформе, нет. В теле платформы преобладают «скрытые» разломы, проявленные в геологических формациях системами трещин, зонами расщепления и смятия. На космических изображениях они прослеживаются фрагментарно прерывистыми и волнистыми линиями, сериями линеаментов, которые часто разветвляются и сливаются вновь, границами цветовых и тоновых аномалий. При дешифрировании рельефа и анализе рисунка водотоков эти разломы трассируются специфическими признаками (уступы рельефа, гряды, изгибы русел рек и др.).

Количественная обработка схем линеаментов всех перечисленных материалов комплексом специальных программ позволила выделить в теле платформы протяженные устойчивые зоны линейных дислокаций различного характера выраженности преимущественно северо-восточного и северо-западного простираний. Как показали результаты сопоставления с геофизическими и геологическими данными, они отвечают наиболее глубинным и долгоживущим нарушениям земной коры данного региона. Эти зоны и узлы их пересечения рассматриваются в качестве наиболее проницаемых в земной коре фанерозоя.

Использование программ поиска эпицентров структур заданного диаметра в схемах дешифрирования линеаментов и анализ множества композит, полученных при трансформациях зональных изображений, позволили выделить на площади признаки радиально-концентрических структур диаметром 180—220 км. Наиболее хорошо такие структуры просматриваются в рисунке речной сети, фрагментами — в рельефе, сложными цветовыми круговыми и изометричными образами — на различных композитах. По степени надежности выделения эти структуры разделены на три группы — проявленные во всех материалах, в двух и только в одном. Косвенно это отражает уровень их первичной энергетической активности и последующей тектонической трансформации.

Пространственное сопоставление выделенных структур с геологической картой поверхности, рельефом кристаллического фундамента, первичными и трансформированными геофизическими полями показывает незначительное, но, в целом, очевидное влияние на ранее сформированные структурные планы, а также на распределение более поздних осадочных формаций, что позволяет рассматривать их как очаги глубинной наложенной активизации.

Пространственная позиция этих элементов отражена на специализированной космоструктурной схеме Западной Якутии, послужившей основой для формирования дистан-

ционной прогнозно-поисковой модели, позволившей оконтурить участки, благоприятные для образования таксонов в ранге *район* кимберлитового магматизма». Все три известных в настоящее время в Якутии промышленно алмазоносных района (Малоботуобинский, Далдыно-Алакитский, Среднемархинский) оказались в контурах участков, где присутствовало аномальное количество выбранных признаков. Кроме того, на обширной территории установлен еще ряд перспективных участков (рис. 3, А), на части которых уже обнаружены кимберлиты.

Модель открыта для признаков, которые получают при анализе других материалов. Главное условие — возможность их площадного проявления и оконтуривания. Наиболее подходят для этого результаты площадных геофизических съемок, сведения о мощности и составе литосферы, данные о величинах эрозионного среза, контурах распространения посткимберлитовых отложений и т.д. Комплексный анализ всей совокупности такого рода информации позволяет оперативно оценивать экономически целесообразную очередность вовлечения перспективных участков в дальнейший анализ.

Результаты локальных работ. Более детальные исследования проведены на четырех известных в настоящее время в России площадях (Малоботуобинская, Далдыно-Алакитская и Среднемархинская в Якутии, Зимнебережная в Архангельской области), где в кимберлитах алмазы содержатся в промышленных концентрациях и являются предметом добычи. Количество известных кимберлитовых тел в их пределах колеблется от 5 до 70. Они вмещаются осадочными толщами нижнего палеозоя и частично перекрыты образованиями верхнего палеозоя и мезозоя, внедрились в среднем палеозое.

Первоначально изучались участки размером около 5 тыс. км² по материалам зональных космических съемок «Modis» с разрешением 250 м/пиксел, а затем фрагменты этих площадей размером в первые тысячи и сотни квадратных километров — по снимкам «Landsat» и «SPOT» с разрешением от 120 до 15 м/пиксел. Параллельно анализировался цифровой рельеф и рисунок речной сети в сопоставимых масштабах, доступные геофизические поля и геологические карты. При дешифрировании дистанционных материалов на всех площадях установлена достаточно густая и разноориентированная трещиноватость верхней части коры, однако крупных тектонических нарушений, убедительно контролирующих проявления известного кимберлитового магматизма, не обнаружено. Установлены лишь непротяженные слабопроявленные трещины, вмещающие цепочки кимберлитовых трубок, которые тракуются исследователями как расположенные над магматическими очагами и являющиеся лишь случайными путями миграции магм. Никаких особенностей, которые отличают их от сотен и тысяч окружающих, не отмечено.

Количественная и качественная обработка схем линеаментов дает возможность констатировать, что в целом все изученные площади пространственно совмещены с узлами пересечения 2—3 региональных зон, которые полностью поглощают участки локализации кимберлитовых тел. На всех присутствующих в ландшафте признаки радиально-концентрических структур диаметром около 200 км. Кроме того, по комплексу разнообразных признаков отмечено присутствие радиально-кольцевых и круговых образований диаметром от 80 до 30 км и менее. Космоструктурные схемы изученных участков построены по результатам

комплексного анализа дистанционных материалов по единым легендам и в единых масштабах, что позволило пространственно позиционировать известные кимберлитовые проявления относительно разнообразных площадных, линейных и кольцевых структур, оценить их связи, выделить черты сходства и различия. В результате были сформированы дистанционные прогнозно-поисковые модели, содержащие только постоянно присутствующие на всех площадях признаки. Они способствуют локализации участков проявления известного магматизма в ранге *поле* и *куст* и

оценке остаточных перспектив этих площадей. Пример такого анализа для Малоботуобинской и Мирнинской площадей показан на рис. 3, Б, В, Г. Эти же модели могут быть использованы для оценки потенциала новых площадей.

Изучению форм структурного контроля различных таксонов кимберлитового магматизма посвящено множество работ. При общем признании в качестве основного фактора пространственного размещения площадей древних платформ в остальном взгляды расходятся. Одни исследователи отдают предпочтение зонам глубинных разломов и

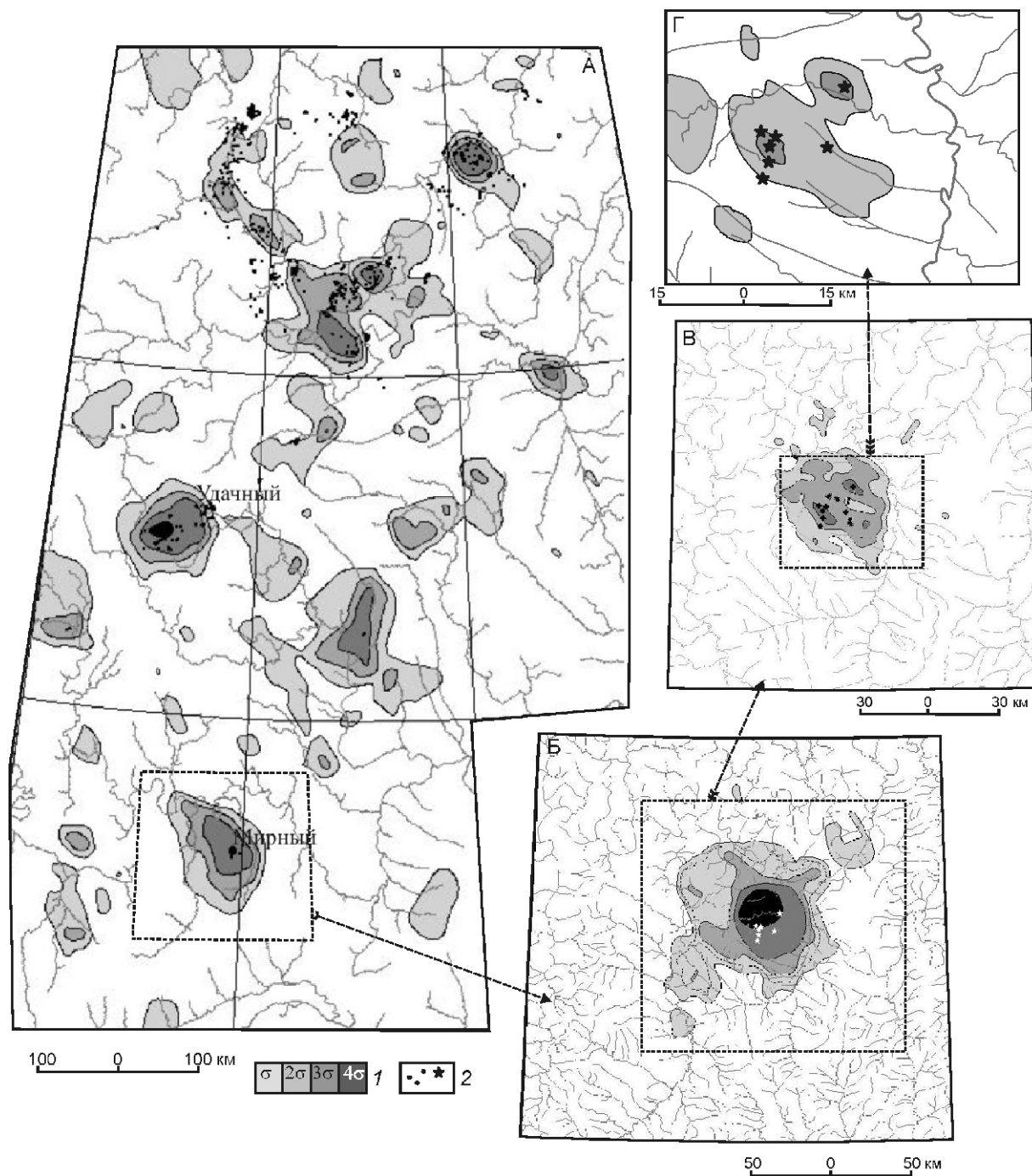


Рис. 3. Участки, благоприятные для проникновения к поверхности кимберлитов, по дистанционным прогнозно-поисковым моделям ранга:

А — район, Западная Якутия; Б — *поле*, Малоботуобинский алмазоносный район; В и Г — *поле* и *куст*, Мирнинская площадь; 1 — площади внутри изолиний с аномальным присутствием благоприятных признаков со значениями (x_1) , (x_2) , (x_3) , (x_4) ; 2 — известные скопления кимберлитовых тел и отдельные трубки

узлам их пересечения, другие — пликативным структурам, склонам крупных поднятий, флексурным перегибам в отложениях платформенного чехла, зонам сочленения антеклиз и синеклиз, авлакогенам и т.д. На практике использование предлагаемых критериев обычно не позволяет в достаточной степени локализовать участки для проведения наземных поисковых работ. Чаще всего они проводятся путем последовательного опознания площадей, прилегающих друг к другу.

Большинство современных гипотез образования кимберлитов предполагает существование вертикально направленного физико-химического и динамического воздействия перемещающихся мантийных масс на вмещающую среду, т.е. локализованный участок внедрения на некоторой глубине должен характеризоваться наличием среды, отличающейся от окружающей изменением структурно-тектонической обстановки и вещественных преобразований. Это подтверждают выполненные к настоящему времени разнообразные геофизические исследования в пределах основных алмазоносных площадей России. Под ними отмечено повышение скоростей сейсмических волн на границе Мохоровичича, различного рода деформации (прогибы, поднятия, смещения) в ее поверхности. Зафиксированы положительные структуры в рельефе кристаллического фундамента и некоторых других внутрикоровых сейсмических границах. Отмечены специфические искажения гравитационного и магнитного полей.

Традиционная модель «района» кимберлитового магматизма включает астеносферу, литосферу, земную кору, мантийные диапиры, корово-мантийные разломы, осадочный чехол, флюидно-магматические колонны с интрузивными телами, наделенными параметрами намагниченности, плотности, скорости прохождения сейсмических волн, электрического сопротивления [3]. Более всего это пространство отличается от окружающей среды в нижних и средних частях земной коры, верхних в связи с расщеплением колонн традиционными геолого-геофизическими методами — обычно не фиксируется. Для моделей *полей* и *кустов* обсуждается комплекс геолого-геофизических признаков, выявление которых возможно только при детальных исследованиях, что нереально на новых площадях. Актуальна задача — усилить этот комплекс материалами, которые позволяют экспрессно фиксировать разнотелные структуры, контролируемые процесс, и которые имеются для любых частей планеты.

Анализ космических российских снимков, проведенный нами в начале 90-х годов прошлого века для ряда алмазоносных площадей мира, показал присутствие в их пределах следов радиально-кольцевых структур разных диаметров, рассматриваемых автором как следы мантийных и коровых энергетических струй [18, 19]. Их образование связывалось или с волновыми энергетическими импульсами, способствующими быстрой транспортировке кимберлитовой магмы из мантии к поверхности, или с активацией подкоровых и внутрикоровых магматических очагов, где мантийные флюиды эволюционировали с отделением кимберлитов в периоды активизации.

Анализ дистанционных материалов новых поколений подтвердил наличие этих структур и позволил получить уточняющую информацию, хорошо коррелирующую с вновь полученными по ним в последние годы данными сейсмического и электрического зондирования, гравитационного и магнитного моделирования. Все они сви-

детельствуют о решающей роли в контроле таксонов этой группы кимберлитового магматизма очаговых активизационных процессов.

Термин *очаговая структура* ввели М.Н.Фаворская и И.Н.Томсон [22] в 1968 г. для характеристики вскрытых эрозией концентрически зональных купольных и кальдерообразных кольцевых морфоструктур диаметром до 50 км, образовавшихся при внедрении интрузий разного состава. Затем это понятие было расширено до *очаговой магмотектонической структуры*, включившее и структуры диаметром в сотни и тысячи километров. Их общее определение — *изометричные в плане морфоструктуры взрывной и плутоногенной природы, имеющие концентрически зональное строение и своеобразный внутренний структурно-тектонический каркас, состоящий из системы радиально-концентрических эндогенных нарушений*. При наземных работах эти структуры, как правило, не картировались.

Причину образования структур такого рода видят [13, 22, 23] в глубинных взрывах, обусловленных импульсивными подъемами углеродно-водородных потоков к земной поверхности вследствие дегазации ядра Земли. Тепловые взрывы на границе жидкого ядра и мантии с позиций теории самоорганизации квалифицируются как режимы с обострением, т.е. распространение тепла в среде с постоянной теплопроводностью в условиях, когда на границе среды температура или поток тепла обращаются в бесконечность за конечное время обострения. С позиций синергетики подобная нелинейность приводит к новым законам роста неустойчивости, возникновению новых структур, каковыми и являются флюиды (плюмы), отделяющиеся от заключающей их матрицы. Взаимодействие сверхэнергетического флюида с породами нижней мантии ведет к сублимации их в газовую фазу, обогащающуюся при движении элементами твердого субстрата. Процесс проходит с затратами тепла, но химическое взаимодействие существенно водородного восстановительного флюида с кислородсодержащей матрицей компенсирует тепловые потери. Изначально водородный плюм, сублимируя существенно кислородный субстрат, становится водно-водородным с наличием в газовой фазе соединений Si, Mg, Fe, S, Ni и в меньшей степени Al, Ca, Na, Cr, Mn, Ti и т.д. Зона плавления в головной части плюма — своеобразная тепловая ловушка, где происходит не только расход тепла на плавление породы, но и растворение флюидных компонентов во вновь образуемом расплаве. Зона плавления при достижении значительных размеров сама начинает играть роль тепловой аномалии, длительное существование которой обеспечивается за счет накопленной расплавом тепловой энергии и подпиткой его теплом и флюидами из нижней части плюма.

Однонаправленный вынос из мантии флюидных и неогерентных компонентов приводил к истощению этими компонентами и кристаллизации пород, что обуславливало «отжимание» перед фронтом кристаллизации флюидных примесных компонентов и формирование астеносферы. В верхних горизонтах литосферы пути движения плюмов определялись тектоническими силами. По наиболее ослабленным зонам подъем флюидов происходил быстро до определенных горизонтов, где они начинали активно взаимодействовать со средой. Такая трактовка хорошо объясняет «многоэтажное» строение магматических комплексов. Существование промежуточных энергетических

и магматических очагов, аккумулирующих глубинную энергию, обуславливало развитие серии дочерних морфоструктур — сателлитов центрального типа, которые коррелируются с более мелкими по размерам границами разделов внутри толщи земной коры.

Газовые взрывы внутри очагов приводили к образованию камер сжатия, а по периферии в окружающей среде — сферических зон дробления и трещинообразования. Отсюда и тектонический каркас очаговых тектономагматических структур в коре в виде системы эндогенных радиальных и кольцевых нарушений. На поверхности деформации они выражались округлыми морфоструктурами центральной симметрии, рассеченными сетью радиальных и кольцевых разломов, а в разрезе — тектоническими конусами разрушения (рис. 4).

Эти каркасы использовались магматитами и флюидами, которые, при прочих благоприятных факторах, формировали месторождения алмазов и других руд. Процесс носил пульсационный характер, что и объясняет многофазность магматизма в пределах изученных алмазоносных площадей.

При формировании прогнозно-поисковых моделей таксонов кимберлитового магматизма важное значение приобретает понимание их сути. Первая группа таксонов (провинция, субпровинция и зона) в этом смысле менее интересна для производственных организаций, которые заинтересованы в относительно локальных площадях для проведения поисковых работ. Вторая группа (районы, поля, кусты) для своего выделения по традиционным технологиям требует [10] проведения обширного комплекса иссле-

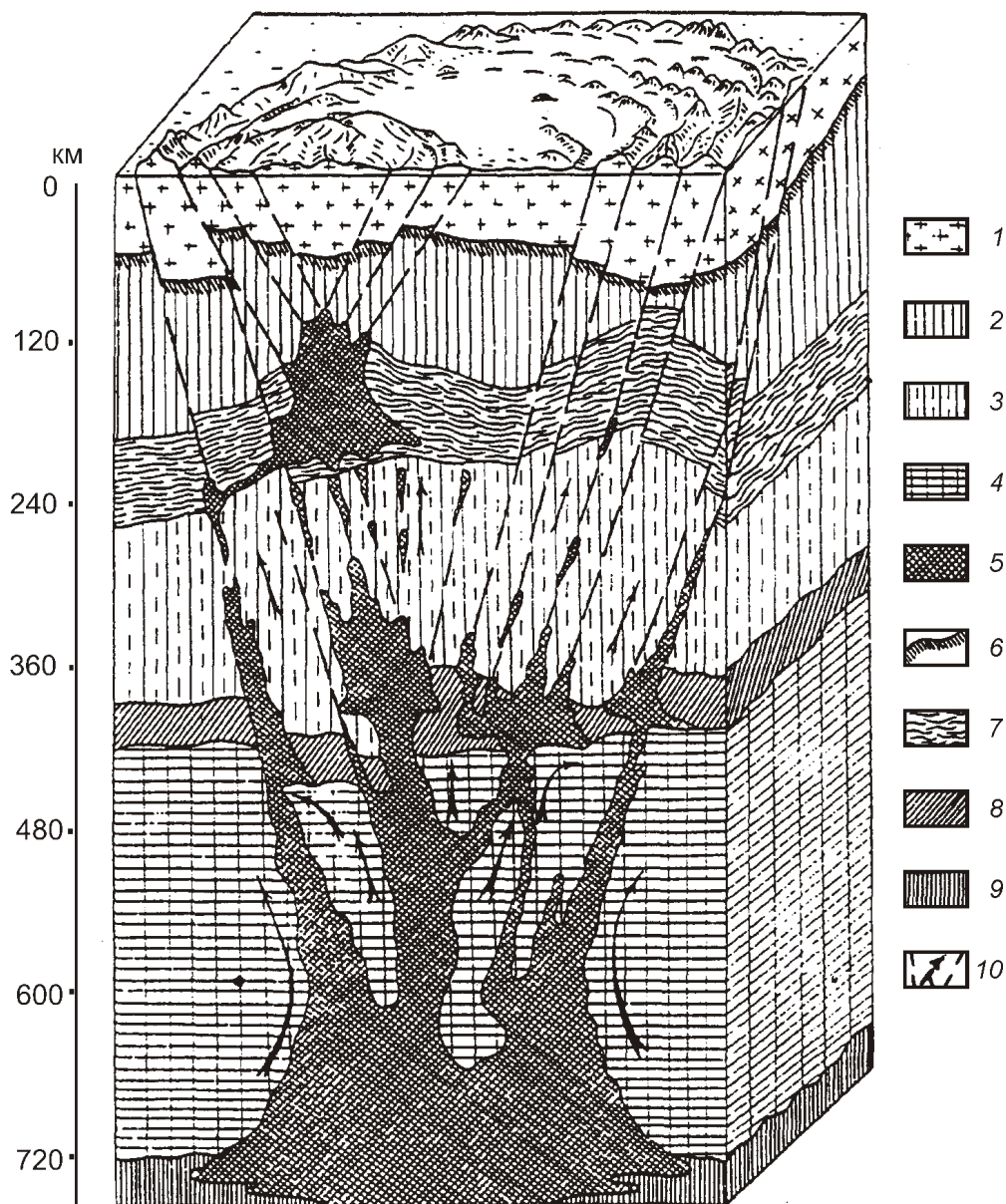


Рис. 4. Разрез скрытоплутонической региональной очаговой тектономагматической структуры (геокона) и ее дочерней морфоструктуры. По В.В.Соловьеву, 1978 с дополнениями О.П.Сторожука [20]:

1 — земная кора; 2 — верхние твердые слои мантии; 3 — верхняя мантия; 4 — средняя мантия; 5 — мантийные дифференциаты; 6 — граница Мохоровичича; 7 — астеносфера; 8 — зоны геофизического раздела: 8 — 400-км, 9 — 700-км; 10 — направления движения магмы и растворов в тектоническом конусе растяжения

дований, к которым относятся геологическое, минералогическое и геохимическое картирования масштабов 1:500 000—1:50 000 и крупнее, сейсмическое зондирование ГСЗ-МОВЗ, гравиметровая и магнитная съемка масштаба 1:200 000—1:10 000, аэроэлектроразведочные исследования (ДИП, АД). Важно и то, что дискуссия о размерах и основных параметрах этой группы таксонов до сих пор не завершена.

По результатам проведенных исследований в пределах алмазных площадей в настоящее время мы различаем четыре энергетических уровня, обеспечивающих продвижение глубинных магм к поверхности — *подкорovýй, нижнекорovýй, среднекорovýй* и *верхнекорovýй*, которые проявлены структурами соответствующего размера. Именно их предлагается рассматривать в качестве контролирующих кимберлитовые таксоны в ранге от *района* до *куста*.

Подкорovýй уровень представлен радиально-концентрическими структурами диаметром около 200 км, внешние границы которых можно принимать за контуры районов кимберлитового магматизма. Причиной их возникновения служили мантийные диапиры, что подтверждает региональный сейсмический профиль «Кратон» [7], который полностью пересекает Далдыно-Алакитскую площадь. Особенности строения мантии под ней выражены изменением сейсмических границ на глубинах ниже 300 км и выше, где отмечается: 1) уменьшение скорости объемных волн в самой верхней части мантии и ее повышение на границах района (разница 0,25 км/с); 2) увеличение мощности первого слоя на 6 км с пониженной скоростью (понижение скорости в нем на 0,20—0,25 км/с); 3) снижение скорости продольных волн на глубине 100—140 км на 0,1 км/с; 4) уменьшение мощности второго слоя с пониженной скоростью на 15 км; 5) уменьшение относительно соседних блоков скорости продольных волн в интервале глубин 45—225 км на 1%. За пределами этого пространства нет ни энергетических, ни материальных условий для образования таксонов более низкого ранга.

Нижнекорovýй уровень маркируется радиально-кольцевыми или круговыми (в зависимости от типа преобразования изображений) структурами диаметром около 80 км. В ряде работ структуры именно этого размера рассматриваются в качестве районов [2] или полей [3] кимберлитового магматизма. В принятой автором иерархии они располагаются между структурами, обеспечивающими контроль *районов* и *полей* кимберлитового магматизма. На Далдыно-Алакитской площади в их пределах находятся два известных там поля, на Зимнебережной — три. В качестве причин их формирования рассматриваются очаги тектоно-магматической активизации в нижних (20—25 км) частях земной коры. Это подтверждают данные сейсмического и гравитационного моделирования на Малоботубинской площади, где под такой структурой обнаружено [21] локальное повышение скорости волн (до 6,9 на фоне 6,8 км/с), которое заключено между внутрикоровой границей и границей Мохо. Средняя ширина данной области составляет 70—90 км.

Среднекорovýй энергетический уровень, вероятно, расположен на глубинах 10—6 км и проявлен на поверхности кольцевыми структурами диаметром 20—30 км. Они постоянно контролируют все известные поля кимберлитового магматизма. Кроме того, для этих участков характерна повышенная плотность микролинеаментов и аномальная

их изотропность. В районе Мирнинского поля [21] под этой структурой по данным сейсмического зондирования в верхах кристаллического фундамента зафиксирована аномалия пониженной скорости волн (до 6,18—6,2 на фоне 6,3—6,35 км/с) шириной 30—40 км, «разрывающая» преломляющую границу 1 и прослеженная вглубь коры до 20 км. В Среднемархинском районе (сейсморазведочные наблюдения в модификации продольного профилирования МОВ-ОГТ [2]) также присутствует контрастная транскоровая аномалия поля рассеянных волн, которая отождествляется с субвертикальной глубинной кимберлитобразующей системой гетерогенного типа. Эту систему характеризуют относительно повышенные упругие свойства, что позволяет авторам предположить участие в ее строении ассоциаций неоднородных образований основного (базитового) состава. Поперечные размеры такой структуры составляют 25—27 км, что вполне соответствует размеру таксона в ранге кимберлитовое *поле*.

Верхнекорovýй энергетический уровень проявлен на поверхности кольцевыми и круговыми структурами диаметром около 10 км и располагается, вероятно, на глубинах не менее 2—4 км. С ними пространственно совмещены комплексные положительные аномалии локальных составляющих гравитационного и магнитного полей, что позволяет предположить развитие здесь ареалов базит-гипербазитового магматизма, представляющих собой дериваты флюидно-магматической колонны над среднекоровыми очагами активизации. Именно над ними формировались ареалы даек, которые проникали в приповерхностное пространство в результате очередных энергетических импульсов.

Верхнекорovýй уровень проявлялся, по-видимому, непосредственно в приближающихся к поверхности кимберлитовых телах и представлял собой процесс высвобождения внутренней энергии, заключенной непосредственно в иммигрирующем материале, что доказывает отмеченное в шлифах микровзрывное дробление фенокристаллов и автолитов, обязанное высокому внутреннему давлению флюидов в их включениях, отвечающему термодинамическим условиям роста кристалла-хозяина в магме [9]. Газы, дополнительно привносимые из автолитов и фенокристаллов, продляли жизнь флюидизатных систем. Магма в трубках, насыщенная газом, при декомпрессии испытывала взрывное кипение. Адиабатическое расширение газовой фазы сопровождалось снижением температуры и затвердеванием магмы. Именно поэтому не наблюдалось волновое распространение энергии в окружающем пространстве, что и объясняет отсутствие радиально-кольцевых структур непосредственно вокруг трубок.

Гипотезу пульсационного продвижения кимберлитов в земной коре подтверждают исследования И.В.Ащепкова с соавторами [1], которые при изучении особенностей минералогии и геохимии глубинных минералов отметили дискретность отдельных групп ильменитов, гранатов, хромитов и других, что обусловлено избирательностью интервалов опробования мантийной колонны поднимающимися кимберлитовыми расплавами. Локальное обогащение железом на каждом уровне и несколько трендов обогащения TiO_2 очевидно свидетельствуют о нескольких этапах внедрения расплавов в мантийной колонне, что сопровождалось разогревом и интенсивным взаимодействием. Разогрев нижней части колонны мог вызывать растворение мелких алмазов и рост крупных. *TP*-условия для мине-

ралов и тренды взаимодействия обнаруживают также четыре этапа просачивания и подъема расплавов, сформировавших четыре промежуточных уровня, т.е. и эти данные подтверждают, что подъем расплавов носил пульсационный характер с постепенным перемещением магматической камеры в верхние этажи. Ильменитовый тренд с четырьмя основными интервалами в данном случае отражает строение подводящих каналов перед извержением. В нижней части — метасоматоз и просачивание сквозь перidotитовый субстрат, далее жильно-камерное фракционирование (совместно с минералами KD, для которых REE 1 — циркон, апатит, перовскит) и затем согласно механизму AFC в жильной системе в верхней части.

Сравнение позиции промышленно алмазоносных кимберлитов на всех изученных эталонных площадях относительно структурных ансамблей, характеризующих разноглубинные энергетические процессы, позволил выявить устойчивую специфику в их локализации. Все алмазоносные кимберлиты, достигшие поверхности, располагались в блоках, где присутствовали признаки максимальной вертикальной проницаемости земной коры во всем ее объеме в виде пространственного совмещения (полного или частичного) всех четырех рассмотренных структур. В графическом варианте идеализированная модель развития алмазоносной кимберлитовой системы по данным дистанционного зондирования выглядит (рис. 5) как система совмещенных в пространстве следов разноглубинных энергетических очаговых процессов, информирующих о последовательном приближении к поверхности глубинных магм.

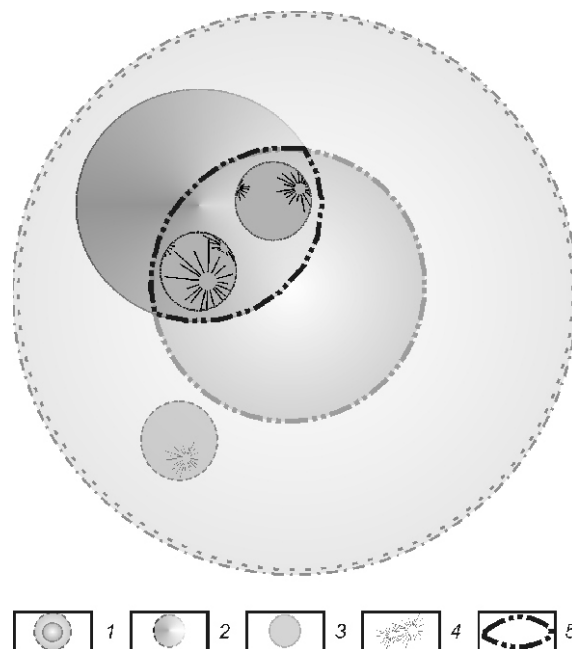


Рис. 5. Идеализированная модель развития алмазоносной кимберлитовой системы в плане:

проекции на поверхности очагов активизации: 1 — подкорового с выделенной ядерной частью, 2 — нижнекорового, 3 — среднекоровых, 4 — верхнекоровых; 5 — благоприятная область для локализации кимберлитов с промышленной алмазоносностью

Сферы приложения материалов космического зондирования при прогнозе и поисках коренных месторождений алмазов

Ранг прогнозируемых таксонов	Стадия изучения и масштаб	Площадь, км ²	Применяемые материалы космического зондирования		Другие методы
			Основные	Дополнительные	
Провинции и субпровинции	Структурное дешифрирование, 1:5 000 000	Миллионы	КСС «Метеор», NOAA	Фотопланы из КСС	Тектонические карты континентов
Субпровинции и зоны	Региональное картирование, структурный анализ и спектральный анализ, 1:2 500 000	Сотни тысяч	КСС «MODIS», «Landsat», МСУ-СК, КАТЭ-200	Фотопланы из КСС и КФС	Геологические и тектонические карты, результаты мелкомасштабных гравимагнитных съемок и сейсмического зондирования
Районы	Среднемасштабное картирование, структурный и спектральный анализ, 1:1 000 000	Десятки тысяч	КФС «Ресурс-Ф», КС «Landsat»	Радиолокационные и тепловые снимки	Геологические карты, результаты среднемасштабных гравимагнитных съемок и сейсмического зондирования
Поле	Детальное картирование, структурный и спектральный анализ, 1:500 000—1:100 000	Тысячи—сотни	КФС «Ресурс», МСУ-Э, МК-4, ТК-350, SPOT-4, LISS	Радиолокационные и тепловые съемки	Аэромагнитная и гравиметровая съемки, электроразведка, геологическая и геохимическая съемка, структурное бурение
Месторождение	Поиски аномалий, 1:50 000—1:10 000	Десятки	Интегральные КФС с разрешением от 10 до 1 м (КФА-3000, КВР-1000, Iconos)	Высотные АФС	Детальные магнитные аэросъемки, наземные минералогические и геохимические съемки, поисковое и разведочное бурение

Выделяемый в конечном варианте участок по площади не превышает первые сотни квадратных километров, что значительно сокращает фронт поисковых наземных работ.

Из представленных материалов можно сделать следующие выводы:

1. Разработка научно обоснованных критериев прогнозной оценки алмазности регионов с целью выделения перспективных площадей, а также совершенствования методики прогнозно-металлогенетических исследований — важная задача современного этапа развития геологии алмазов. Особое значение эти исследования приобретают в условиях резкого сокращения в последние десятилетия планомерных геологических и геофизических съемок, глубинного картирования и геологического доизучения площадей, в связи с чем крайне важным становится планомерное изучение и постоянный (в свете вновь появляющихся материалов) сравнительный анализ статистически значимого количества эталонов, позволяющий обоснованно говорить об устойчивости выявляемых критериев, представляющих собой выдержанные, статистически устойчивые признаки, которые могут быть перенесены из известных алмазных районов на вновь оцениваемые территории.

К наиболее важной особенности методики отраслевого прогнозирования следует отнести также последовательное вовлечение в анализ все более крупномасштабных материалов (геологические и геофизические карты различного содержания, космические снимки), а также использование критериев прогнозирования в определенной последовательности — от региональных геолого-структурных и формационных к более локальным минералогическим, геохимическим, получение которых более трудоемко.

2. Классические программы прогноза и поисков алмазов включают несколько стадий, в пределах которых материалы космического зондирования играют различную роль (см. таблицу). Наиболее эффективно их применение на первых стадиях работ — предварительная рекогносцировка, региональное и детальное картирование, когда расшифровывается геологическое строение крупных регионов, уточняется взаимоотношение структур, выбираются площади для постановки наземных поисковых работ. На последующих стадиях космические снимки должны выполнять вспомогательную роль в комплексе с наземными методами.

3. Проведенные исследования позволили усовершенствовать технологию последовательной (системной) локализации участков, перспективных для поисков кимберлитовых площадей с использованием космической информации все возрастающей детальности, что максимально отвечает принципам системного подхода. Использование материалов дистанционного зондирования на ранних этапах оценки алмазности новых территорий позволит значительно сократить временные и материальные затраты при открытии новых месторождений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ащепков И.В., Владыкин Н.В., Ротман А.Я.* и др. Особенности минералогии и геохимии глубинных минералов из трубки «Зарница» / Эффективность прогнозирования и поисков месторождений алмазов: прошлое, настоящее и будущее (АЛМАЗЫ-50). —С-Пб., 2004. С. 36—39.
2. *Бизайс Я.Я., Караев Н.А., Лебедкин П.А.* Региональная сейсморастворка МОВ-ОГТ при решении прогнозно-поисковых

задач на алмазы / Геология алмаза — настоящее и будущее. —Воронеж, 2005. С. 1111—1123.

3. *Ваганов В.И., Голубев Ю.К., Пруссакова Н.А.* Стадийная технология ведения геологоразведочных работ на алмазы на Восточно-Европейской платформе / Геология алмаза — настоящее и будущее. —Воронеж, 2005. С. 1124—1135.
4. *Ваганов В.И.* Алмазные месторождения России и мира (основы прогнозирования). —М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2000.
5. *Ваганов В.И., Иванкин П.Ф., Кропоткин П.Н.* и др. Взрывные кольцевые структуры щитов и платформ. —М.: Недра, 1985.
6. *Гинтов О.Б.* Структуры континентальной земной коры на ранних этапах ее развития. —Киев: Наукова думка, 1978.
7. *Егоркин А.В.* Строение верхней мантии под Далдыно-Алакитским кимберлитовым полем по сейсмограммам ядерных взрывов // Геология рудных месторождений. 2001. Т. 43. № 1. С. 24—37.
8. *Занкович Н.С., Зинчук Н.Н.* Петрографо-минералогические характеристики кимберлитовых пород разных фаз внедрения трубок Накынского поля / Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения. —Воронеж, 2001.
9. *Зинчук Н.Н., Пизнюр А.В.* Новое о вскипании алмазоносных магм / Тезисы IV международной конференции «Новые идеи в науках о Земле». —М., 2003.
10. *Зинчук Н.Н., Герасимчук А.В., Гарат М.Н.* Научно-методическое обеспечение геологоразведочных работ АК «АЛРОСА»: направление, структура, основные результаты исследований, проблемные задачи / Геологические аспекты минерально-сырьевой базы акционерной компании «АЛРОСА»: современное состояние, перспективы решения. —Мирный, 2003. С. 6—28.
11. *Илутин И.П.* Кимберлиты Якутии — линейное расположение трубок и вещественный состав // Руды и металлы. 2003. № 5—6. С. 60—69.
12. *Луцицкий И.В., Бондаренко П.М.* Механизм образования концентрических структур над магматическим очагом (по экспериментальным данным) // Геология и геофизика. 1974. № 10. С. 3—19.
13. *Маракушев А.А.* Рудоносность взрывных кольцевых структур // Геология рудных месторождений. 1996. Т. 38. № 6. С. 500—511.
14. *Невский В.А.* Кольцевые разрывы и некоторые данные о механизме их формирования // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1971. № 5. С. 47—61.
15. *Невский В.А., Фролов А.А.* Структуры рудных месторождений кольцевого типа. —М., 1985.
16. *Петров А.И.* О механизме образования структур центрального типа // Советская геология. 1968. № 9. С. 139—145.
17. *Петров А.И., Плотников Л.М., Юревич Г.Г.* Механизм образования структур центрального типа // Советская геология. 1971. № 2. С. 75—84.
18. *Серокуров Ю.Н., Калмыков В.Д.* Факторы контроля провинций, субпровинций и районов проявления алмазоносных пород // Отечественная геология. 1994. № 1. С. 3—8.
19. *Серокуров Ю.Н., Калмыков В.Д., Зуев В.М.* Космические методы при прогнозе и поисках месторождений алмазов. —М., Недра, 2001.
20. *Сторожук О.П.* Очаговые магмотектонические структуры и их роль в прогнозировании эндогенных рудных месторождений (на примере Центрально-Алданского и Центрально-Кольского районов). Автореф. дисс. ... канд. геол.-минер. наук. —М., 2004.
21. *Суворов В.Д., Мельник Е.А., Манаков А.В.* Структура земной коры Мало-Ботуобинского и Далдыно-Алакитского кимберлитовых районов по данным сейсмического и гравитационного моделирования / Эффективность прогнозирования и поисков месторождений алмазов: прошлое, настоящее и будущее (алмазы-50). —С-Пб., 2004. С. 339—343.
22. *Томсон И.Н., Фаворская М.А.* Рудоконцентрирующие структуры и принципы локального прогнозирования эндогенного оруднения // Советская геология. 1968. № 9. С. 73—86.
23. *Фаворская М.А., Томсон И.Н., Баскина В.А.* и др. Глобальные закономерности размещения крупных рудных месторождений. —М.: Недра, 1974.