

УДК 551.243.8:552.3 (470.11)

©Ю.Н.Серокуров, В.Д.Калмыков, 2006

## СИСТЕМЫ ОЧАГОВЫХ МАГМОТЕКТОНИЧЕСКИХ СТРУКТУР — ОСНОВНОЙ ФАКТОР КОНТРОЛЯ ФАНЕРОЗОЙСКОГО МАГМАТИЗМА В РАЙОНЕ ЗИМНЕГО БЕРЕГА

Ю.Н.Серокуров, В.Д.Калмыков (Институт ДИОС)

Район Зимнего Берега стал объектом пристального внимания после открытия архангельскими геологами в восьмидесятые годы прошлого века первых на Восточно-Европейской платформе алмазных кимберлитов. Открытия продолжаются, и к настоящему времени здесь выявлены десятки тел различных щелочно-ультраосновных пород (кимберлитов, пикритов, оливинных мелилититов, базальтов), образующих несколько разобнесенных групп. Их вмещают рифейские и вендские терригенные осадочные образования, слагающие нижнюю часть осадочного чехла платформы. Кристаллический фундамент расположен на глубинах от 0,5 до 3 км, что связано с развитой системой горстов и грабенов северо-западного простирания, входящих в состав рифейской Беломорской рифтогенной структуры. Его верхняя часть сложена породами беломорской серии позднего архея. Мощность земной коры оценивается в 37–40 км, а литосферы — около 200 км.

Внедрение магматитов происходило в течение длительного промежутка времени [6], который достаточно уверенно датируется как позднедевонский–раннекаменноугольный. В пользу этого свидетельствуют факты наличия рядом расположенных разновозрастных тел, прорывание трубками ранее сформированных силлов кимберлитов, присутствие нескольких фаз внедрения в отдельных телах. Кимберлитовмещающие толщи на востоке перекрыты верхнекаменноугольными терригенно-карбонатными отложениями, мощность которых постепенно возрастает и наращивается пермскими терригенными образованиями. Все палеозойские толщи перекрыты сплошным чехлом кайнозойских отложений переменной мощности — озерно-аллювиальных, ледниковых, ледниково-морских, флювиогляциальных, аллювиальных, озерно-болотных. Дочетвертичный рельеф довольно расчленен и обладает значительными перепадами. Растительность таежная, много болот и рек.

Взгляды на структурный контроль распростра-

ненного здесь палеозойского магматизма различны. Разные исследователи выделяют от четырех до шести кимберлитовых полей и более десятка кусков (групп) кимберлитовых и родственных им пород, объединяющих тела сходного петрохимического, петрографического, геохимического и вещественного составов.

К кимберлитоконтролирующим предлагается относить зоны разломов субмеридионального простирания [6], по которым не обнаруживают смещений ни в фундаменте, ни в чехле, в связи с чем их генезис не вполне ясен. Большинство исследователей ареал магматизма рассматривают как закономерный результат развития мантийного очага, на что указывает симметричное распределение тел с различными характеристиками вещественного состава — в центре развиты кимберлиты Fe-Ti серии (ильменитовые), а по периферии — Al серии (безильменитовые) и базальты [9].

Модель, предложенная в работе [4], предполагает формирование кимберлитов I и II групп, а также переходных кимберлитов и лампроитов в едином глубинном мантийном резервуаре (плюме), образованном при субдукции древней океанической коры. Флюидогенерирующие потоки материнской магмы эволюционировали при движении вверх, захватывали и перерабатывали материал из различных участков гетерогенной и в разной степени метасоматизированной субконтинентальной литосферы.

Геологи ЦНИГРИ [2, 8] выявили в разрезе земной коры Зимнего Берега интегрированную совокупность физико-геологических неоднородностей, которую можно интерпретировать как субвертикальную область преобразования мантийно-коровой толщи, генетически связанную с формированием и развитием гетерогенной кимберлитобразующей системы. Она, как предполагают, представлена на уровне верхней мантии — нижних горизонтов земной коры мантийно-коровым диапиром мафит-ультрамафитового состава, на уровне консолидиро-

ванной земной коры — флюидно-магматической колонной (включая базитовые, базит-гипербазитовые и кимберлитовые расплавы). В потенциальных геофизических полях система отражена характерной областью деформации структурных планов гравитационных и магнитных аномалий.

Изложенное позволяет констатировать, что участку развития ареала магматитов на Зимнем Берегу присущ устойчивый комплекс неочевидных геолого-геофизических признаков, которые свидетельствуют о трансоровом (очаговом) характере его формирования. Эти выводы потребовали длительных геолого-геофизических исследований. Для характеристики признаков очаговой активизации авторами использованы более доступные материалы космических съемок. Зимнебережная площадь рассматривается нами как эталонная, т.е. наиболее благоприятная для совершенствования технологий дистанционного прогноза.

Формой отражения очагов активизации в земной коре (и мантии?) является определенное сочетание тектонических нарушений в фундаменте и породах осадочного чехла, обусловленное воздействием на них глубинных процессов. 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 [11].

Причиной образования таких каркасов считают глубинные взрывы огромной мощности, обусловленные импульсивным подъемом углеродно-водородных потоков к земной поверхности вследствие дегазации ядра Земли [3, 5, 12]. Такие взрывы приводили сначала к возникновению камер сжатия, а затем в окружающей твердой среде — сферических зон дробления и трещинообразования. На поверхности они выражались округлыми морфоструктурами центральной симметрии, рассеченными сетью радиальных и кольцевых разломов, а в разрезе — тектоническими конусами разрушения. Видимый диаметр структур на поверхности по расчетам [7] в 3–4 раза больше, чем глубина взрыва. Магматические очаги после взрывов претерпевали декомпрессию, и газово-жидкие расплавы по трещинам скола и отрыва внедрялись в ослабленные зоны вмещающей толщи пород.

При наземных геологических работах очаговые магмотектонические структуры в большинстве случаев не диагностировались. И только с появлением космических съемок произошел революционный прорыв в их картировании. Следы их были обнаружены и на большинстве алмазоносных площадей

мира [10], в том числе на Зимнебережной. Появление в последние годы возможности изучить результаты космических съемок последних поколений («Modis», «Landsat», «SPOT» с разрешением от 500 до 15 м/пиксел, цифрового рельефа, рисунка речной сети) позволили уточнить характер их проявления в современном ландшафте, более полно оценить взаимоотношения, предложить дистанционные прогнозно-поисковые модели, которые целесообразно использовать при оценке перспектив новых площадей, где геолого-геофизические исследования необходимой детальности отсутствуют.

Работы проведены в три этапа с привлечением дистанционных и традиционных материалов повышающейся детальности. В рамках первого этапа по материалам низкого разрешения на площади в первые тысячи квадратных километров визуализированы следы наиболее глубинных структур активизации. В рамках второго и третьего по материалам среднего и высокого разрешения на участках площадью в сотни квадратных километров уточнена позиция структур, выделенных на первом этапе, и визуализированы менее глубинные. На всех этапах проводились:

- компьютерная подготовка космических снимков и другой дистанционной информации с помощью специальных программ обработки (синтез, фильтрация, кластеризация, различного рода трансформации и т.д.);

- визуальное и компьютерное дешифрирование как первичных изображений, так и многочисленных «композигов»;

- обработка полученных результатов качественными и количественными методами для выделения информативных признаков;

- визуализация информативной информации на специализированных картах;

- окоптуривание перспективных участков.

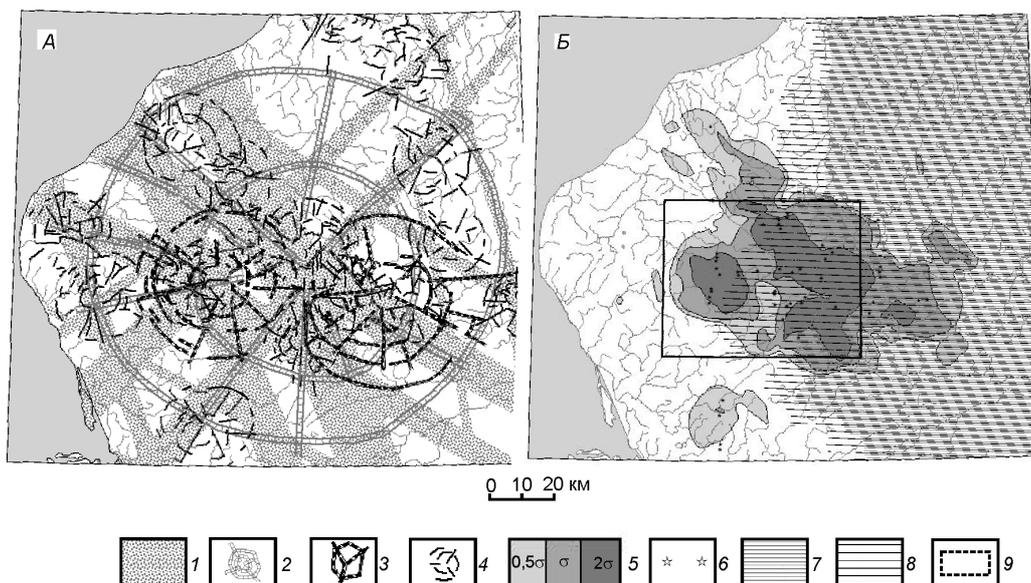
По результатам работ первого этапа изучена площадь более 5000 км<sup>2</sup>. В ее пределах в сложном рисунке линеаментов и цветовых аномалий визуализирована морфоструктура диаметром около 200 км с отчетливым радиально-концентрическим строением. Плутоногенная природа структуры подтверждается наложенным характером образующих элементов на более ранние структуры дорифейского и рифей-вендского этапов развития территории и «теневым» отражением в потенциальных геофизических полях (особенно при их трансформациях). Структура расположена в узле пересечения зон линеаментов регионального ранга, которые отражают позицию глубинных сквозькоровых разломов. Зоны северо-западного простираения связаны, вероятно, с Беломорским (или

Кандалакшско-Двинским) авлакогеном, сформированным в рифее и активизированным в среднем палеозое и в конце кайнозоя. Зоны северо-восточного простирания отражают Ладожско-Мезенскую разломно-блоковую структуру венд-раннепалеозойской активизации. Близмеридиональные зоны связаны со структурами, заложенными в позднем архее — раннем протерозое и активизированными в герцинический этап тектогенеза. Причиной формирования этой радиально-кольцевой структуры, контролирующей, по нашим представлениям, Зимнебережный район кимберлитового магматизма, мог стать взрыв тектономагматического (энергетического) очага в подошве земной коры.

При анализе всего комплекса материалов на площади установлены признаки еще двух радиально-кольцевых структур диаметром около 80 км и более десятка диаметром около 30 км. Эпицентры тектономагматических очагов, активизация которых обусловила проявление на поверхности образующих их элементов, расположены на глубинах соответственно 25 и 10 км. Полезная информация о необходимых для создания дистанционной прогнозно-поисковой модели «район кимберлитового магматизма» структурных элементах приведена на рис. 1, А. Она отобрана исходя из гипотезы миграции кимберлитов в земной коре к поверхности только в области над мантийным диапиром, кото-

рый, собственно, и продуцировал эти магмы. Наиболее благоприятные условия миграции в этой области создавали последовательные энергетические импульсы в магматических камерах, которые закономерно приближались к поверхности. Региональные зоны нарушений разных простираний, сформированные ранее, служили пассивными благоприятными структурами. Результат оценки приведен на рис. 1, Б. В качестве минимально перспективной по изолинии, характеризующей аномальное присутствие благоприятных признаков со значениями  $(x+0,5\sigma)$ , оконтурена площадь, включающая все известные алмазоносные кимберлиты сосредоточены в пределах западной морфоструктуры диаметром около 80 км, наиболее доступной для поисков. Там же локализован участок со значениями перспективности  $(x+2\sigma)$ . Аналогичный участок, но большего размера, зафиксирован восточнее, однако мощность посткимберлитовых отложений здесь быстро возрастает, что, очевидно, не благоприятствует поискам.

Работы второго этапа с материалами среднего разрешения («Landsat», потенциальные геофизические поля) проведены на площади 6000 км<sup>2</sup>, которая полностью охватывает проекцию на поверхности западной нижнекоревой структуры активизации (см. рис. 1, контур 9). Она проявилась на серии



**Рис. 1.** Схема линейных и очаговых активизационных структур по дистанционным материалам низкого разрешения (А) и позиция участков, перспективных для миграции к поверхности кимберлитов (Б):

1 — зоны линеаментов, проявляющие линейные структуры активизации регионального ранга; концентрические и радиальные элементы, проявляющие очаги активизации; 2 — подкоровый, 3 — среднекоровые, 4 — верхнекоровые; 5 — области внутри изолиний с аномальной суммой благоприятных признаков; 6 — известные магматические тела (кимберлиты, пикриты, мелилититы); посткимберлитовые платформенные отложения; 7 — пермские, 8 — каменноугольные; 9 — контур работ второго этапа

«композит», полученных при трансформациях зональных каналов космических изображений этого вида, комплексными цветовыми и тоновыми аномалиями, своеобразными текстурами ландшафта, генерализированным рисунком микроштрихов. Радиально-концентрическое строение структуры подчеркнуто размещением современных водотоков и растительности. Все это позволяет рассматривать и ее как результат энергетического воздействия на кору и породы чехла очага активизации, располагавшегося на глубине около 25 км.

Пространственно данная структура [8] совпадает с локализованной областью деформации общего структурного плана поля силы тяжести размером 60×85 км, выраженной снижением (на 25–30 мгал) его уровня. На этом фоне выделяются отдельные локальные максимумы небольшой интенсивности. В поле горизонтального градиента структуре соответствует участок потери корреляции линейных аномалий, формирующих общий структурный план градиентного поля Зимнего Берега. На карте локальной составляющей поля силы тяжести, обусловленной влиянием неоднородностей нижних горизонтов земной коры, здесь отмечена положительная малоамплитудная (1,0–1,5 мгал) аномалия размером до 40 км, центр масс которой по расчетам расположен на глубине около 25 км. Наблюдаются также некоторое повышение напряженности магнитного поля, нарушение линейного плана его аномалий, присутствие средне-частотной аномалии  $\Delta T$  овальной формы размером около 75 км. Ее источник также находится на глубине 20–25 км. Сейсмическое зондирование указывает на расслоенность разреза земной коры в этом участке, обусловленную присутствием в ней на глубинах 15 и 25 км слоев с инверсией скоростей продольных и поперечных волн. В целом интегрированная совокупность физико-геологических неоднородностей интерпретируется [8] как субвертикальная область преобразования мантийно-коровой толщи, генетически связанная с формированием и развитием здесь гетерогенной кимберлитобразующей системы.

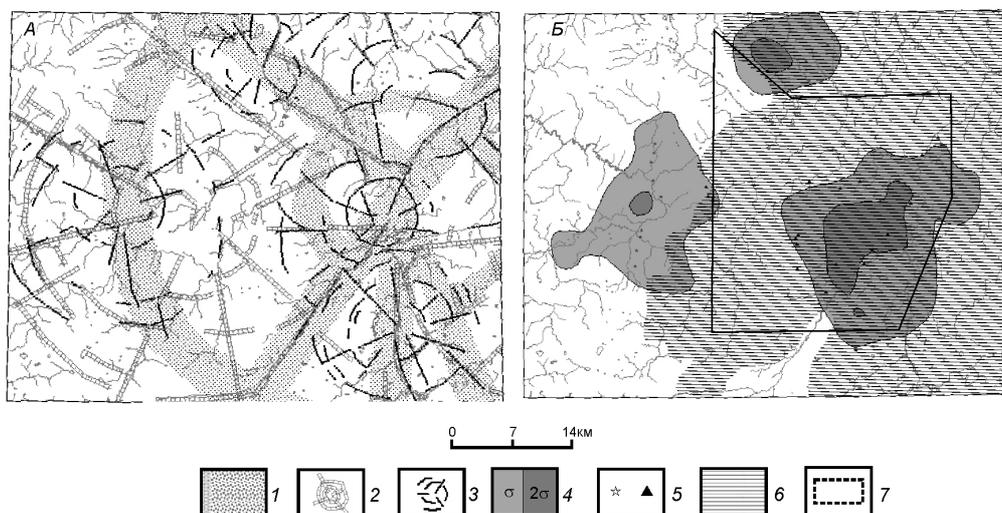
При обработке схем детального дешифрирования линеаментов и результатов площадного районирования многочисленных «композитов» на площади выделены системы линеаментов разных направлений и признаки кольцевых и круговых структур более высокого ранга. Первоочередной интерес на этом этапе представляли структуры диаметром около 30 км, способные маркировать позицию среднекоровых очагов активизации. Обнаружены признаки всего пяти структур подобного рода. Две из них пространственно совпадают с известными

Золотицким и Верхотинским кимберлитовыми полями и проявлены достаточно отчетливо, остальные три расположены восточнее, пространственно перекрывают друг друга, что затрудняет их визуализацию. Схема необходимых для прогноза структур приведена на рис. 2, А. Используемая на этом этапе дистанционная прогнозно-поисковая модель содержала шесть благоприятных признаков, и с ее помощью выделены благоприятные участки для локализации полей кимберлитового магматизма. Изолинией аномального их совпадения ( $x+\sigma$ ) оконтурено три обособленных участка (см. рис. 2, Б). Два пространственно совпадают с известными Золотицким и Верхотинским кимберлитовыми полями, где присутствуют промышленные месторождения алмазов, третий имеет большие размеры и отвечает Кепинскому полю.

Работы третьего этапа (см. рис. 2, Б, контур 7) проведены на площади 2500 км<sup>2</sup> с использованием французских зональных космических снимков «SPOT». Участок полностью перекрыт посткимберлитовыми отложениями мощностью от 60 до 100 м.

Известные кимберлитовые тела здесь группируются в ряд кустов и изучены с помощью скважин. Пространственно они [8] по данным гравитационного моделирования м-ба 1:200 000 (подбор геоплотностных разрезов в диапазоне глубин 0–25 км) ассоциируются с локальными купольными структурами в кровле транскоровой физико-геологической неоднородности. Эти структуры проявляются в потенциальных геофизических полях в виде характерных комплексных аномальных областей и интерпретируются как скрытые на глубине 2–4 км (и выходящие на поверхность кристаллического фундамента) локальные ареалы базит-гипербазитового магматизма, связанные с отдельными дериватами многофазной флюидно-магматической колонны кимберлитобразующей системы предыдущего ранга. Для них характерны комплексные положительные аномалии локальных составляющих гравитационного и магнитного полей.

Устойчивого отражения, как показал специализированный анализ множества «композитов», полученных при анализе зональных каналов, ареалы базит-гипербазитового магматизма в современном ландшафте не имеют, но отдельные аномальные изменения цвета над некоторыми отмечаются. Несистемный характер этого явления затрудняет их использование в моделях. При обработке схем микролинеаментов визуализированы фрагменты зон, проявляющих линейные и дуговые структуры разного ранга. С ними устойчивой связи известных здесь кимберлитовых тел также не обнаружено.



**Рис. 2.** Схема линейных и очаговых активизационных структур по дистанционным материалам среднего разрешения (А) и позиция участков, перспективных для миграции к поверхности кимберлитов (Б):

концентрические и радиальные элементы, проявляющие очаги активизации: 1 — подкоровой, 2 — среднекоровой, 3 — верхнекоровые; 4 — области внутри изолиний с аномальной суммой благоприятных признаков; 5 — известные магматические тела; 6 — посткимберлитовые платформенные отложения; 7 — контур работ третьего этапа

Количественная обработка этой информации показала лишь тяготение групп тел к участкам повышенной плотности микротрещин и аномалиям их изотропного распределения. Кроме того, визуализировано более десятка малых кольцевых структур (диаметр 12–8 км), часть из которых пространственно совпадает с известными кустами кимберлитов. Проявлены они слабо и при выделении требуют значительного количества различных преобразований и трансформаций. Можно предположить, что некоторые из них отражают позицию верхнекоровых тектономагматических очагов активизации, над которыми с наибольшей вероятностью могли формироваться ареалы даек, поставляющих материал для образования диатрем.

Следует отметить, что большая часть Кепинской площади расположена в основании западного сектора подкоровой радиально-концентрической структуры и характеризуется значительной деструкцией верхней части коры, что отражается в усложненном рисунке современного ландшафта. В этот сектор вписывается круговая область, проявленная слабыми аномальными изменениями цвета, тона, текстуры и структуры космических трансформированных изображений. На снимках более низкого разрешения она не фиксировалась, что говорит о ее слабом отражении в верхних частях коры и значительном (до 80%) пространственном совмещении с Золотицкой, Верхотинской и Центральной радиально-концентрическими структурами, выраженными более отчетливо. В связи с этим

можно предположить, что известные кусты кимберлитового магматизма связаны с различными среднекоровыми магматическими очагами. Специализированная структурная схема Кепинской площади приведена на рис. 3, А. Оценка перспектив проведена с использованием дистанционной прогнозно-поисковой модели, которая ориентирована для выделения благоприятных участков локализации «кустов» кимберлитового магматизма. Составлена она с учетом изучения якутских эталонов и содержит «сквозные» признаки.

Изолинией ( $x+\sigma$ ) в качестве перспективной оконтурено около 30% от первоначально оцениваемой площади, что свидетельствует о сложности существующей здесь обстановки (см. рис. 3, Б). В пределах этого контура расположено 95% известных кимберлитовых тел, что показывает эффективность использованной модели. Наличие достаточно локальных участков с более высокой суммой благоприятных признаков говорит о не вполне исчерпанном потенциале площади.

Таким образом, изучение материалов дистанционного зондирования все возрастающего разрешения на эталонной площади позволило визуализировать разноглубинные очаги активизации в мантии и земной коре. В совокупности они представляют собой закономерный итог эволюции тектономагматической колонны, которая пульсационно приближалась к поверхности. Контурные разноглубинных активизационных структур определяют границы миграции мантийных магматитов на каж-

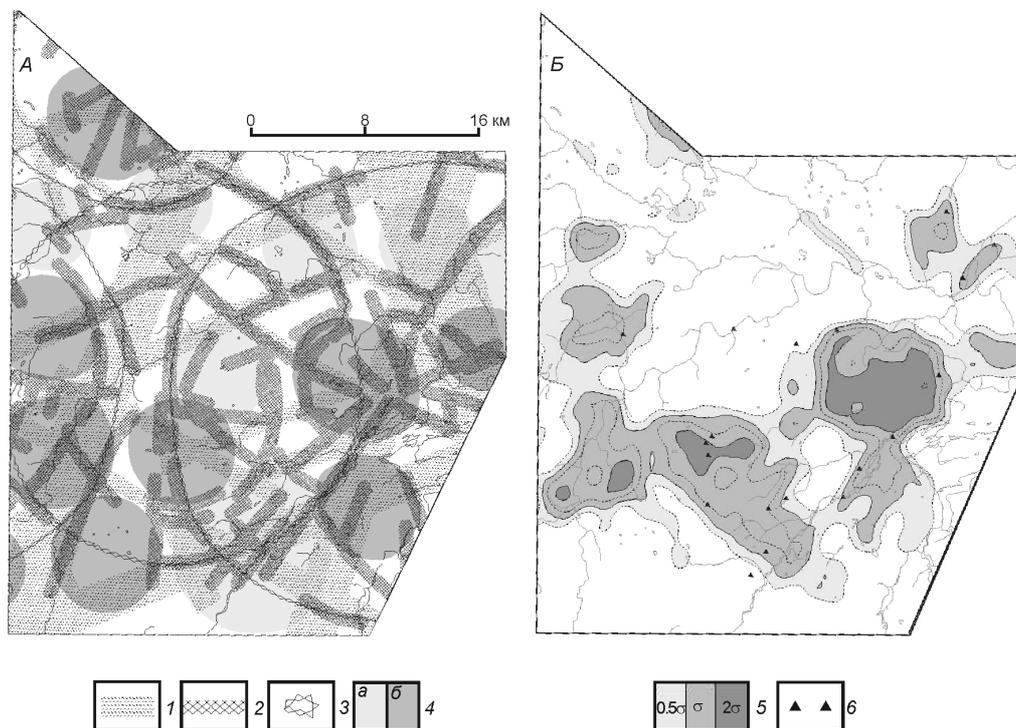


Рис. 3. Схема линейных и очаговых активационных структур по дистанционным материалам высокого разрешения (А) и позиция участков, перспективных для миграции к поверхности кимберлитов (Б):

1 — сквозные зоны линеаментов, обусловленные активизацией региональных структур; 2 — концентрические и радиальные элементы, проявляющие среднекоровые очаги активизации; 3 — условные границы среднекоровых структур активизации, контролирующей поля кимберлитового магматизма; 4 — области над верхнекоровыми очагами активизации (а — слабовыраженные; б — хорошо выраженные); 5 — области внутри изолиний с аномальной суммой благоприятных признаков; б — известные магматические тела

дом из уровней земной коры. Определенное пространственное сочетание этих структур благоприятствует достижению алмазонасытыми кимберлитами поверхности.

Дистанционные прогнозно-поисковые модели, созданные на базе изучения алмазонасыщенных эталонов, целесообразно использовать при оценке перспектив новых территорий, для которых отсутствует достаточно детальная геолого-геофизическая информация.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваганов В.И. Алмазные месторождения России и мира (основы прогнозирования). — М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2000.
2. Ваганов В.И., Голубев Ю.К., Прусакова Н.А. Стадийная технология ведения геологоразведочных работ на алмазы на Восточно-Европейской платформе // Геология алмаза — настоящее и будущее. Воронеж, 2005.
3. Глобальные закономерности размещения крупных рудных месторождений / М.А.Фаворская, И.Н.Томсон, В.А.Баскина и др. — М.: Недра, 1974.
4. Два типа алмазонасыщенных кимберлитов в Архангельской провинции / В.К.Гаранин, Г.П.Кудрявцева, Т.В.Посухова и др. // Геология и разведка. 2001. № 4.
5. Маракушев А.А. Рудоносность взрывных кольцевых структур // Геология рудных месторождений. 1996. Т. 38. № 6.
6. О структурном контроле размещения кимберлитовых тел (на примере Архангельской провинции) / Е.А.Андросов, В.В.Вержак, В.А.Ларченко и др. // Геология алмаза — настоящее и будущее. Воронеж, 2005.
7. Петров А.И., Плотников Л.М., Юревич Г.Г. Механизм образования структур центрального типа // Советская геология. 1971. № 2.
8. Прусакова Н.А. Геолого-геофизическая прогнозная модель Зимнебережного кимберлитового поля: Автореф. дис... канд. геол.-минер. наук. — М., 2004.
9. Саблуков С.М. Петрологическая зональность кимберлитовых районов Архангельской алмазонасыщенной провинции // Алмазы и алмазонасыщенность Тимано-Уральского региона. Сыктывкар, 2001.
10. Серокуров Ю.Н., Калмыков В.Д., Зуев В.М. Космические методы при прогнозе и поисках месторождений алмазов. — М.: Недра, 2001.
11. Сторожук О.П. Очаговые магмотектонические структуры и их роль в прогнозировании эндогенных рудных месторождений (на примере Центрально-Алданского и Центрально-Кольмского районов): Автореф. дис... канд. геол.-минер. наук. — М., 2004.
12. Томсон И.Н., Фаворская М.А. Рудоконцентрирующие структуры и принципы локального прогнозирования эндогенного оруденения // Советская геология. 1968. № 9. С. 73–86.