

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»;

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Научный геоинформационный центр Российской академии наук (НГИЦ РАН)

На правах рукописи

**Ишмухаметова Венера Тальгатовна**

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОРЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АЛМАЗОВ  
НА СЕВЕРЕ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ НА ОСНОВЕ ДЕШИФРИРОВАНИЯ  
МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ**

25.00.11 – Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:  
доктор геол.-минер. наук,  
профессор Дергачев А.Л.

Москва – 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Глава 1. Прогнозно-поисковые признаки алмазоносных кимберлитов Сибирской платформы.....	8
Глава 2. Применение методов дистанционного зондирования при прогнозировании и поисках коренных месторождений алмазов.....	26
Глава 3. Методика комплексного использования материалов космической съемки, гравиметрических и магнитометрических данных для выявления алмазоносных кимберлитовых трубок.....	45
Глава 4. Крупномасштабный прогноз кимберлитовых трубок на основе ГИС-технологий и комплекса дистанционных методов.....	78
Глава 5. Прогнозирование нового кимберлитового поля и коренных месторождений алмазов на основе ГИС-технологий обработки космических, геолого-геофизических и картографических данных.....	91
Заключение.....	129
Литература.....	131

## **Введение**

### **Актуальность работы**

Якутская алмазоносная провинция (ЯАП) является главным источником добываемых алмазов, а также их разведанных запасов и прогнозных ресурсов. С позиции региональных объектов прогноза (субпровинция, кимберлитоконтролирующая зона, алмазоносный район) ЯАП изучена достаточно полно и требуется лишь уточнение имеющихся критериев для слабо исследованных территорий. Анализ литературы, посвященной геологии и алмазоносности показал, что высокими перспективами на обнаружение новых кимберлитовых полей на севере Сибирской платформы обладает Приленский алмазоносный район, где насчитывается свыше 190 кимберлитовых тел среднепалеозойского и мезозойского возраста, подавляющее большинство которых неалмазоносны или характеризуются убогой алмазоносностью. Наличие в районе промышленных россыпей алмазов, источниками которых не могли служить известные слабоалмазоносные кимберлитовые тела, позволяет предполагать возможность обнаружения на этой территории еще неизвестных богатых коренных источников. На большинстве открытых площадей, благоприятных для проведения поисков коренных месторождений алмазов, соответствующие работы уже выполнены, и поэтому ресурс объектов, выявляемых традиционными геолого-геофизическими методами, почти исчерпан. Совершенствование дистанционных методов открывает новые перспективы при прогнозировании и поисках коренных месторождений алмазов на открытых территориях, обеспечивающих переход от собственно региональных прогнозных построений, к непосредственно поисковым работам на относительно локальных площадях.

**Цели работы** – разработать новые подходы к комплексированию дистанционных методов при прогнозировании алмазоносных кимберлитовых тел; на основе дешифрирования материалов космической съемки выделить потенциально алмазоносные участки в пределах Далдыно-Алакитского алмазоносного района и на малоизученной перспективной площади на севере Сибирской платформы.

### **Задачи исследования:**

1. Рассмотреть прогнозно-поисковые признаки алмазоносных кимберлитов Сибирской платформы.
2. Оценить возможности существующих методов дистанционного зондирования при прогнозировании коренных месторождений алмазов.

3. Определить целесообразность использования материалов космической съемки для распознавания кимберлитовых тел на фоне вмещающих их пород и оценки потенциальной алмазоносности.

4. На эталонной площади разработать методику комплексного использования материалов космической съемки и геолого-геофизических данных для крупномасштабного прогнозирования коренных месторождений алмазов.

5. На малоизученной перспективной площади, выделенной по существующим прогнозно-поисковым признакам, выявить потенциально алмазоносные участки по предложенной методике комплексного использования материалов космической съемки и геолого-геофизических данных для крупномасштабного прогнозирования коренных месторождений алмазов.

### **Фактический материал и методы исследования**

В основу работы положен материал, полученный автором в процессе выполнения работ в Научном геоинформационном центре Российской академии наук (НГИЦ РАН). Базой для исследований стали: 1) материалы многозональной космической съемки LANDSAT 7 ETM+; 2) геологические, топографические, геофизические, тектонические, шлихоминералогические карты, карты полезных ископаемых; 3) структурно-прогнозные схемы кимберлитолокализирующих дислокаций, полученные в результате анализа мегатрещиноватости, предоставленные Милашевым В.А.; 4) опубликованная и фондовая специализированная литература по геологическому строению региона и отдельных его площадей, истории развития, особенностям общей металлогении и алмазоносности.

Исследования проводились с помощью специализированных программных продуктов ArcGIS, ENVI и Adobe Photoshop.

### **Научная новизна**

Предложен принципиально новый метод выделения алмазоносных кимберлитовых трубок на фоне вмещающих их пород на основе дешифрирования материалов многозональной космической съемки LANDSAT 7 ETM+, позволяющий локализовать площади на перспективных участках, выделенных другими методами. Впервые продемонстрирована возможность использования значений яркости в каналах 4 (0.76-0.90 мкм), 5 (1.55-1.75 мкм), 7 (2.08-2.35 мкм) КС LANDSAT 7 ETM+ для прогнозирования кимберлитовых тел открытого типа.



## **Практическая значимость**

Показана эффективность применения результатов дешифрирования материалов космической съемки на основе ГИС-технологий в комплексе с геологическими, геофизическими, шлихоминералогическими данными при прогнозировании кимберлитовых месторождений алмазов, как на изученных площадях, так и на новых, плохо исследованных территориях.

На перспективной площади, выделенной по имеющимся геофизическим и шлихоминералогическим данным, в пределах Алакит-Мархинского и Далдынского кимберлитовых полей на основе дешифрирования материалов космической съемки выделены потенциально алмазоносные участки.

Впервые с использованием дистанционных методов установлено, что на севере Сибирской платформы, в пределах листов R-51-21-В,Г,-33-А,Б можно ожидать выявление нового кимберлитового поля, в пределах которого по яркостным характеристикам КС LANDSAT 7 ETM+ в каналах 4 (0.76-0.90 мкм), 5 (1.55-1.75 мкм), 7 (2.08-2.35 мкм) установлено 18 объектов, перспективных на наличие кимберлитовых тел.

Результаты исследований переданы в АК «АЛРОСА» для использования в поисково-разведочных работах на коренные месторождения алмазов (вх. № А01-100/1307 от 16.11.2015 г.).

## **Защищаемые положения**

1. На объектах Алакит-Мархинского и Далдынского кимберлитовых полей установлены статистически достоверные различия между алмазоносными кимберлитовыми телами и вмещающими породами в диапазонах 0.76-0.90, 1.55-1.75, 2.08-2.35 мкм КС LANDSAT 7 ETM+. Значения яркости в этих диапазонах в сочетании с гравимагнитными данными могут быть использованы в качестве информативных признаков при крупномасштабном прогнозировании алмазоносных кимберлитовых трубок открытого типа.

2. Выявленные аномалии в пределах точек тройного сочленения кимберлитолокализирующих дислокаций, установленные по методике структурного анализа изотропной мегатрещиноватости в Алакит-Мархинском и Далдынском кимберлитовых полях, обладают различными яркостными характеристиками КС LANDSAT 7 ETM+ и по-разному проявлены в гравитационном и магнитном полях. Разбраковка их по яркости и геофизическим данным позволила выявить новые участки, перспективные для выявления кимберлитовых трубок.

3. На основе предложенной методики дешифрирования материалов многозональной космической съемки LANDSAT 7 ETM+ и комплексного анализа геологических данных, результатов геофизических и шлихо-минералогических исследований с использованием ГИС-технологий в Приленском районе Лено-Анабарской субпровинции, к северо-востоку от Хорбусуонского поля, прогнозируется новое кимберлитовое поле, включающее 18 объектов, перспективных на обнаружение потенциально алмазоносных кимберлитовых тел.

### **Апробация работы**

Результаты работы представлены на следующих конференциях:

1. XXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2014», 7-11 апреля 2014 г., Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова.

2. Вторая Международная конференция «Новые технологии обработки и использования данных дистанционного зондирования Земли в геологоразведочных работах и при ведении мониторинга опасных геологических процессов», 22-24 апреля 2014 г., Санкт-Петербург, ФГУП «ВСЕГЕИ».

3. XXII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2015», 13-17 апреля 2015 г., Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова.

4. Результаты выполненной работы изложены в 2 отчетах НГИЦ РАН по Программе фундаментальных научных исследований за 2013 г. – Гос. регистр. № 01201352174; за 2015 г. – Гос. регистр. № 01201451731.

5. Результаты выполненных исследований по крупномасштабному прогнозированию коренных месторождений алмазов на основе дешифрирования материалов космической съемки в пределах Алакит-Мархинского и Далдынского кимберлитовых полей и на севере Сибирской платформы переданы в АК «АЛРОСА».

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, включая 3 статьи – в журналах, входящих в перечень рекомендованных ВАК.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, включает 140 страниц текста, 56 рисунков и 23 таблицы и сопровождается списком литературы из 99 наименований. Защищаемое положение 1 раскрыто в главе 3, защищаемое положение 2 – в главе 4, защищаемое положение 3 – в главе 5.

## **Благодарности**

Автор выражает глубокую благодарность профессору, доктору геолого-минералогических наук Дергачеву Александру Лукичу за научное руководство проведенными исследованиями и ценные рекомендации по проделанной работе. Автор также выражает искреннюю признательность за неоценимую помощь и поддержку при выполнении диссертационной работы заведующему лабораторией Природных ресурсов и антропогенных процессов НГИЦ РАН, кандидату геолого-минералогических наук Миловскому Георгию Алексеевичу.

Особую благодарность автор выражает доктору геолого-минералогических наук Милашеву Владимиру Аркадьевичу за предоставленные структурно-прогнозные схемы по кимберлитолокализующим дислокациям, установленные по методике структурного анализа изотропной мегатрещиноватости в Алакит-Мархинском и Далдынском кимберлитовых полях.

## Глава 1. Прогнозно-поисковые признаки алмазоносных кимберлитов Сибирской платформы

Для месторождений алмазов в соответствии с разработками ЦНИГРИ принята следующая таксонометрия основных перспективных площадей (Ваганов и др., 1989, 1995, 2000, 2002).

*Алмазоносная минерагеническая зона:* линейная высокопроницаемая структура, неоднократно активизирующаяся и контролирующая процессы коро-мантийного энергомассопереноса. Зоны характеризуются значительной (до 500 км и более) протяженностью при ширине около 50 км, большой глубиной заложения ограничивающих внутрискрутурных разломов. Насыщенность таких зон разновозрастными дайкообразными и штокообразными телами, трубками взрыва основного, ультраосновного и щелочно-ультраосновного состава определяет их облик. К алмазоносным (потенциально алмазоносным) принадлежат зоны, находящиеся в алмазоносных субпровинциях; несущие интрузивы щелочно-ультраосновного состава и линейно сгруппированные ореолы минералов-индикаторов и самих алмазов.

*Алмазоносное поле:* естественная группа пространственно-сближенных кимберлитовых тел, связанных с развитием единой вертикальной «стволовой» зоны повышенной проницаемости. Площадь поля от первых сотен квадратных километров до 2.5 тыс. кв. км.

*Куст (группа) алмазоносных тел:* локальные скопления (группы, цепочки) от 2 до 10 алмазоносных тел в пределах кимберлитовых полей. Площадь куста не превышает первых десятков квадратных километров.

*Месторождение:* конкретное коренное тело (трубка, силл, дайка), концентрация, стоимость и запасы алмазов в котором делают его разработку экономически выгодной.

Основой выделения перспективных площадей и участков на территории Якутской алмазоносной провинции (ЯАП) является традиционный набор прогнозно-поисковых признаков, апробированный в процессе многолетней практики поисковых работ АК «АЛРОСА». В обобщенном виде он сводится к ряду магматических, минералогическо-геохимических, структурно-тектонических и геофизических факторов (Горев и др., 2005; Фолисевиц и др., 2000; Подчасов и др., 2004).

Использование магматических критериев основывается на особенностях размещения кимберлитовых тел в плане и способности их ассоциировать с родственными магматическими образованиями. Отдельные кимберлитовые тела обычно образуют пространственно сближенные сообщества – кимберлитовые поля, в пределах которых они

группируются в виде обособленных «кустов» или линейных групп (цепочек) тел. Это свойство используется как критерий прогнозирования. При обнаружении единичного кимберлитового тела можно говорить, во-первых, что мы находимся на площади поля и, во-вторых, о наличии вблизи других подобных объектов. Кроме собственно кимберлитовых тел, в пределах ЯАП, особенно в ее северной части, кимберлиты в полях пространственно ассоциируют с родственными им магматитами – пикритовыми порфиритами, карбонатитами, щелочными базальтоидами. Эта особенность также может использоваться как магматический критерий – наличие отдельных тел или их групп, сложенных родственными кимберлитам магматическими образованиями, указывающими на возможность обнаружения кимберлитов. Однако, все поля с широким спектром сопутствующих магматических пород являются, на сегодняшний день, непродуктивными.

В качестве минералогических предпосылок и признаков выступают продукты дезинтеграции кимберлитов – алмазы и их минералы-спутники (пироп, пикроильменит, хромшпинелиды, оливин, циркон). Алмазы, как основные минералы-индикаторы проявлений кимберлитового магматизма, нередко являются прямым прогнозно-поисковым критерием. В качестве геохимических критериев прогнозирования используются эндогенные (первичные) и вторичные ореолы и потоки рассеяния типоморфных элементов кимберлитов. Эндогенные ореолы характеризуются повышенными значениями местного геохимического фона пород и аномальными содержаниями Cr, Ni, Co, Ti, Ba, Sr, Mn (Подчасов и др., 2004).

Структурно-тектонические критерии прогнозирования в наиболее общем виде сводятся к выявлению закономерностей связи кимберлитопроявлений с тектоническими процессами и структурами. Вопросам установления и обоснования таких закономерностей посвящена обширная литература, в которой отражены существующие представления о связи кимберлитового магматизма с разрывной и пликтивной тектоникой кристаллического фундамента и осадочного чехла, а также с особенностями глубинного структурно-вещественного строения алмазоносных территорий. Однако четких закономерностей размещения кимберлитов, нашедших отражение в структурно-тектоническом плане осадочного чехла и кристаллического фундамента, к настоящему времени не установлено (Горев и др., 2005). К наиболее определенным и достоверным из них относятся: приуроченность кимберлитов к стабильным блокам древних платформ, а в них – к краевым частям антеклиз и зонам сочленения последних с прогибами, а также пространственная связь кимберлитовых полей с разнотипными зонами разломов и узлами их пересечений.

В группу геофизических прогнозно-поисковых критериев отнесены аномалии, выявленные на площади исследований различными геофизическими методами и интерпретируемые как возможные тела кимберлитов или родственных им магматитов. При этом по степени перспективности выделяются аномалии, рекомендуемые к заверке и аномалии, геологическая природа которых достоверно не установлена.

При проведении прогноза алмазоносных площадей Якутской алмазоносной провинции наиболее устойчивыми были признаны следующие геофизические и структурно-тектонические поисковые критерии и признаки:

- Линейные зоны прогибов поверхности верхней мантии.
- Локальные депрессии поверхности верхней мантии.
- Участки повышенной сейсмической расслоенности земной коры.
- Области максимального погружения магнитоактивной поверхности.
- Гравитационные минимумы.
- Рифтоподобные структуры – секущие зоны.
- Зоны глубинных разломов – зоны краевых дислокаций.
- Тектонические узлы (участки с наиболее сложным структурным планом осадочного чехла, узлы пересечения различно ориентированных разломов и дайковых поясов).

Согласно концепции, разработанной в ЦНИГРИ (Ваганов и др., 1995), минерагенические зоны представляют собой «пояса повышенной проницаемости». Они имеют зональное строение, при котором центральная часть представлена широкой зоной глубинного разлома, а краевые части – линейными гранулит-базит-гипербазитовыми блоками. В гравитационном поле блокам соответствуют среднечастотные линейные положительные аномалии; аналогичные аномалии наблюдаются нередко и в магнитном поле. Сейсморазведкой фиксируются участки повышенных скоростных параметров в верхней и средней частях земной коры. Глубинным разломам обычно отвечают линейные, среднечастотные, отрицательные аномалии в гравитационном и магнитном полях и соответственно пониженные значения скоростных параметров (5.9-6.1 км/с) в верхней части земной коры. На более глубоких горизонтах они прослеживаются по участкам с потерей корреляции сейсмических волн. По данным МТЗ, в разрезе земной коры им иногда отвечают близвертикальные зоны пониженных сопротивлений. С геолого-структурных позиций выделяются три основных типа минерагенических зон (по мере убывания контрастности их отражения в геологических полях): платформенная мобильная зона; плечевая часть рифтов и авлакогенов (область дифференцированных блоковых движений); зона скрытых разломов фундамента. Выполненный в ЦНИГРИ анализ

материалов по алмазным месторождениям мира показал, что именно тип минерагенической зоны является основным фактором, определяющим (в статистическом плане) тип коренных месторождений и средний уровень алмазоносности. Классические кимберлиты с крупными и уникальными месторождениями алмазов приурочены к зонам скрытых разломов фундамента. Исследуемая в настоящей работе Алакит-Оленекская алмазоносная минерагеническая зона представляет собой область сгущения скрытых разломов фундамента, слабо проявленных в осадочных породах чехла. Алакит-Оленекская зона, контролирующая кимберлитовые поля с промышленными диатремами, имеет северо-восточное простирание при ширине 60-70 км протяженностью более 600 км. Контуры зоны проведены с большой долей условности с учетом приуроченности кимберлитовых полей к отдельным разломам и трещинам. На участках, изученных более детально (прежде всего, сейсморазведочными работами), эти контуры определяются более уверенно. Зоны скрытых разломов фундамента обычно хорошо дешифрируются на космоснимках и выделяются в региональных геофизических полях, но относительно слабо отражаются в реально наблюдаемых геологических структурах. Они характеризуются наиболее слабой контрастностью тектонических движений в породах фундамента, а в породах чехла «просвечивают» лишь в виде отдельных разломов и трещин. В пределах зон, как правило, полностью отсутствует складчатость и метаморфизм чехольных образований.

Прогнозирование алмазоносного поля является ключевым элементом при количественной оценке прогнозных ресурсов категории  $P_3$ . Известным кимберлитовым полям присущ устойчивый комплекс геолого-геофизических признаков (Ваганов и др., 2002; Голубев и др., 2004). Основными элементами этого комплекса являются:

1. Пересечение минерагенической зоны с поперечными приподнятыми блоками или глубинными разломами.
2. Купольное поднятие диаметром 30-100 км, с амплитудами от нескольких десятков до первых сотен метров, с постепенным затуханием на глубину. Проявляется в достаточно пластичных породах чехла. При повышенной жесткости пород – блоковое поднятие, соизмеримое с купольным. Возможна комбинация обоих типов поднятий.
3. Положительная кольцевая морфоструктура, кольцевые и дугообразные разломы в верхних и нижних горизонтах осадочного чехла, образующих в совокупности радиально-концентрическую систему.
4. Наличие блоков с изотропной ориентировкой трещиноватости.

5. Смена структуры потенциальных полей: протяженные среднечастотные линейные аномалии сменяются аномалиями изометричной формы и широким спектром высокочастотных аномалий. Уровень поля  $\Delta g$  снижается на 4-12 мГал.

6. Интенсивные положительные гравитационные аномалии на флангах поля, отождествляемые со скрытыми ареалами докембрийского базит-гипербазитового магматизма.

7. Повышенные граничные скорости по поверхности верхней мантии; наличие в земной коре повышенного числа зон с инверсией скоростей.

8. Площадная аномалия повышенного электрического сопротивления в коре и верхней мантии на глубинах от 40 до 400 км, диаметром около 60 км.

9. Депрессия магнитоактивной поверхности.

10. Широкое распространение минералов-индикаторов, в том числе хорошей сохранности, присутствие алмазов в аллювии и терригенных отложениях промежуточных коллекторов.

11. Наличие аэромагнитных (электрических) аномалий «трубочного» типа.

12. Повышенный геохимический фон и аномальные ореолы комплекса элементов-индикаторов (хром, никель, кобальт, титан, ванадий, иттрий) кимберлитов (Островский и др., 1983).

Куст (группа) алмазоносных тел – характеризуется следующими поисковыми признаками: наличие приподнятого блока фундамента; изометричное малоамплитудное куполовидное поднятие в породах чехла; наличие сближенной пары разломов в породах осадочного чехла; наличие ближнего (до 1.5 км от первоисточника) и дальнего (до 10 км) ореолов минералов-индикаторов в перекрывающих трубки отложениях. Отмечается (Ваганов и др., 2002), что до настоящего времени достаточно обоснованная прогнозно-поисковая модель куста отсутствует. Это позволяет предполагать большие потенциальные возможности дистанционных методов – многозональной космической съемки (в комплексе с геофизическими) для решения задачи выявления кустов кимберлитовых трубок в пределах кимберлитовых полей.

Кимберлитовые поля отражаются в виде типоморфных аномалий  $\Delta g$  и  $\Delta T$  (Ваганов и др., 2002). Граница кимберлитового поля обычно проводится по контуру совмещенных в плане аномалий  $\Delta g$  и  $\Delta T$ . Кусты кимберлитовых тел приурочены к периферическим частям локальных максимумов  $\Delta g$  небольшой интенсивности изометричных или слабовытянутых форм. В магнитном поле группы кимберлитовых тел контролируются своеобразными кольцевыми структурами, образованными системами локальных



элементов различной интенсивности и сопряженными с локальными изометричными максимумами гравитационного поля.

При поисках кимберлитовых тел аэромагнитная съемка М. 1:25 000 является основным геофизическим методом. При этом подразумевается, что съемкой этого масштаба в пределах кимберлитового поля будут выявлены (не будут пропущены) относительно крупные средне-, высокомагнитные тела (трубки-лидеры). Аэромагнитная съемка масштаба 1:10 000 проводится в пределах уже выявленного кимберлитового поля либо на высокоперспективных участках, намеченных и оконтуренных, например, по шлихо-минералогическим критериям.

Основной задачей поисковой аэромагнитной съемки является выявление локальных магнитных аномалий, перспективных на обнаружение кимберлитовых тел. Главными признаками таких аномалий являются сравнительно небольшие размеры в плане (от первых сотен метров до 1-1.5 км), приблизительно изометричная или слабовытянутая форма в плане (соотношение осей 1:1-1:3), интенсивность не менее 3-5 нТл и т.д. По сравнению с обычными съемками, проводимыми для целей геологического картирования, к данной съемке предъявляются более высокие требования к точности магнитных измерений и плановой привязке, средняя квадратическая погрешность измерений должна быть не ниже 1 нТл при частоте измерений не более 0.5-1.0 с. По данным даже детальной магнитной съемки далеко не всегда удается однозначно оценить перспективность исследуемой аномалии на выявление кимберлитов. Поэтому в районах, где по данным аэромагнитной съемки масштаба 1:25 000 и последующей наземной детализации выделяется большое число подлежащих разбурированию магнитных аномалий, для определения первоочередных объектов целесообразно комплексировать магниторазведку на аномалиях с другими геофизическими методами – прежде всего электроразведкой и гравиразведкой.

В масштабе 1:1 000 000 – осуществляется выделение потенциально алмазоносных минерагенических зон и предварительное установление аномальных площадей ранга поля. В масштабе 1:200 000 – окончательное оконтуривание прогнозируемых полей и предварительное выделение перспективных площадей ранга куста тел. В масштабе 1:50 000 – детализация внутренней структуры поля, окончательное оконтуривание перспективных участков ранга куста тел и обоснование направлений и методики поисковых работ; заверка наиболее интересных локальных аномалий. Поисковые признаки таксонов минерагеническая зона, поле, куст представлены в табл. 1.1.

Принципы прогнозирования, методики поисков, оценки и разведки коренных месторождений алмазов отражены в фундаментальной работе сотрудников

ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА» (Подчасов и др., 2004). Прогнозные критерии подразделяются на региональные, среднемасштабные и локальные (крупномасштабные) в соответствии с их значимостью и детальностью прогнозных исследований. Основные критерии для регионального и локального прогнозирования коренных месторождений алмазов в сводном виде отражены в табл. 1.2. и 1.3. Поскольку некоторые критерии прогноза носят «сквозной» характер, т.е. используются как для регионального, так и для локального прогнозирования, их описание приводится совместно.

Анализ размещения отдельных кимберлитовых полей Сибирской платформы показывает, что они большей частью приурочены к крупным поднятиям поверхности кристаллического фундамента. При этом кимберлитовые поля часто располагаются в зонах сочленения более мелких структур (блоков) фундамента, осложняющих приподнятые участки. Для проявления кимберлитов благоприятны зоны сочленения крупных положительных и отрицательных платформенных структур (антеклиз, седловин и синеклиз, впадин). Кимберлиты приурочены преимущественно к склонам, часто сложных, прерывистых сводовых поднятий и мегавалов, а также к флексурам, расположенным по обрамлению крупных отрицательных структур. Мощность осадочного чехла в период проявления кимберлитового магматизма на известных алмазоносных территориях, как правило, не превышает 2.5 км; участки с большей мощностью чехла бесперспективны на обнаружение кимберлитов.

Большинство проявлений кимберлитов на древних платформах пространственно связано с авлакогенами, заложенными в рифее и в дальнейшем испытавшими неоднократную тектоно-магматическую активизацию. Авлакогены характеризуются поднятиями поверхности Мохо, сопровождаются глубинными разломами, основным и ультраосновным вулканизмом. Основной вулканизм присущ стадии опускания, грабенообразования – деформации раздвига и сброса, а ультраосновной – стадии воздымания с характерными для нее деформациями сдвига без существенных вертикальных смещений. Кимберлиты располагаются либо непосредственно на бортах грабенообразных впадин (палеорифтов), либо на смежных с ними поднятиях фундамента и чехла (Зинчук и др., 2010; Гладков и др., 2008).

Таблица 1.1

## Коренные месторождения алмазов. Алмазоносные минерагенические зоны, поля, кусты (по Ваганову В.И. и др., 2002)

Группа элементов-признаков	Пространственные металлогенические таксоны		
	Алмазоносная минерагеническая зона	Алмазоносное поле	Куст (группа) алмазоносных тел
1	2	3	4
Структурные	Резкодифференцированные горст-грабеновые блоки; сдвигово-надвиговые структуры, складки линейного типа; плечевая часть рифтов и авлакогенов; зона скрытых разломов фундамента.	Поперечные приподнятые блоки или глубинные разломы; купольное и (или) блоковое поднятие диаметром 30-100 км, амплитудой до 100 м; положительная кольцевая морфоструктура с радиально-концентрической системой разломов; блоки с изотропной ориентировкой трещиноватости.	Приподнятый блок фундамента; изометричное малоамплитудное куполовидное поднятие в породах чехла; сближенные пары разломов в породах осадочного чехла.
Геохимические		Аномальные ореолы комплекса элементов-индикаторов (хром, никель, кобальт, титан, ванадий, иттрий) кимберлитов и лампроитов.	
Минерагенические		Присутствие алмазов и минералов-индикаторов хорошей сохранности в аллювии и промежуточных коллекторов	Ореолы минералов-индикаторов ближнего (до 1.5 км от первоисточника) и дальнего (до 10 км) сноса в перекрывающих трубки отложениях.
Геофизические	Чередование разноконтрастных удлиненно-вытянутых зон региональных магнитных и гравитационных аномалий.	Смена протяженных среднечастотных линейных аномалий потенциальных полей аномалиями изометричной формы и широким спектром высокочастотных аномалий; интенсивные положительные гравитационные аномалии на флангах поля и снижение уровня поля $\Delta g$ на 4-12 мГал в средней части; повышенные граничные скорости по поверхности верхней мантии, наличие в земной коре повышенного числа зон с инверсией скоростей; площадная аномалия повышенного электрического сопротивления в коре и верхней мантии на глубинах 40-400 км, диаметром около 60 км; депрессия магнитоактивной поверхности; аэромагнитные (и электрические) аномалии «трубчатого» типа.	

Таблица 1.2

Критерии регионального прогнозирования коренных месторождений алмазов (по Подчасову В.М. и др., 2004)

Перспективность площади	Геолого-тектонические						Магматические		Минералогическое и палеогеографические			Геохимические	Геофизические
	Возраст фундамента	Рельеф фундамента	Структура осадочного чехла	Мощность осадочного чехла	Глубинные структуры авлакогенов	Глубинные разломы	Ассоциация ультраосновных-щелочно-ультраосновных пород	Возраст кимберлитовых тел	Морфология алмазов	Наличие минералов-индикаторов и их состав	Наличие промежуточных коллекторов	Наличие региональных геохимических аномалий	Наличие региональных геофизических аномалий
Высокоперспективные	Архейский и раннепротерозойский в пределах древних кратонов	Зоны сочленения крупных блоков поднятий и впадин	Зоны сочленения крупных, первого порядка, положительных и отрицательных платформенных структур	2-2.5км	Рифейские, позднее активизированные авлакогены	Глубинные мантийные разломы, связанные с крупными структурами и типа авлакогенов и протягивающиеся по обрамлению последних	Только кимберлитовые породы	Среднепалеозойский (для России)	Плоскогранный тип, округлых менее 30%	Обогащенные хромом малокальциевые пиропы, высокохромистые хромшпинелиды, хромдиопсид, пикроильменит, оливин	Коллекторы ближайшего переноса, содержащие алмазы и минералы-индикаторы, в т.ч. малокальциевые хромпиропы	Региональные (сотни кв. км) геохимические аномалии полиэлементного состава – Ni, Co, Cr, V, Zn, Nb; контрастность аномалий от 3 до 10 геофонов и более	Отрицательные аномалии силы тяжести, коромантийные сейсмические неоднородности, характеризующиеся высокой электропроводностью; смена структуры потенциальных полей
Перспективные							Кимберлиты, кимберлит-лампроиты, лампроиты, реже – щелочные и ультраосновные породы						
Бесперспективные	Позднепротерозойский, вне пределов древних кратонов	Центральные части ненарушенных блоков	Центральные части отрицательных структур	Более 3.5км	Вне территорий влияния авлакогенов	Территория вне зон глубинных разломов	Щелочные и ультраосновные породы, карбонатиты, реже – кимберлиты, лампроиты	-	Алмазы отсутствуют или представлены преимущественно округлыми кристаллами	Гранаты пироп-альмандинового ряда, пикроильменит, перовскит	Коллекторы дальнего переноса, потерявшие связь с первоисточником	Контрастные площадные геохимические аномалии Ni, Co, Cr, V отсутствуют	Указанные аномалии, неоднородности отсутствуют

Таблица 1.3

Критерии среднемасштабного и локального прогнозирования коренных месторождений алмазов (по Подчасову В.М. и др., 2004)

Перспективность площадей	Геолого-структурные				Минералогические			Геохимические	Геофизические	Локальные аномалии		
	Тектонические	Тектономагматические	Структуры осадочного чехла	Магматические	Наличие алмазов, степень их износа	Наличие в рыхлых отложениях кимберлитовых минералов, степень их износа	Наличие в отложениях минералов легкой фракции	Наличие геохимических аномалий	Наличие аномалий, неоднородностей	Геофизические	Геохимические	Дистанционные
Высокоперспективные	Оперяющие разломы главных тектонических нарушений района	Зоны разломов, фиксируемые кимберлитовыми телами	Зоны сочленения положительных и отрицательных структур второго порядка, склоны сводовых и валообразных поднятий, малоамплитудные локальные мульды, кольцевые структуры	Наличие кимберлитовых (лампроитовых) тел, обломков кимберлитов, лампроитов	Наличие алмазов преимущественно октаэдрического облика без признаков механического износа	Участки с повышенной концентрацией кимберлитовых минералов (КМ), в т.ч. алмазной ассоциации со слабым механическим износом	Присутствуют флогопит, серпентин, сапонит	Участки полиэлементных площадных геохимических аномалий, ореолов и потоков рассеяния Cr, Ni, Co, V, Ti	Отрицательные аномалии силы тяжести, коровомантийные сейсмические неоднородности, характеризующиеся высокой электропроводностью; смена структуры потенциальных полей	Наличие локальных магнитных, электрических и гравитационных аномалий трубчатого типа и их группировка: кустовая или линейная	Наличие первичных и вторичных локальных аномалий Cr, Ni, Co, V, Ti, Nb, Zr, Th, U и легких РЗЭ; наложение газовых ореолов водорода, метана, гелия, аргона	Наличие изометричных объектов, дешифрирующихся на аэрофотоснимках
Перспективные	Прочие разломы			Наличие ультраосновных-щелочных пород	Наличие алмазов, в т.ч. с признаками механического износа	Участки с умеренным содержанием кимберлитовых минералов со слабым и средним механическим износом	Указанные минералы отсутствуют					
Бесперспективные	Участки вне разломов или зон разломов			Отсутствие кимберлитов, лампроитов, ультраосновных пород	Отсутствие алмазов	Кимберлитовые минералы отсутствуют или встречаются единичные зерна со следами сильного механического износа		Указанные аномалии, ореолы и потоки рассеяния отсутствуют	Указанные аномалии, неоднородности отсутствуют	Отсутствие геофизических аномалий	Отсутствие геохимических аномалий	Изометричные объекты отсутствуют

Проявления кимберлитового магматизма генетически и пространственно связаны с зонами глубинных мантийных разломов платформ, вдоль которых происходят скачкообразные изменения глубин залегания поверхности Мохо. Мантийные долгоживущие глубинные разломы контролируют рельеф фундамента, а частично и структуры осадочного чехла, имеют большую протяженность и являются главными подводщими и магомгенерирующими структурами. Основные кимберлитоконтролирующие глубинные разломы связаны с крупными отрицательными структурами типа авлакогенов и протягиваются по обрамлению последних. Кимберлиты одного тектоно-магматического цикла (возраста) приурочены обычно к глубинным разломам, обрамляющим один из бортов авлакогена или крупной грабенообразной впадины. В пределах второго борта они либо отсутствуют, либо имеют другой возраст.

К поверхности земли глубинные разломы разветвляются на серию субпараллельных разрывов второго и более высоких порядков, движения по ним затухают, особенно в пластичной толще осадочного чехла. Контролирующие кимберлитовый вулканизм зоны глубинных разломов, как правило, «скрытые», без заметных смещений на поверхности. В отдельных случаях они фиксируются в гравимагнитных полях (благодаря проявлению основного магматизма), реже дешифрируются на космоснимках. В рельефе поверхности фундамента и структуре чехла они сопровождаются сложными, иногда кулисообразно расположенными сводовыми и валообразными поднятиями, флексурами.

Отмечается (Подчасов и др., 2004), что единственный надежный признак кимберлитоконтролирующего глубинного разлома – присутствие в его зоне самих кимберлитовых тел.

В качестве критериев локального прогноза рассматриваются признаки, свойственные участкам проявления кимберлитов и выраженные в локальных структурах фундамента и чехла платформы, локальных морфоструктурах земной поверхности, характере контролирующих и вмещающих кимберлиты разломов. Кимберлитовые поля чаще тяготеют к склонам сравнительно небольших изолированных сводов, валов, входящих в состав крупных поднятий поверхности фундамента, обрамляющих отрицательные структуры первого порядка. Однако устойчивой связи кимберлитовых полей с локальными формами рельефа поверхности фундамента не просматривается, поскольку геофизические данные, на основе которых исследуется рельеф фундамента, не являются абсолютно достоверными.

В локальных структурах осадочного чехла кимберлитовые поля приурочены преимущественно к сочленению положительных и отрицательных структур второго

порядка и располагаются на склонах сводовых и валообразных поднятий, а также на крыльях флексур, обрамляющих желоба и впадины. Поскольку кимберлитовые поля различаются между собой по многим характеристикам (размерам, количеству и плотности проявлений эруптивных аппаратов, возрасту трубок и их морфологии, величине эрозионного среза, структурному плану деформации поля, характеру разреза кимберлитовмещающих и перекрывающих трубки пород и т.д.), то и локальные структуры осадочного чехла будут отличаться, особенно в районах проявления кимберлитового магматизма разного возраста. Универсальных критериев выделения, а тем более оконтуривания кимберлитовых полей по характеру структур осадочного чехла на сегодняшний день не существует. Кусты (группы) кимберлитовых тел внутри поля выражены в структуре осадочного чехла весьма слабо, главным образом, в магматогенных инъективных формах, возникших при внедрении кимберлитов. Какой либо закономерной их приуроченности к определенным локальным тектоническим структурам не наблюдается. Инъективные магматогенные структуры сопровождают большинство кимберлитовых тел, главным образом, трубчатой формы. Они представляют собой изометричные или слабо вытянутые овальные купола, мульды и более мелкие брахискладки, в центральной части которых располагаются кимберлитовые трубки. Размер их зависит от размера кимберлитового тела и редко превышает его в два раза. Вблизи глубоко эродированных трубок инъективные структуры практически не фиксируются. Преобладают положительные структуры – мелкие купола, брахиантиклинали, вызванные задиром вмещающих пород при внедрении кимберлитов. При построении детальных структурных карт по маркирующим горизонтам кимберлитовмещающей толщи выявилось, что достаточно часто кимберлитовые тела сопровождаются малоамплитудными локальными мульдами. Впервые это было отмечено для трубок Мирнинского поля, а позднее такая связь была установлена в Алакит-Мархинском кимберлитовом поле. Отмечается, что использование околотрубчатых мульд для прогнозных целей не вызывает сомнения.

К локальным структурным критериям можно отнести, так называемые, трапповые «воротнички»: вокруг некоторых крупных и средних по размерам кимберлитовых тел более поздние трапповые интрузии образуют кольцеобразные структуры. Трапповая интрузия (обычно силл), залегающая примерно на границе раздела верхнего и нижнего палеозоя, приближаясь к кимберлитовой трубке, уменьшается в мощности до полного выклинивания, поднимается на более верхние этажи и как бы «обтекает» трубку, образуя подковообразную структуру. Внутри таких «окон» расположены трубки Юбилейная, Кылахская, Восток в Алакит-Мархинском поле. Над малыми в диаметре трубками (менее

50-100 м) траппы не испытывают тенденции к их обтеканию и выклиниванию и данный критерий вообще не проявляется.

Результаты морфометрических исследований алмазоносных территорий показывают, что большинство кимберлитоконтролирующих структур осадочного чехла в той или иной степени проявляется в современных морфоструктурах. Кимберлитовые поля тяготеют преимущественно к изометричным положительным морфоструктурам второго-третьего порядка для полей узлового типа и вытянутым морфоструктурам – для полей линейного типа, характеризующихся повышенной мегатрещиноватостью и плотностью гидросети. Имеются примеры, когда средние по размерам морфоструктуры второго-третьего порядка ограничивают или контролируют кимберлитовые поля. Так, вдоль западной и восточной границ Далдынского кимберлитового поля намечаются субмеридиональные желобообразные зоны прерывистых отрицательных морфоструктур, ограничивающих поле.

В качестве одного из критериев локального прогноза следует отметить кольцевые структуры (структуры центрального типа). В пределах алмазоносных территорий по космическим снимкам выделяется большое количество кольцевых структур, природа которых трактуется неоднозначно, а их связь с проявлениями щелочно-ультраосновного магматизма часто не подтверждается. Тем не менее, отдельные дешифрируемые морфоструктуры центрального типа напрямую связаны с проявлениями кимберлитового вулканизма и могут использоваться в качестве вспомогательного прогнозного критерия.

Главнейшими элементами, определяющими размещение трубок взрыва, даек и силлов, а также структуру кимберлитовых полей и отдельных кустов тел, являются разрывные нарушения. Подавляющее число исследователей рассматривают кимберлитоконтролирующие разрывные нарушения как отражения на земной поверхности глубинных мантийных разломов первого порядка. В осадочном чехле платформ они разветвляются (дихотомируют) в разрывные нарушения второго-третьего порядка, вплоть до зон повышенной трещиноватости. Главным признаком кимберлитоконтролирующего разрывного нарушения служит приуроченность к нему кимберлитовых тел, поскольку фиксация разломов на поверхности затруднена в силу слабой их отраженности физических полей и незначительной (до полного отсутствия) амплитуды смещения. В ряде случаев рассматриваемые нарушения могут быть отдешифрированы на аэрофото- и космоснимках. При наличии в зоне установленного или отдешифрированного разрывного нарушения хотя бы одного кимберлитового тела, можно ожидать открытия новых тел и их групп. Кимберлитовые тела располагаются и вытянуты либо по основному разлому, либо по оперяющим его трещинам отрыва и скалывания,



образующим с направлением основного разлома угол 15-40°. Например, для Далдыно-Алакитского района основные рудоконтролирующие разломы (зоны разломов) имеют простирание СВ 55-65°, рудовмещающие разломы Алакит-Мархинского поля, вдоль которых и ориентированы длинные оси тел (трубки Сытыканская, Комсомольская, Айхал, Юбилейная и др.) имеют азимут СВ 63-67° (в среднем 65°), Далдынского поля – 70-80°. Таким образом, ориентировка разрывных нарушений, контролирующих или непосредственно вмещающих группы и отдельные тела в пределах одного кимберлитового поля, отличается определенной стабильностью, что, несомненно, следует учитывать при прогнозных исследованиях в качестве одного из критериев.

Приуроченность кимберлитов к зонам разломов кристаллического фундамента далеко не всегда очевидна. На многих примерах установлено отсутствие причинной и пространственной связи кимберлитового магматизма с разрывными дислокациями, выделяемыми геофизическими методами в кристаллических породах фундамента платформы. Тем не менее, в кимберлитовых полях трубки взрыва и дайки обычно группируются в виде нескольких почти параллельных и (или) пересекающихся цепочек. На линии, соединяющей несколько известных тел, при детальном исследовании иногда удавалось обнаружить еще 2-3 диатремы. Эти данные, а также близкая к прямолинейной конфигурация таких цепочек и наличие у некоторых из них апофиз, ориентированных под углом 30-45° к простиранию осевой линии, дают основание связывать локализацию подобных групп с разломами и оперяющими их трещинами.

В качестве важного магматического критерия отмечается (Подчасов и др., 2004), что алмазоносность рудных полей зависит от состава магматических образований: повышенная в чисто кимберлитовых полях, умеренная – в полях, где, кроме кимберлитов, встречаются и упомянутые выше родственные породы, и низкая там, где кимберлиты редки, т.е. преобладают родственные им породы.

Геофизические критерии на стадиях регионального и среднемасштабного прогноза играют одну из ведущих ролей (Подчасов и др., 2004). Практически все мелкомасштабные и среднемасштабные прогнозныe карты на алмазы составлены на основе интерпретации материалов глубинных сейсмических зондирований (ГСЗ), магнитотеллурических зондирований (ГМТЗ), гравитационных и магнитных съемок масштаба 1:1 000 000 – 1:200 000. Кимберлитовые зоны, по существу, относятся к категории погребенных структур и выделяются преимущественно по геофизическим данным, с использованием характерных элементов и особенностей строения магнитного и гравитационного полей. К этим особенностям относятся: узкие линейные очень протяженные интенсивные положительные магнитные аномалии; линейные протяженные зоны мелких

положительных и отрицательных гравитационных аномалий; резкая смена ориентировки аномалий  $\Delta g$  и  $\Delta T$  в региональном плане; пережимы (сужения), развороты, разрывы и смещения отдельных участков протяженных аномалий гравимагнитных полей. В верхних горизонтах платформенного чехла кимберлитовые зоны сопровождаются многочисленными разрывными нарушениями или зонами сгущения даек основного состава, фиксируемых магниторазведкой. Отдельные разрывные нарушения картируются по прерывистым цепочкам мелких локальных аномалий магнитного поля и по гравиметрическим ступеням.

Над кимберлитовыми полями установлены изометричные, совмещающиеся в плане гравитационные и магнитные аномалии. В центральных частях аномалий в большинстве случаев уровень как гравитационного, так и магнитного полей снижается. Иногда по периферии они обрамляются дугообразными положительными аномалиями. Амплитуда снижения уровня полей в средней части аномалии центрального типа составляет: в поле силы тяжести от 4 до 8 мГал, в магнитном поле от 80 до 150 нТл. Диаметр аномалий центрального типа изменяется от 30 до 90 км. Региональные геофизические критерии носят неоднозначный характер и могут применяться только в комплексе с другими региональными критериями прогнозирования алмазоносных кимберлитов.

Локальные геофизические критерии прогноза основываются на отличиях физических свойств кимберлитов от вмещающих и перекрывающих их пород. Кимберлиты по отношению к вмещающим карбонатным породам обладают повышенной намагниченностью. Избыточное намагничивание изменяется от  $0.4-0.6 \cdot 10^{-4}$  СИ до  $25-40 \cdot 10^3$  СИ. Слабомагнитные трубки составляют 10-15 % от их общего числа. Преимущественно это трубки малого диаметра или сильно выветрелые тела.

подавляющее большинство известных кимберлитовых трубок, в том числе все крупные тела, образуют магнитные аномалии. Кимберлитовые тела выражаются в магнитном поле характерными аномалиями «трубчатого типа». Аэромагнитными съемками над ними фиксируются узко локализованные, преимущественно положительные аномалии интенсивностью от единиц до сотен нТл, которые отмечаются на одном – двух, а иногда и более маршрутах (в зависимости от масштаба съемки). Наземной магнитной съемкой крупных масштабов кимберлитовые трубки фиксируются изометричными или овально-вытянутыми положительными магнитными аномалиями интенсивностью от десятков-сотен до первых тысяч нТл. На севере Якутской алмазоносной субпровинции магнитными съемками был выявлен ряд трубок, полностью сложенных кимберлитами с обратной полярностью и естественной остаточной намагниченностью (трубка Гамма и др.). Создаваемые ими аномалии имеют соответственно отрицательный знак. Контуры

магнитных аномалий по наземной съемке лишь в общих чертах дают представление о границах кимберлитовых тел, а причудливые очертания изолиний магнитного поля далеко не всегда фиксируют изменения в поведении контакта на эрозионной поверхности. Это вызвано присутствием во многих трубках практически немагнитных и слабомагнитных разновидностей кимберлитовых пород, а также морфологией кимберлитовых тел.

Опыт работ в пределах Зимнебережного алмазоносного района Архангельской области показал, что всем известным на сегодняшний день трубкам взрыва соответствуют локальные магнитные аномалии, параметры которых меняются в широких пределах (Программа проведения опытно-методических работ, 2012). Это и определяет возможность использования магниторазведки в качестве поискового метода. Однако целый ряд мешающих факторов не позволяет однозначно интерпретировать данные магнитной съёмки:

- локальные магнитные аномалии часто оторваны от кимберлитовых тел.
- аномалии «трубочного типа» наблюдаются и над телами, сложенными щелочными базальтоидами, оливиновыми миллилитами, и пикритовыми порфиритами, промышленных концентраций алмазов в которых на сегодняшний день не установлено.
- магнитные аномалии от трубок фиксируются на фоне многочисленных аномалий – помех, характеристики которых перекрываются. В частности к ним относятся аномалии, обусловленные неоднородностью магнитных свойств четвертичных отложений.

Более чем полувековое применение магниторазведки при поисках коренных проявлений алмазоносного щелочно-ультраосновного магматизма, изменили утверждение о ее высокой результативности. Причинами изменение такого мнения послужили, с одной стороны, ограниченность фонда контрастных по петромагнитным параметрам диатрем, обратной корреляционной связью между интенсивностью локальных магнитных аномалий от трубок с их алмазоносностью, а с другой, реальные технико-метрологические характеристики современной аэромагнитной съемки, что привело к выделению на изучаемых площадях локальных магнитных аномалий трубочного типа интенсивностью в первые нТл, а иногда десятые доли нТл, исчисляемых сотнями штук. Естественно, такое состояние дел существенно усложнило процесс поисков перспективных объектов и привело к его значительному удорожанию. Но, несмотря на это, магниторазведка была и остается одним из профилирующих геофизических методов при поисках кимберлитовых трубок, поскольку большинство алмазоносных кимберлитовых трубок характеризуется устойчивыми, но весьма слабоповышенными значениями приращения вектора магнитной индукции. Поэтому задача разбраковки многочисленных магнитных аномалий трубочного

типа остается весьма и весьма актуальной и, по мнению многих исследователей, невозможна без комплексирования с другими геофизическими методами, имеющими другую физическую природу.

Предпосылками для применения гравirazведки при поисках кимберлитовых трубок является их пониженная плотность относительно вмещающих пород, хотя встречаются отдельные разновидности кимберлитов, несколько превышающие по плотности вмещающие породы. Теоретические расчеты и практические наблюдения показывают, что большинство трубок отмечается плавными отрицательными аномалиями силы тяжести, амплитудой от  $-0.1$  до  $-1.5$  мГал. Вместе с тем, создаваемый трубками аномальный эффект зависит не только от плотности собственно кимберлитов, но и в значительной степени от плотности вмещающей среды и размеров трубок, от характера перекрывающих отложений. Например, кимберлитовая трубка Зарница (Далдынское поле), имеющая большие размеры и значимые различия в плотности по сравнению с вмещающими породами, создает отрицательную гравитационную аномалию интенсивностью до  $-1$  мГал, а трубка Амакинская (Мирнинское поле), имея гораздо меньший дефицит плотности и меньшие размеры, обуславливает аномальный эффект всего в  $-0.1$  мГал.

Кимберлитовые трубки и обрамляющее их пространство представляют собой ориентированные в вертикальном направлении аномальные сейсмически гетерогенные области, контрастные по отношению к вмещающей среде по поглощающим свойствам и типам неоднородностей. Удельное электрическое сопротивление кимберлитов верхних частей трубок в большей части случаев меньше, чем удельное сопротивление вмещающих карбонатных пород. Но имеют место и обратные соотношения (для трубок, сложенных магматическим кимберлитом). По уровню радиоактивности более чем в 30 % кимберлитовых трубок наблюдаются повышенные содержания тория и несколько пониженные содержания калия по сравнению с вмещающими осадочными породами. В этих случаях контрастность аномалий подчеркивается отношением Th/K.

Геофизические методы, наиболее широко применяемые за рубежом: аэромагнитная, гаммаспектрометрическая, аэроэлектромагнитная съёмки. С их помощью выделяют глубинные разломы и локальные аномалии геофизических полей над кимберлитами, даже перекрытыми (например, в Ботсване). Кимберлиты обычно более магнитные, электропроводящие и менее радиоактивные. Ограничение методов: близость свойств вмещающих пород и кимберлитов, глубокое залегание последних (Подчасов и др., 2004).

Анализ физических свойств показывает, что задача локального прогноза и поисков кимберлитовых тел в открытых районах часто решается даже отдельными геофизическими методами (магниторазведкой), комплексирование геофизических методов позволяет еще больше повысить эффективность поисков. Прогнозирование и поиски кимберлитовых трубок, перекрытых терригенными и туфогенными отложениями, значительно осложняются за счет уменьшения интенсивности аномальных эффектов от кимберлитовых тел и усложнения характера геофизических полей. В полях развития траппов наблюдаются сложные гравитационные, магнитные поля, выделение на фоне которых аномальных эффектов от кимберлитовых трубок затруднено. Во вмещающих и перекрывающих кимберлитовые тела отложениях известно большое количество локальных объектов с магнитными и плотностными свойствами, близкими к таковым у кимберлитов. Над ними часто наблюдаются аномалии, аналогичные аномалиям над кимберлитовыми телами. В связи с этим весьма актуальным является комплексное геолого-геофизическое изучение аномальных объектов и их дальнейшая разбраковка по степени перспективности. На закрытых площадях пока не разработана надежная методика локального прогноза и эффективность поисковых работ остается довольно низкой.

Перечисленные выше прогнозно-поисковые признаки разных таксонов нацелены на выделение кимберлитов безотносительно их алмазоносности. Вместе с тем, при оценке прогнозных ресурсов необходимо в первую очередь оценить вероятность обнаружения именно алмазоносных кимберлитов. Наиболее обоснованными в настоящее время являются прямые поисковые признаки алмазоносности, то есть те особенности состава глубинных минералов, которые обнаруживают значимую корреляцию с уровнем алмазоносности пород (Ваганов и др., 2002). Наиболее разработаны минералогические критерии алмазоносности на примере пиропов и хромшпинелидов. Косвенные критерии и даже прямые признаки имеют вероятностный характер, отражающий уровень наших знаний на сегодняшний день. Даже при максимальном совпадении благоприятных критериев алмазоносности в случае обнаружения, например, нового кимберлитового поля, одна алмазоносная трубка будет приходиться на десятки пустых. Выше изложенное указывает на необходимость использования принципиально новых методов, дающих независимую оценку границ кимберлитовых полей и потенциальной алмазоносности кустов кимберлитовых трубок в их пределах. Обработка результатов многозональной космической съемки в масштабе 1:1 000 000 – 1:200 000 и панхроматической съемки высокого разрешения в масштабе 1:50 000 – 1:10 000 является одним из таких методов.

## **Глава 2. Применение методов дистанционного зондирования при прогнозировании и поисках коренных месторождений алмазов**

Применение материалов дистанционного зондирования (аэро- и космических) при прогнозировании и поисках коренных месторождений алмазов является составной частью собственно геологических методов и используется прежде всего на ранних стадиях поисковых работ наряду с другими методами прогноза.

Перспективные направления прогнозирования и поисков кимберлитовых тел по данным дистанционного зондирования являются: выявление разломов на основе линейamentного анализа, выявление зон повышенной трещиноватости, определение границ изотропных блоков и выделение кимберлитовых тел по яркостным характеристикам.

Большой вклад в выявлении кимберлитовых трубок и контролирующих их размещение структур на основе дистанционных методов внесли специалисты ФГУНПП «Аэрогеология» (первоначально ВАГТ – Всесоюзный аэрогеологический трест), ГУП «НИИКАМ» (первоначально ЛАЭМ – Лаборатория аэрометодов АН СССР, затем ВНИИКАМ – Всероссийский научно-исследовательский институт космоаэрологических методов) и ВСЕГЕИ (Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского).

В 1955 г. в Лаборатории аэрометодов Академии наук СССР, по инициативе член-корр. АН СССР Н.Г. Келля, началась разработка методики поисков коренных месторождений алмазов с помощью аэрофотосъемки и методики комплексного применения аэрофотосъемки и аэромагнитной съемки (Кобец и др., 1958, 1959; Барыгин, 1960; Никаноров, 1962). Работы показали, что для дешифрирования аэрофотоснимков лучшими являются масштабы 1:10 000 и 1:15 000, т. к. изображение контуров, соответствующих кимберлитовым трубкам, получается наиболее четкими (Кобец и др., 1958, 1959). Впервые была предложена методика интерпретации локальных геофизических аномалий «трубчатого типа» и получены средние величины намагничивания ряда кимберлитовых тел (Меньшиков, 1957).

В ходе научных исследований на площадях Сибирской платформы (Барыгин В.М., Кобец Н.В., Комаров В.Б., Леонов Б.Н., Сусов М.В., Никаноров Н.Г.) выделены признаки дешифрирования кимберлитовых тел, связанные с изометричной формой проявления кимберлитовых тел, растительностью, микрорельефом и тектоникой (рис. 2.1). Установлено, что изометричная форма кимберлитовых тел выражается на аэроснимках по растительности и микрорельефу. На кимберлитах и продуктах их сноса часто развит густой ольхово-лиственничный лес, связанный с более богатыми почвами,

образующимися на продуктах разрушения этих пород, выделяющийся на снимке как темный фототон; светлый фототон основной части аэрофотоснимка соответствует редколесью (Загребина, 1960; Кобец, 1960, Использование аэрометодов, 1961). По микрорельефу кимберлитовые тела дешифрируются по приконтактной зоне с вмещающими породами, к которой приурочены зона изменения и зона дробления кимберлитов и вмещающих пород. Кроме того, на аэроснимках хорошо выражен микрорельеф деллей – в виде темных полос, спускающихся с водоразделов по направлению к водотокам. Делли, идущие по склону выше кимберлитового тела, меняют свое направление. О наличии кимберлитовых тел также свидетельствует шлейфообразное, радиальное расположение деллей (Барыгин, 1960).



1 – опознается на аэроснимках по густой растительности и нарушению структурно-денудационных уступов У,  
2 – опознается по характеру растительности

Рис. 2.1. Кимберлитовые трубки.  
Масштаб 1:15 000 (по Кобец Н.В., 1958)

Выраженность кимберлитовых тел на аэрофотоснимке зависит от уклона и экспозиции склона. Лучше всего дешифрируются кимберлитовые тела, расположенные в средних и верхних частях склонов долин, так как на этих участках хорошо выдерживаются условия увлажнения, и кимберлитовые тела не маскируются рыхлыми образованиями. На крутых склонах интенсивнее идет снос рыхлых образований, который также маскирует выходы кимберлитов на поверхность. Поэтому кимберлитовые тела выражены более четко

на склонах с крутизной менее 30°. Хуже опознаются кимберлитовые тела, расположенные на водоразделах. Здесь чаще встречается сгущение растительности, обусловленное причинами, не связанными с наличием трубок: останцовые россыпи, термокарстовые воронки, заболоченные участки и т.п. В нижних частях склонов и в долинах в связи с увеличением мощности наносов и значительно большим увлажнением наблюдается сгущение растительного покрова, среди которого обнаружить кимберлитовую трубку на аэрофотоснимке по геоботаническим признакам практически невозможно.

Некоторые кимберлитовые тела выражаются в рельефе в виде небольших возвышенностей, а в случае приуроченности их к зонам разрывных нарушений подчеркиваются небольшими образованиями и смещениями структурных уступов (Использование аэрометодов, 1961).

Одним из выявленных признаков дешифрирования кимберлитовых тел являются тектонические нарушения, развитые вокруг кимберлитовых тел и выделяющиеся на аэроснимках в виде многоугольника (Барыгин, 1960). Предлагается метод прослеживания кимберлитов по линиям простирания тектонических разрывных нарушений и их пересечений, хорошо дешифрирующихся на аэроснимках, располагающихся на линиях разрывных нарушений отдельными группами в виде отчетливо видимых цепочек и вытянутых в направлении простирания разрывных нарушений (Кобец, 1960; Барыгин, 1960).

По результатам дешифрирования аэрофотоснимков были открыты кимберлитовые трубки Аэрогеологическая, Крошка, Подснежная, Немагнитная, Львиная Лапа (Леонов, 1958), Дайковая, Аэрофотосъемочная, Академическая, Сибирская, Полуночная (Кобец, 1960).

Появление материалов космических съемок вывело методы дистанционного зондирования на новый информационный уровень. На основе дешифрирования создавались геолого-структурные схемы конкретных площадей, космогеологические и космоктонические карты крупных регионов. Установлена система линеаментов, контролирующая известные кимберлитовые поля, приуроченные к местам пересечения разломов с линеаментами. Основное внимание при дешифрировании было обращено на выделение кольцевых структур, зон линеаментов и узлов их пересечений, с которыми связаны перспективные участки для выявления кимберлитовых полей (Глуховский М.З., Моралев В.М., Жаворонкин В.И., Фомин Ю.М., Тюленев А.Е., Пуговкин А.А., Натапов Л.М., Осташкин И.М., Музис В.А., Серокуров Ю.Н.).

При региональных дистанционных исследованиях Глуховским М.З., Моралевым В.М., Жаворонкиным В.И. (Глуховский и др., 1993) крупные кольцевые структуры диаметром от 500 до 1 300 км и много более мелких выделены в особый класс кольцевых структур – нуклеары. Авторы указывают, что кимберлитовые поля тяготеют к периферии этих нуклеаров и местам пересечения радиальных и дуговых разломов.

Фомин Ю.М. (Фомин, 1991, 1992) рассматривает зоны сгущения мегатрещин над активизированными отрезками древних глубинных разломов (рудоконтролирующими структурами) как главнейшие объекты исследований с применением космофотоснимков. Проведенное автором изучение информативности космических снимков различного вида и масштаба в отношении разрывных структур показало, что наиболее полную информацию о древней системе мегатрещин предоставляют интегральные черно-белые снимки масштаба 1:200 000 (0.45-0.75 мкм); в отношении выявления кимберлитовых трубок, показано, что трубчатые образования подчеркиваются составом и определенным



расположением растительного покрова. В связи с этим они наиболее успешно выделяются с помощью спектрональных космофотоснимков (0.6-0.82 мкм) масштаба 1:200 000.

Тюленев А.Е. и др. (Тюленев и др., 1992) в процессе дешифрирования космических снимков различных масштабов (1:25 000 000 – 1:1 000 000) выявили ритмику размещения рудоконтролирующих разломов Сибирской платформы (рис. 2.2). Ими установлена система линеаментов, контролирующая известные поля кимберлитового магматизма (Далдынское, Алакитское, Харамайское, Мунское, Маймечя-Котуйское, Чомурдахское), приуроченные к местам пересечения северо-восточных разломов с линеаменами западно-северо-западного и широтного простирания. Перспективные участки авторы связывают с узлами пересечения линеаментов, где кимберлитовые поля не установлены.

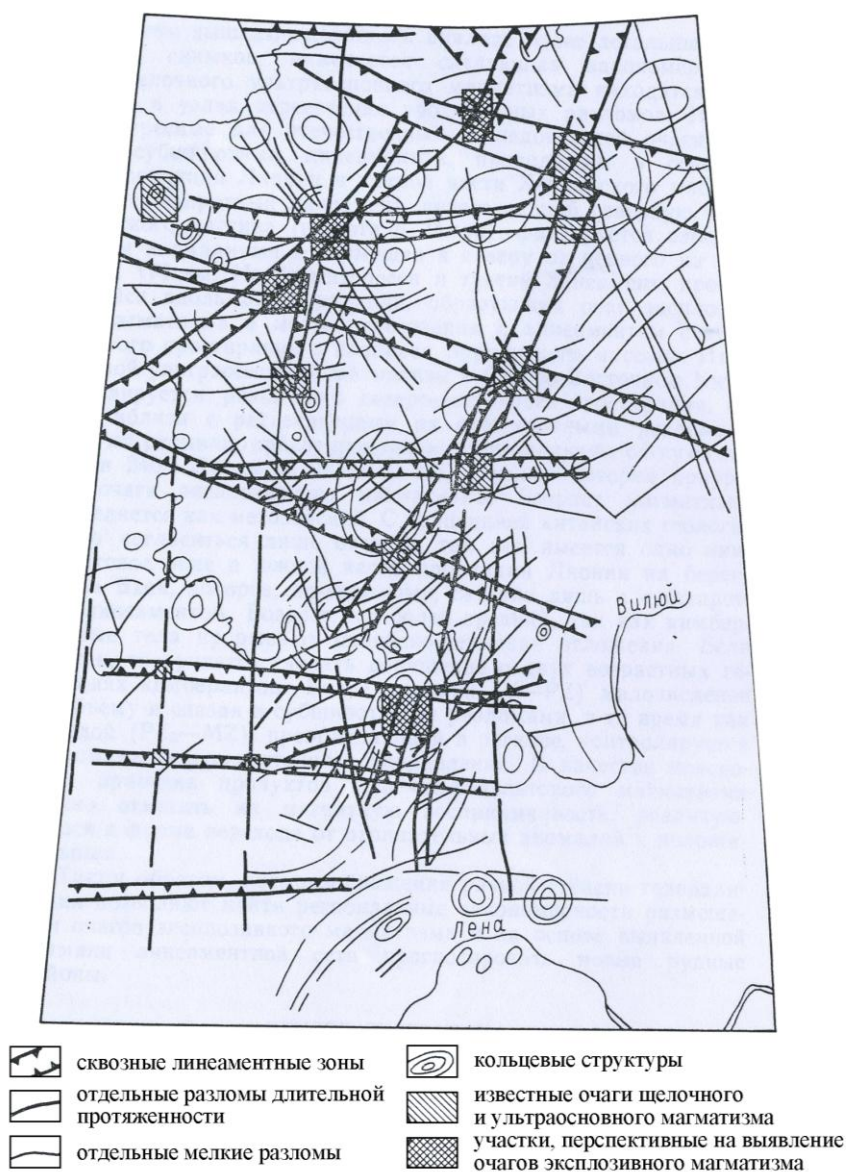


Рис. 2.2. Региональная космоструктурная схема Западной Якутии, созданная на основе дешифрирования среднemasштабных космоизображений (по Тюленеву А.Е., 1992)

С открытием Архангельской алмазонасной провинции специалистами ВСЕГЕИ разработаны методики дешифрирования аэрофотосъемки и радиолокационной съемки для выявления тел трубчатого типа на Восточно-Европейской платформе. Установлено, что практически все тела отображаются на снимках в виде фотообразов, т.е. имеет место своеобразное «просвечивание» трубок взрыва. Основание для этого – резкая плотностная неоднородность кимберлитовых «столбцов» и вмещающих их рыхлых платформенных отложений (Антонова, 1992; Лопатин, 2001).

Антоновой И.Б. (Антонова, 1992) исследованы возможности дешифрирования аэрофотоснимков (АФС) крупного масштаба (1:25 000) для выделения тел трубчатого типа в осадочном чехле Восточно-Европейской платформы, где трубки перекрыты палеозойскими осадками мощностью от нескольких десятков до сотен метров. На примере Золотицкого кимберлитового поля, где мощность покрова над поверхностью обнаруженных трубок не превышает 56 м, установлено десять признаков исследуемых объектов (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Признаки аномальных фотоизображений на трубках взрыва  
Золотицкого поля (по Антоновой И.Б., 1992)

Группа признаков	Характеристика признаков
геометрические	1) наличие фигуры, обладающей симметрией центрального типа, близкой к кругу диаметром от 100 до 1000 м
	2) парность фигур в плане (в форме восьмерки)
	3) зональное концентрическое строение (в форме кольца)
ландшафтные	4) пониженное положение местности, соответствующей контуру фигуры (наблюдается под стереоскопом)
	5) приуроченность к выделяемым объектам локальных положительных форм рельефа
	6) определенная конфигурация гидросети – огибание реками и ручьями контура фигуры
	7) отчетливые кольцевые контуры на территории болот, которые подчеркиваются определенными типами ассоциаций болотной растительности
	8) закономерное распределение лесной растительности, разреженность или полное отсутствие которой по контуру фигуры усиливает его очертания
структурные	9) характер сопряжения разрывных нарушений с выделяемыми объектами – утыкание и огибание
фотографические	10) тоновые отличия аномального дешифрируемого объекта и окружающего его изображения.

Анализ признаков применительно к эталонным структурам показал, что на них наблюдается одновременно по пять-восемь признаков, но их набор может быть различным. Первый и четвертый признаки – сквозные, их наличие необходимо для выделения аномальных объектов на АФС. Второй и третий геометрические признаки, варианты конфигураций фигур аномалий АФС, отображают структуру, характерную для трубок взрыва. Признаки шестой и девятой наиболее значимы, так как несут информацию во взаимоотношениях ориентированных элементов структурного плана и ландшафта с аномальными объектами (указывают на структурную предопределенность последних).

Для всех эталонных структур Золотицкого кимберлитового поля характерны особенности в размещении растительного покрова независимо от того, в пределах каких ландшафтов (болотных или лесных) они находятся (признаки седьмой и восьмой).

Лопатин Д.В. (Лопатин, 2001) из признаков аномальных фотоизображений на трубках взрыва (табл. 2.1) выделяет шестой и десятый признаки, как наиболее значимые и характерные для алмазоносных трубок. При написании программы распознавания образов и выделении контрастных объектов именно эти два признака составляли основу автоматизированного поиска погребенных трубок взрыва на Восточно-Европейской платформе.

Таблица 2.2

Строение радиолокационных аномалий, имитирующие тела трубочного типа  
(по Лопатину Д.В., 2001)

№ п/п	Морфологическая (фототиповая) разновидность строения	Характеристика строения радиолокационных аномалий
1	Радиально-лучистое	Обусловлено радиально расходящимися положительными формами водно-ледникового происхождения, приуроченными, как правило, к зонам линеаментов.
2	Зонально-концентрическое	Подчеркивается чередованием фототонов различной интенсивности. Внутренняя часть изображения тел обычно плоская, слабовогнутая с резко очерченными краями. Выделяется по более темному фототону, создающему видимость вогнутой поверхности. Четкость контуров на РЛ-изображении определяется чередованием контуров, обусловленных повышениями или понижениями в рельефе.
3	Контрастное рельефное изображение внутри контура неконформного ему комплекса форм	На местности он представлен расчлененными ложбинами, одним или группой холмов водно-ледникового происхождения (камы). Генетическая связь с трубочными телами отсутствует.
4	Лепешковидные – ортогональные аномалии в тоновом контрасте	Внутри контура фототон заметно осветленный и постепенно темнеет от центра к периферии. Внешний контур аномалии нечеткий и фиксирует кочковатое низинное болото. Кочкарник здесь определяет диффузное рассеяние фототона, дающее осветление в поле контура. Прямой связи между аномалиями такого типа и диаметрами трубок не наблюдается, хотя не исключено и соответствие.
5	С выпуклой осветленной поверхностью внутри идеального фототонного кольца	В ландшафте представлены одиночными холмами с узкой полосой периферических болотных понижений низинного типа. Этот тип конформен контуру самих трубок взрыва.

При проведении предварительной классификации по перспективности всех отдешифрированных фотоаномалий по степени соответствия их телам трубочного типа предложено проводить технические операции: сопоставление фотоаномалий 1) с данными магнитометрии того же масштаба и 2) с данными дешифрирования радиолокационной съемки М. 1:100 000. Структуры трубочного типа в РЛ-изображении местности выделялись через формы экзогенного рельефа, которые проявляются через яркостные характеристики (табл. 2.2). Последние же наиболее сильно реагируют на степень увлажненности поверхности, связанной с особенностями гидрологического и

гидрогеологического режимов, газобиохимического обмена в зонах повышенной трещиноватости и проницаемости горных пород. Первый, второй и пятый типы отличаются наибольшей степенью корреляции с телами трубчатого типа. Наличие центростональной геометрии – характерный признак диатрем. Второй тип соответствует практически всем выделенным трубкам взрыва. Это обстоятельство позволяет использовать его в качестве определяющего.

По результатам дешифрирования обзорных снимков выявлена закономерная связь приуроченности интрузивных тел к узлам пересечения рифтогенных разломов и менее глубинных их аналогов. Поиск аналогов подобных структурных композиций позволил локализовать площади поисков тел трубчатого типа в пределах всей Восточно-Европейской платформы.

Для создания основы автоматизированной системы поисков трубок взрыва предлагается включать следующие процедуры:

- выделение узлов пересечения рудоконтролирующих и рудолокализирующих систем (очаговых структур и региональных систем разломов);
- проведение дешифрирования АФС, РЛС и космических снимков высокого пространственного разрешения, увеличенных до М. 1:25 000 (10-15 м на местности), которые были сняты в летнее время в видимой и инфракрасной зонах спектра, согласно разработанной системе индикаторов;
- проведение дешифрирования в цифровой форме по тем же индикаторам;
- проведение дешифрирования РЛ-изображений высокого разрешения также по двум индикаторным признакам (форма аномалии и интенсивность) в любом доступном режиме;
- дешифрирование детального гравитационного поля (если есть такая возможность) и выделение мощных точечных аномалий, размеры которых корреспондировали бы с размерами магматических камер;
- приведение данных к совместимому виду;
- совмещение и анализ вариантов совпадений;
- осуществление биогеохимического опробования рудоперспективных ореольных структур;
- составление кадастровых паспортов на все рудоперспективные площади;
- составление картотеки прогнозируемых участков.

Пуговкин А.А. в ряде своих работ (Пуговкин и др., 2003, 2008) на примере площадей Архангельской алмазоносной провинции в результате дешифрирования

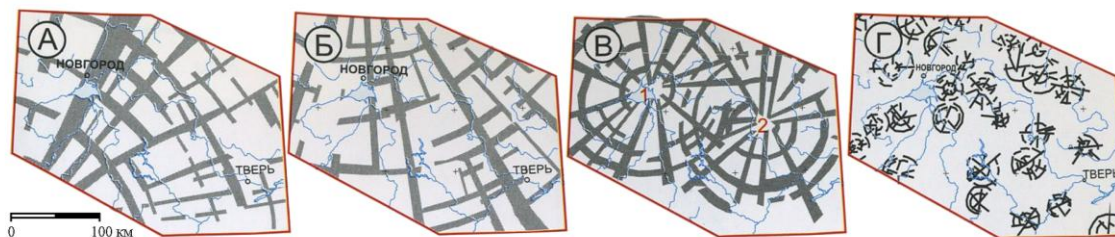
материалов космических съемок выделил следующие структурные элементы модели полей и кустов алмазоносных кимберлитовых трубок:

- структуры центрального типа площадью до 7 км: дифференцированного морфотектонического типа, сложной, как правило, телескопической морфологии в комбинации со структурами центрального типа цилиндрической морфологии диаметром до 300 м;
- узлы пересечения разрывных нарушений при обязательном присутствии нарушений взбросо-надвигового типа.

В работах Серокурова Ю.Н. и др. (Серокуров, 2001, 2004, 2006) приведены данные о формах отражения известных алмазоносных площадей Сибирской и Восточно-Европейской платформ в материалах космического зондирования. Указаны благоприятные предпосылки и признаки локализации алмазоносных провинций, областей, зон, районов, полей и кустов, форма их проявления в геолого-геофизических и дистанционных материалах (табл. 2.3).

Более информативными оказались: узлы пересечения зон линеаментов устойчивых простираний; участки повышенной плотности кольцевых структур диаметром от 1 до 10 км; гирлянды кольцевых структур, фиксирующих активные участки разломов в этом масштабе; площади развития линеаментов определенных простираний.

В качестве образа алмазоносных районов авторы рассматривают радиально-кольцевые структуры диаметром около 200 км, проявленные дугвыми и линейными зонами сгущения линеаментов (рис. 2.3). В пределах главной структуры располагаются более мелкие структуры диаметром 30-50 км, в центральной или средней зоне которых локализуются кимберлитовые поля. Кимберлиты располагаются цепочками и группами вдоль дугвых и радиальных зон линеаментов, формирующих каркас поля.



А – В – фрагменты зон линеаментов, относящиеся: А – к Восточно-Европейской системе, Б – Ладожской структуре, В – Ильменской (1) и Вышневолоцкой (2) структурам; Г – радиально-кольцевые активизационные структуры малых (15-20 км) глубин

Рис. 2.3. Образы разноглубинных активизационных структур, установленных при анализе сводной схемы дешифрирования Новгород-Тверской площади (по Серокурову Ю.Н., 2001)

Таблица 2.3

Предпосылки и признаки локализации алмазоносных провинций, областей, зон, районов, полей и тел, форма их проявления в геолого-геофизических и дистанционных материалах (по Серокурову Ю.Н., 2001)

Ранг	Предпосылки и признаки	Ландшафтная и геолого-геофизическая выраженность	Проявленность в материалах аэро- и космических съемок	Тип снимков (масштаб)
Глобальный (для провинций)	Платформы с докембрийским основанием	Преимущественно равнинные ландшафты; области с двухэтажным строением верхней части земной коры и ее общей повышенной мощностью	Области развития равнинных ландшафтов с однообразными мозаичными фототонами и фоторисунками, окруженные участками более сложного строения, отвечающими областям развития разновозрастной складчатости	Телевизионные и сканерные (1:10 000 000 – 1:7 500 000)
Региональный (для областей и зон)	Кратоны (нуклеары) в пределах платформ	Блоки фундамента, сложенные преимущественно супракрустальными метаморфическими породами архея; мозаичный тип магнитного и гравитационного полей	Слабопроявленные овалообразные структуры диаметром в сотни километров в теле платформ	Сканерные (1:7 500 000 – 1:2 500 000)
	Крупные неоднократно активизированные в фанерозое зоны разломов	Линейные впадины и поднятия рельефа поверхности Мохоровичича; полосы повышенных градиентов теплового потока; протяженные гравитационные ступени, цепочки магнитных аномалий	Протяженные линеаменты и зоны сгущения линеаментов; гирлянды кольцевых структур диаметром в несколько десятков километров; границы ландшафтных областей	Сканерные и интегральные (1:2 500 000 – 1:1 000 000)
	Рифтогенные погребенные прогибы (авлакогены), активизированные в фанерозое	Линейные протяженные структуры в различных разделах земной коры, рельефе кристаллического фундамента, нижних горизонтах осадочного покрова	Зоны линейно вытянутых площадных фотовыделов; протяженные зоны сгущения однонаправленных линеаментов, сопровождаемые гирляндами кольцевых структур	Сканерные и интегральные (1:2 500 000 – 1:1 000 000)
Районный (для районов)	Узлы пересечения региональных разломов, рифтов и авлакогенов	Участки литосферы с аномально высокими скоростями продольных сейсмических волн; узлы пересечения разломов и линейных элементов геофизических полей	Пересечение зон повышенной плотности линеаментов, площадных фотовыделов, гирлянд кольцевых структур	Сканерные и интегральные (1:2 500 000 – 1:500 000), фотопланы
	Участки осложнения во внутреннем строении авлакогенов, их бортовых частей с проявлением щелочно-ультраосновного магматизма	Участки осложненного строения фундамента и чехла, интенсивное развитие приповерхностных дислокаций коры, сопровождающееся магматизмом основного и ультраосновного состава	Участки повышенной плотности линейных и кольцевых структур; усложнения во взаимоотношениях площадных ландшафтных структур	Сканерные, интегральные и зональные (1:2 500 000 – 1:500 000), фотопланы

Ранг	Предпосылки и признаки	Ландшафтная и геолого-геофизическая выраженность	Проявленность в материалах аэро- и космических съемок	Тип снимков (масштаб)
Локальный (для полей и кустов)	Оперяющие разломы, расположенные под углом к главным структурным швам	Зоны разломов второго и третьего порядков, пересекающие основную структуру или сочленяющиеся с ней	Зоны линейментов небольшой протяженности в области влияния более крупных	Сканерные, интегральные и зональные (1:2 500 000 – 1:500 000), фотопланы
	Приподнятые микроблоки фундамента, слабые поднятия в нижних структурных этажах и современной поверхности	Изометричные купола в маркерах осадочного покрова, морфоструктурные поднятия в рельефе	Овалообразные и кольцевые структуры диаметром десятки-сотни километров	Сканерные, интегральные и зональные (1:1 000 000 – 1:200 000), фотопланы
	Участки повышенной тектонической трещиноватости и изотропного распределения разломов	Участки усложненного рисунка гидросети, элементов интерпретации геофизических полей	Участки повышенной плотности линейментов; аномалии их изотропности	Сканерные, интегральные и зональные (1:1 000 000 – 1:200 000), фотопланы
	Площади проявления кимберлитового (лампроитового) магматизма в виде трубок, даек, силлов	Присутствие нескольких близкорасположенных тел кимберлитов; магнитные аномалии трубчатого типа	Узлы пересечения зон линейментов II и III порядков; повышенная плотность кольцевых структур диаметром ≤40 км	Сканерные, интегральные и зональные (1:200 000 – 1:70 000), фотопланы
	Тела кимберлитов и лампроитов	Локальные совмещенные максимумы магнитного и гравитационного полей; аномалии электрического поля	Фотоаномалии трубчатого и даечного типов в открытых районах	Аэрофото снимки (1:100 000 – 1:25 000)

Появление в последние годы высокопроизводительной компьютерной техники и многофункционального программного обеспечения открывает качественно новые возможности реализации информационных технологий по применению материалов космической съемки за счет количественных методов комплексного анализа цифровых данных различного пространственного разрешения (Кирсанов, 2004).

В настоящее время в мире сложился рынок многоспектральных и радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗ) различного пространственного разрешения. Спутники с оптической аппаратурой съемки: SPOT (Франция), KOMPSAT (Корея), UK-DMC2 (Великобритания), EROS (Израиль), GeoEye (США), IKONOS (США), QuickBird (США), WorldView (США), Pleiades (Франция), FORMOSAT (Тайвань), ASTER (США), Landsat (США), MODIS (США). Спутники радиолокационной съемки: KOMPSAT-5 (Корея), RADARSAT-2 (Канада), TerraSAR-X (Германия), COSMO-SkyMed (Италия), ALOS-2 (Япония).

Среди специализированных программ обработки изображений распространены ERDAS IMAGINE, ENVI, INPHO, PhotoScan, SARscape, использование которых позволяет решать задачи предварительной и тематической обработки данных дистанционного



зондирования, а также обеспечивающие возможности быстрого перехода от результатов обработки снимков к выполнению операций моделирования, анализа и интерпретации средствами ArcGIS.

С помощью дистанционных материалов и их преобразований по компьютерным технологиям выявляются, прежде всего, структурные факторы локализации продуктов кимберлитового вулканизма (сообществ кимберлитовых тел, реже отдельных трубок). Целенаправленная интерпретация результатов обработки линеаментных полей позволяет с большой долей вероятности выявлять погребенные структурные формы разных порядков (рангов) и осложняющие их структуры и элементы более высоких порядков, к которым могут быть приурочены поля кимберлитов.

Сводная схема линеаментов составляется по дистанционной основе в автоматическом и/или интерактивном режиме и корректируется по цифровым моделям современного рельефа и геофизических полей (рис. 2.4).



Рис. 2.4. Схема линеаментов западной части Беломорско-Кулойского плато. Золотицкая площадь (по Смирнову М.Ю., 2006)



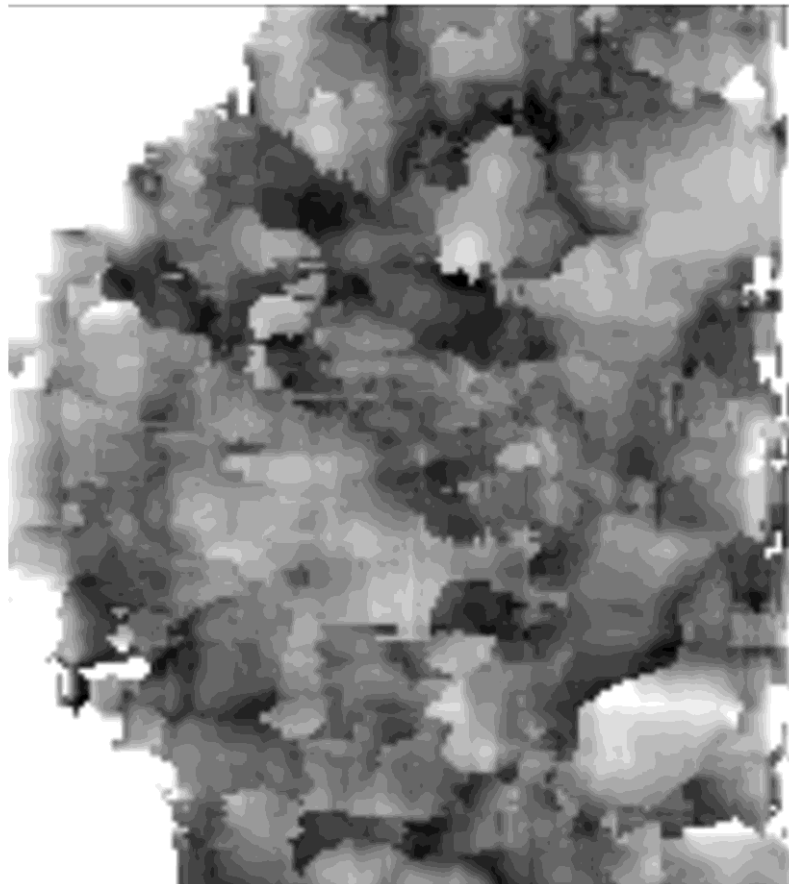


Рис. 2.5. Модель изотропности линеamentного поля западной части Беломорско-Кулойского плато. Золотицкая площадь (по Смирнову М.Ю., 2006)

Результаты обработки линеamentных полей представляются в виде полутоновых изображений, где яркость соответствует определенному значению характеристики поля (рис. 2.5). Районирование по степени изотропности линеamentного поля позволяет выделить разломы, ограничивающие блоки фундамента и кимберлитоконтролирующие зоны (рис. 2.6). Это служит основанием для привлечения материалов ДЗЗ при выявлении зон повышенной трещиноватости горных пород, обусловленной новейшими деформациями земной коры (Смирнов, 2006; Хилько, 2011).

Многими исследователями для выявления перспективных алмазоносных участков ранга кимберлитовый район, кимберлитовое поле используются автоматизированные процедуры для выделения радиально-кольцевых структур и поиска их центров с последующим выделением составляющих элементов (Серокуров Ю.Н., Калмыков В.Д., Зуев В.М., Макаров Д.В. Громцев К.В., Енгальчев С.Ю.). Разрабатываются методики выделения кольцевых и радиальных разломов по контрастному изменению температурного поля (Кривошапкин И.И.).

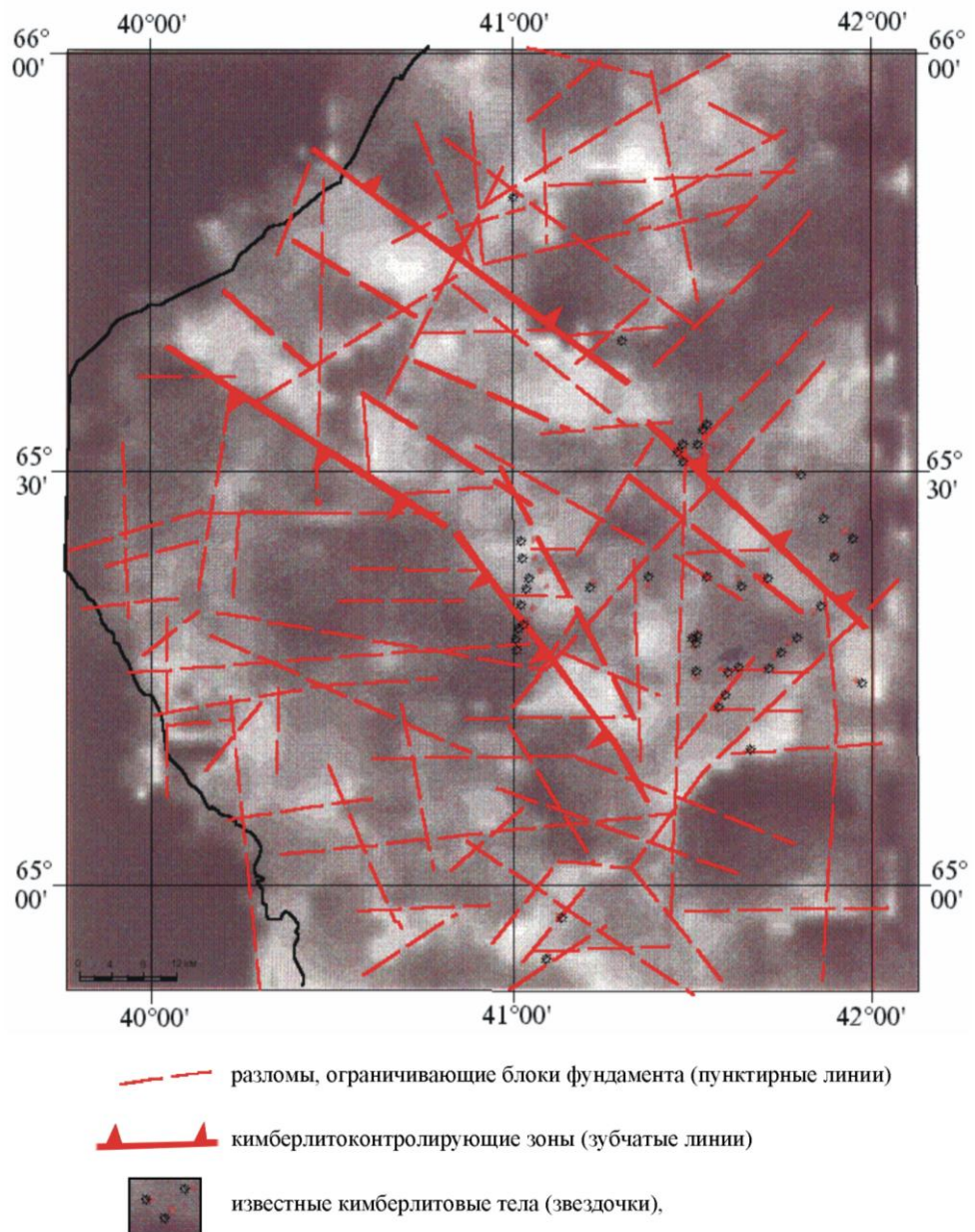


Рис. 2.6. Районирование по степени изотропности линеamentного поля западной части Беломорско-Кулойского плато. Золотицкая площадь (по Смирнову М.Ю., 2006)

Макаров Д.В. (Макаров, 2011) в качестве общей и единой модели на всех уровнях контроля алмазоносных объектов (табл. 2.4) рассматривает систему тектонических дислокаций разноранговых радиально-тектонических структур. Автор, вслед за Серокуровым Ю.Н., на материалах космической съемки для локализации алмазоносных площадей ставит задачу выделения радиально-кольцевых структур (контролирующие кимберлитовые районы) и предлагает использовать алгоритм обработки первичных данных дешифрирования, включающий автоматизированные интерактивные процедуры, поиск центров очаговых структур, фильтрацию элементов этих структур из сводных схем дешифрирования, визуализацию их различными методами.

Таблица 2.4

## Иерархический ряд радиально-концентрических структур (по Макарову Д.В., 2011)

Ранг	Алмазоносный таксон	Структурные модели метасистемы	Масштаб выявления (а) и исследования (б)
Континентальный	Провинция	- Радиально-концентрическая система организации элементов <i>верхней мантии и литосферы</i> в пределах «древней платформы», обусловленная поднятием крупного мантийного диапира (?) и разрядкой созданных напряжений. <u>Составляющие:</u> зоны сверхглубинных разломов, участки разновозрастной стабилизации фундамента, авлакогены с их зонами краевых дислокаций.	(а) 1:20 000 000 (б) 1:10 000 000
Региональный	Субпровинция	- Овоидно-радиальная структура организации элементов <i>верхних частей верхней мантии и литосферы</i> , обусловленная развитием дочерней формы от более глубокой и крупной. <u>Составляющие:</u> блоки с одинаковым возрастом кратонизации и историей геологического развития, фрагменты зон повышенной проницаемости - палеорифтовых систем, мобильных зон и т.д.	(а) 1:10 000 000 (б) 1:2 500 000
Районный	Район	- Радиально-кольцевая структура организации элементов <i>литосферы</i> , обусловленная развитием дочерней формы (астенолинзы (?)) от предыдущей более глубокой и крупной. <u>Составляющие:</u> зоны глубинных разломов, обособления участков проявления глубинного магматизма, пространственно тяготеющих к средней и ядерной части структуры, узлы пересечения разломов предшествующих структур.	(а) 1:2 500 000 (б) 1:1 000 000
Локальный	Поле	- Радиально-кольцевая структура организации элементов <i>земной коры</i> , обусловленная развитием дочерней формы (мантийного диапира (?)) от предыдущей более глубокой и крупной. <u>Составляющие:</u> зоны коровых разломов и их пересечения, купольное или блоковое поднятие в породах чехла и фундамента, комплексная геофизическая аномалия.	(а) 1:1 000 000 (б) 1:500 000 - 1:200 000
	Куст	- (?) Стволовая структура, обусловленная развитием дочерней формы (внутрикоровой промежуточной камеры (?)) на фоне единого глубинного очага предыдущего ранга. <u>Составляющие:</u> Зона или узел пересечения разломов разноориентированных и разноранговых элементов структур, предшествующих рангов, локальные купольные поднятия и др.	(а) 1:200 000 (б) 1:50 000
Детальный	Тело	- Диатрема, обусловленная формированием вулканического аппарата центрального типа. <u>Составляющие:</u> концентрическая и радиальная трещиноватость вмещающих пород, кольцевой вал и т.д. - Силл, дайка, штокверк, маар. <u>Составляющие:</u> трещиноватость вмещающих пород.	(а) 1:50 000 (б) 1:10 000 и детальной

Громцев К.В. (Громцев, 2010) для выделения радиально-кольцевых структур предложил включить в этапы технологического процесса обработки космических снимков высокочастотную и градиентную фильтрации, фильтрации яркостных минимумов для

выявления перспективных алмазоносных участков ранга кимберлитовый район, кимберлитовое поле.

Кривошапкин И.И. (Кривошапкин, 2013) указывает на перспективу анализа температурных полей для выявления структур, контролирующих размещение кимберлитовых полей. При дешифрировании участка, расположенного в Анабарском районе (в междуречье рек Бенчима и Оленек), установил, что четко выделяются кольцевые и радиальные разломы северо-восточного направления по контрастному изменению температурного поля (диапазоны 61 и 62 Landsat ETM+). Куойкское и Хорбусуонское кимберлитовые поля расположены на продолжении радиальных разрывных структур и тяготеют к участкам контрастной смены температур.

Задачи регионального прогноза кимберлитовых полей, кимберлитовых тел могут быть решены посредством применения метода композиционного кодирования многозональных (многоспектральных) космических снимков, разработанного в НИИКАМ Н.Ф. Афанасьевым (рис. 2.7).

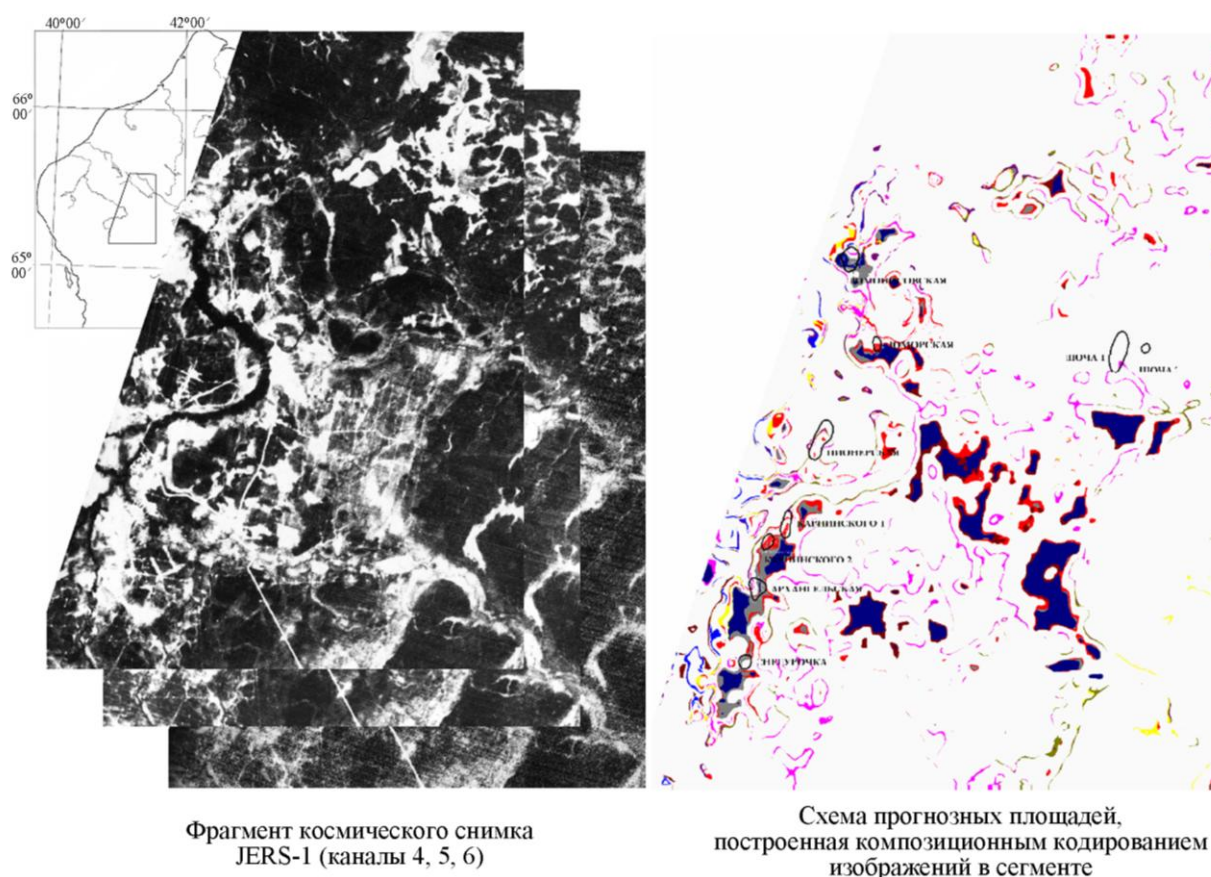


Рис. 2.7. Метод композиционного кодирования многозональных космических снимков. Золотицкая площадь. Алмазное месторождение им. М.В. Ломоносова (по Афанасьеву Н.Ф., 2004)

Метод реализуется последовательностью технологических операций обработки различных комбинаций диапазонов, анализа и сравнительной оценки результатов, полученных в различных вариантах вычислений (Афанасьев, 1992, 2004). Благодаря этому методу, становится возможным целенаправленная интерпретация преобразованных изображений для прогнозирования участков локализации кимберлитовых тел. В основе метода используется идея отдельного анализа энергетической и информационной составляющих изображения, которые дифференцированно характеризуют функциональную структуру многозональных изображений. Благодаря этому свойству метода по многозональным снимкам можно выделять тектонические и петрофизические неоднородности в земной коре. Композиционное кодирование геоинформации разрабатывается более тридцати лет и накоплен определенный геологический опыт решения отмеченных классов задач по многозональным снимкам на его основе (Афанасьев, 2004).

В области разработки технических средств и автоматизированной обработки материалов дистанционного зондирования выделяются авторские программы LINEAMENT (Загубный Д.Г.) и ALINA (Щепин М.В.), где представлены первые результаты экспериментальных прогнозов для выявления локальных областей потенциально алмазоносных кимберлитов.

Загубный Д.Г. (Загубный, 2010) в авторской программе LINEAMENT провел автоматизированную обработку материалов дистанционного зондирования и цифрового рельефа с целью выявления информативных поисковых признаков для прогноза кимберлитовых тел в Восточной Сибири. Основными дистанционными материалами, используемые в работе, были: цифровой рельеф GTOPO30 и DTM, оцифрованная речная сеть 1:1 000 000 масштаба и мозаика, составленная из снимков «Modis». С помощью программы LINEAMENT по материалам дистанционного зондирования устанавливаются изотропные и анизотропные области трещиноватости земной коры, производится поиск центров кольцевых структур. Результаты обработки линеаментных полей представляются в виде полутоновых изображений, где яркость соответствует определенному значению характеристики поля.

При программной обработке дистанционных данных автором выделено ряд информативных признаков распространенности кимберлитового магматизма Восточной Сибири: гипсометрическое и морфологическое положение района, степень расчлененности рельефа, плотность и анизотропность линеаментной сети, а именно:

- большинство районов кимберлитового магматизма располагается на одном гипсометрическом уровне и находится на границе современных поднятий и впадин;



- палеозойские трубки тяготеют к наиболее расчлененным областям рельефа, в то время как мезозойские занимают промежуточное положение;

- выделяется интервал 1-го канала снимка «Modis», маркирующий основные области распространения кимберлитов;

- области сгущения линеаментов имеют высокую степень совпадения с областями распространения палеозойских трубок;

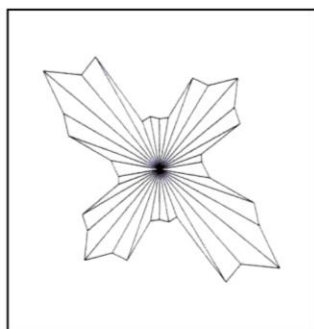
- анизотропность линеаментной сети является отрицательным признаком, и трубки тяготеют к изотропным областям;

- кимберлиты мезозойского и палеозойского возраста имеют различный структурный контроль, что отражается в различных информативных интервалах.

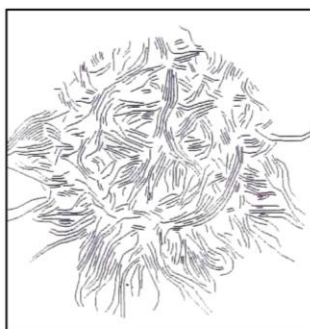
На основании выделенных информативных признаков автором составлены предварительные прогнозные модели распространения для кимберлитов палеозойского и мезозойского возраста, и для всех кимберлитовых тел (Загубный, 2010; Говорова, 2011).

Щепин М.В., Евдокимов С.В. и др. (Щепин и др., 2007, 2008, 2009) представили результаты первых экспериментальных прогнозов выявления локальных областей потенциально алмазоносных кимберлитов с помощью «метода свернутых роз» (программного распознавания образов). Программный метод распознавания образов реализован в программе ALINA. Суть метода заключается в формировании и последующем анализе матрицы направлений границ перепадов яркости изображения, каждый элемент которой имеет свою ориентацию и определяется функцией свертки ориентированной розы-диаграммы, заданной апертуры поля градиента яркости изображения. В программе ALINA реализованы алгоритмы поиска и выделения радиально-концентрических кольцевых структур и алгоритмов трассировки границ перепадов яркости.

Для исследований использовались фрагменты панхроматического канала снимков ЕТМ ИСЗ Landsat с пространственным разрешением 15 м (Далдынское кимберлитовое поле в Якутии и Зимний Берег в Архангельской области с разными геолого-структурными условиями). Область прогноза задается в виде локальных круговых областей диаметром 100-500 м, что позволяет значительно сократить геологоразведочные работы.



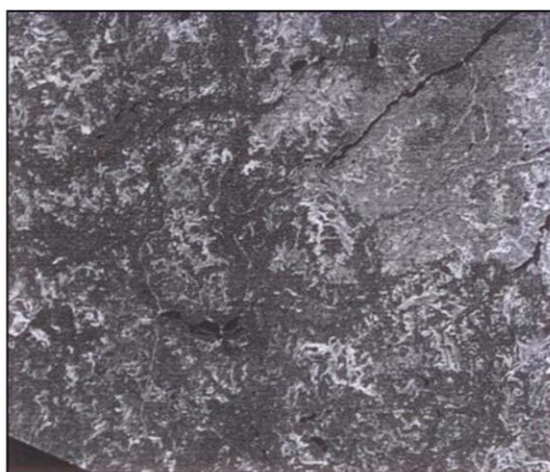
Роза-диаграмма ориентации границ перепада яркости



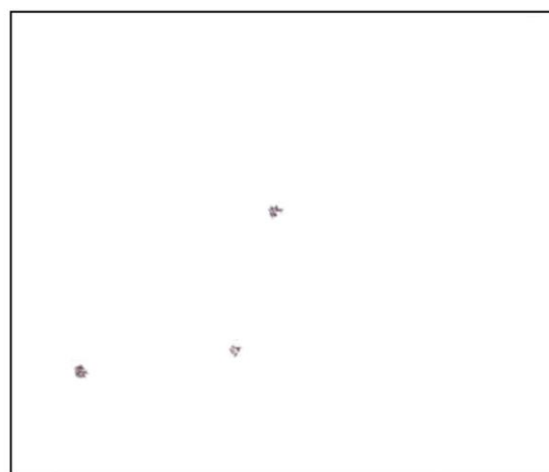
Векторизованные границы перепада яркости по алгоритму «слепой» трассировки



Векторизованные границы перепада яркости по алгоритму радиально-концентрической трассировки



Зимний берег, Архангельская область. Фрагмент снимка Landsat



Зимний берег, Архангельская область. Выявленные и векторизованные структурные образы диаметром областей 400 м

Рис. 2.8. Выявление локальных областей кимберлитовых трубок с помощью программного метода распознавания образов («метод свернутых роз») (по Щепину М.В., 2008, 2009)

Таким образом, технология обработки комплекса дистанционных съемок предназначена для анализа и интерпретации геолого-геофизических (гравиметрических, магнитометрических, геологических, аэрокосмических и др.) данных с целью последовательного решения на основе количественных характеристик задач среднемасштабного (прогнозирование кимберлитового поля) и локального (прогнозирование конкретного алмазодобывающего объекта) прогнозирования. В результате применения космической съемки для выделения структурно-вещественных неоднородностей при поисках кимберлитов Мавричевым В.Г. с соавторами (Мавричев и др., 2004) установлен иерархический ряд линейных и ареальных тектонических образований, различающихся составом, структурой и состоянием (напряженностью): 1) выделение и прослеживание систем и серий разрывов, в том числе построение роз-

диаграмм мега- и мезотрециноватости, отражающих главные направления палеотектонических стрессов, определение генезиса и взаимоотношений разрывов, ранжирование их по значимости в развитии территории проявления кимберлитового (лампроитового) магматизма, выявление закономерностей размещения коллекторов алмазов; 2) определение прогнозно-поисковых признаков развития кимберлитовых полей и критериев их обнаружения; 3) структурное районирование с определением границ ареалов (тектонических блоков и других объектов), благоприятных для локализации кимберлитовых тел; 4) создание комплексной геолого-геофизической модели искомых объектов – кимберлитовых тел.



### **Глава 3. Методика комплексного использования материалов космической съемки, гравиметрических и магнитометрических данных для выявления алмазоносных кимберлитовых трубок**

Разработка комплекса методов дистанционного зондирования для выявления алмазоносных кимберлитовых трубок осуществлялась автором на эталонных объектах Алакит-Мархинского и Далдынского кимберлитовых полей. Выбор этих кимберлитовых полей обусловлен максимальной изученностью в пределах Якутской алмазоносной провинции, их принадлежностью к существенно различным категориям по степени благоприятности для поисковых работ и нахождение в этих районах большинства промышленных коренных месторождений (Айхал, Сытыканская, Юбилейная, Комсомольская, Краснопресненская, Удачная, Зарница). Кимберлитовые трубки, датируемые девоном-ранним карбоном, прорывают карбонатные отложения нижнего палеозоя, которые полого погружаются в юго-западном направлении. В Далдынском поле на поверхность выходят в основном породы кембрия, а в Алакит-Мархинском – породы ордовика и силура. Кимберлиты Далдынского поля перекрыты маломощным (первые метры) чехлом кайнозойских отложений. Большая часть Алакит-Мархинского поля перекрыта терригенно-осадочными отложениями карбона-перми и траппами нижнего триаса. Мощность карбон-пермских отложений колеблется от первых метров до 60 м, траппов – от первых метров до 150 м (Подчасов и др., 2004).

Для решения вопросов, связанных с распознаванием кимберлитовых тел на фоне вмещающих их пород и оценки их потенциальной алмазоносности в условиях открытых площадей, было предпринято исследование возможностей многозональной космической съемки LANDSAT 7 ETM+. Выбор космической съемки для исследований обусловлен тем, что составление Государственных геологических карт России М. 1:1 000 000 (третьего поколения) в обязательном порядке обеспечивается дистанционной основой, созданной на базе цифровых материалов КС LANDSAT 7 ETM+ (Методическое руководство, 2009; Требования, 2012). Поэтому дальнейшая разработка методических основ комплексного использования геолого-геофизических данных и материалов дистанционного зондирования для крупномасштабного прогнозирования коренных месторождений алмазов является актуальной.

Обработка цифровых материалов космической съемки осуществлялась с использованием программного продукта ENVI 4.8, включающего набор инструментов для проведения полного цикла обработки данных от пространственной привязки изображения до получения необходимой информации. Для анализа результатов данных

КС LANDSAT 7 ETM+ использовались значения яркостных характеристик в каналах: 1 (0.45–0.52 мкм, видимый), 2 (0.52–0.60 мкм, видимый), 3 (0.63–0.69 мкм, видимый), 4 (0.76–0.90 мкм, ближний инфракрасный), 5 (1.55–1.75 мкм, средний инфракрасный), 6 (10.40–12.5 мкм, тепловой), 7 (2.08–2.35 мкм, средний инфракрасный), 8 (0.52–0.90 мкм, панхроматический). Яркостные характеристики представляют собой значения DN (Digital Numbers) – исходные значения в каждом пикселе полученного снимка. Значения DN безразмерны и пропорциональны количеству попадающего на сенсор излучения и характеризуют поток энергии (ватт) на квадратный метр земной поверхности на одинстерадиан (трехмерный угол от точки на поверхности Земли к сенсору) на единицу измеряемой длины волны:  $W/(m^2 * ster * \mu m)$  (Шовенгердт, 2010; Костин, 2013). Пространственное разрешение каналов 1–5 и 7 составляет 30 м, канала 6 – 60 м, канала 8 – 15 м.

В пределах участков Алакит-Мархинского и Далдынского кимберлитовых полей проведена обработка яркостных характеристик отдельных трубок, кустов трубок и площадей, на которых по результатам проведения детальных геолого-съёмочных работ кимберлитовых тел не выявлено (так называемые «пустые» площади). Координаты кимберлитовых трубок и их краткая характеристика любезно предоставлены Амакинской экспедицией АК «АЛРОСА».

Изучение яркостных характеристик во всех диапазонах космической съёмки позволило наметить количественные критерии для выявления кимберлитовых тел на фоне вмещающих их пород и оценки их потенциальной алмазоносности. Все исследуемые трубки, кусты трубок и «пустые» площади сравнивались попарно на основе статистических критериев Фишера (F-критерий) и Стьюдента (t-критерий) с целью определения значимости различий яркости в диапазонах КС LANDSAT 7 ETM+. Все расчеты проводились с уровнем значимости  $\alpha=0.01$ , что соответствует 99 % доверительной вероятности правомочности полученных выводов (Бронштейн и др., 2010).

F-критерий, основан на сравнении дисперсий:

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2},$$

$$\text{где } S_1^2 > S_2^2, \quad S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2$$

В том случае, если вычисленное значение F-критерия не превышает табличное значение при уровне значимости  $\alpha=0.01$  (т.е. с вероятностью 99 %), проводилось сравнение средних значений двух выборок по t-критерию:

$$t = \frac{(\bar{X} - \bar{Y})}{\sqrt{\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right) \frac{(n_1 - 1) s_X^2 + (n_2 - 1) s_Y^2}{n_1 + n_2 - 2}}}$$

В том случае, если вычисленное значение t-критерия было больше табличного при уровне значимости  $\alpha=0.01$  различие двух выборок данного диапазона космической съемки оценивалось как значимое.

Исходным являлся вопрос о том, какую площадь следует рассматривать в качестве основы для идентификации с кимберлитовой трубкой. На основе изучения яркостных характеристик кимберлитовых трубок (НИИГА, Геофизическая, Долгожданная, Ленинградская, Молодежная, Искорка) и околотрубочного пространства установлено, что, если изучаемая площадь околотрубочного пространства превышает размеры самой трубки не более чем в 2–4 раза, то различия дисперсий и средних значений яркостей между ними являются незначимыми. Если исследуемая площадь превышает площадь кимберлитового тела в 5 раз и более, то в сравниваемых выборках в ряде диапазонов появляются значимые различия как по F-, так и по t-критерию (табл. 3.1 – 3.6).

Таблица 3.1

Сравнение яркостных характеристик кимберлитовой трубки НИИГА в зависимости от площади исследований, включающей кимберлитовое тело и околотрубочное пространство, по F- и t-критерию в каналах KC LANDSAT 7 ETM+

Канал 1 (0.45 - 0.52 мкм)				Канал 2 (0.52 - 0.60 мкм)					
	1	2	3		1	2	3		
1		1.095	1.120	F-критерий	1	1.061	1.050	F-критерий	
2	1.190		1.023		2	0.778			1.011
3	0.667	0.688			3	0.155	1.154		
t-критерий				t-критерий					
Канал 3 (0.63 - 0.69 мкм)				Канал 4 (0.76 - 0.90 мкм)					
	1	2	3		1	2	3		
1		1.227	1.102	F-критерий	1	1.175	1.595	F-критерий	
2	1.177		1.113		2	1.175			1.358
3	0.658	0.727			3	<b>3.481</b>	<b>3.481</b>		
t-критерий				t-критерий					
Канал 5 (1.55 - 1.75 мкм)				Канал 6 (10.40 - 12.5 мкм)					
	1	2	3		1	2	3		
1		1.025	1.099	F-критерий	1	1.000	1.774	F-критерий	
2	1.449		1.072		2	0.000			1.774
3	1.704	0.135			3	0.285	0.285		
t-критерий				t-критерий					

Продолжение таблицы 3.1

Канал 7 (2.08 - 2.35 мкм)

	1	2	3
1		1.024	1.136
2	1.115		1.163
3	1.665	0.478	

t-критерий

F-критерий

Канал 8 (0.52 - 0.90 мкм)

	1	2	3
1		1.072	1.089
2	0.810		1.016
3	2.048	1.391	

t-критерий

F-критерий

1 – площадь 3,97 га (49 пикселей), 2 – площадь 6,56 га (81 пикселей), 3 – площадь 9,82 га (121 пикселей).  
Жирным шрифтом выделены значения F- и t-критериев, превышающие табличные значения при  $\alpha=0.01$

Таблица 3.2

Сравнение яркостных характеристик кимберлитовой трубки Геофизическая в зависимости от площади исследований, включающей кимберлитовое тело и околотрубочное пространство, по F- и t-критерию в каналах KC LANDSAT 7 ETM+

Канал 1 (0.45 - 0.52 мкм)

	1	2	3	4
1		1.387	1.681	1.757
2	0.240		1.212	1.267
3	0.566	0.374		1.046
4	0.684	0.506	0.117	

t-критерий

F-критерий

Канал 2 (0.52 - 0.60 мкм)

	1	2	3	4
1		1.081	1.152	1.324
2	0.653		1.065	1.225
3	1.029	0.390		1.150
4	1.316	0.669	0.271	

t-критерий

F-критерий

Канал 3 (0.63 - 0.69 мкм)

	1	2	3	4
1		1.167	1.169	1.205
2	0.932		1.002	1.033
3	0.515	0.594		1.030
4	0.878	0.177	0.532	

t-критерий

F-критерий

Канал 4 (0.76 - 0.90 мкм)

	1	2	3	4
1		1.102	1.130	1.021
2	0.782		1.026	1.125
3	1.357	0.644		1.155
4	0.982	0.187	0.557	

t-критерий

F-критерий

Канал 5 (1.55 - 1.75 мкм)

	1	2	3	4
1		1.004	1.204	1.451
2	1.161		1.209	1.457
3	1.440	0.362		1.205
4	1.159	0.070	0.334	

t-критерий

F-критерий

Канал 6 (10.40 - 12.5 мкм)

	1	2	3	4
1		1.600	1.600	1.457
2	0		1.000	1.098
3	0	0.000		1.098
4	0	0.000	0.000	

t-критерий

F-критерий

Канал 7 (2.08 - 2.35 мкм)

	1	2	3	4
1		1.823	2.044	2.547
2	0.513		1.121	1.397
3	1.063	0.670		1.246
4	1.119	0.831	0.206	

t-критерий

F-критерий

Канал 8 (0.52 - 0.90 мкм)

	1	2	3	4
1		1.115	1.037	1.111
2	0.122		1.075	1.004
3	0.152	0.355		1.071
4	0.462	0.767	0.473	

t-критерий

F-критерий

1 – площадь 2.03 га (25 пикселей), 2 – площадь 3.97 га (49 пикселей),  
3 – площадь 6.56 га (81 пикселей), 4 – площадь 9.82 га (121 пикселей).  
Жирным шрифтом выделены значения F- и t-критериев, превышающие табличные значения при  $\alpha=0.01$

Таблица 3.3

Сравнение яркостных характеристик кимберлитовой трубки Долгожданная в зависимости от площади исследований, включающей кимберлитовое тело и околотрубочное пространство, по F- и t-критерию в каналах КС LANDSAT 7 ETM+

Канал 1 (0.45 - 0.52 мкм)				F-критерий	Канал 2 (0.52 - 0.60 мкм)				F-критерий
	1	2	3			1	2	3	
1		1.256	1.280		1		1.127	1.086	
2	0.182		1.019		2	0.536		1.038	
3	0.500	0.369		3	0.861	0.351			
t-критерий					t-критерий				

Канал 3 (0.63 - 0.69 мкм)				F-критерий	Канал 4 (0.76 - 0.90 мкм)				F-критерий
	1	2	3			1	2	3	
1		1.249	1.455		1		1.056	1.116	
2	0.651		1.164		2	0.402		1.057	
3	1.332	0.721		3	0.736	0.353			
t-критерий					t-критерий				

Канал 5 (1.55 - 1.75 мкм)				F-критерий	Канал 6 (10.40 - 12.5 мкм)				F-критерий
	1	2	3			1	2	3	
1		1.233	1.446		1		1.146	1.058	
2	0.862		1.173		2	0.627		1.083	
3	1.054	0.090		3	0.366	0.370			
t-критерий					t-критерий				

Канал 7 (2.08 - 2.35 мкм)				F-критерий	Канал 8 (0.52 - 0.90 мкм)				F-критерий
	1	2	3			1	2	3	
1		1.148	1.422		1		1.017	1.129	
2	0.595		1.239		2	0.991		1.110	
3	1.002	0.376		3	1.419	0.375			
t-критерий					t-критерий				

1 – площадь 3.97 га (49 пикселей), 2 – площадь 6.56 га (81 пикселей), 3 – площадь 9.82 га (121 пикселей).  
Жирным шрифтом выделены значения F- и t-критериев, превышающие табличные значения при  $\alpha=0.01$

Таблица 3.4

Сравнение яркостных характеристик кимберлитовой трубки Ленинградская в зависимости от площади исследований, включающей кимберлитовое тело и околотрубочное пространство, по F- и t-критерию в каналах КС LANDSAT 7 ETM+

Канал 1 (0.45 - 0.52 мкм)			F-критерий	Канал 2 (0.52 - 0.60 мкм)			F-критерий
	1	2			1	2	
1		1.002		1		1.002	
2	0.641		2	0.772			
t-критерий				t-критерий			

Канал 3 (0.63 - 0.69 мкм)			F-критерий	Канал 4 (0.76 - 0.90 мкм)			F-критерий
	1	2			1	2	
1		1.009		1		1.030	
2	0.652		2	0.352			
t-критерий				t-критерий			

Продолжение таблицы 3.4

Канал 5 (1.55 - 1.75 мкм)

	1	2
1		1.063
2	0.309	

t-критерий

F-критерий

Канал 6 (10.40 - 12.5 мкм)

	1	2
1		1.000
2	0.000	

t-критерий

F-критерий

Канал 7 (2.08 - 2.35 мкм)

	1	2
1		1.131
2	0.531	

t-критерий

F-критерий

Канал 8 (0.52 - 0.90 мкм)

	1	2
1		1.004
2	0.779	

t-критерий

F-критерий

1 – площадь 9,82 га (121 пикселов), 2 – площадь 13,69 га (169 пикселов).

Жирным шрифтом выделены значения F- и t-критериев, превышающие табличные значения при  $\alpha=0.01$

Таблица 3.5

Сравнение яркостных характеристик кимберлитовой трубки Молодежная в зависимости от площади исследований, включающей кимберлитовое тело и околотрубочное пространство, по F- и t-критерию в каналах KC LANDSAT 7 ETM+

Канал 1 (0.45 - 0.52 мкм)

	1	2	3	4
1		1.315	1.196	1.104
2	0.126		1.100	1.191
3	0.249	0.502		1.084
4	0.147	0.377	0.166	

t-критерий

F-критерий

Канал 2 (0.52 - 0.60 мкм)

	1	2	3	4
1		1.198	1.363	1.183
2	0.169		1.138	1.012
3	0.077	0.147		1.152
4	0.013	0.269	0.144	

t-критерий

F-критерий

Канал 3 (0.63 - 0.69 мкм)

	1	2	3	4
1		1.171	1.298	1.097
2	0.326		1.109	1.067
3	0.677	0.397		1.183
4	0.170	0.252	0.788	

t-критерий

F-критерий

Канал 4 (0.76 - 0.90 мкм)

	1	2	3	4
1		1.193	1.172	1.091
2	0.226		1.018	1.094
3	0.320	0.095		1.018
4	0.684	0.540	0.514	

t-критерий

F-критерий

Канал 5 (1.55 - 1.75 мкм)

	1	2	3	4
1		1.122	1.103	1.170
2	0.180		1.017	1.313
3	0.088	0.361		1.291
4	0.169	0.466	0.138	

t-критерий

F-критерий

Канал 6 (10.40 - 12.5 мкм)

	1	2	3	4
1		0.000	0.000	0.000
2	0.490		1.000	1.511
3	0.490	0.000		1.511
4	0.893	0.873	0.873	

t-критерий

F-критерий

Канал 7 (2.08 - 2.35 мкм)

	1	2	3	4
1		1.032	1.104	1.176
2	0.278		1.140	1.214
3	0.331	0.060		1.065
4	0.288	0.001	0.072	

t-критерий

F-критерий

Канал 8 (0.52 - 0.90 мкм)

	1	2	3	4
1		1.251	1.422	<b>1.561</b>
2	0.882		1.136	1.248
3	0.253	0.970		1.098
4		1.099	0.028	

t-критерий

F-критерий

1 – площадь 2.03 га (25 пикселов), 2 – площадь 3.97 га (49 пикселов), 3 – площадь 6.56 га (81 пикселов), 4 – площадь 9.82 га (121 пикселов). Жирным шрифтом выделены значения F- и t-критериев, превышающие табличные значения при  $\alpha=0.01$

Сравнение яркостных характеристик кимберлитовой трубки Искорка в зависимости от площади исследований, включающей кимберлитовое тело и околотрубочное пространство, по F- и t-критерию в каналах КС LANDSAT 7 ETM+

Канал 1 (0.45 - 0.52 мкм)					Канал 2 (0.52 - 0.60 мкм)					
	1	2	3	4		1	2	3	4	
1		1.413	2.388	<b>3.528</b>	F-критерий	1		1.390	1.644	2.184
2	0.562		1.690	<b>2.497</b>		2	0.886		1.182	1.570
3	0.662	0.240		1.478		3	0.891	0.021		1.328
4			0.043			4	0.488	0.394	0.487	
t-критерий					t-критерий					
Канал 3 (0.63 - 0.69 мкм)					Канал 4 (0.76 - 0.90 мкм)					
	1	2	3	4		1	2	3	4	
1		1.396	1.885	<b>2.712</b>	F-критерий	1		1.010	1.013	1.146
2	0.494		1.350	<b>1.942</b>		2	0.076		1.002	1.158
3	0.676	0.271		1.439		3	0.775	1.084		1.160
4			0.579			4	1.337	1.854	0.900	
t-критерий					t-критерий					
Канал 5 (1.55 - 1.75 мкм)					Канал 6 (10.40 - 12.5 мкм)					
	1	2	3	4		1	2	3	4	
1		1.827	<b>3.134</b>	<b>4.335</b>	F-критерий	1		2.131	2.556	3.901
2	0.150		1.715	<b>2.373</b>		2	1.210		1.200	1.831
3		0.270		1.383		3	0.632	0.791		1.526
4			0.368			4	1.162	0.256	1.504	
t-критерий					t-критерий					
Канал 7 (2.08 - 2.35 мкм)					Канал 8 (0.52 - 0.90 мкм)					
	1	2	3	4		1	2	3	4	
1		1.262	1.794	2.230	F-критерий	1		1.333	1.469	<b>1.552</b>
2	0.054		1.422	1.767		2	0.182		1.102	1.165
3	0.262	0.269		1.243		3	0.609	0.525		1.057
4	0.605	0.738	0.550			4		0.981	0.507	
t-критерий					t-критерий					

1 – площадь 2,03 га (25 пикселей), 2 – площадь 3,97 га (49 пикселей), 3 – площадь 6,56 га (81 пикселей), 4 – площадь 9,82 га (121 пикселей). Жирным шрифтом выделены значения F- и t-критериев, превышающие табличные значения при  $\alpha=0.01$

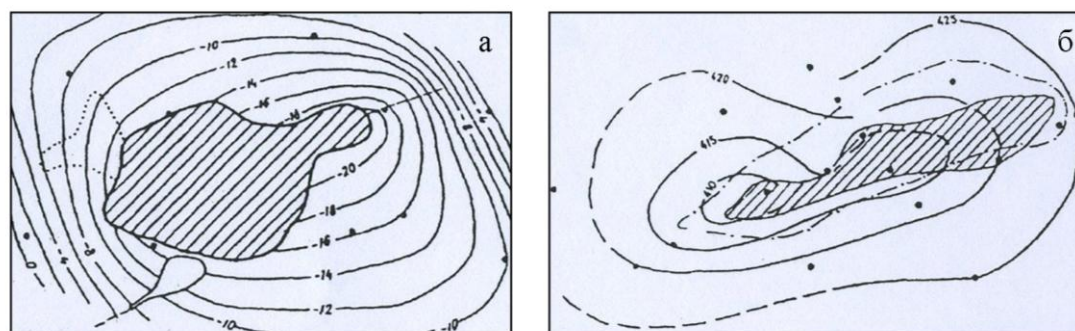


Рис. 3.1. Околотиатремовые мульды проседания над кимберлитовыми трубками Юбилейная (а) и Одинцова (б) в изолиниях (по Подчасову В.М., 2004)

Это обстоятельство, вероятно, связано с тем, что внедрение кимберлитов приводит к возникновению околодиатремовых мульд проседания (рис. 3.1), брекчированию пород, в результате чего вокруг каждой диатремы образуется ореол трещиноватости и повышенной проницаемости для растворов, формирующих в этом ореоле зону метасоматических изменений вмещающих пород, которые выражаются в доломитизации последних, образовании прожилков сульфидов, кальцита, халцедона, участков интенсивной закарстованности, кавернозности, повышенной битуминозности и т.д. Ореол этих проявлений в 3–5 раз больше диаметра самой кимберлитовой диатремы (Подчасов и др., 2004). Поэтому кимберлитовое тело и вмещающие его метасоматические породы приобретают близкие яркостные характеристики. Таким образом, была проведена оптимизация размера, которая принимается в расчетах за площадь эталонной трубки, с учетом значимости различий по яркостным характеристикам в зависимости от площади считываемой информации. В табл. 3.7 представлены данные о площади исследуемых кимберлитовых трубок, их алмазонасности и мощности перекрывающих отложений.

Таблица 3.7

Характеристики исследуемых кимберлитовых тел Алакит-Мархинского и Далдынского кимберлитовых полей (по Милашеву В.А., 2003; Колганову В.Ф., 2011; Аргунову К.П., 2005 и запискам к геол. картам М. 1:200 000)

Кимберлитовая трубка	Площадь, га	Алмазонасность, усл. ед. **	Мощность (Н) перекрывающих отложений, м*
Весёлая	0.30	2.0	Н=4.9 м
Геофизическая	1.60*	19.5	Н= от 1.2 до 1.6 м
Долгожданная	2.71	46.7	Н= от 1.0 до 1.4 м
Зимняя	1.53	28.1	Н= от 1.5 до 2.3 м
Искорка трубка апофиз	1.42 0.16	29.1	Н= не превышает 1.5-1.8 м
Коллективная	0.26	0.37	Н= от 2.0 до 2.5 м
Кутузовой			Н = около 2-3 м
Ленинградская	9.40*	14.5	Н= от 1.6 до 2.3 м
Маршрутная	0.47	23.0	Н= от 0.5 до 2.0 м
Меньшикова			Н= до 3.0 м
Молодежная	1.77	21.4	Н= от 1.0 до 1.8 м
Начальная	0.30	31.5	Н= от 0.9 до 1.2 м
НИИГА	3.6	24.1	Н= от 0.3 до 1.0-1.5 м
Осенняя	1.80	33.4	Н= от 2.0 до 2.8 м
Радиогеодезическая			Н= до 1-2.0 м
Светлая	0.30	2.5	Н= от 0.7 до 2.5 м в центральной и юго-западной части, до 4.0 м в северо-восточной
Смежная	0.10	37.9	Н= от 2.9 до 4.0 м
Талисман			Н= от 2.0 до 2.5 м

\* Данные любезно предоставлены Амакинской экспедицией АК «АЛРОСА»

\*\* Алмазонасность, усл. ед.



В пределах участка Алакит-Мархинского поля (Q-49-XVI-067,068) исследованы трубка НИИГА, куст трубок НИИГА, Маршрутная, куст трубок Радиогодезическая, Талисман, Меньшикова и пять «пустых» площадей (I–V) олондинской свиты, на которых по результатам проведения детальных геолого-съёмочных работ кимберлитовых тел не выявлено (рис. 3.2, табл. 3.8).

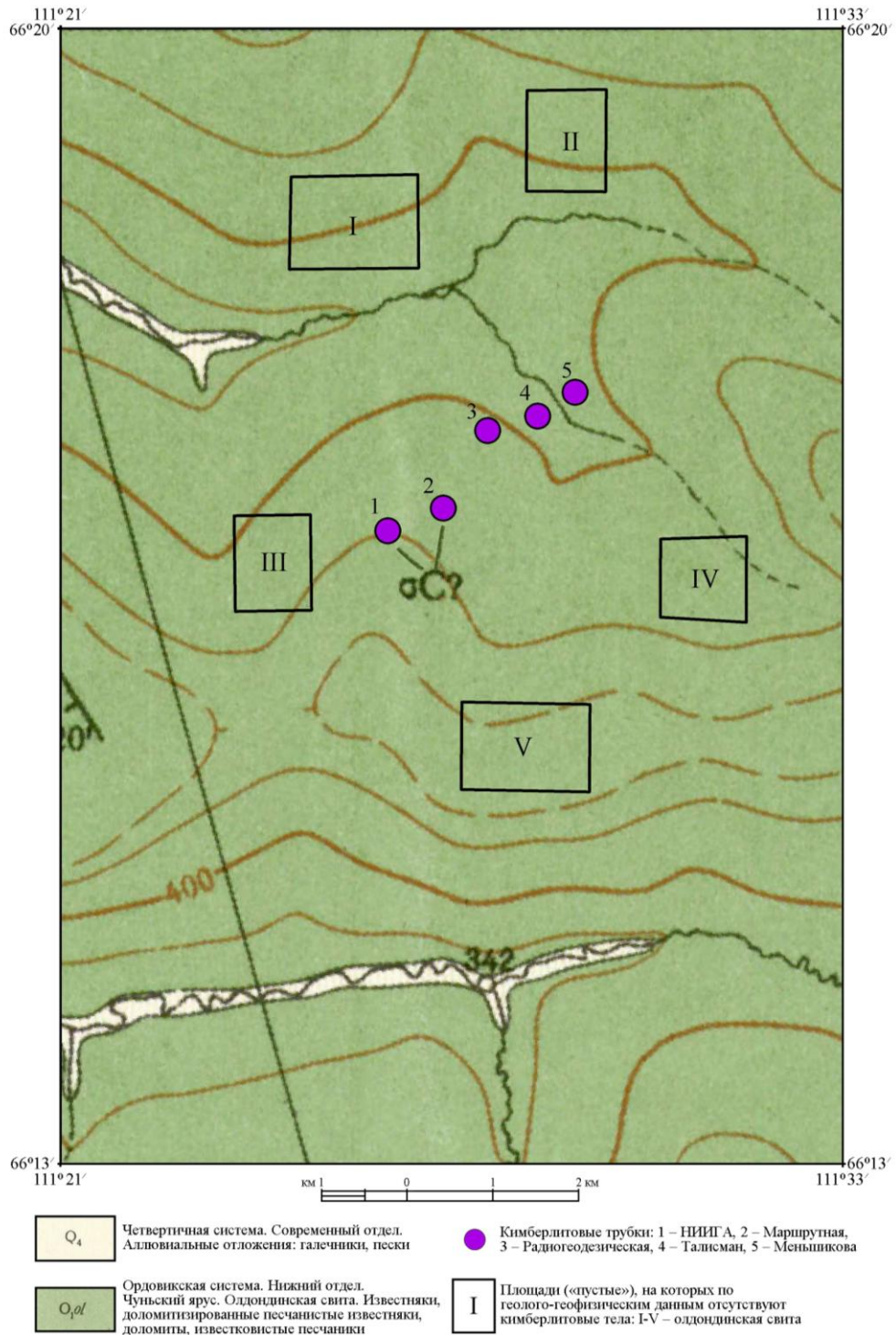


Рис. 3.2. Фрагмент карты дочетвертичных образований М. 1:200 000 участка Q-49-XVI-067,068 (составлена Васильевой М.Н., 1959; с дополнениями автора)

Таблица 3.8

Яркостные характеристики исследуемых кимберлитовых тел и вмещающих пород участка Алаakit-Мархинского поля (Q-49-XVI-067,068) в каналах KC LANDSAT 7 ETM+

№№	Характеристика объектов	Канал 1 (0.45 - 0.52 мкм)			Канал 2 (0.52 - 0.60 мкм)			Канал 3 (0.63 - 0.69 мкм)			Канал 4 (0.76 - 0.90 мкм)		
		Mean	S <sup>2</sup>	n	Mean	S <sup>2</sup>	n	Mean	S <sup>2</sup>	n	Mean	S <sup>2</sup>	n
1	Трубка НИИГА	63.111	9.175	81	51.099	10.240	81	46.753	26.588	81	86.605	10.217	81
2	Куст трубок Маршрутная, НИИГА	62.158	9.939	423	49.818	10.310	423	45.281	21.781	423	84.392	13.618	423
3	Куст трубок Меньшикова, Талисман, Радиогеодезическая	59.499	10.244	627	47.874	10.618	627	41.990	27.917	627	83.641	18.895	627
4	Площадь I	64.439	12.294	1970	52.644	11.687	1970	49.308	23.591	1970	86.032	12.032	1970
5	Площадь II	60.434	8.467	1292	49.051	7.661	1292	44.161	18.284	1292	84.328	8.013	1292
6	Площадь III	60.949	10.103	1217	48.627	9.663	1217	43.259	21.792	1217	81.349	12.305	1217
7	Площадь IV	62.158	11.884	1083	49.773	11.950	1083	45.548	27.849	1083	81.265	9.293	1083
8	Площадь V	62.162	10.313	1786	49.858	9.814	1786	45.292	20.382	1786	80.766	11.676	1786

№№	Характеристика объектов	Канал 5 (1.55 - 1.75 мкм)			Канал 6 (10.40 - 12.5 мкм)			Канал 7 (2.08 - 2.35 мкм)			Канал 8 (0.52 - 0.90 мкм)		
		Mean	S <sup>2</sup>	n	Mean	S <sup>2</sup>	n	Mean	S <sup>2</sup>	n	Mean	S <sup>2</sup>	n
1	Трубка НИИГА	80.691	24.466	81	127.563	2.129	16	45.481	17.003	81	45.904	19.554	324
2	Куст трубок Маршрутная, НИИГА	79.716	29.317	423	127.142	1.783	113	44.953	15.330	423	45.080	18.472	1695
3	Куст трубок Меньшикова, Талисман, Радиогеодезическая	74.265	53.451	627	124.587	4.302	172	41.199	23.323	627	44.056	18.065	2508
4	Площадь I	83.208	23.051	1970	128.268	0.998	500	47.443	16.455	1970	46.916	17.916	7880
5	Площадь II	77.089	28.831	1292	126.127	1.806	322	42.948	13.673	1292	44.856	16.095	5168
6	Площадь III	75.380	26.706	1217	125.406	1.197	313	42.478	16.367	1217	43.559	15.966	4864
7	Площадь IV	78.566	26.982	1083	126.783	1.720	267	44.910	15.376	1083	44.040	17.824	4333
8	Площадь V	79.128	23.278	1786	126.660	3.432	432	44.995	12.029	1786	43.931	16.608	7141

Mean - среднее значение яркости, S<sup>2</sup> - дисперсия яркости, n - число пикселей в пределах контура объекта на карте (см. рис. 3.2)

Таблица 3.9

Сравнение яркостных характеристик исследуемых кимберлитовых тел и вмещающих пород участка Алаakit-Мархинского поля (Q-49-XVI-067,068) по F- и t-критерию в каналах KC LANDSAT 7 ETM+

Канал 1 (0.45 - 0.52 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1		1.083	1.117	1.340	1.084	1.101	1.295	1.124
2	2.507		1.031	1.237	1.174	1.016	1.196	1.038
3	<b>9.615</b>	<b>13.284</b>		1.200	1.210	1.014	1.160	1.007
4	<b>3.356</b>	<b>12.346</b>	<b>31.360</b>		<b>1.452</b>	1.217	1.035	1.192
5	<b>8.012</b>	<b>10.358</b>	<b>6.387</b>			1.193	1.403	1.218
6	<b>5.945</b>	<b>6.755</b>	<b>9.257</b>	<b>28.275</b>	<b>4.235</b>		1.176	1.021
7	2.420	0.003	<b>15.773</b>	<b>17.298</b>	<b>13.214</b>	<b>8.748</b>		1.152
8	<b>2.608</b>	0.020	<b>17.877</b>	<b>20.682</b>	<b>15.316</b>	<b>10.202</b>	0.031	

t-критерий

F-критерий

Канал 2 (0.52 - 0.60 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1		1.007	1.037	1.141	1.337	1.060	1.167	1.043
2	<b>3.291</b>		1.030	1.134	<b>1.346</b>	1.067	1.159	1.051
3	<b>8.399</b>	<b>9.537</b>		1.101	<b>1.386</b>	1.099	1.125	1.082
4	<b>3.966</b>	<b>15.587</b>	<b>30.769</b>		<b>1.525</b>	1.209	1.023	1.191
5	<b>6.396</b>					1.261	<b>1.560</b>	1.281
6	<b>6.917</b>	<b>6.730</b>	<b>4.846</b>	<b>33.347</b>	<b>3.614</b>		1.237	1.016
7	<b>3.346</b>	0.232	<b>11.177</b>	<b>22.111</b>		<b>8.370</b>		1.218
8	<b>3.482</b>	0.237	<b>13.503</b>	<b>25.945</b>	<b>7.405</b>	<b>10.608</b>	0.681	

t-критерий

F-критерий

Канал 3 (0.63 - 0.69 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1		1.221	1.050	1.127	1.454	1.220	1.047	1.305
2	2.556		1.282	1.083	1.191	1.001	1.279	1.069
3	<b>7.655</b>	<b>10.368</b>		1.183	1.527	1.281	1.002	<b>1.370</b>
4	<b>4.628</b>	<b>15.575</b>	<b>32.151</b>		1.290	1.083	1.180	1.157
5	<b>5.224</b>	<b>4.571</b>	<b>9.634</b>	<b>31.012</b>		1.192	<b>1.523</b>	1.115
6	<b>6.479</b>	<b>7.676</b>	<b>5.281</b>	<b>34.665</b>	<b>5.052</b>		1.278	1.069
7	1.985	0.911	<b>13.430</b>	<b>19.835</b>		<b>11.041</b>		1.366
8	<b>2.830</b>	0.045		<b>26.162</b>	<b>7.014</b>	<b>11.951</b>	1.381	

t-критерий

F-критерий

Канал 4 (0.76 - 0.90 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1		1,333	<b>1.849</b>	1.178	1.275	1.204	1.099	1.143
2	<b>5.045</b>		<b>1.387</b>	1.132	<b>1.699</b>	<b>1.107</b>	<b>1.465</b>	1.166
3				<b>1.570</b>	<b>2.358</b>	<b>1.536</b>	<b>2.033</b>	1.618
4	1.461	<b>8.720</b>			<b>1.502</b>	1.023	1.295	1.030
5	<b>6.966</b>					<b>1.536</b>	1.160	<b>1.457</b>
6	<b>13.126</b>			<b>36.868</b>			1.054	1.054
7	<b>15.155</b>			<b>37.891</b>	<b>25.358</b>	0.611		1.256
8	<b>15.082</b>	<b>19.322</b>	<b>16.826</b>	<b>46.795</b>		<b>4.543</b>	<b>3.947</b>	

t-критерий

F-критерий

1 – Трубка НИИГА (81 пикселов), 2 – Куст трубок Маршрутная, НИИГА (423 пикселов), 3 – Куст трубок Меньшикова, Талисман, Радиогодезическая (627 пикселов), 4 – 8 – Площади, на которых по геолого-геофизическим данным отсутствуют кимберлитовые тела (см. рис. 3.2):  
 4 – Площадь I (1970 пикселов), 5 – Площадь II (1292 пикселов), 6 – Площадь III (1217 пикселов), 7 – Площадь IV (1083 пикселов), 8 – Площадь V (1786 пикселов).  
 Жирным шрифтом выделены значения F- и t-критериев, превышающие табличные значения при  $\alpha=0.01$

Продолжение таблицы 3.9

Канал 5 (1.55 - 1.75 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1		1.198	<b>2.185</b>	1.061	1.178	1.092	1.103	1.051
2	1.505		<b>1.823</b>	1.272	1.017	1.098	1.087	1.259
3				<b>2.319</b>	<b>1.854</b>	<b>2.001</b>	<b>1.981</b>	<b>2.296</b>
4	<b>4.618</b>	<b>13.258</b>			1.251	1.159	1.171	1.010
5	<b>5.883</b>	<b>8.717</b>		<b>33.955</b>		1.080	1.069	1.239
6	<b>8.981</b>	<b>14.684</b>		<b>43.427</b>	<b>8.116</b>		1.147	1.147
7	<b>3.563</b>	<b>3.816</b>		<b>24.820</b>	<b>6.777</b>	<b>14.724</b>		1.159
8	<b>2.850</b>	2.202		<b>25.952</b>	<b>11.030</b>	<b>20.303</b>	<b>2.936</b>	

F-критерий

t-критерий

Канал 7 (2.08 - 2.35 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1		1.109	1.372	1.033	1.244	1.039	1.106	1.414
2	1.104		<b>1.521</b>	1.073	1.121	1.068	1.003	1.274
3	<b>7.628</b>			<b>1.417</b>	<b>1.706</b>	<b>1.425</b>	<b>1.517</b>	<b>1.939</b>
4	<b>4.262</b>	<b>11.524</b>			1.203	1.005	1.070	<b>1.368</b>
5	<b>5.939</b>	<b>9.536</b>		<b>32.041</b>		1.197	1.125	1.137
6	<b>6.462</b>	<b>10.926</b>		<b>33.601</b>	<b>3.039</b>		<b>1.361</b>	<b>1.361</b>
7	1.260	0.188		<b>16.697</b>	<b>12.530</b>			1.278
8	1.224	0.220			<b>15.714</b>		0.602	

F-критерий

t-критерий

Канал 6 (10.40 - 12.5 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1		1.194	2.021	<b>2.133</b>	1.179	1.779	1.238	1.612
2	1.167		<b>2.412</b>	1.787	1.013	<b>1.490</b>	1.037	<b>1.924</b>
3	<b>5.603</b>			<b>4.310</b>	<b>2.382</b>	<b>3.594</b>	<b>2.502</b>	1.254
4		<b>10.119</b>			<b>1.809</b>	1.199	<b>1.723</b>	<b>3.438</b>
5	<b>4.153</b>	<b>6.914</b>				<b>1.509</b>	1.050	<b>1.900</b>
6	<b>7.557</b>			<b>38.307</b>			<b>1.437</b>	<b>2.867</b>
7	2.296	2.425			<b>5.957</b>			<b>1.996</b>
8	1.927		<b>11.985</b>					

F-критерий

t-критерий

Канал 8 (0.52 - 0.90 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1		1.059	1.082	1.091	1.215	1.225	1.097	1.177
2	<b>3.150</b>		1.023	1.031	1.148	1.157	1.036	1.112
3	<b>7.332</b>	<b>7.626</b>		1.008	1.122	1.131	1.014	1.088
4	<b>4.209</b>	<b>16.160</b>	<b>29.445</b>		1.113	1.122	1.005	1.079
5	<b>4.532</b>	1.953	<b>8.041</b>	<b>27.749</b>		1.008	1.107	1.032
6	<b>10.159</b>	<b>13.227</b>	<b>4.948</b>	<b>44.428</b>	<b>16.220</b>		1.116	1.040
7	<b>7.642</b>	<b>8.530</b>	0.150	<b>35.961</b>	<b>9.647</b>	<b>5.610</b>		1.073
8	<b>8.494</b>	<b>10.326</b>	<b>1.310</b>	<b>43.941</b>	<b>12.522</b>	<b>4.943</b>	1.375	

F-критерий

t-критерий

1 – Трубка НИИГА (81 пикселов), 2 – Куст трубок Маршрутная, НИИГА (423 пикселов), 3 – Куст трубок Меньшикова, Талисман, Радиогодезическая (627 пикселов), 4 – 8 – Площади, на которых по геолого-геофизическим данным отсутствуют кимберлитовые тела (см. рис. 3.2):

4 – Площадь I (1970 пикселов), 5 – Площадь II (1292 пикселов), 6 – Площадь III (1217 пикселов), 7 – Площадь IV (1083 пикселов), 8 – Площадь V (1786 пикселов).

Жирным шрифтом выделены значения F- и t-критериев, превышающие табличные значения при  $\alpha=0.01$

В таблице 3.9 представлены сравнения яркостных характеристик кимберлитовых трубок и вмещающих пород по F-критерию и t-критерию при уровне значимости  $\alpha=0.01$  в каналах KC LANDSAT 7 ETM+. В панхроматическом канале практически все исследованные площади значимо отличаются друг от друга. Алмазоносная трубка НИИГА отличается значимо от вмещающих пород в каналах 2 и 5 во всех случаях, в каналах 1, 3 и 4 в 80 % случаев, в каналах 6 и 7 в 60 % случаев. Соответственно, куст алмазоносных трубок НИИГА и Маршрутная (в контур которого входит также площадь между трубками) значимо отличается от вмещающих пород в 80 % случаев в панхrome и в канале 5, в 60 % случаев – в каналах 1, 3, 4 и 7. Для куста неалмазоносных трубок Радиогеодезическая, Талисман, Меньшикова значимые отличия от вмещающих пород отмечаются во всех случаях для канала 1, в 80 % случаев – в каналах 2 и 3. Следует обратить внимание, что «пустые» площади I–V, на которых отсутствуют кимберлитовые тела, как правило, значимо отличаются друг от друга во многих спектральных диапазонах. Это свидетельствует о существенных вариациях литологического состава олдондинской свиты, представленной известняками, доломитизированными песчанистыми известняками, доломитами и известковистыми песчаниками.

Анализ приведенных выше результатов показывает, что статистически достоверные различия яркостных характеристик наблюдаются в различных спектральных диапазонах, что делает полезным синтез этих каналов в цветовой модели RGB для выявления кимберлитовых тел на фоне вмещающих пород. Для выделения трубок НИИГА и Маршрутная необходимо наличие хотя бы одного инфракрасного канала в комбинациях спектральных диапазонов. Несмотря на различия алмазоносных трубок НИИГА и Маршрутная по площади (соответственно 3.6 га и 0.47 га), данные трубки уверенно выявляются на фоне вмещающих пород (рис. 3.3), тогда как безрудные трубки Радиогеодезическая, Талисман и Меньшикова практически неотличимы от фона. На результаты выявления кимберлитовых трубок по яркостным характеристикам на фоне вмещающих пород влияет мощность рыхлых перекрывающих отложений. Хотя все трубки относятся к открытому типу, тем не менее, трубки НИИГА и Маршрутная, отличающиеся наименьшими значениями перекрывающего чехла (от 0.3–0.5 до 1.5–2.0 м), по яркостным характеристикам выявляются увереннее, чем трубки Меньшикова и Талисман, для которых мощность перекрывающих отложений составляет 2–3 м (табл. 3.7).

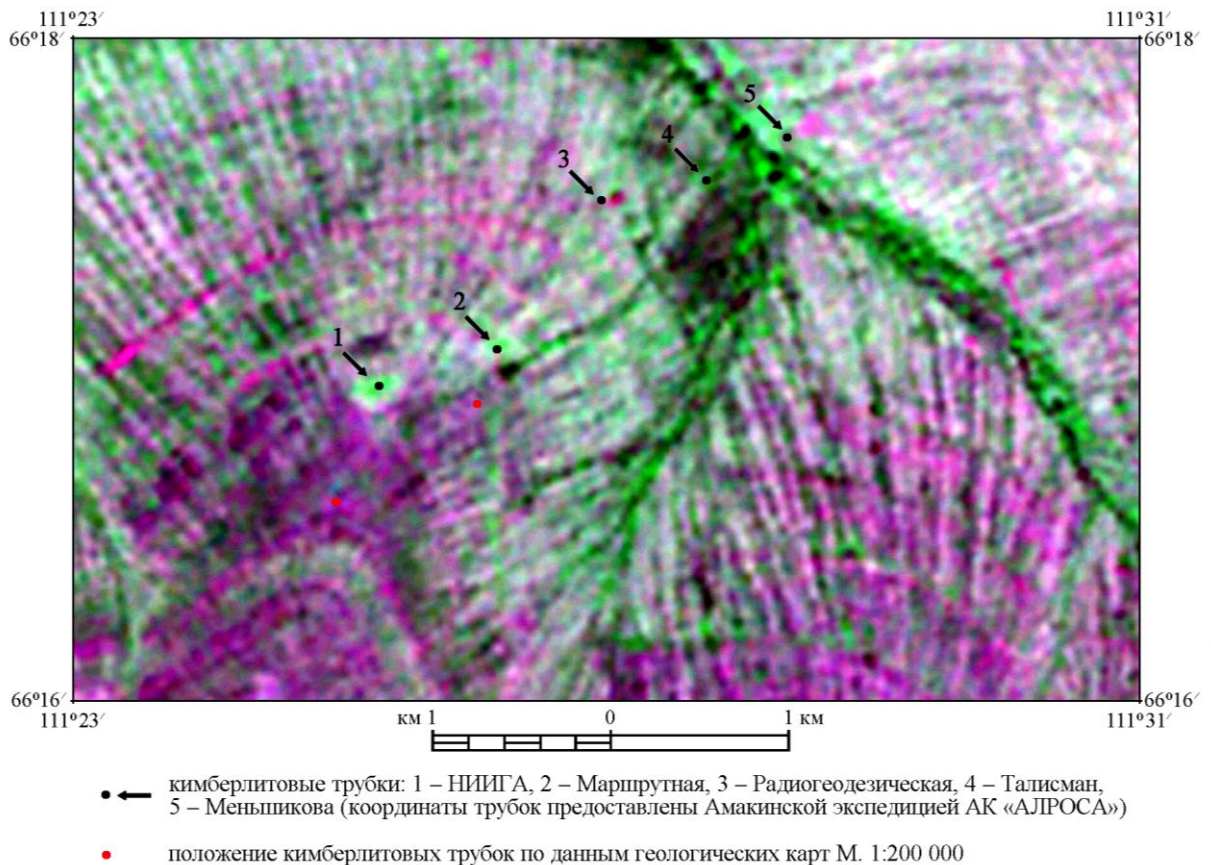
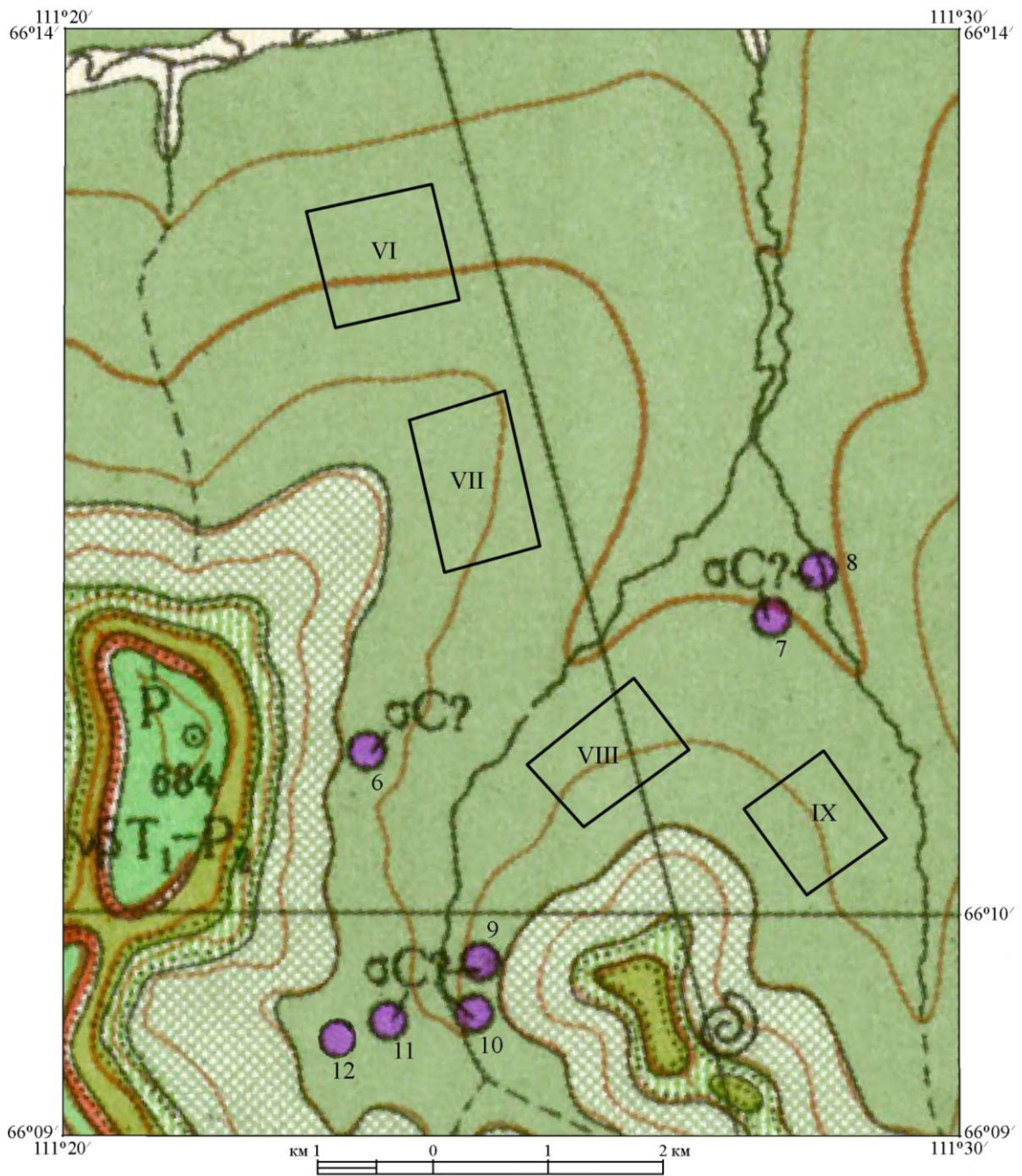


Рис. 3.3. Результаты обработки в цветовой модели RGB 4-го (0.76–0.90 мкм), 5-го (1.55–1.75 мкм) и 7-го (2.08–2.35 мкм) каналов КС LANDSAT 7 ETM+ участка расположения кимберлитовых трубок НИИГА, Маршрутная, Радиогодезическая, Талисман, Меньшикова Алакит-Мархинского кимберлитового поля

В пределах участка Алакит-Мархинского поля (Q-49-XVI-067) изучены яркостные характеристики трех отдельных трубок Искорка, Коллективная, Светлая, куст трубок Начальная, Смежная, куст трубок Кутузовой, Веселая (рис. 3.4, табл. 3.10). Полученные данные сопоставлены с четырьмя «пустыми» площадями (VI–IX) олдондинской свиты, не содержащими кимберлитовых тел (табл. 3.11). Данные трубки и кусты трубок статистически значимо отличаются от вмещающих пород в панхроматическом канале в большем числе случаев, чем в отдельных каналах. При этом доля значимых различий трубок и вмещающих пород меньше, что может быть обусловлено наличием перекрывающих отложений. Так, трубка Искорка выявляется на фоне вмещающих пород менее, чем в 50 % случаев и только в отдельных каналах 5 и 6. На полученные результаты по трубке Искорка, вероятно, повлияло частичное перекрытие трубки траппами (рис. 3.5).





- |  |  |
|--|--|
| Q <sub>4</sub> Четвертичная система. Современный отдел. Аллювиальные галечники, пески, суглинки (отложения поймы)  | P <sub>1</sub> -P <sub>2</sub> Основные породы-долериты нормального ряда   |
| p Пермская система. Пермь нерасчлененная. Конгломераты, песчаники, сланцы, туфы, туфопесчаники   | P <sub>1</sub> -P <sub>2</sub> Дайки недифференцированных долеритов  |
| S <sub>1ln</sub> Сидуринская система. Нижний отдел. Лландоверрийский ярус. Известняки  | P <sub>1</sub> -P <sub>2</sub> Дайки долеритов предполагаемые  |
| O <sub>sk</sub> Ордовикская система. Средний отдел. Криволучский ярус. Глинистые известняки, доломиты, аргиллиты, песчаники, конгломераты                                    | Граница несогласного залегания отложений   |
| O <sub>shs</sub> Ордовикская система. Нижний отдел. Чуньский ярус. Сохолохская свита. Доломиты, оолитовые, водорослевые, глауконитовые доломитизированные известняки         | Граница нормального стратиграфического контакта  |
| O <sub>ol</sub> Ордовикская система. Нижний отдел. Чуньский ярус. Олдондинская свита. Известняки, доломитизированные песчаные известняки, доломиты, известковистые песчаники | Кимберлитовые трубки: 6 – Искорка, 7 – Коллективная, 8 – Светлая, 9 – Смежная, 10 – Начальная, 11 – Веселая, 12 – Кутузовой  |
|  | VI Площади («пустые»), на которых по геолого-геофизическим данным отсутствуют кимберлитовые тела: VI-IX – олдондинская свита |

Рис. 3.4. Фрагмент карты дочетвертичных образований М. 1:200 000 участка Q-49-XVI-067 (составлена Васильевой М.Н., 1959; с дополнениями автора)

Таблица 3.10

Яркостные характеристики исследуемых кимберлитовых тел и вмещающих пород участка Алакит-Мархинского поля (Q-49-XVI-067) в каналах KC LANDSAT 7 ETM+

№№	Характеристика объектов	Канал 1 (0.45 - 0.52 мкм)			Канал 2 (0.52 - 0.60 мкм)			Канал 3 (0.63 - 0.69 мкм)			Канал 4 (0.76 - 0.90 мкм)		
		Mean	S <sup>2</sup>	n	Mean	S <sup>2</sup>	n	Mean	S <sup>2</sup>	n	Mean	S <sup>2</sup>	n
1	Трубка Искорка	60.714	9.958	49	48.735	9.824	49	43.143	20.167	49	87.041	36.540	49
2	Трубка Коллективная	60.880	7.860	25	48.360	7.157	25	42.520	19.760	25	83.400	7.167	25
3	Трубка Светлая	60.000	6.250	25	48.320	3.893	25	42.760	11.940	25	88.280	17.043	25
4	Куст трубок Начальная, Смежная	60.328	6.856	58	48.397	6.173	58	43.621	12.766	58	85.569	11.864	58
5	Куст трубок Кутузовой, Веселая	61.068	14.222	266	49.444	15.116	266	44.891	34.286	266	85.868	14.190	266
6	Площадь VI	60.735	7.346	1302	47.780	7.265	1302	42.825	16.715	1302	81.420	5.042	1302
7	Площадь VII	62.583	12.923	1361	50.276	12.072	1361	45.447	29.408	1361	83.400	8.277	1361
8	Площадь VIII	61.246	8.241	1008	48.852	7.790	1008	43.958	15.605	1008	81.856	5.343	1008
9	Площадь IX	61.909	10.869	916	49.400	10.929	916	44.777	24.538	916	81.901	9.683	916

№№	Характеристика объектов	Канал 5 (1.55 - 1.75 мкм)			Канал 6 (10.40 - 12.5 мкм)			Канал 7 (2.08 - 2.35 мкм)			Канал 8 (0.52 - 0.90 мкм)		
		Mean	S <sup>2</sup>	n	Mean	S <sup>2</sup>	n	Mean	S <sup>2</sup>	n	Mean	S <sup>2</sup>	n
1	Трубка Искорка	80.857	25,458	49	127.917	2.265	12	44.776	20.303	49	45.321	19.819	196
2	Трубка Коллективная	77.120	55,777	25	126.167	1.367	6	42.840	29.307	25	43.620	14.258	100
3	Трубка Светлая	85.000	40,000	25	127.500	3.000	4	47.200	18.500	25	45.520	14.717	100
4	Куст трубок Начальная, Смежная	79.810	17,525	58	124.357	1.170	14	44.793	8.448	58	44.947	15.464	226
5	Куст трубок Кутузовой, Веселая	78.944	39,510	266	125.710	1.816	62	44.150	18.370	266	45.481	20.007	1046
6	Площадь VI	77.664	25,250	1302	126.633	1.911	324	43.588	14.040	1302	43.248	13.496	5245
7	Площадь VII	80.110	25,742	1361	127.506	1.625	346	45.348	15.258	1361	44.888	17.603	5405
8	Площадь VIII	77.435	16,264	1008	126.036	0.919	256	43.859	10.500	1008	43.866	14.004	3985
9	Площадь IX	79.722	19,886	916	127.296	0.994	233	45.314	12.008	916	44.098	17.349	3662

Mean - среднее значение яркости, S<sup>2</sup> - дисперсия яркости, n - число пикселей в пределах контура объекта на карте (см. рис. 3.4)



Таблица 3.11

Сравнение яркостных характеристик исследуемых кимберлитовых тел и вмещающих пород участка Алакит-Мархинского поля (Q-49-XVI-067) по F- и t-критерию в каналах КС LANDSAT 7 ETM+

Канал 1 (0.45 - 0.52 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		1.267	1.593	1.453	1.428	1.356	1.298	1.208	1.091
2	0.222		1.258	1.146	1.809	1.070	1.644	1.049	1.383
3	0.984	1.171		1.097	2.275	1.175	2.068	1.319	1.739
4	0.693	0.863	0.530		<b>2.074</b>	1.072	<b>1.885</b>	1.202	1.585
5	0.617	0.242	1.386			<b>1.936</b>	1.101	<b>1.726</b>	1.308
6	0.052	0.265	1.345	1.122			<b>1.759</b>	1.122	<b>1.480</b>
7	<b>3.588</b>	2.355	<b>3.576</b>		<b>6.236</b>			1.122	<b>1.189</b>
8	1.260	0.630	2.150	2.380		<b>4.379</b>	<b>9.729</b>		1.319
9	2.477	1.546	<b>2.873</b>	<b>3.582</b>	<b>3.545</b>			<b>4.717</b>	

t-критерий

Канал 2 (0.52 - 0.60 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		1.373	<b>2.523</b>	<b>1.591</b>	1.539	1.352	1.229	1.261	1.112
2	0.510		1.838	1.159	2.112	1.015	1.687	1.089	1.527
3		0.060		1.586	<b>3.882</b>	1.866	<b>3.101</b>	2.001	<b>2.807</b>
4		0.060	0.136		<b>2.449</b>	1.177	<b>1.955</b>	1.262	1.770
5	1.206	1.362				<b>2.081</b>	1.252	<b>1.940</b>	<b>1.383</b>
6	2.420	1.067	0.997	1.711			<b>1.662</b>	1.072	<b>1.504</b>
7	3.060	2.741			<b>3.500</b>			1.072	1.105
8	<b>0.286</b>	<b>0.872</b>	0.947	1.216			<b>9.339</b>	<b>10.698</b>	
9	1.375	1.558		2.270				<b>6.015</b>	

t-критерий

Канал 3 (0.63 - 0.69 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		1.021	1.689	1.580	1.700	1.207	1.458	1.292	1.217
2	0.566		1.655	1.548	1.735	1.182	1.488	1.266	1.242
3	0.373	0.213		1.069	<b>2.872</b>	1.400	<b>2.463</b>	1.307	2.055
4	0.613	1.194	1.017		<b>2.686</b>	1.309	<b>2.304</b>	1.222	<b>1.922</b>
5	1.984	1.971				<b>2.051</b>	1.166	<b>2.197</b>	<b>1.397</b>
6	0.533	0.369	0.079	1.458			<b>1.759</b>	1.071	<b>1.468</b>
7	<b>2.938</b>	<b>2.682</b>			1.508			<b>1.884</b>	1.198
8	1.402	1.793	1.502	0.636		<b>6.706</b>			<b>1.572</b>
9	2.260	2.254	2.022				<b>2.990</b>		

t-критерий

Канал 4 (0.76 - 0.90 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		<b>5.099</b>	2.144	<b>3.080</b>	<b>2.575</b>	<b>7.248</b>	<b>4.415</b>	<b>6.839</b>	<b>3.774</b>
2			2.378	1.655	1.980	1.421	1.155	1.155	1.351
3	0.920	<b>4.959</b>		1.437	1.201	<b>3.381</b>	<b>2.059</b>	<b>3.190</b>	1.760
4		<b>2.801</b>	<b>3.096</b>		1.196	<b>2.353</b>	1.433	<b>2.221</b>	1.225
5		<b>3.199</b>	<b>3.035</b>	0.557		<b>2.815</b>	<b>1.714</b>	<b>2.656</b>	<b>1.465</b>
6		<b>4.351</b>					<b>1.642</b>	1.060	<b>1.921</b>
7		0.001		<b>5.575</b>				1.060	1.170
8		<b>3.286</b>				<b>4.570</b>	<b>14.011</b>		<b>1.812</b>
9		<b>2.385</b>	<b>10.016</b>	<b>8.650</b>			<b>11.796</b>		

t-критерий

1 – Трубка Искорка (49 пикселей), 2 – Трубка Коллективная (25 пикселей), 3 – Трубка Светлая (25 пикселей), 4 – Куст трубок Начальная, Смежная (58 пикселей), 5 – Куст трубок Кутузовой, Веселая (266 пикселей), 6 - 9 – Площади, на которых по геолого-геофизическим данным отсутствуют кимберлитовые тела (см. рис. 3.4): 6 – Площадь VI (1302 пикселей), 7 – Площадь VII (1361 пикселей), 8 – Площадь VIII (1008 пикселей), 9 – Площадь IX (916 пикселей).

Жирным шрифтом выделены значения F- и t-критериев, превышающие табличные значения при  $\alpha=0.01$

Продолжение таблицы 3.11

Канал 5 (1.55 - 1.75 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		2.191	1.571	1.453	1.552	1.008	1.011	1.565	1.280
2	2.550		1.394	<b>3.183</b>	1.412	<b>2.209</b>	<b>2.167</b>	<b>3.429</b>	<b>2.805</b>
3	<b>3.062</b>	<b>4.026</b>		<b>2.282</b>	1.012	1.584	1.554	<b>2.459</b>	<b>2.011</b>
4	1.173				<b>2.255</b>	1.441	1.469	1.078	1.135
5	2.014	1.364	<b>4.604</b>			<b>1.565</b>	<b>1.535</b>	<b>2.429</b>	<b>1.987</b>
6	<b>4.367</b>		<b>7.193</b>	<b>3.204</b>			1.019	<b>1.553</b>	1.270
7	1.013		<b>4.752</b>	0.444		<b>12.498</b>		<b>1.583</b>	1.294
8	<b>5.728</b>			<b>4.354</b>					1.223
9	1.725			0.147		<b>9.943</b>	1.880	<b>11.813</b>	

F-критерий

t-критерий

Канал 6 (10.40 - 12.5 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		1.657	1.324	1.935	1.247	1.185	1.394	<b>2.465</b>	2.279
2	2.485		2.195	1.168	1.329	1.398	1.189	1.487	1.375
3	0.464	1.468		2.563	1.652	1.570	1.847	3.264	3.019
4	<b>6.997</b>	<b>3.351</b>	<b>4.506</b>		1.552	1.633	1.388	1.273	1.178
5	<b>5.098</b>	0.801	2.537	<b>3.503</b>		1.052	1.118	<b>1.976</b>	<b>1.827</b>
6	<b>3.150</b>	0.820	1.244	<b>6.076</b>	<b>4.836</b>		1.176	2.079	1.923
7	1.091	2.554	0.009	<b>9.108</b>	<b>10.129</b>	<b>8.505</b>		<b>1.768</b>	<b>1.635</b>
8		0.329	<b>2.992</b>	<b>6.337</b>		<b>5.882</b>			1.081
9	2.044	<b>2.729</b>	0.400	<b>10.664</b>		<b>6.249</b>		<b>14.247</b>	

F-критерий

t-критерий

Канал 7 (2.08 - 2.35 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		1.443	1.097	<b>2.403</b>	1.105	1.446	1.331	<b>1.934</b>	<b>1.691</b>
2	1.631		1.584	<b>3.469</b>	1.595	<b>2.087</b>	1.921	<b>2.791</b>	<b>2.441</b>
3	2.222	<b>3.153</b>		<b>2.190</b>	1.007	1.318	1.212	1.762	1.541
4					2.175	1.662	<b>1.806</b>	1.243	1.421
5	0.931	1.427	<b>3.400</b>	1.088		1.308	1.204	<b>1.749</b>	<b>1.530</b>
6	2.162		<b>4.761</b>	2.418	2.176		1.087	<b>1.337</b>	1.169
7	1.003	<b>3.156</b>	2.344		<b>4.500</b>	<b>11.861</b>		<b>1.453</b>	1.271
8			<b>5.048</b>	2.146					1.144
9			2.666	1.121		<b>11.021</b>	0.212	<b>9.518</b>	

F-критерий

t-критерий

Канал 8 (0.52 - 0.90 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		1.390	1.347	1.282	1.009	<b>1.469</b>	1.126	1.415	1.142
2	<b>3.268</b>		1.032	1.085	1.403	1.056	1.235	1.018	1.217
3	0.380	<b>3.530</b>		1.051	1.359	1.090	1.196	1.051	1.179
4	0.918	<b>2.844</b>	1.222		1.294	1.146	1.138	1.104	1.122
5	0.459	<b>4.026</b>	0.084	1.662		<b>1.482</b>	1.137	<b>1.429</b>	1.153
6		1.002	<b>6.121</b>	<b>6.786</b>			1.304	1.038	1.286
7	1.416	<b>3.001</b>	1.494	0.206	<b>4.131</b>	<b>21.439</b>		1.038	1.015
8	<b>5.266</b>	0.648	<b>4.363</b>	<b>4.213</b>		<b>7.935</b>	<b>12.216</b>		1.239
9	<b>3.993</b>	1.134	<b>3.376</b>	<b>2.984</b>	<b>9.317</b>	<b>10.159</b>	<b>8.831</b>	<b>2.566</b>	

F-критерий

t-критерий

1 – Трубка Искорка (49 пикселей), 2 – Трубка Коллективная (25 пикселей), 3 – Трубка Светлая (25 пикселей), 4 – Куст трубок Начальная, Смежная (58 пикселей), 5 – Куст трубок Кутузовой, Веселая (266 пикселей), 6 - 9 – Площади, на которых по геолого-геофизическим данным отсутствуют кимберлитовые тела (см. рис. 3.4): 6 – Площадь VI (1302 пикселей), 7 – Площадь VII (1361 пикселей), 8 – Площадь VIII (1008 пикселей), 9 – Площадь IX (916 пикселей).

Жирным шрифтом выделены значения F- и t-критериев, превышающие табличные значения при  $\alpha=0.01$

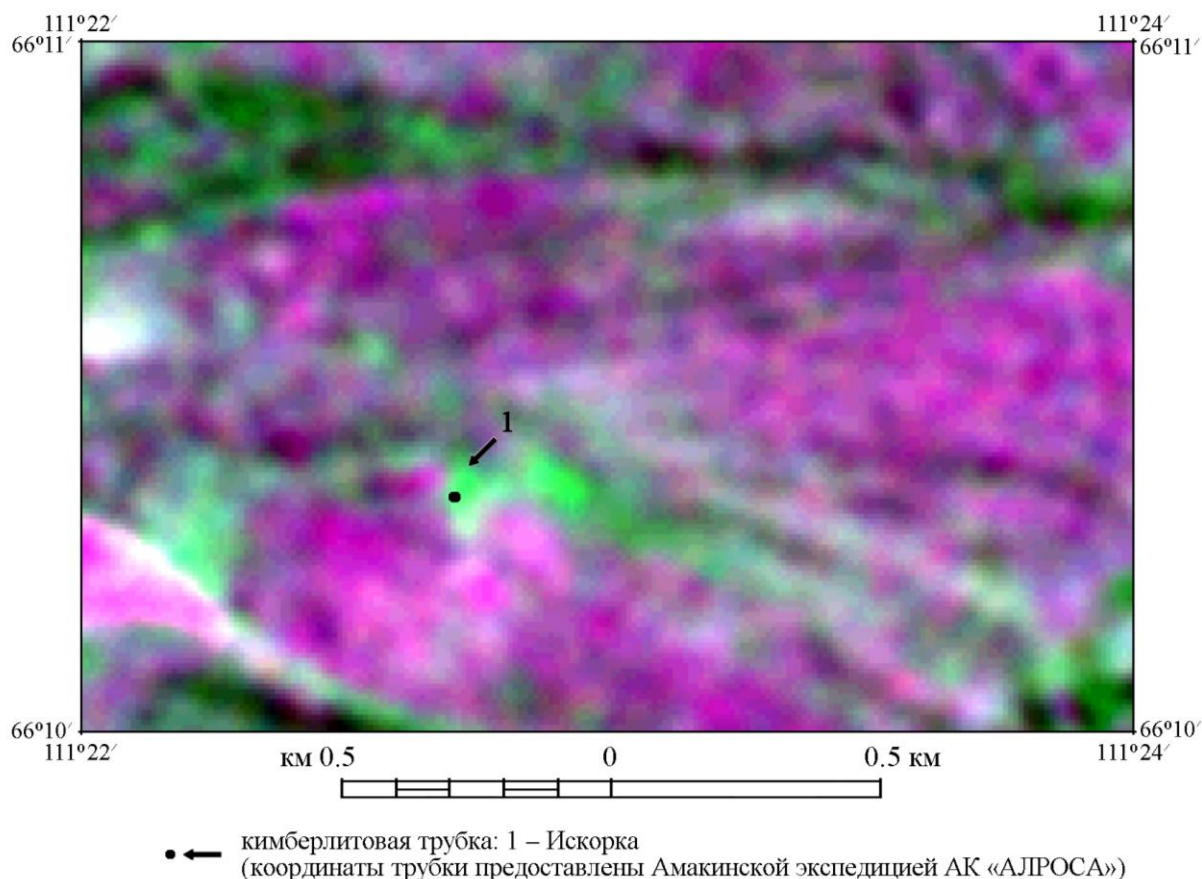


Рис. 3.5. Результаты обработки в цветовой модели RGB 4-го (0.76–0.90 мкм), 5-го (1.55–1.75 мкм) и 7-го (2.08–2.35 мкм) каналов КС LANDSAT 7 ETM+ участка расположения кимберлитовой трубки Искорка Алакит-Мархинского кимберлитового поля

Трубка Коллективная выделяется в 75 % случаев только в канале 4. Трубка Светлая выявляется на фоне вмещающих пород в 50 % случаев только в каналах 1, 5 и 7. Отмечено, что площади, характеризующие вмещающие породы, значительно отличаются друг от друга. Как отмечалось выше, это обстоятельство отражает существенные вариации литологического состава олдондинской свиты в пределах исследуемой территории. В связи с тем, что трубки Коллективная, Светлая, Начальная, Смежная, Веселая имеют мощность перекрывающих отложений от 2.0 м до 4.9 м и площадь в плане 0.1–0.3 га, данные кимберлитовые трубки трудно диагностировать по яркости.

В пределах участка Далдынского поля (Q-49-XVII-058,070) исследованы яркостные характеристики трубок Геофизическая, Долгожданная, Ленинградская, Молодежная и четырех «пустых» площадей (X–XIII) олдондинской свиты (рис. 3.6, табл. 3.12).

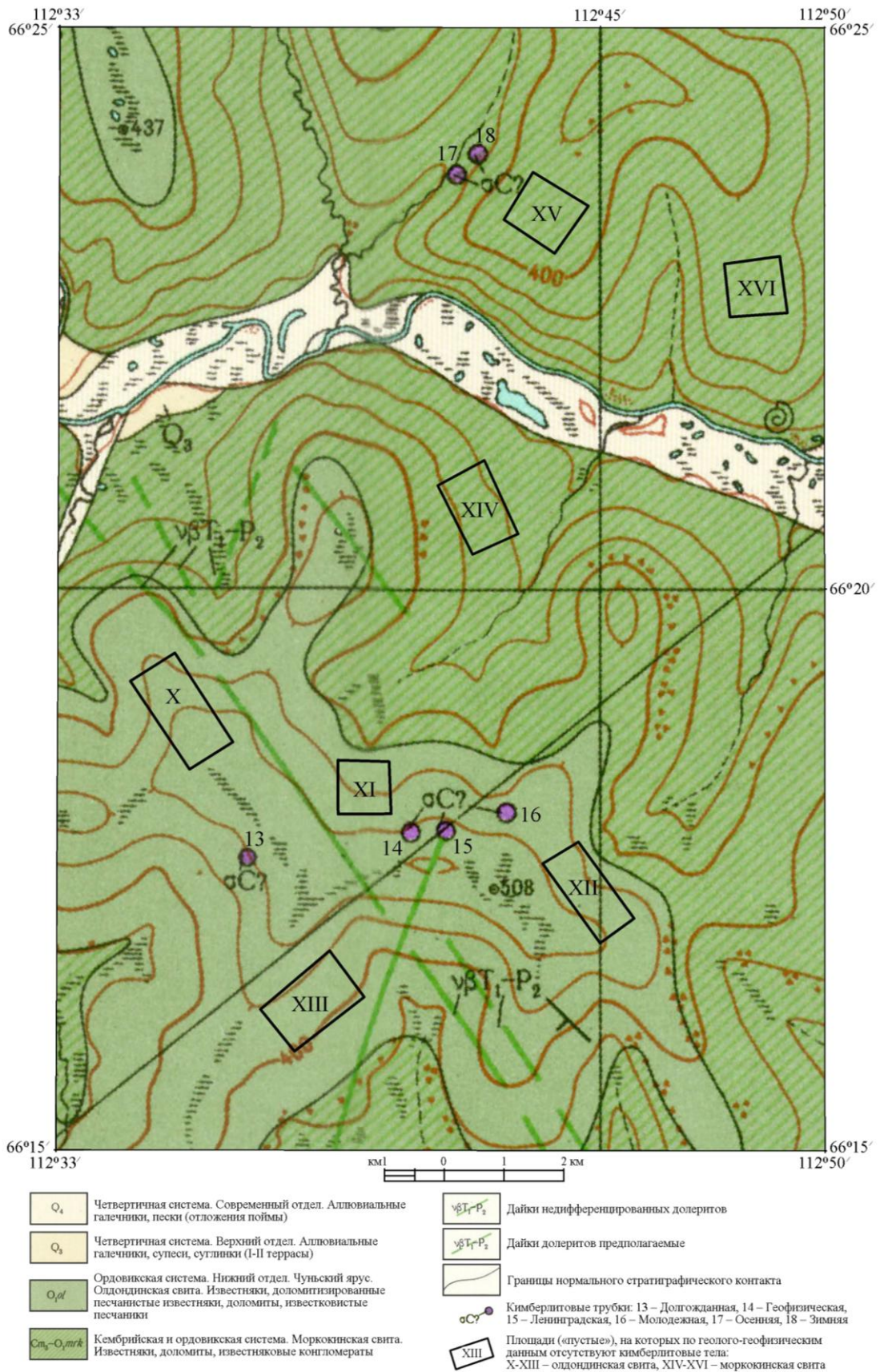


Рис. 3.6. Фрагмент карты дочетвертичных образований М. 1:200 000 участка Q-49-XVII-058,070 (составлена Васильевой М.Н., 1959; с дополнениями автора)



Таблица 3.12

Яркостные характеристики исследуемых кимберлитовых тел и вмещающих пород участка Далдынского поля (Q-49-XVII-058,070)  
в каналах KC LANDSAT 7 ETM+

№№	Характеристика объектов	Канал 1 (0.45 - 0.52 мкм)			Канал 2 (0.52 - 0.60 мкм)			Канал 3 (0.63 - 0.69 мкм)			Канал 4 (0.76 - 0.90 мкм)		
		Mean	S <sup>2</sup>	n	Mean	S <sup>2</sup>	n	Mean	S <sup>2</sup>	n	Mean	S <sup>2</sup>	n
1	Трубка Долгожданная	59.864	7.594	81	47.556	11.875	81	43.309	26.191	81	82.667	11.750	81
2	Трубка Геофизическая	59.247	4.238	81	46.407	2.894	81	41.284	4.431	81	78.543	3.426	81
3	Трубка Молодежная	60.309	5.091	81	48.160	4.586	81	42.469	9.402	81	82.531	5.652	81
4	Трубка Ленинградская	59.290	11.326	169	46.846	7.964	169	41.278	21.654	169	83.041	16.945	169
5	Куст трубок Геофизическая, Ленинградская, Молодежная	59.515	7.017	705	47.162	5.474	705	41.529	12.659	705	81.190	11.373	705
6	Площадь X	57.375	5.607	1862	44.896	3.985	1862	38.562	12.193	1862	83.437	16.484	1862
7	Площадь XI	58.357	8.080	932	46.635	7.869	932	40.528	19.072	932	83.065	13.677	932
8	Площадь XII	59.713	13.933	1391	47.529	13.379	1391	41.830	32.422	1391	83.097	15.358	1391
9	Площадь XIII	59.406	10.005	1671	47.580	9.584	1671	41.963	21.181	1671	87.725	12.746	1671

№№	Характеристика объектов	Канал 5 (1.55 - 1.75 мкм)			Канал 6 (10.40 - 12.5 мкм)			Канал 7 (2.08 - 2.35 мкм)			Канал 8 (0.52 - 0.90 мкм)		
		Mean	S <sup>2</sup>	n	Mean	S <sup>2</sup>	n	Mean	S <sup>2</sup>	n	Mean	S <sup>2</sup>	n
1	Трубка Долгожданная	84.988	32.712	81	128.250	1.250	20	49.617	30.089	81	43.660	20.844	324
2	Трубка Геофизическая	79.037	8.061	81	127.500	0.533	16	44.469	5.777	81	41.685	10.111	324
3	Трубка Молодежная	75.716	4.706	81	127.875	0.250	16	41.716	4.331	81	43.948	14.979	324
4	Трубка Ленинградская	76.349	33.824	169	127.056	2.625	36	41.935	19.966	169	43.567	13.446	676
5	Куст трубок Геофизическая, Ленинградская, Молодежная	76.376	17.425	705	127.428	1.158	159	42.296	11.169	705	42.909	13.779	2820
6	Площадь X	78.328	23.313	1862	126.884	1.478	475	44.526	22.335	1862	42.731	12.011	7386
7	Площадь XI	75.721	15.617	932	126.860	1.082	228	41.627	13.233	932	43.268	13.964	3764
8	Площадь XII	76.246	27.193	1391	128.044	4.125	341	42.147	19.750	1391	43.696	16.361	5430
9	Площадь XIII	83.630	17.275	1671	130.279	1.735	412	46.117	13.443	1671	45.307	13.775	6754

Mean - среднее значение яркости, S<sup>2</sup> - дисперсия яркости, n - число пикселей в пределах контура объекта на карте (см. рис. 3.6)

Таблица 3.13

Сравнение яркостных характеристик исследуемых кимберлитовых тел и вмещающих пород участка Далдынского поля (Q-49-XVII-058,070) по F- и t-критерию в каналах КС LANDSAT 7 ETM+

Канал 1 (0.45 - 0.52 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		<b>1.792</b>	1.492	1.491	1.082	1.354	1.064	<b>1.835</b>	1.318
2			1.201	<b>2.672</b>	1.656	1.323	<b>1.906</b>	<b>3.287</b>	<b>2.361</b>
3	1.123	<b>3.128</b>		<b>2.225</b>	1.378	1.101	<b>1.587</b>	<b>2.737</b>	<b>1.965</b>
4	1.336				<b>1.614</b>	<b>2.020</b>	1.402	1.230	1.132
5	1.119	0.880	<b>2.591</b>			1.252	1.151	<b>1.986</b>	<b>1.426</b>
6	<b>9.195</b>	<b>7.001</b>	<b>10.937</b>		<b>19.767</b>		<b>1.441</b>	<b>2.485</b>	<b>1.785</b>
7	<b>4.587</b>			<b>3.809</b>	<b>8.400</b>			<b>1.724</b>	1.238
8				1.406					<b>1.393</b>
9	1.279			0.453			<b>8.407</b>		

t-критерий

Канал 2 (0.52 - 0.60 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		<b>4.103</b>	<b>2.589</b>	1.491	<b>2.169</b>	<b>2.980</b>	1.509	1.127	1.239
2			1.585	<b>2.752</b>	<b>1.891</b>	1.377	<b>2.719</b>	<b>4.622</b>	<b>3.311</b>
3		<b>5.769</b>		<b>1.736</b>	1.193	1.151	<b>1.716</b>	<b>2.917</b>	<b>2.090</b>
4	1.728				<b>1.455</b>	<b>1.999</b>	<b>1.012</b>	<b>1.680</b>	<b>1.203</b>
5			<b>3.669</b>			<b>1.374</b>	<b>1.438</b>	<b>2.444</b>	<b>1.751</b>
6		<b>6.709</b>	<b>14.364</b>				<b>1.975</b>	<b>3.357</b>	<b>2.405</b>
7	<b>2.777</b>							<b>1.700</b>	1.218
8	0.063								<b>1.396</b>
9	0.069						<b>7.715</b>		

t-критерий

Канал 3 (0.63 - 0.69 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		<b>5.911</b>	<b>2.786</b>	1.210	<b>2.069</b>	<b>2.148</b>	1.373	1.238	1.237
2			<b>2.122</b>	<b>4.887</b>	<b>2.857</b>	<b>2.752</b>	<b>4.304</b>	<b>7.317</b>	<b>4.780</b>
3				<b>2.303</b>	1.346	1.297	<b>2.028</b>	<b>3.448</b>	<b>2.253</b>
4	<b>3.125</b>				<b>1.711</b>	<b>1.776</b>	1.135	<b>1.497</b>	1.022
5			2.282			1.038	<b>1.507</b>	<b>2.561</b>	<b>1.673</b>
6			<b>9.906</b>		<b>19.117</b>		<b>1.564</b>	<b>2.659</b>	<b>1.737</b>
7	<b>5.417</b>			2.034				<b>1.700</b>	1.111
8	2.284								<b>1.531</b>
9	2.555			1.843			<b>7.77</b>		

t-критерий

Канал 4 (0.76 - 0.90 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		<b>3.429</b>	<b>2.079</b>	1.442	1.033	1.403	1.164	1.307	1.085
2			1.650	<b>4.946</b>	<b>3.319</b>	<b>4.811</b>	<b>3.992</b>	<b>4.483</b>	<b>3.720</b>
3		<b>11.911</b>		<b>2.998</b>	<b>2.012</b>	<b>2.916</b>	<b>2.420</b>	<b>2.717</b>	<b>2.255</b>
4	0.710				<b>1.490</b>	1.028	1.239	1.103	1.329
5	<b>3.726</b>					<b>1.449</b>	1.203	<b>1.350</b>	1.121
6	1.682			1.212			1.205	1.073	1.293
7	0.936			0.076	<b>10.549</b>	2.349		1.123	1.073
8	0.967			0.173		2.339	0.195		1.205
9	<b>12.48</b>			<b>16.01</b>	<b>41.42</b>	<b>33.17</b>	<b>31.51</b>	<b>34.16</b>	

t-критерий

1 – Трубка Долгожданная (81 пикселов), 2 – Трубка Геофизическая (81 пикселов), 3 – Трубка Молодежная (81 пикселов), 4 – Трубка Ленинградская (169 пикселов), 5 – Куст трубок Геофизическая, Ленинградская, Молодежная (705 пикселов), 6 – 9 – Площади, на которых по геолого-геофизическим данным отсутствуют кимберлитовые тела (см. рис. 3.6): 6 – Площадь X (1862 пикселов), 7 – Площадь XI (932 пикселов), 8 – Площадь XII (1391 пикселов), 9 – Площадь XIII (1671 пикселов). Жирным шрифтом выделены значения F- и t-критериев, превышающие табличные значения при  $\alpha=0.01$

Продолжение таблицы 3.13

Канал 5 (1.55 - 1.75 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		<b>4.058</b>	<b>6.951</b>	1.034	<b>1.877</b>	1.403	<b>2.095</b>	1.203	<b>1.894</b>
2			1.713	<b>4.196</b>	<b>2.162</b>	<b>2.892</b>	<b>1.937</b>	<b>3.373</b>	<b>2.143</b>
3		<b>8.365</b>		<b>7.188</b>	<b>3.703</b>	<b>4.954</b>	<b>3.319</b>	<b>5.778</b>	<b>3.671</b>
4	<b>11.050</b>				<b>1.941</b>	<b>1.451</b>	<b>2.166</b>	1.244	1.958
5						<b>1.338</b>	1.116	<b>1.561</b>	1.009
6	<b>12.053</b>						<b>1.493</b>	1.166	<b>1.350</b>
7					<b>3.240</b>			<b>1.741</b>	1.106
8	<b>14.586</b>			0.240		<b>11.755</b>			<b>1.574</b>
9				<b>20.81</b>	<b>38.81</b>		<b>47.37</b>		

F-критерий

t-критерий

Канал 6 (10.40 - 12.5 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		2.344	<b>5.000</b>	2.100	1.080	1.183	1.156	<b>3.300</b>	1.388
2	2.314		2.133	<b>4.923</b>	2.171	2.771	2.028	<b>7.733</b>	<b>3.252</b>
3		1.695		<b>10.502</b>	<b>4.631</b>	<b>5.913</b>	<b>4.326</b>	<b>16.498</b>	<b>6.938</b>
4	<b>2.927</b>				<b>2.268</b>	<b>1.776</b>	<b>2.427</b>	1.571	1.514
5	<b>3.208</b>	0.263				1.277	1.070	<b>3.563</b>	<b>1.498</b>
6	<b>4.936</b>	2.013			<b>5.017</b>		1.367	<b>2.790</b>	<b>1.173</b>
7	<b>5.699</b>	2.419			<b>5.212</b>	0.262		<b>3.814</b>	1.604
8				<b>2.826</b>					<b>2.378</b>
9	<b>6.771</b>			<b>13.808</b>			<b>33.800</b>		

F-критерий

t-критерий

Канал 7 (2.08 - 2.35 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		<b>5.208</b>	<b>6.948</b>	1.507	<b>2.694</b>	1.347	<b>2.274</b>	1.523	<b>2.238</b>
2			1.334	<b>3.456</b>	<b>1.933</b>	<b>3.866</b>	<b>2.291</b>	<b>3.419</b>	<b>2.327</b>
3		<b>7.793</b>		<b>4.610</b>	<b>2.579</b>	<b>5.157</b>	<b>3.056</b>	<b>4.560</b>	<b>3.104</b>
4	<b>11.794</b>				<b>1.788</b>	1.119	<b>1.509</b>	1.011	<b>1.485</b>
5						<b>2.000</b>	1.185	<b>1.768</b>	1.204
6	<b>9.425</b>			<b>6.854</b>			<b>1.688</b>	1.131	<b>1.661</b>
7					<b>3.820</b>			<b>1.492</b>	1.016
8	<b>14.500</b>			0.587		<b>14.565</b>			<b>1.469</b>
9					<b>23.81</b>		<b>30.04</b>		

F-критерий

t-критерий

Канал 8 (0.52 - 0.90 мкм)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		<b>2.062</b>	<b>1.392</b>	<b>1.550</b>	<b>1.513</b>	<b>1.735</b>	<b>1.493</b>	1.274	<b>1.513</b>
2			<b>1.481</b>	<b>1.330</b>	<b>1.363</b>	1.188	<b>1.381</b>	<b>1.618</b>	<b>1.362</b>
3				1.114	1.087	1.247	1.073	1.092	1.087
4			1.510		1.025	1.119	1.039	1.217	1.024
5			<b>4.749</b>	<b>4.147</b>		1.147	1.013	1.187	1.000
6		<b>5.334</b>	<b>6.153</b>	<b>5.970</b>	2.273		1.163	<b>1.362</b>	1.147
7			<b>3.133</b>	1.919	<b>3.868</b>	<b>7.531</b>		1.172	1.014
8	0.152		1.090	0.792	<b>8.619</b>		<b>5.147</b>		1.188
9			<b>6.429</b>	<b>11.638</b>	<b>28.821</b>	<b>42.681</b>	<b>26.959</b>	<b>22.880</b>	

F-критерий

t-критерий

1 – Трубка Долгожданная (81 пикселов), 2 – Трубка Геофизическая (81 пикселов), 3 – Трубка Молодежная (81 пикселов), 4 – Трубка Ленинградская (169 пикселов), 5 – Куст трубок Геофизическая, Ленинградская, Молодежная (705 пикселов), 6 – 9 – Площади, на которых по геолого-геофизическим данным отсутствуют кимберлитовые тела (см. рис. 3.6): 6 – Площадь X (1862 пикселов), 7 – Площадь XI (932 пикселов), 8 – Площадь XII (1391 пикселов), 9 – Площадь XIII (1671 пикселов). Жирным шрифтом выделены значения F- и t-критериев, превышающие табличные значения при  $\alpha=0.01$

Трубка Геофизическая отличается значительно от вмещающих пород в канале 4 во всех случаях, в канале 3 – в 75 % случаев, в каналах 5–8 в 50 % случаев (табл. 3.13). Трубка Молодежная отличается значительно от вмещающих пород в канале 8 в 75 % случаях, в канале 6 в 50 % случаев, в каналах 1 и 7 в 25 % случаев. Результаты вычислений по трубкам Долгожданная и Ленинградская связаны с неопределенностью вычисления значений t-критерия, т.к. во многих случаях  $F_{расч} > F_{табл}$ . Вероятно, это связано, с тем что, судя по снимкам, на данных трубках велись горные работы (рис. 3.7). Трубки Геофизическая и Молодежная, характеризующиеся чехлом рыхлых отложений менее 2 м, также выявляются по космическим данным уверенно при синтезе каналов 754, 743, 741, 431, 543, 541.

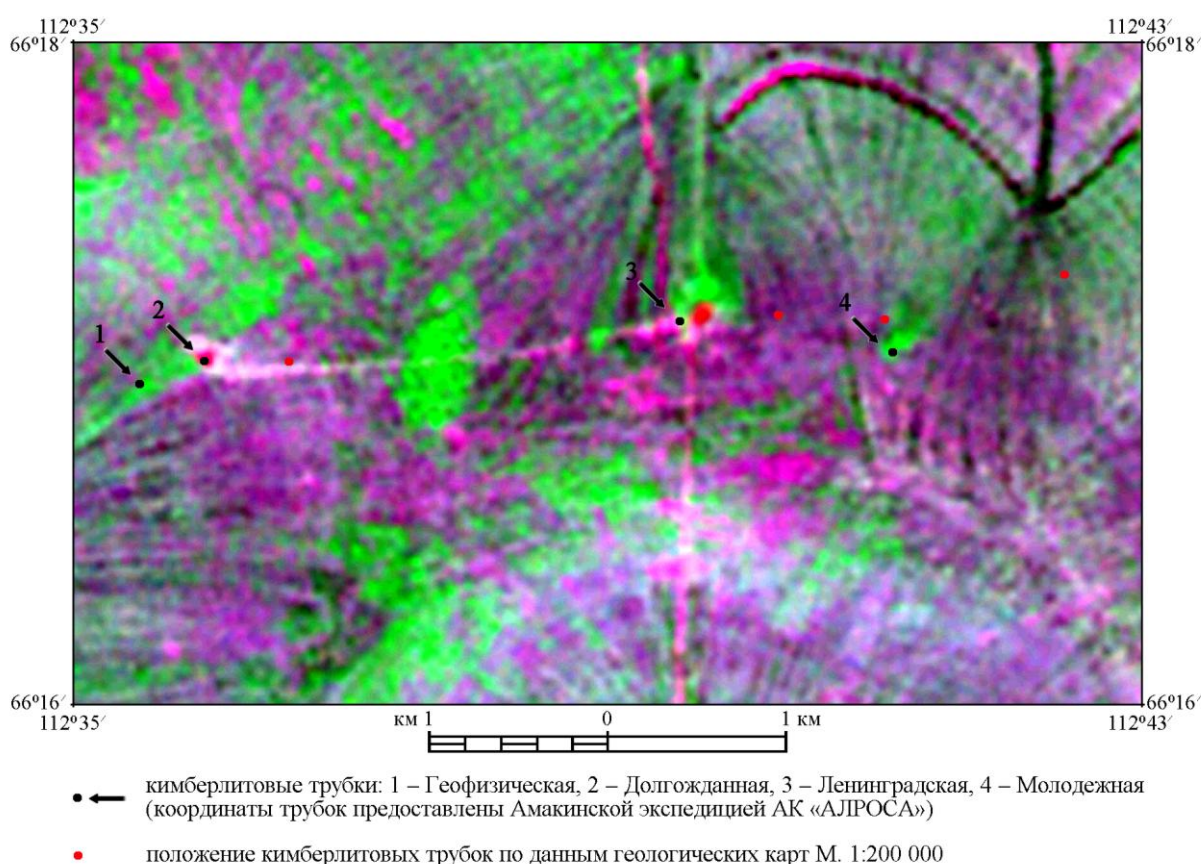


Рис. 3.7. Результаты обработки в цветовой модели RGB 4-го (0.76–0.90 мкм), 5-го (1.55–1.75 мкм) и 7-го (2.08–2.35 мкм) каналов КС LANDSAT 7 ETM+ участка расположения кимберлитовых трубок Геофизическая, Долгожданная, Ленинградская, Молодежная Далдынского кимберлитового поля

Сопоставление трубки Ленинградская с расположенными рядом Молодежной и Геофизической показало, что по всем диапазонам они не различимы, т.е. выделение их в один куст правомочно. Вместе с тем, крайние трубки Молодежная и Геофизическая значительно различаются в каналах 1, 2, 4, 5 и 7. Для объяснения подобного явления были привлечены определения значений абсолютного возраста (Зайцев и др., 2010): кимберлит из трубки Молодежная имеет абсолютный возраст – 430 млн. лет, из трубки



Геофизическая – 412 млн. лет. Отмечается общая закономерность: если трубки не различаются – то отличия отсутствуют во всех каналах; а если значимые различия имеются, то также по многим каналам. Например, трубка Долгожданная ни в одном диапазоне не отличается от трубки Молодежная и Геофизическая, но при этом отличается от трубки Ленинградская сразу по четырем каналам 3, 5, 6 и 7. Возможно, это связано с тем, что в плане площадь трубки Ленинградской в 3.5 раза больше Долгожданной, соответственно на площади исследования было различное соотношение собственно кимберлитов и вмещающих пород. На обработанном космическом снимке в цветовой модели RGB в каналах 4, 5, 7 алмазонасные кимберлитовые трубки уверенно выявляются на фоне вмещающих пород (рис. 3.7).

В пределах участка Далдынского поля исследованы яркостные характеристики трубок Осенняя, Зимняя и трех «пустых» площадей (XIV–XVI) моркокинской свиты (рис. 3.6, табл. 3.14).

Таблица 3.14

Яркостные характеристики исследуемых кимберлитовых тел и вмещающих пород участка Далдынского поля (Q-49-XVII-058,070) в каналах KC LANDSAT 7 ETM+

№№	Характеристика объектов	Канал 1 (0.45 - 0.52 мкм)			Канал 2 (0.52 - 0.60 мкм)		
		Mean	S <sup>2</sup>	n	Mean	S <sup>2</sup>	n
1	Куст трубок Осенняя, Зимняя	59.552	8.336	297	47.862	6.444	297
2	Площадь XIV	60.588	5.825	1370	49.164	3.986	1370
3	Площадь XV	58.108	7.004	1195	45.740	6.074	1195
4	Площадь XVI	66.883	7.779	1044	55.431	7.615	1044

№№	Характеристика объектов	Канал 3 (0.63 - 0.69 мкм)			Канал 4 (0.76 - 0.90 мкм)		
		Mean	S <sup>2</sup>	n	Mean	S <sup>2</sup>	n
1	Куст трубок Осенняя, Зимняя	43.024	21.841	297	81.734	20.108	297
2	Площадь XIV	43.972	9.360	1370	83.804	6.138	1370
3	Площадь XV	39.422	16.058	1195	83.521	20.437	1195
4	Площадь XVI	52.506	14.358	1044	85.771	7.655	1044

№№	Характеристика объектов	Канал 5 (1.55 - 1.75 мкм)			Канал 6 (10.40 - 12.5 мкм)		
		Mean	S <sup>2</sup>	n	Mean	S <sup>2</sup>	n
1	Куст трубок Осенняя, Зимняя	79.296	45.270	297	129.141	2.668	78
2	Площадь XIV	79.439	19.146	1370	130.228	2.396	338
3	Площадь XV	80.941	27.560	1195	129.565	2.165	294
4	Площадь XVI	85.201	14.161	1044	131.517	0.751	265

№№	Характеристика объектов	Канал 7 (2.08 - 2.35 мкм)			Канал 8 (0.52 - 0.90 мкм)		
		Mean	S <sup>2</sup>	n	Mean	S <sup>2</sup>	n
1	Куст трубок Осенняя, Зимняя	44.545	29.472	297	43.536	15.411	1188
2	Площадь XIV	43.893	8.871	1370	44.652	13.100	5488
3	Площадь XV	45.721	23.063	1195	43.073	14.085	4790
4	Площадь XVI	49.050	12.093	1044	47.841	14.913	4200

Mean – среднее значение яркости, S<sup>2</sup> – дисперсия яркости, n - число пикселей в пределах контура объекта на карте (см. рис. 3.6)

Большие значения дисперсий яркости по сравниваемым объектам, при которых значения F-критерия превышают табличные значения, не позволили оценить значимость различий по некоторым диапазонам (табл. 3.15). Тем не менее, данные трубки значимо

отличаются между собой и от вмещающих пород моркокинской свиты в каналах 4, 5, 7. Трубка Зимняя с мощностью перекрывающих отложений 1.5–2.3 м выявляется более уверенно, чем трубка Осенняя с перекрывающими отложениями 2.0–2.8 м (рис. 3.8). Отмечается, что отдельные площади, на которых кимберлитовые тела не установлены, также значимо отличаются друг от друга в панхроматическом канале, что свидетельствует о литологической неоднородности моркокинской свиты, представленной глинистыми известняками, песчанистыми и оолитовыми известняками, доломитами и известняковыми конгломератами.

Таблица 3.15

Сравнение яркостных характеристик исследуемых кимберлитовых тел и вмещающих пород участка Далдынского поля (Q-49-XVII-058,070) по F-критерию и t-критерию в каналах KC LANDSAT 7 ETM+

Канал 1 (0.45 - 0.52 мкм)					Канал 2 (0.52 - 0.60 мкм)					
	1	2	3	4		1	2	3	4	
1		<b>1.431</b>	1.190	1.072	F-критерий	1		<b>1.616</b>	1.061	1.182
2			1.203	<b>1.336</b>		2			<b>1.524</b>	<b>1.910</b>
3	<b>8.262</b>	<b>24.813</b>		1.111		3	<b>13.202</b>			1.254
4	<b>39.655</b>		<b>76.324</b>			4	<b>42.437</b>		<b>87.778</b>	
t-критерий					t-критерий					
Канал 3 (0.63 - 0.69 мкм)					Канал 4 (0.76 - 0.90 мкм)					
	1	2	3	4		1	2	3	4	
1		<b>2,333</b>	<b>1,360</b>	<b>1,521</b>	F-критерий	1		<b>3.276</b>	1.016	<b>2.627</b>
2			<b>1,716</b>	<b>1,534</b>		2			<b>3.329</b>	1.247
3				1,118		3	<b>6.105</b>			<b>2.670</b>
4			<b>79,049</b>			4		<b>18.366</b>		
t-критерий					t-критерий					
Канал 5 (1.55 - 1.75 мкм)					Канал 6 (10.40 - 12.5 мкм)					
	1	2	3	4		1	2	3	4	
1		<b>2.364</b>	<b>1.643</b>	<b>3.197</b>	F-критерий	1		1.114	1.233	<b>3.554</b>
2			<b>1.439</b>	<b>1.352</b>		2	<b>5.531</b>		1.107	<b>3.192</b>
3				<b>1.946</b>		3	2.208	<b>5.497</b>		<b>2.884</b>
4						4				
t-критерий					t-критерий					
Канал 7 (2.08 - 2.35 мкм)					Канал 8 (0.52 - 0.90 мкм)					
	1	2	3	4		1	2	3	4	
1		<b>3.322</b>	1.278	<b>2.437</b>	F-критерий	1		1.176	1.094	1.033
2			<b>2.600</b>	<b>1.363</b>		2	<b>9.483</b>		1.075	1.138
3	<b>3.674</b>			<b>1.907</b>		3	<b>3.772</b>	<b>21.680</b>		1.059
4						4	<b>33.796</b>	<b>41.744</b>	<b>59,287</b>	
t-критерий					t-критерий					

1 – Куст трубок Осенняя, Зимняя (297 пикселов), 2 – 4 – Площади, на которых по геолого-геофизическим данным отсутствуют кимберлитовые тела (см. рис. 3.6): 2 – Площадь XIV (1370 пикселов), 3 – Площадь XV (1195 пикселов), 4 – Площадь XVI (1044 пикселов).

Жирным шрифтом выделены значения F- и t-критериев, превышающие табличные значения при  $\alpha=0.01$

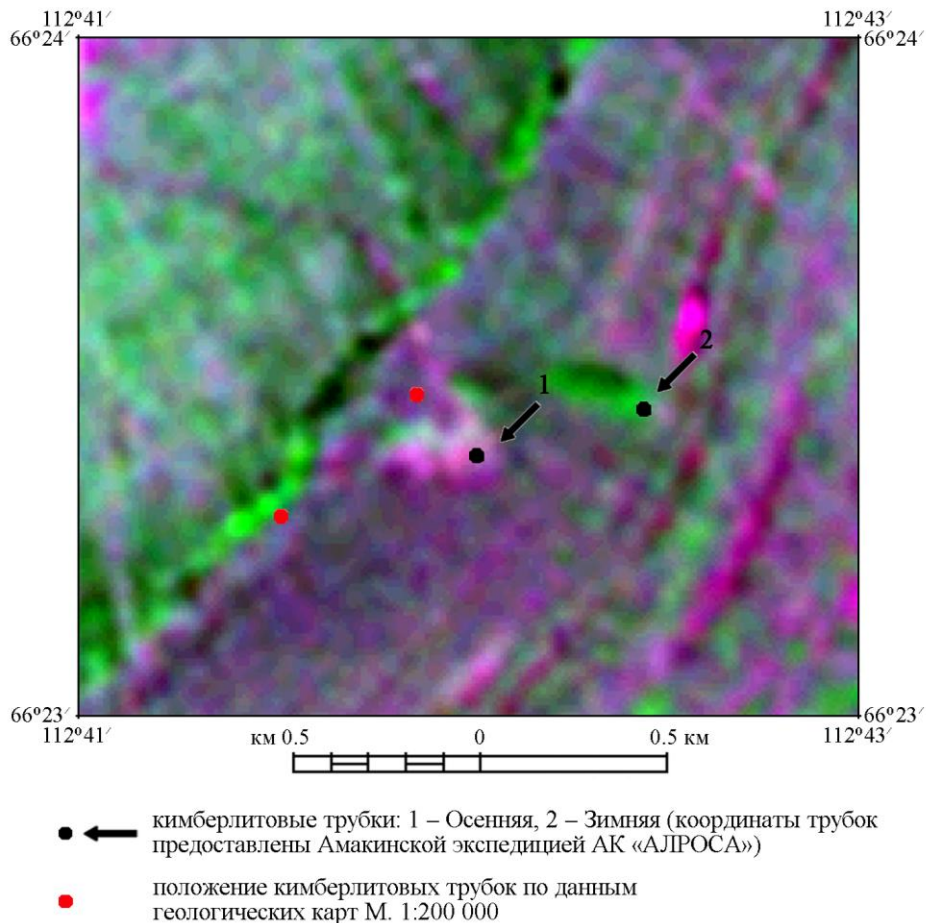


Рис. 3.8. Результаты обработки в цветовой модели RGB 4-го (0.76–0.90 мкм), 5-го (1.55–1.75 мкм) и 7-го (2.08–2.35 мкм) каналов KC LANDSAT 7 ETM+ участка расположения кимберлитовых трубок Осенняя, Зимняя Далдынского кимберлитового поля

По результатам обработки яркостных характеристик кимберлитовых трубок, кустов трубок и «пустых» площадей с целью определения значимости различий яркости в различных диапазонах установлены статистически достоверные различия между алмазоносными кимберлитовыми телами и вмещающими породами в каналах 4 (0.76–0.90 мкм), 5 (1.55–1.75 мкм), 7 (2.08–2.35 мкм) KC LANDSAT 7 ETM+.

Важной закономерностью является то, что среднее значение спектральной яркости алмазоносных кимберлитовых трубок выше, чем среднее значение «пустых» площадей не содержащие кимберлитовых тел.

Основываясь на полученных результатах, подобран алгоритм обработки цифровых материалов KC LANDSAT 7 ETM+ в цветовой модели RGB в каналах 4 (0.76–0.90 мкм), 5 (1.55–1.75 мкм), 7 (2.08–2.35 мкм) для выделения аномалий, соответствующих алмазоносным кимберлитовым телам открытого типа на фоне вмещающих пород. С учетом разрешающей способности используемых в работе космических снимков площадь одного пиксела в основных спектральных каналах соответствует 0.08 га. Площадь отдельной кимберлитовой трубки на исследованной территории составляет в среднем

0.3 – 3 га (исключение составляет только трубка Ленинградская – 9.4 га). С учетом околотрубочной зоны метасоматически измененных пород площадь выделенной аномалии составляет 1 – 12 га. Данные аномалии представлены ярко зеленым цветом и выделяются на фоне вмещающих пород различного сочетания фиолетовых и зеленых оттенков. Аномалии, соответствующие разрабатываемым кимберлитовым трубкам, представлены в красных оттенках в цветовой модели RGB в каналах 4, 5, 7 КС LANDSAT 7 ETM+ (рис. 3.9).

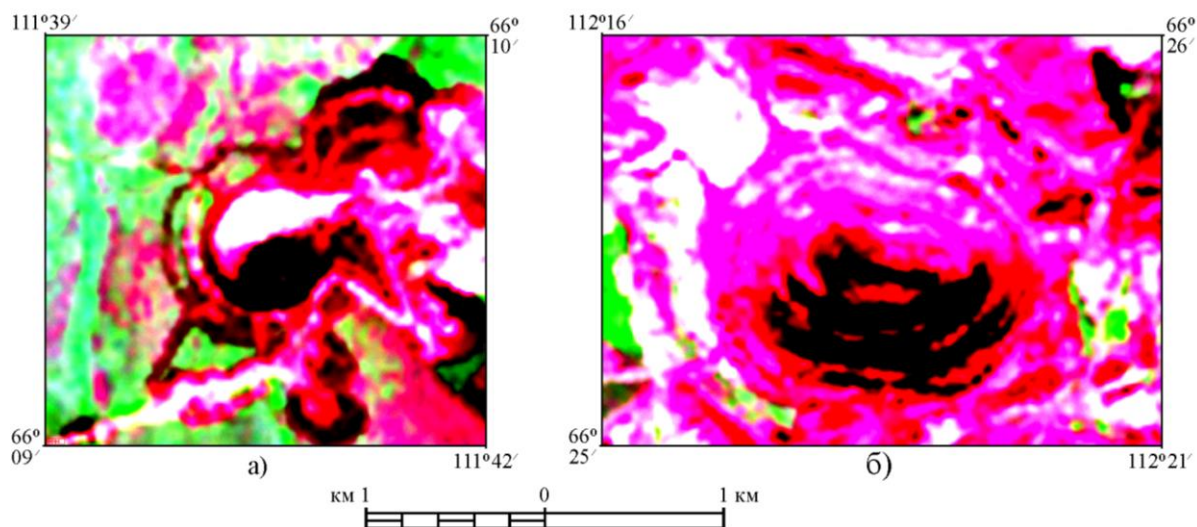


Рис. 3.9. Результаты обработки в цветовой модели RGB 4-го (0.76–0.90 мкм), 5-го (1.55–1.75 мкм) и 7-го (2.08–2.35 мкм) каналов КС LANDSAT 7 ETM+ разрабатываемых кимберлитовых трубок Сытыканская (а) и Удачная (б)

Характерно, что в пределах каждой отдельно взятой «пустой» площади выборка является однородной: яркость по всей совокупности пикселов распределена в соответствии с нормальным законом (рис. 3.10, 3.11). Площади, относящиеся к классу «пустых», варьируют в пределах 87 – 158 га. В связи с этим при сканировании исследуемой территории на наличие кимберлитовых трубок методом «скользящего окна» предлагается применять размер окна в 100 га (1 км x 1 км). В этом случае при отсутствии в пределах «окна» кимберлитов и метасоматитов из околотрубочного пространства выборка по яркости в данном спектральном диапазоне будет однородной, а при наличии кимберлитов, отличающихся в данном диапазоне яркости от вмещающих пород, в пределах «окна» возникнет аномалия площадью порядка 1 – 12 га, которая и будет обнаружена.

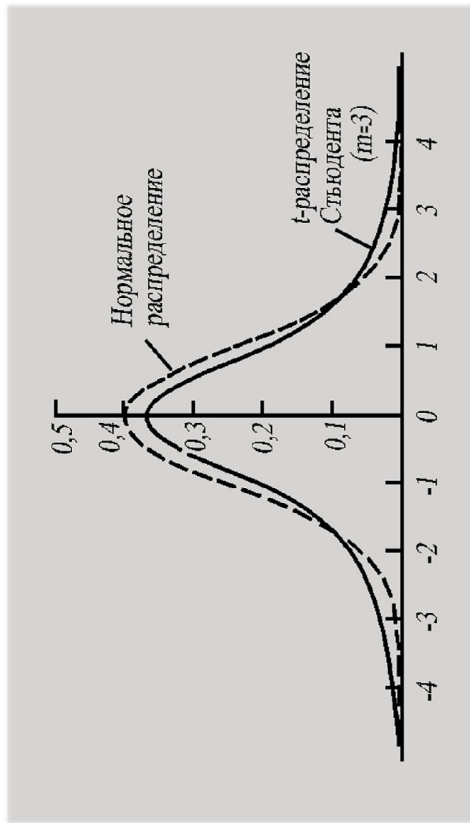
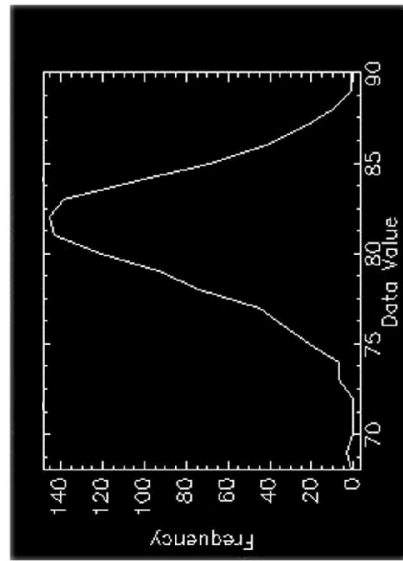


Рис. 3.10.  $t$ -распределение Стьюдента с  $m$  степенями свободы. Сравнение со стандартизированным нормальным распределением (по Корн Г. и др., 1974, с.622)

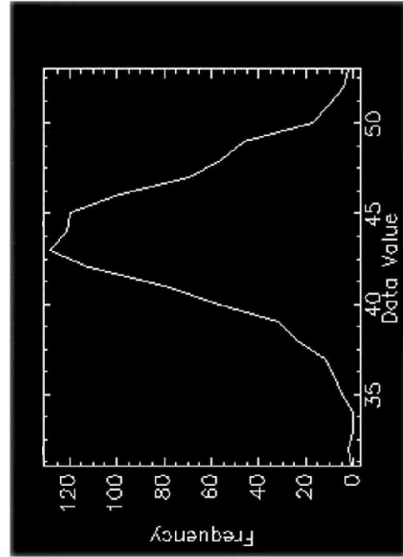
Рис. 3.11. Гистограммы распределения яркости «пустых» площадей, на которых по геолого-геофизическим данным отсутствуют кимберлитовые тела

- а) площадь IV – 86,64 га; канал 4 (0,76–090 мкм) KC LANDSAT 7 ETM+ в пределах участка Q-49-XVI-067,068
- б) площадь VIII – 80,64 га; канал 7 (2,08–2,35 мкм) KC LANDSAT 7 ETM+ в пределах участка Q-49-XVI-067
- в) площадь XIII – 133,68 га; канал 5 (1,55–1,75 мкм) KC LANDSAT 7 ETM+ в пределах участка Q-49-XVII-058,070

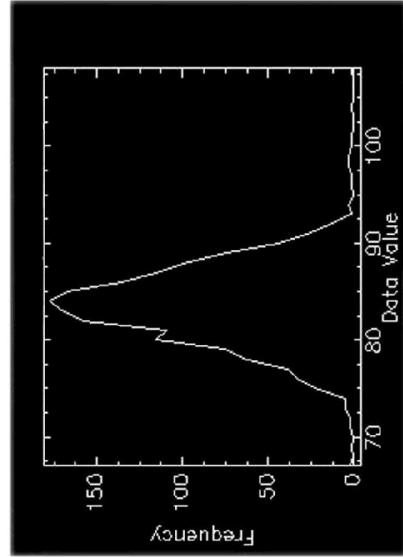
Data Value – значение яркости; Frequency – частота встречаемости



а)



б)



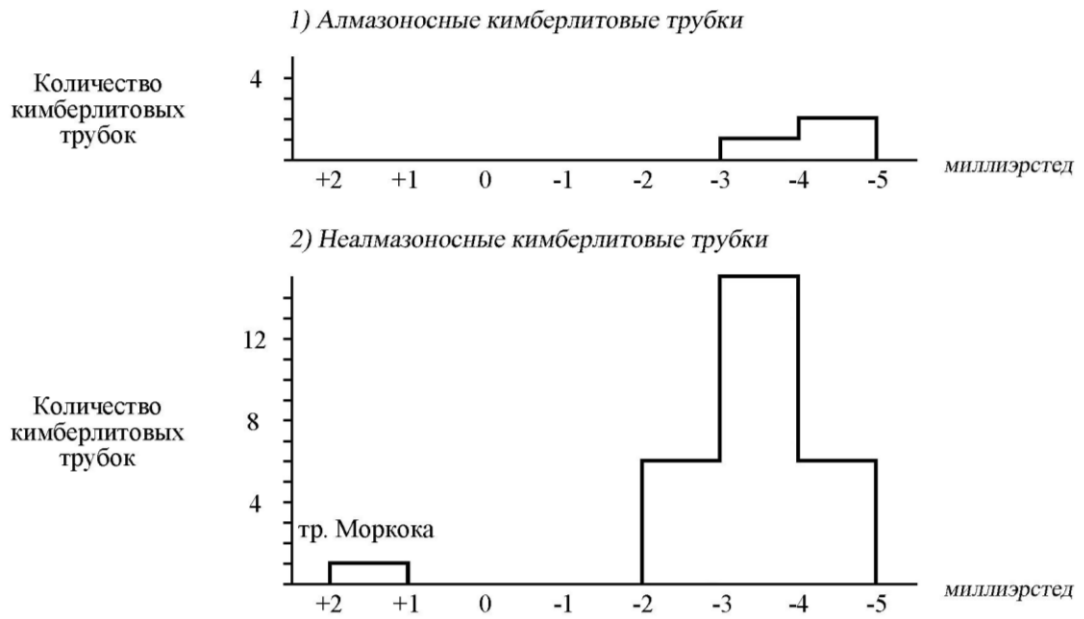
в)

На представленных рисунках 3.3, 3.7, 3.8 показаны кимберлитовые трубки по данным геологических карт М. 1:200 000, положение которых отличается от истинного. Таким образом, по материалам космической съемки, используя комбинации каналов 4, 5, 7 при синтезе изображения, можно более достоверно указывать положение кимберлитовых трубок. Ограничением предложенного метода выявления аномалий по яркостным характеристикам, соответствующих кимберлитовым трубкам, является наличие перекрывающих рыхлых отложений мощностью более пяти метров, наличие траппов и малый размер площади самих кимберлитовых трубок (менее 0.3 га). В последнем случае площадь аномалии с учетом околотрубочной зоны метасоматически измененных пород должна составить менее 1 га, и ее трудно диагностировать по яркости в связи с техническими характеристиками КС LANDSAT 7 ETM+.

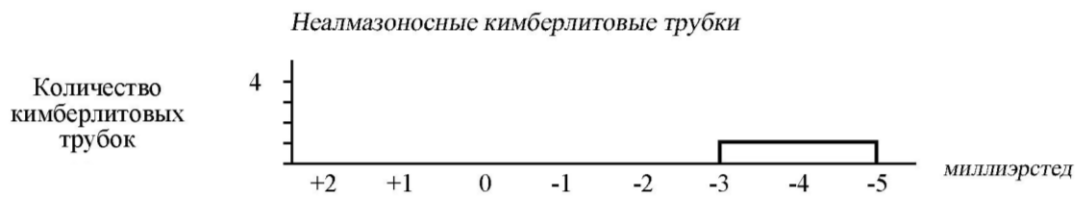
Ранее предложенная методика также была апробирована при выделении перспективных участков для поиска нефтяных месторождений на площади Лено-Анабарского прогиба и Оленекской зоны дислокаций на основе анализа гравиметрических, магнитных и многозональных космических данных. По результатам дешифрирования космических снимков также установлено, что среднее значение спектральной яркости нефтегазоносных структур выше, чем среднее значение пустых структур (Миловский и др., 2015).

Для исследований особенностей распределения кимберлитовых тел в гравитационном и магнитном полях использовались карты аномального магнитного поля (М. 1:200 000) и гравиметрические карты (М. 1:1 000 000). По результатам исследований распределения кимберлитовых тел в магнитных и гравитационных полях алмазоносные кимберлитовые трубки открытого типа характеризуются диапазонами значений  $-2 \div -5$  мЭ и  $-10 \div -15$  мГал (рис. 3.12, 3.13). В диапазон значений магнитного поля  $-2 \div -5$  мЭ включены кимберлитовые трубки, как с промышленными содержаниями алмазов, так и трубки с содержанием алмазов  $\sim 20$  мг/м<sup>3</sup>. Выделенные диапазоны значений магнитного и гравитационного полей могут использоваться в качестве реперных для прогноза алмазоносных кимберлитовых тел на перспективных площадях. В случае «перекрытых» трубок эти диапазоны составляют  $-1 \div -4$  миллиэрстед,  $-10 \div -25$  миллигал, что объясняется естественным влиянием перекрывающих пород.

Геотип “открытое” (площади развития терригенно-карбонатных пород нижнего палеозоя и верхнего протерозоя с маломощным элювиально-делювиальным покровом до 3 м)



Геотип “полуоткрытое” (площади перекрытые терригенными осадками верхнего палеозоя и мезо-кайнозоя мощностью до 20 м)



Геотип “перекрытое” (площади преимущественного развития пород трапповой формации, залегающих на перекрывающих кимберлиты терригенных отложениях)

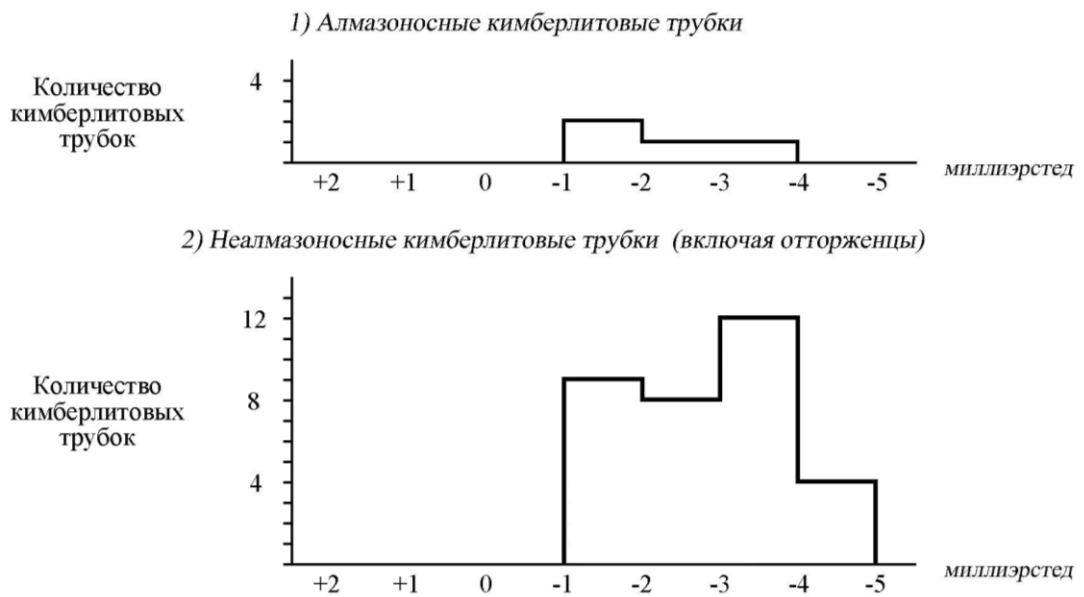
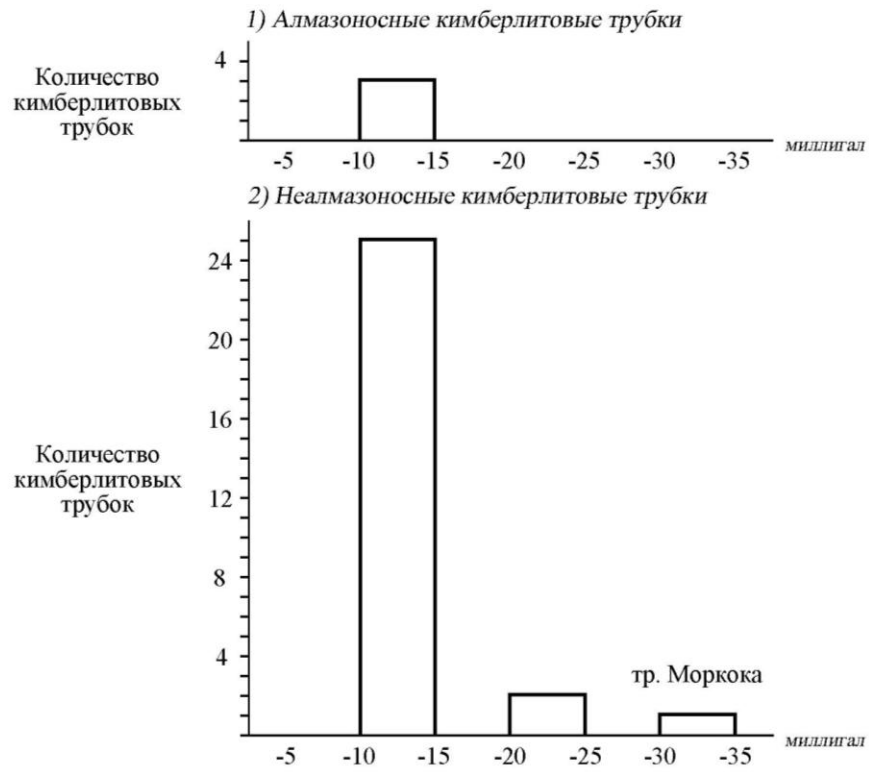
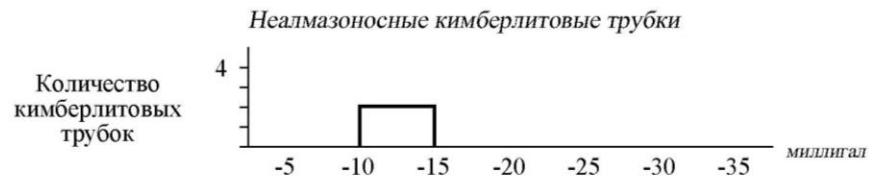


Рис. 3.12. Распределение кимберлитовых тел в магнитном поле (геотип трубки в соответствии с классификацией АК «АЛРОСА»)

Геотип “открытое” (площади развития терригенно-карбонатных пород нижнего палеозоя и верхнего протерозоя с маломощным элювиально-делювиальным покровом до 3 м)



Геотип “полуоткрытое” (площади перекрытые терригенными осадками верхнего палеозоя и мезо-кайнозоя мощностью до 20 м)



Геотип “перекрытое” (площади преимущественного развития пород трапповой формации, залегающих на перекрывающих кимберлиты терригенных отложениях)

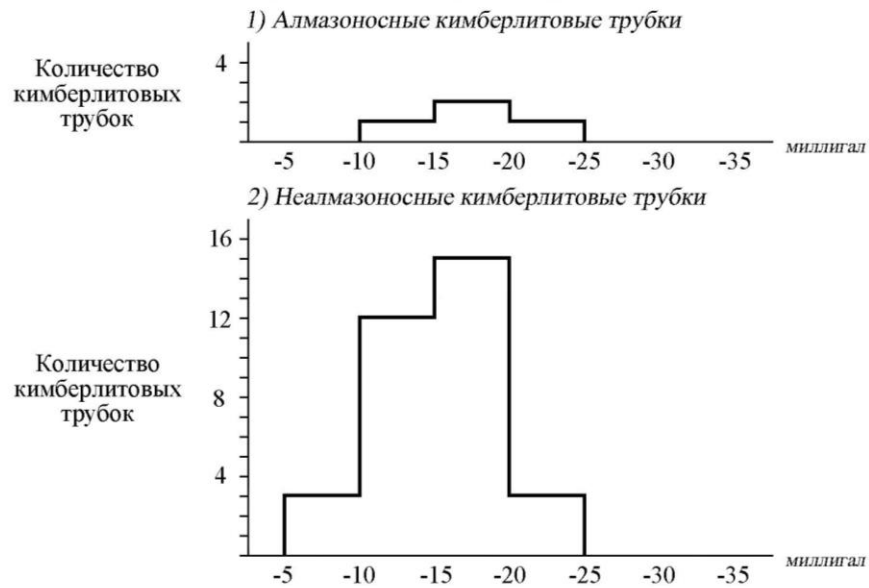


Рис. 3.13. Распределение кимберлитовых тел в гравитационном поле (геотип трубки в соответствии с классификацией АК «АЛРОСА»)



Изложенные выше данные позволяют наметить последовательность обработки материалов дистанционного зондирования, гравиметрических и магнитометрических данных для выявления алмазонасных кимберлитовых трубок открытого типа. Сначала на поисковой площади устанавливаются области, в которых значения гравитационного и магнитного полей составляют, соответственно,  $-10 \div -15$  мГал и  $-2 \div -5$  мЭ. Затем, в пределах, выделенных для опоскования областей, проводится компьютерная обработка космических снимков и по яркостным характеристикам в комбинациях спектральных каналов 4, 5, 7 сканированием методом «скользящего окна» выявляются аномалии, соответствующие конкретным трубкам и кустам трубок. Для выявления трубок закрытого типа должны привлекаться в первую очередь результаты структурного анализа, включающие данные по региональным разломам фундамента, кольцевым и дугообразным разломам, фиксирующим положительные и отрицательные морфоструктуры, а также результаты дешифрирования зон повышенной изотропной трещиноватости.

#### **Глава 4. Крупномасштабный прогноз кимберлитовых трубок на основе ГИС-технологий и комплекса дистанционных методов**

Для апробации предложенной методики выявления аномалий, соответствующих кимберлитовым трубкам, привлечены структурно-прогнозные схемы кимберлитолокализующих дислокаций, составленные Милашевым В.А. с использованием методики структурного анализа изотропной мегатрещиноватости. Выявление структурно-текстурного рисунка линеаментов является одним из приоритетных направлений дистанционного зондирования при выявлении границ кимберлитовых полей и кустов кимберлитовых трубок.

При разработке концепции использования геоинформационных технологий (ГИС-технологий) для крупномасштабного прогнозирования алмазонасных кимберлитовых трубок комплексом дистанционных методов в качестве эталонных объектов взяты Алакит-Мархинское и Далдынское кимберлитовые поля Далдыно-Алакитского района. Концепция использования ГИС-технологий заключается в комплексном использовании геофизических и космических методов в сочетании с анализом изотропной трещиноватости горных пород при крупномасштабном прогнозировании алмазонасных кимберлитовых трубок.

Применение геоинформационных технологий при прогнозировании алмазонасных кимберлитовых трубок позволяет осуществить совместный анализ разнотипных геологических, геофизических и космических данных, привязанных к одним и тем же точкам геопространства. В результате пространственного совмещения этих данных появляется возможность получения принципиально новой информации на основе синтеза и переинтерпретации имеющихся результатов. При исследовании юго-западной части Алакит-Мархинского кимберлитового поля Р.Ф. Салиховым и др. (Салихов, 2004, 2008) с помощью ГИС-технологий выполнен анализ структурно-тектонических характеристик фундамента и осадочного чехла на основе сейсмических и магнито-гравиметрических данных, отмечена приуроченность кимберлитовых тел к отрицательным синформным пликативным структурам платформенного чехла в местах их пересечения или совпадения с разломами. Указанными авторами изучалась основная кимберлитоконтролирующая зона глубинных разломов северо-восточного простирания, а также ортогональная к ней северо-западная и диагональная субширотно-субмеридиональная системы; с помощью ГИС-процедур выявлялись локальные алмазоперспективные участки.

Исследованиями В.А. Милашева установлена тесная связь пространственного распределения кимберлитовых тел с блоками земной коры, характеризующимися

изотропной по ориентировке тектонической трещиноватостью (Милашев, 1971, 1979, 1997, 2003, 2007, 2008, 2010). Результаты анализа мегатрещиноватости позволяют строить структурные границы кимберлитовых полей вне зависимости от числа и размещения найденных диатрем, поэтому выделение таких участков дистанционным методом позволяет резко сокращать площади опоискования и повышать эффективность работ. В.А. Милашевым предложена следующая схема методики структурного анализа мегатрещиноватости:

1. На топокартах и аэрофотоснимках всей подлежащей структурному районированию территории проводят выделение значимых для анализа элементов (в первую очередь – водотоков и пр.).

2. Проводят анализ количественных соотношений различно ориентированных систем мегатрещиноватости и графически отражают их путем построения схем роз-диаграмм путем осреднения по 10-градусным интервалам наблюдаемой длины и ориентировки водотоков способом «скользящего окна».

3. Для среднемасштабных схем оптимальная площадь элементарной ячейки составляет около  $100 \text{ км}^2$  (1/16 часть территории сдвоенного листа топокарты масштаба 1:100 000), а шаг перемещения ее около 5 км (1/8 стороны листа такой карты).

4. На полученной схеме роз-диаграмм визуально выделяют участки (блоки) с близкими по длине всесторонне ориентированными лучами («изотропная ориентировка») и участки, существенно отличающиеся по направлению главных, числу, размеру (протяженности) и ориентировке второстепенных лучей диаграмм («анизотропная ориентировка»).

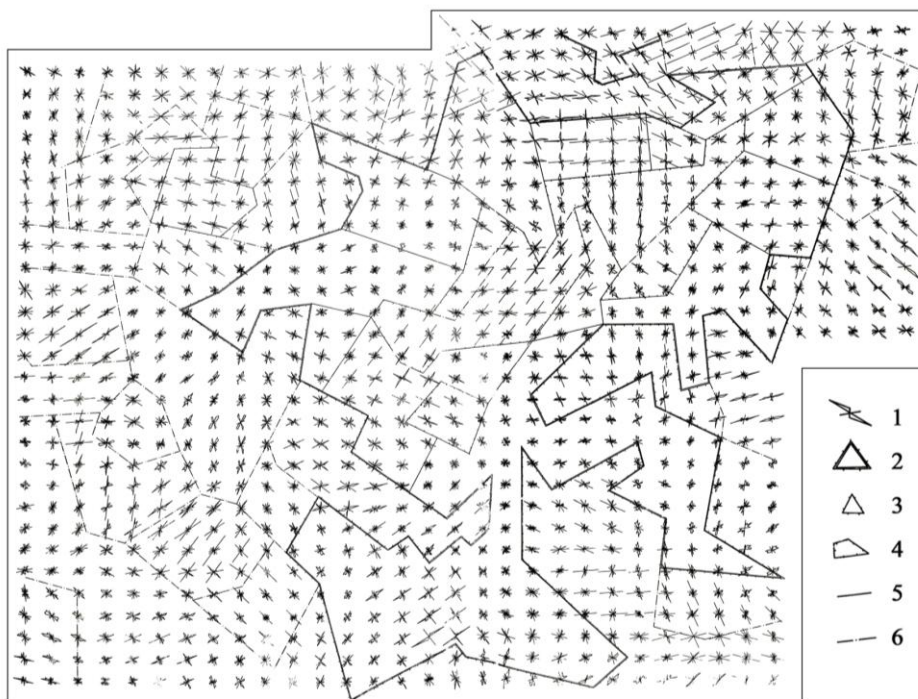
5. В целях минимизации случайных флюктуаций правомерным следует считать выделение участков (блоков) каждого типа лишь в тех случаях, когда они включают не менее трех однотипных роз-диаграмм, не лежащих на одной прямой.

6. Участки (блоки) с изотропными системами трещиноватости признаются благоприятными структурами и могут быть рекомендованы для поисков кимберлитов, особенно при наличии дополнительных минералогических и геофизических данных.

На территории Якутской провинции блоки с изотропной трещиноватостью вмещают 96 % найденных диатрем, что позволяет принимать контуры таких блоков в качестве структурных границ кимберлитовых полей. Площади блоков с изотропными системами трещиноватости обычно не превышают 10 % изучаемых территорий и поэтому после выделения их дистанционным методом открывается возможность сокращать площади опоискования и повышать эффективность работ. Отмечается также, что, несмотря на успехи в определении структурных границ кимберлитовых полей, остаются

невьясненными причины отсутствия проявлений кимберлитового магматизма в других аналогичных по типу трещиноватости блоках земной коры, а это препятствует аргументированному выделению категории «кимберлитоносных» среди общей массы блоков с изотропной по ориентировке мегатрещиноватостью.

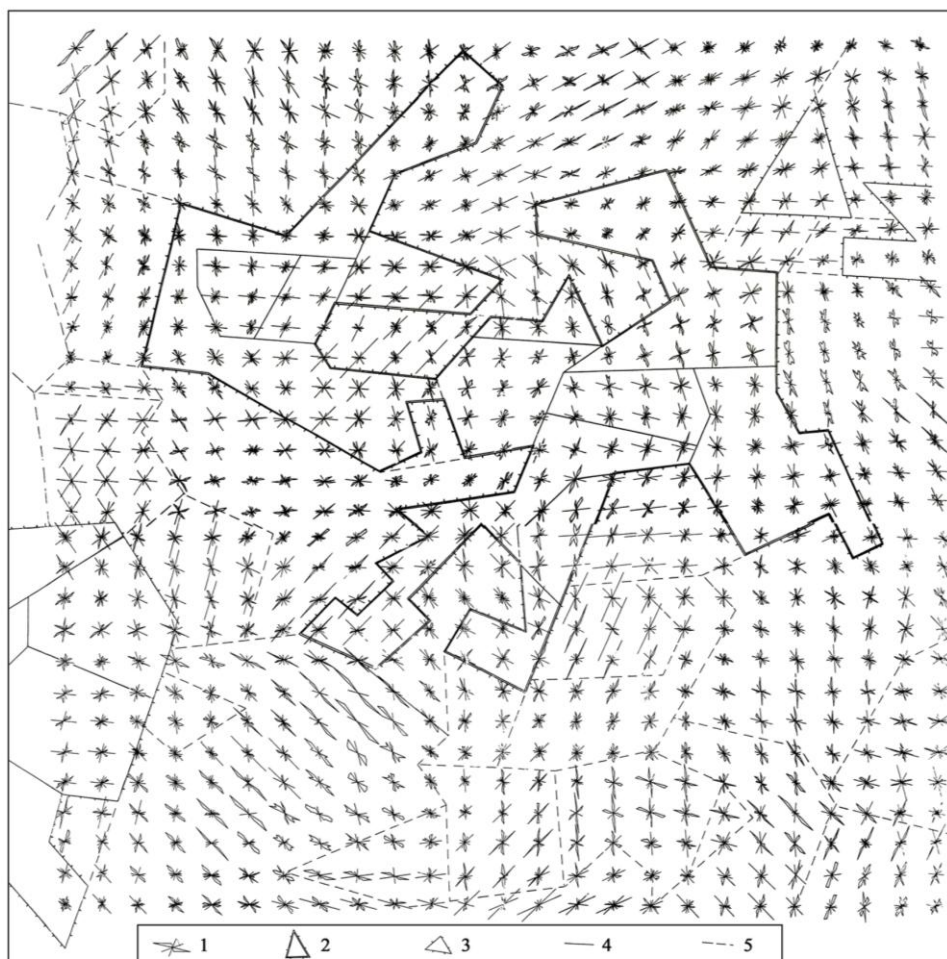
Метод структурного анализа мегатрещиноватости позволил В.А. Милашеву установить, что блоки с изотропной по ориентировке трещиноватостью, в пределах которых располагаются Далдынское и Алакит-Мархинское кимберлитовые поля, обладают четко выраженным мозаичным строением. Последнее проявляется в том, что оба макроблока состоят из большого числа миниблоков, отличающихся от соседних структурным рисунком изотропной по ориентировке трещиноватости. Площадь миниблоков изменяется от нескольких десятков до первых сотен кв. км. Наиболее результативными приемами анализа мегатрещиноватости являются построение карт роз-диаграмм простираний, отражающих относительную протяженность систем трещин по различным направлениям (рис. 4.1, 4.2).



Использован метод «скользящего окна», интервал отсчетов 10°, площадь элементарной ячейки около 100 кв. м., шаг перемещения 2,3 км в меридиональном и 2,75 км в широтном направлении

- 1 – розы-диаграммы простираний тектонической трещиноватости
- 2 – границы макроблоков с изотропной по ориентировке трещиноватостью и установленными кимберлитовыми телами
- 3 – границы других блоков с изотропной по ориентировке трещиноватостью
- 4 – границы миниблоков («окон») с анизотропной трещиноватостью в пределах макроблока с установленными кимберлитовыми телами
- 5 – границы миниблоков, находящихся внутри «изотропного» макроблока и отличающихся между собой структурным рисунком изотропной по ориентировке трещиноватости
- 6 – границы анизотропных блоков, отличающихся по структурному рисунку трещиноватости

Рис. 4.1. Схема роз-диаграмм тектонической трещиноватости и структурного районирования Алакит-Мархинской площади (по Милашеву В.А., 1997)



Использован метод «скользящего окна», интервал отсчетов  $10^\circ$ , площадь элементарной ячейки около 100 кв. м., шаг перемещения 2,3 км в меридиональном и 2,75 км в широтном направлении

- 1 – розы-диаграммы простираний тектонической трещиноватости
- 2 – границы макроблоков с изотропной по ориентировке трещиноватостью и установленными кимберлитовыми телами
- 3 – границы других блоков с изотропной по ориентировке трещиноватостью
- 4 – границы миниблоков, находящихся внутри «изотропных» макроблоков и отличающихся между собой структурным рисунком изотропной по ориентировке трещиноватости
- 5 – границы анизотропных блоков, отличающихся по структурному рисунку трещиноватости

Рис. 4.2. Схема роз-диаграмм тектонической трещиноватости и структурного районирования Далдынской площади (по Милашеву В.А., 1997)

Карты роз-диаграмм служат основой для выделения площадей (блоков), различающихся по типу (изотропный, анизотропный) и структурному рисунку трещиноватости (рис. 4.3). Дистанционно выделяемые структурные элементы контролируют локализацию 75 % выходов кимберлитовых тел в Далдынском, и 80 % – в Алакит-Мархинском полях. Ведущую роль в локализации кимберлитов играют тройные и двойные «точки» (к тройным «точкам» относятся точки пересечения трех и более линейных дислокаций). Они контролируют размещение 43 % найденных диатрем, хотя суммарная площадь «точек» составляет лишь 14 % всей территории Далдынского и 9 % Алакит-Мархинского поля.



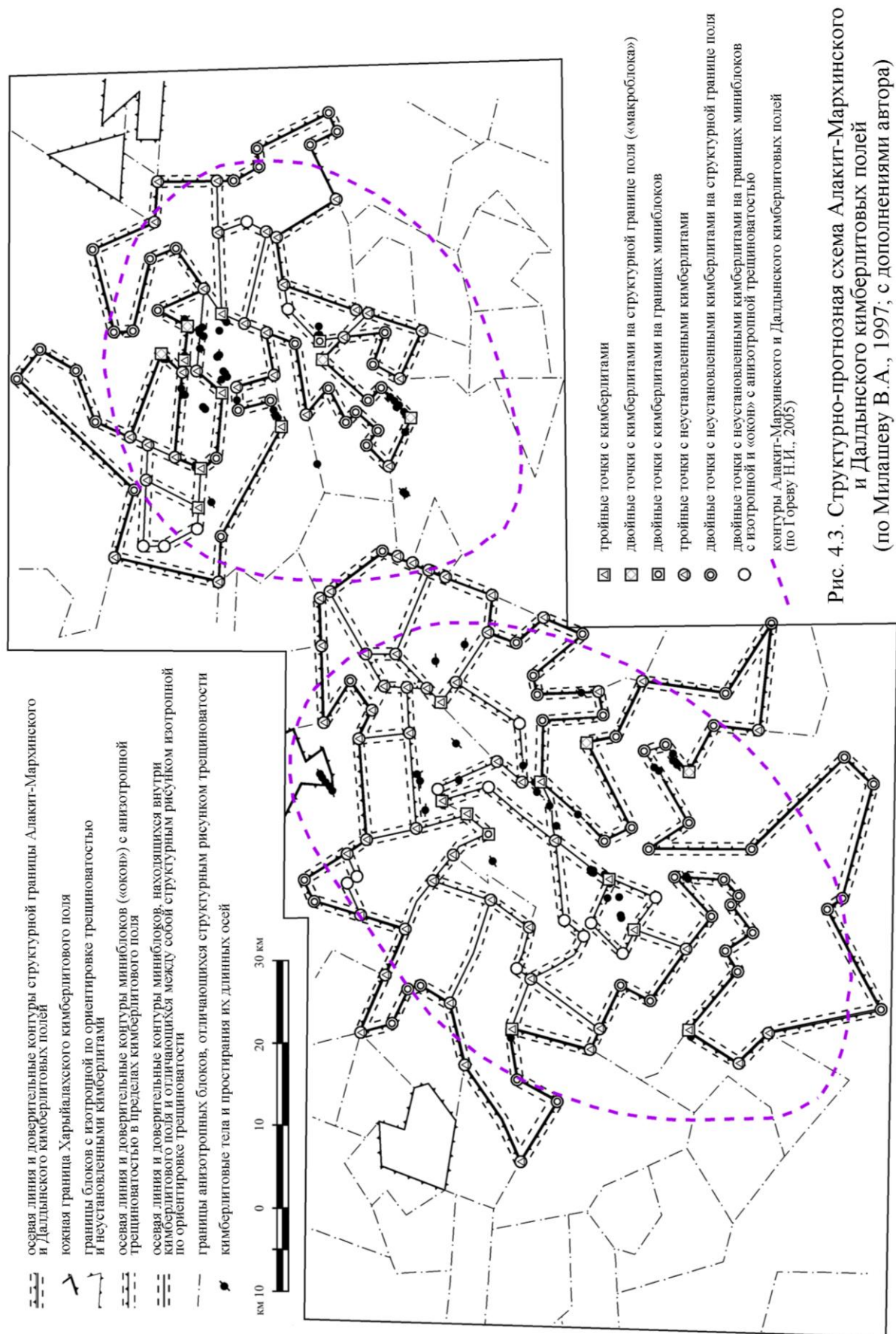


Рис. 4.3. Структурно-прогностическая схема Алакит-Мархинского и Далдынского кимберлитовых полей (по Миллашеву В.А., 1997; с дополнениями автора)

Для сравнения следует отметить, что при поисках месторождений углеводородов в осадочном чехле платформ, также активно используется дистанционное исследование зон трещиноватости над структурными ловушками. Согласно работам Д.М. Трофимова и др. (Трофимов, 2009, 2012; Малышев, 2009) космические методы дают возможность выявить широкий спектр разрывных нарушений, включая малоамплитудные дислокации, зоны трещиноватости и их современную подвижность; позволяют оценить степень раскрытости флюидоупоров и резервуаров. Фильтрационно-емкостные свойства карбонатных резервуаров определяются трещиноватостью, которая не всегда может быть установлена сейсморазведкой, но с высокой эффективностью регистрируется дистанционными методами. Мелкие дизъюнктивные дислокации сопровождаются широкими зонами трещиноватости от десятков метров до нескольких километров, образующими взаимосвязанную систему с пликативными деформациями чехла. Именно через разрывные нарушения в ловушки поступают мигрирующие углеводороды.

При работе с пространственными данными автором использована геоинформационная система ArcGIS ver. 10., в которую включены различные виды карт и результаты исследования по мегатрещиноватости, выполненные В.А. Милашевым в пределах Алакит-Мархинского и Далдынского кимберлитовых полей. Возможность проводить обработку космических снимков в ENVI, с последующей интеграцией их в ArcGIS, позволила провести необходимые исследования.

Анализ трещиноватости на площади эталонных кимберлитовых полей проводился средствами, имеющимися в программных продуктах ENVI и Adobe Photoshop. За основное направление были взяты линеаменты, совпадающие с «генеральным» направлением, определяемым ориентировкой длинных осей кимберлитовых тел с азимутами 60-75° (Горев, 2004, 2005), также проводился поиск оперяющих разломов, отклоняющихся от «генерального» направления на угол до 30-40° и поиск линеаментов ортогональных к «генеральному» направлению.

На основе ГИС-технологий в пределах Алакит-Мархинского и Далдынского кимберлитовых полей для апробации предложенного метода комплексного использования материалов космической съемки, гравиметрических и магнитометрических данных для выявления алмазоносных кимберлитовых трубок исследованы точки тройного сочленения кимберлитолокализующих дислокаций, установленные Милашевым В.А. по методике структурного анализа изотропной мегатрещиноватости. Всего обследовано 88 тройных «точек», в том числе 14 «точек» с установленными кимберлитами и 74 «точки», на которых кимберлитовые тела к настоящему времени не выявлены. С учетом разрешающей способности космического снимка и технических характеристик программных продуктов

их обработки каждая из тройных «точек» представляет собой небольшую площадь земной поверхности ограниченную 1-2' по широте с севера на юг и 2-4' по долготе с запада на восток.

При определении перспективности тех или иных тройных «точек» на наличие кимберлитовых тел, кроме значений аномалий силы тяжести и интенсивности магнитного поля, учитывалось отсутствие траппов (рис. 4.4). Если значения аномалий силы тяжести ( $\Delta g$ , мГал) и интенсивности магнитного поля ( $\Delta T$ , мЭ) по этим объектам находятся в интервале  $-10 \div -15$  мГал и  $-2 \div -5$  мЭ соответственно, то тройные «точки» относятся к объектам прогноза первой очереди и на них необходимо проведение наземных заверочных работ и детального опробования. К объектам прогноза второй очереди относятся тройные «точки», на которых перспективные по космическим данным объекты соответствуют эталонным значениям хотя бы одному из двух геофизических параметров  $\Delta g$  или  $\Delta T$ .

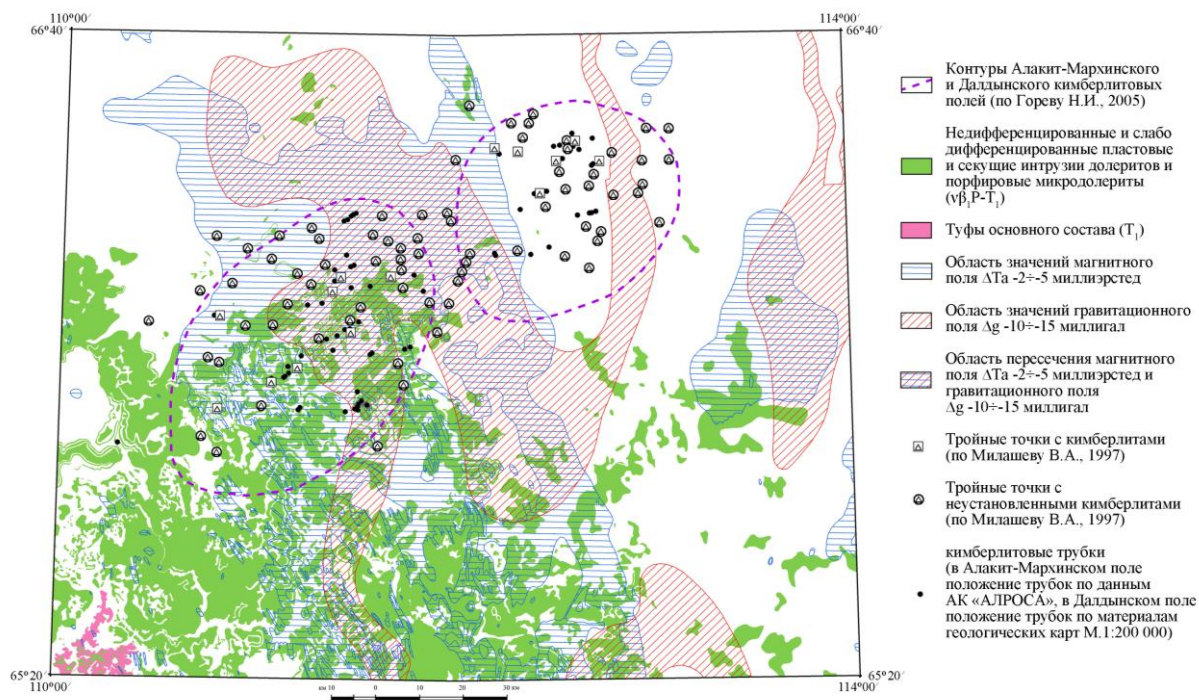


Рис. 4.4. Соотношение тройных точек с траппами и значения гравитационного и магнитного полей благоприятные для поисков кимберлитовых тел на площадь Q-49-XV-XVIII, XXI-XXIV

В пределах тройных «точек» по результатам обработки космических данных в диапазонах: 0.76-0.90 мкм, 1.55-1.75 мкм, 2.08-2.35 мкм КС LANDSAT 7 ETM+ сканированием методом «скользящего окна» выявлены объекты, аналогичные эталонным алмазонасным трубкам НИИГА и Маршрутная (Ишмухаметова, 2014). Данные объекты представлены аномалиями площадью 1 – 12 га, соответствующие как установленным кимберлитовым телам открытого типа, так и предполагаемым перспективным участкам на наличие кимберлитовых тел.



В результате исследований установлены перспективные участки для выявления кимберлитовых трубок, выполнена разбраковка их по степени перспективности (Ишмухаметова, 2015). В пределах шести тройных «точек» выявлены перспективные участки, что подтверждает эффективность комплексирования методов дистанционного анализа кимберлитолокализующих дислокаций (рис. 4.5).



На рис. 4.6 – 4.11 представлены результаты обработки участков тройных «точек» с установленными кимберлитами и с неустановленными кимберлитами в цветовой модели RGB 4-го (0.76–0.90 мкм), 5-го (1.55–1.75 мкм) и 7-го (2.08–2.35 мкм) каналов КС LANDSAT 7 ETM+. Перспективные участки на наличие кимберлитовых тел представлены аномалиями ярко зеленого цвета, выделяющиеся на фоне различного сочетания фиолетовых и зеленых оттенков.

В Алакит-Мархинском поле перспективные участки установлены в пределах «точек» №№ 4 и 5. Тройная «точка» № 4 расположена в центральной части Алакит-Мархинского поля, с ней связаны известные кимберлитовые трубки – Богатых, Кисмет, Геохимическая. В пределах «точки» № 4 выявлено до семи перспективных участков, три из которых наиболее предпочтительны по совокупности геолого-структурных, геофизических и космических факторов: № 4-5, № 4-6, № 4-7 (рис. 4.6). В пределах тройной «точки» № 5, расположенной в западной части Алакит-Мархинского поля, имеется только одна кимберлитовая трубка – Славутич и установлено пять перспективных

участков, из которых наибольший интерес представляют участки №№ 5-1, 5-2 и 5-3 (рис. 4.7).

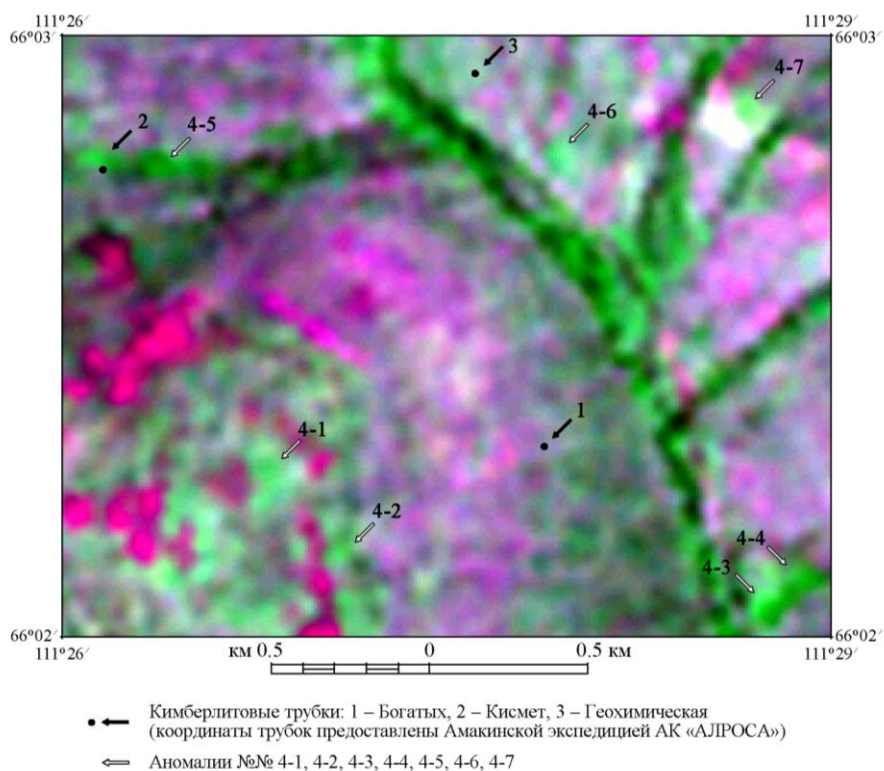


Рис. 4.6. Результаты обработки в цветовой модели RGB 4-го (0.76–0.90 мкм), 5-го (1.55–1.75 мкм) и 7-го (2.08–2.35 мкм) каналов КС LANDSAT 7 ETM+ участка тройной точки № 4 с установленными кимберлитами (см. рис. 4.5)

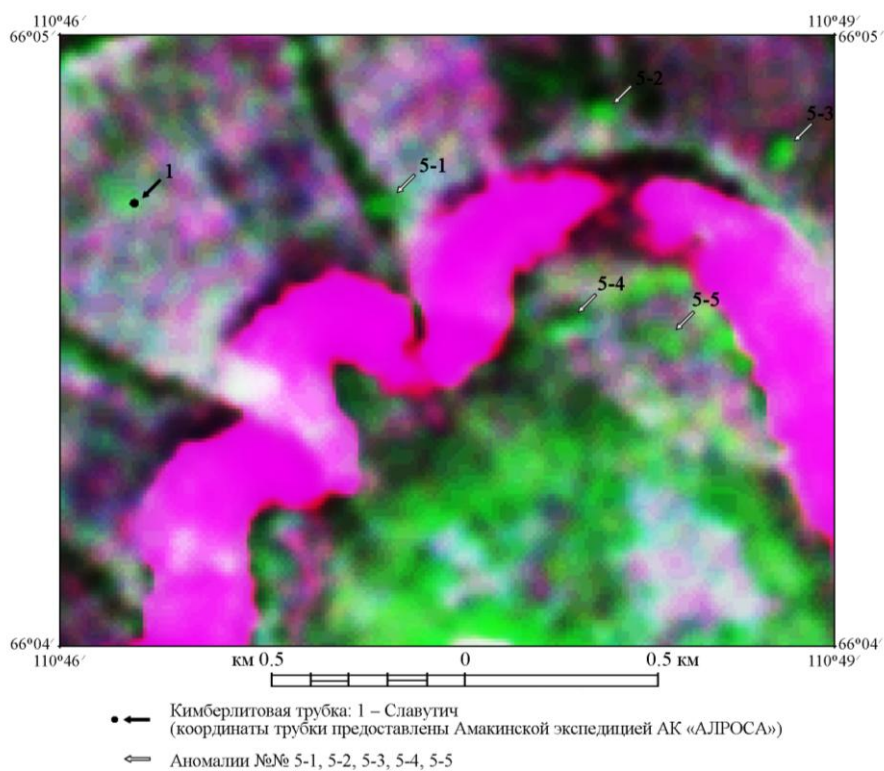


Рис. 4.7. Результаты обработки в цветовой модели RGB 4-го (0.76–0.90 мкм), 5-го (1.55–1.75 мкм) и 7-го (2.08–2.35 мкм) каналов КС LANDSAT 7 ETM+ участка тройной точки № 5 с установленными кимберлитами (см. рис. 4.5)

В Далдынском поле перспективные участки на кимберлиты выявлены в пределах тройных «точек» №№ 9 и 11. В тройной «точке» № 9 находятся три линейно расположенные кимберлитовые трубки: Академическая, Аэрофотосъемочная и Якутская, и перспективный участок № 9-1 (рис.4.8).

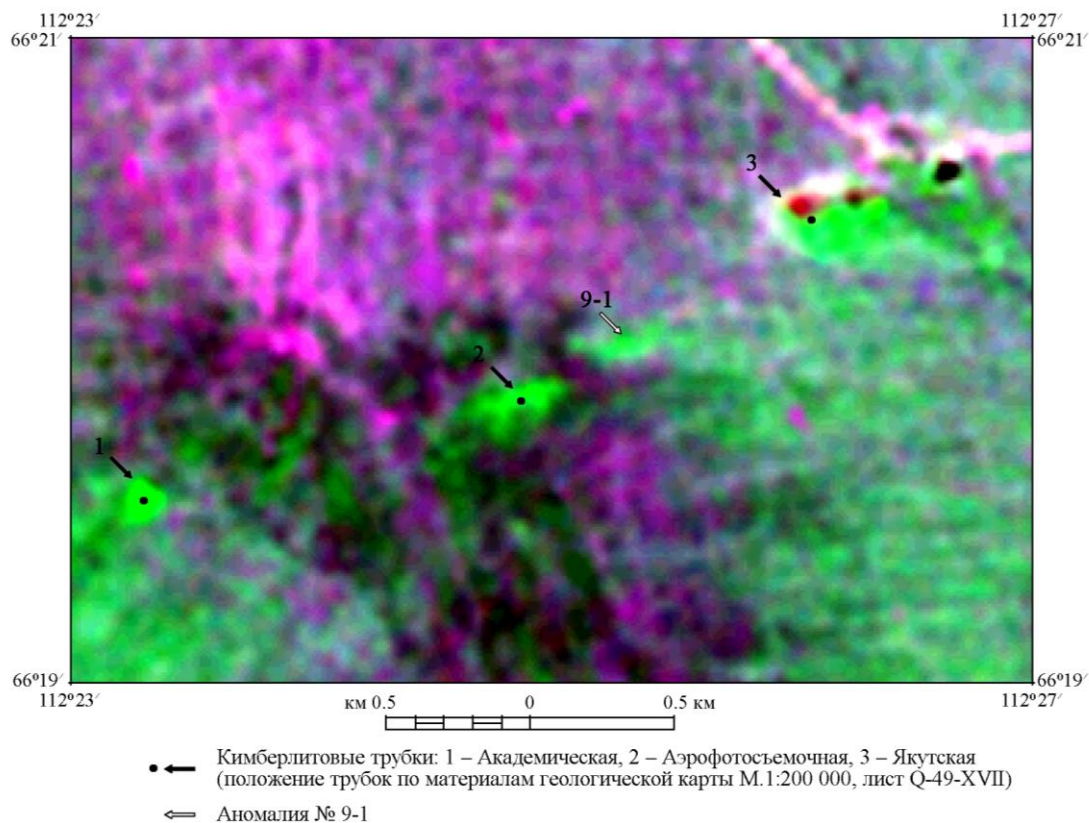


Рис. 4.8. Результаты обработки в цветовой модели RGB 4-го (0.76–0.90 мкм), 5-го (1.55–1.75 мкм) и 7-го (2.08–2.35 мкм) каналов KC LANDSAT 7 ETM+ участка тройной точки № 9 с установленными кимберлитами (см. рис. 4.5)

В тройной точке № 11 имеется трубка Зимняя, восточнее которой выявлены три участка с примерно равной перспективностью №№ 11-1, 11-2, 11-3 (рис. 4.9). Следует отметить, что тройные «точки» №№ 9 и 11 характеризуются положительными значениями магнитного поля.

При рассмотрении тройных «точек», в пределах которых кимберлитовые тела к настоящему моменту не обнаружены, следует выделить «точки» №№ 43 и 78. В точке № 43, расположенной на севере Алакит-Мархинского поля, рядом с кустом эталонных трубок НИИГА и Маршрутная, выявлено до шести перспективных участков, из которых наиболее предпочтительными являются три: №№ 43-1, 43-2, 43-3 (рис. 4.10). В Далдынском поле в тройной «точке» № 78 обнаружен находящийся в русле ручья один перспективный участок №78-1 (рис. 4.11).



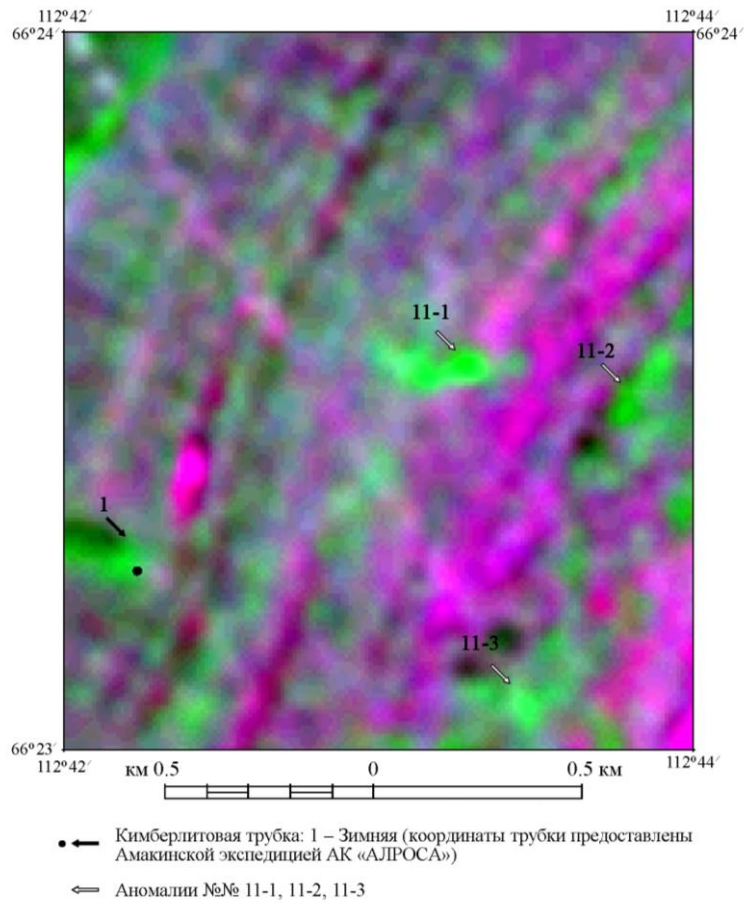


Рис. 4.9. Результаты обработки в цветовой модели RGB 4-го (0.76–0.90 мкм), 5-го (1.55–1.75 мкм) и 7-го (2.08–2.35 мкм) каналов KC LANDSAT 7 ETM+ участка тройной точки № 11 с установленными кимберлитами (см. рис. 4.5)

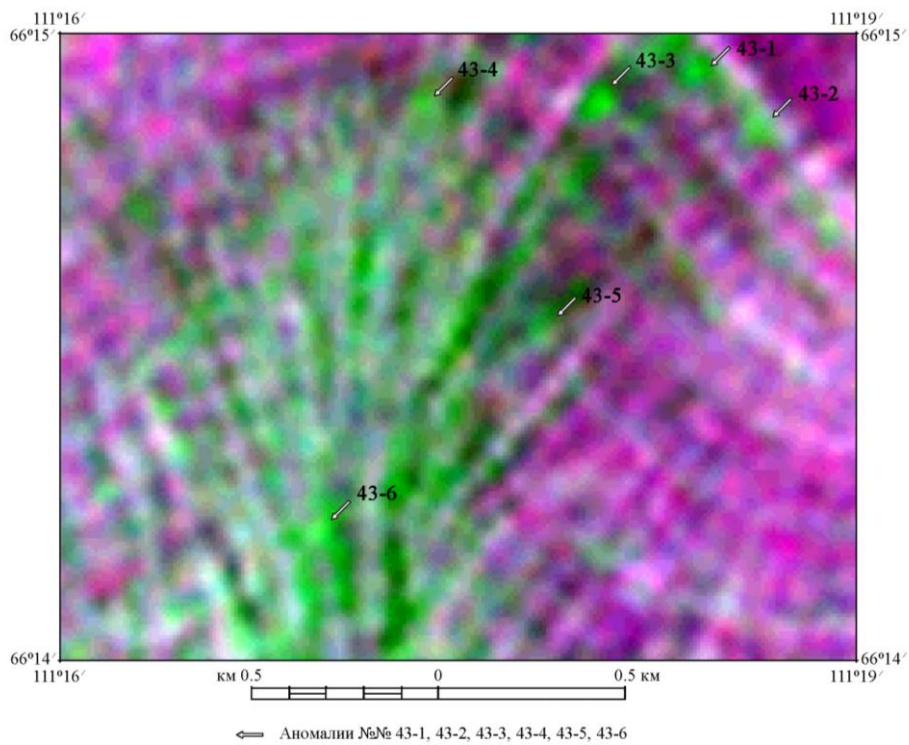


Рис. 4.10. Результаты обработки в цветовой модели RGB 4-го (0.76–0.90 мкм), 5-го (1.55–1.75 мкм) и 7-го (2.08–2.35 мкм) каналов KC LANDSAT 7 ETM+ участка тройной точки № 43 с неустановленными кимберлитами (см. рис. 4.5)

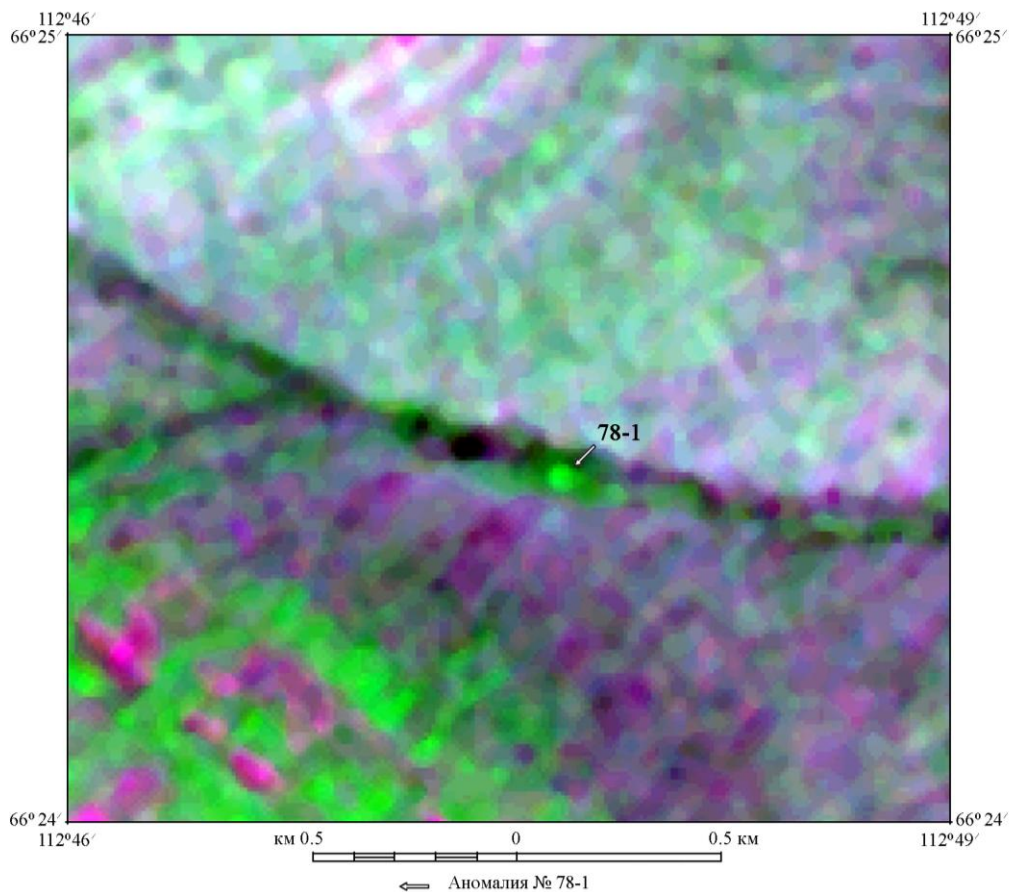


Рис. 4.11. Результаты обработки в цветовой модели RGB 4-го (0.76–0.90 мкм), 5-го (1.55–1.75 мкм) и 7-го (2.08–2.35 мкм) каналов КС LANDSAT 7 ETM+ участка тройной точки № 78 с неустановленными кимберлитами (см. рис. 4.5)

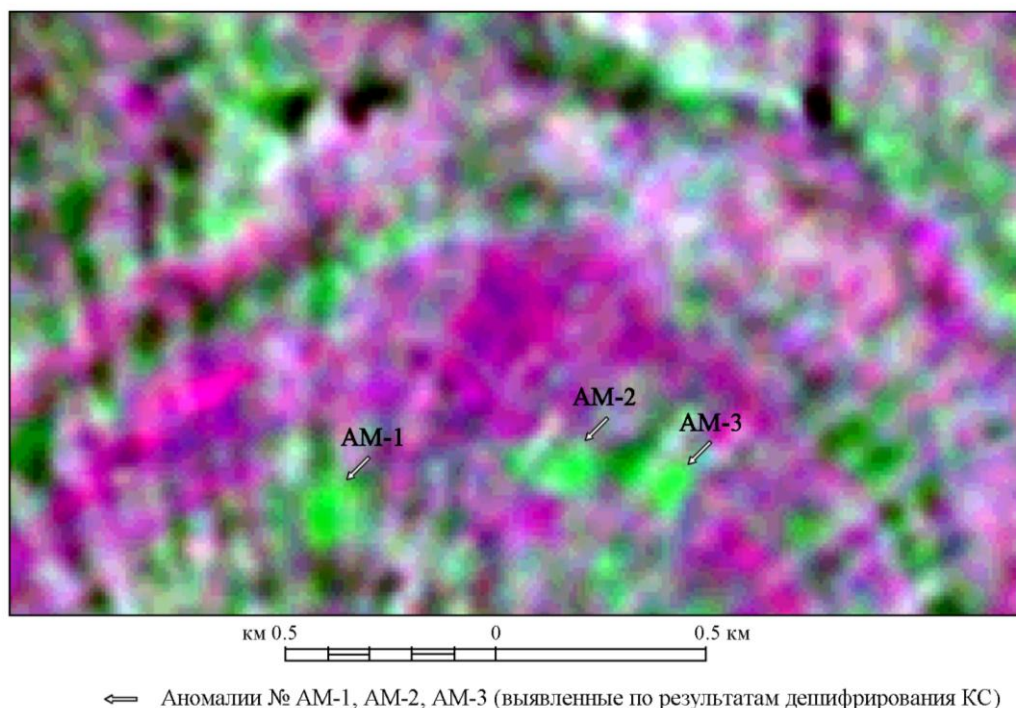


Рис. 4.12. Результаты обработки в цветовой модели RGB 4-го (0.76–0.90 мкм), 5-го (1.55–1.75 мкм) и 7-го (2.08–2.35 мкм) каналов КС LANDSAT 7 ETM+ перспективного участка к северу от Алаakit-Мархинского кимберлитового поля

К северу от Алакит-Мархинского кимберлитового поля в выделенных диапазонах значений  $\Delta g$ ,  $\Delta T$  (-10÷-15 миллигал, -2÷-5 миллиэрстед) по яркостным характеристикам в цветовой модели RGB 4-го (0.76 - 0.90 мкм), 5-го (1.55 - 1.75 мкм) и 7-го (2.08 - 2.35 мкм) каналов КС LANDSAT 7 ETM+ выделен перспективный участок. На данном участке предположительно можно ожидать три кимберлитовые трубки, которые могут быть аналогами куста алмазоносных трубок НИИГА, Маршрутная (рис. 4.12).

Заверка наземными средствами выявленных по комплексу дистанционных методов участков, перспективных на наличие кимберлитовых тел, позволит дать практическую оценку как методике изотропной трещиноватости, так и предлагаемого способа поисков по совокупности данных гравиметрической, магнитометрической и многозональной космической съемки.

Результаты проведенных исследований на эталонных площадях Алакит-Мархинского и Далдынского кимберлитовых полей могут служить основанием для проведения прогнозно-поисковых работ на алмазы на севере Сибирской платформы.

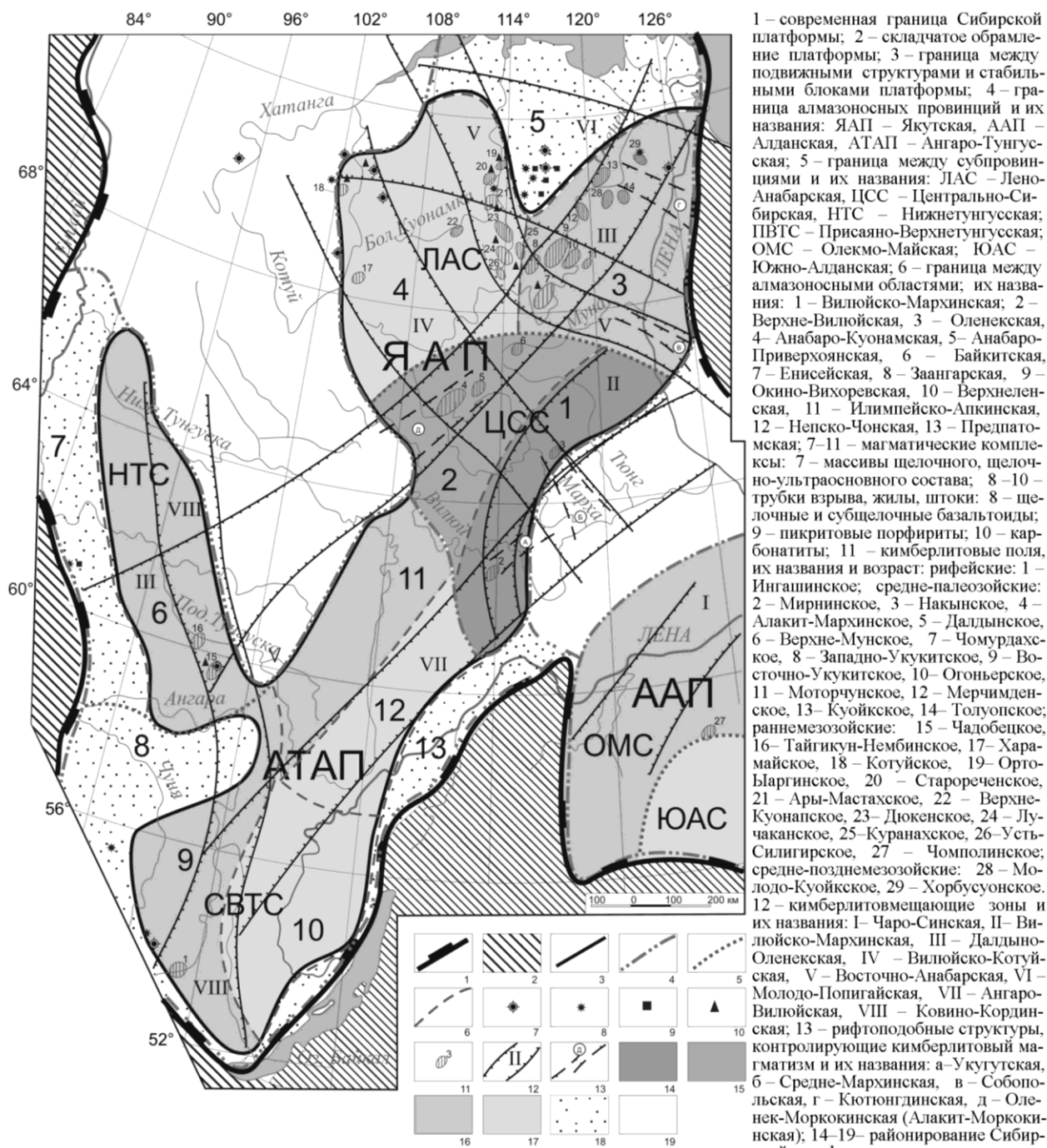
## **Глава 5. Прогнозирование нового кимберлитового поля и коренных месторождений алмазов на основе ГИС-технологий обработки космических, геолого-геофизических и картографических данных**

Оценка перспектив коренной алмазоносности на севере Сибирской платформы проведена на основе обобщения имеющихся геолого-геофизических материалов с использованием традиционного комплекса прогнозно-поисковых признаков, охарактеризованных в первой главе, с учетом результатов ранее выполненных работ и рекомендаций предшественников, с применением предложенного комплекса дистанционных методов для выявления алмазоносных кимберлитовых трубок. Исследование проведено в пределах листа R-51-А, Б на основе геоинформационных технологий, обеспечивающих полный пространственный анализ систем поисковых признаков: геологических, космических, геофизических и позволяющих более точно определять кимберлитоперспективные участки с оценкой их потенциальной алмазоносности. Задача исследования сводилась к выделению площадей соответствующих кимберлитовому полю, а для кимберлитовых полей – выявлению локальных участков, перспективных на обнаружения группы тел или отдельной кимберлитовой трубки.

Якутская алмазоносная провинция (ЯАП) является главным источником добываемых алмазов, а также их разведанных запасов и прогнозных ресурсов. На севере провинции в Лено-Анабарской субпровинции большой интерес вызывает Приленский алмазоносный район с многочисленными россыпями и кимберлитовыми телами различного возраста. Район занимает северо-восточную часть Якутской алмазоносной провинции, охватывая Лено-Оленекское междуречье, характеризуется широким развитием россыпной алмазоносности и интенсивным проявлением кимберлитового магматизма. В его пределах насчитывается свыше 190 кимберлитовых тел среднепалеозойского и мезозойского возраста, составляющих группу из пяти кимберлитовых полей: Куойкского, Молодинского, Толуопского, Мерчимденского и Хорбусуонского (рис. 5.1). Подавляющее большинство выявленных кимберлитопроявлений неалмазоносны и только в девяти из них установлены убогие содержания алмазов. Наличие в районе промышленных россыпей алмазов, источниками которых не могли служить известные слабоалмазоносные кимберлитовые тела, позволяет предполагать возможность обнаружения на этой территории еще не известных богатых коренных источников.



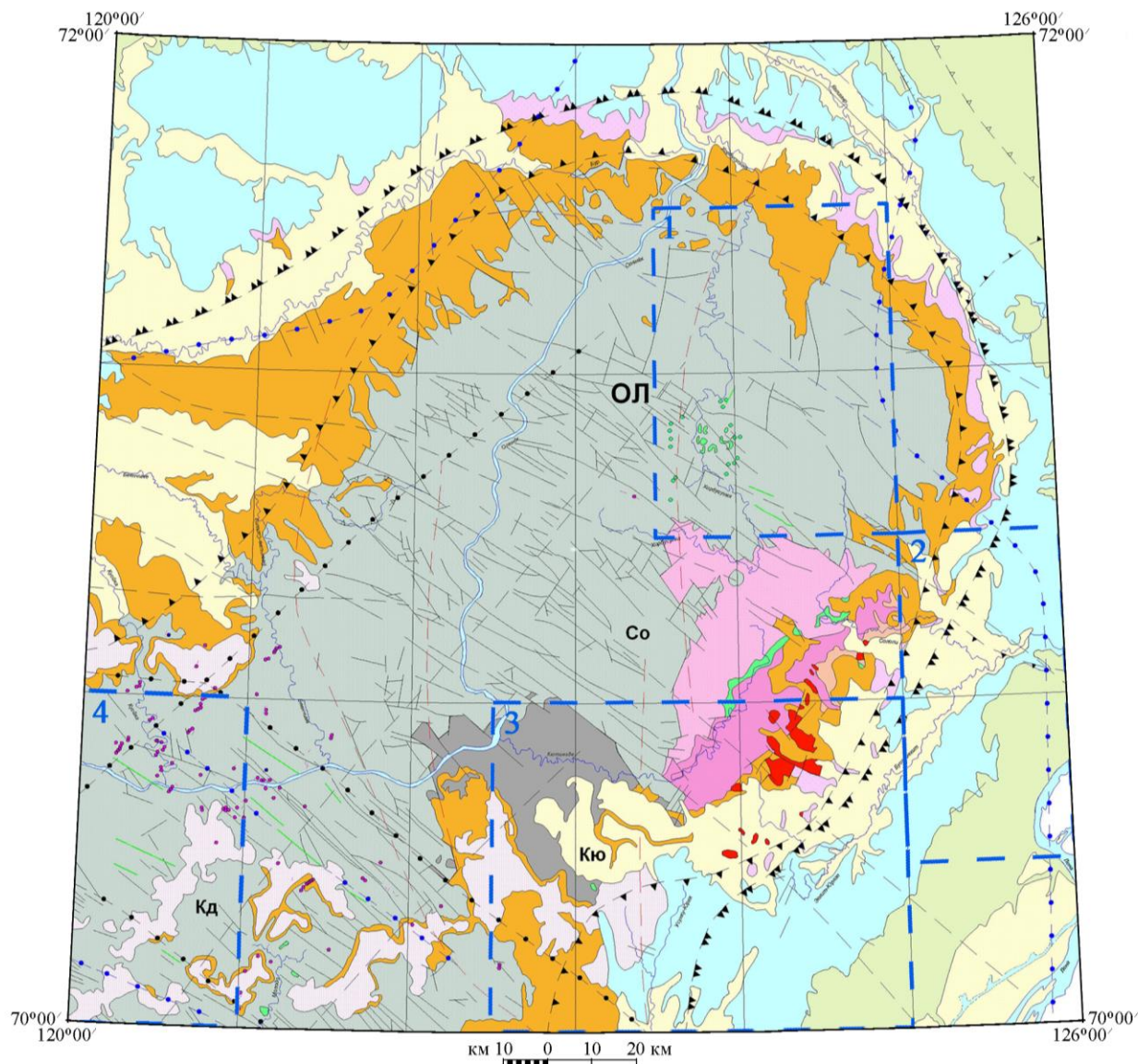
Основные особенности геологического строения района обусловлены приуроченностью к Оленекскому сводовому поднятию (рис. 5.2, 5.3).



14–17 – стабильные блоки, перспективные на алмазоносные кимберлиты: 14 – области с высокоалмазоносными кимберлитовыми полями; 15 – области с высоким и средним потенциалом алмазоносности кимберлитовых полей; 16 – области с низким потенциалом алмазоносности кимберлитовых полей (или без известных кимберлитовых полей), с прогнозируемыми кимберлитовыми полями со средним и высоким уровнем алмазоносности; 17 – области с низким потенциалом алмазоносности кимберлитовых полей (или без известных кимберлитовых полей), с предполагаемыми отдельными средне- и низкоалмазоносными коренными источниками. 18–19 – подвижные структуры: 18 – с предполагаемыми коренными источниками некимберлитового генезиса; 19 – бесперспективные в отношении коренных источников алмазов

Рис. 5.1. Схема районирования Сибирской платформы на коренную алмазоносность (по Гореву Н.И., 2008)





Структура I-порядка: ОЛ – Оленекское сводовое поднятие  
 Структура II-порядка: Со – Солоолийское поднятие, КД – Куойкско-Далдынское поднятие, Кю – Кютонгдинский грабен

- |  |   |
|--|---|
| <p><b>Структурные элементы</b><br/>         Границы надпорядковых структур: Анабарская антеклиза, Лено-Анабарский прогиб и Предверхоанский краевые прогибы</p> <p><b>Структуры первого порядка</b><br/>         Поднятия</p> <p><b>Структуры второго порядка</b><br/>         Поднятия, вали<br/>         Прогибы, мулды, желоба</p> <p><b>Основные тектонические нарушения</b><br/> <b>А. Выделенные по геолого-геофизическим данным</b><br/>         Внутрискладчатые мантийные разломы фундамента, архейского заложения, активизированные в последующие этапы</p> <p>Площади, перспективные на наличие кимберлитовых полей, I очереди: 1 – R-51-20-22,32-34; II очереди: 2 – R-51-XII,XVIII; 3 – R-51-54-58,66-70; 4 – R-50-XVIII,R-51-XIII</p> | <p>а) Разломы, выраженные в структуре фундамента и нижних горизонтов чехла позднепротерозойского заложения, активизированные в последующие этапы: а) мантийные, б) коровые</p> <p>б) Разломы, выраженные в структуре фундамента и нижних горизонтов чехла среднепалеозойского заложения, активизированные в последующие этапы: а) мантийные, б) коровые</p> <p><b>Б. Выделенные по геологическим данным</b><br/>         Разломы чехла: а) надвиги, б) сбросы, взбросы</p> <p>Дайки долеритов и диабазов</p> <p>Трубки взрыва, дайки и жилы кимберлитов</p> <p>Штоки щелочных пикритов, карбонатитов</p> <p>Штоки щелочных базальтоидов</p> <p>Условные обозначения по формациям представлена на рис. 5.3</p> |
|--|---|

Рис. 5.2. Фрагмент тектонической схемы на площадь R-51-А,Б (составлена Амакинской ГРЭ АК «АЛРОСА», 2000; с дополнениями автора)


















Мегаконтакты (Структурные ярусы) Тектонический режим	Структурно- формационная область	Комплексы (Структурные подъярусы)	ФОРМАЦИИ	
			Осадочные, вулканогенно-осадочные и метаморфические	Магматические
Кайно- зойский	ВОСТОЧНО- СИБИРСКАЯ ФИЛОКРАТОННАЯ	Неоген-четверти- чный (N-Q) 	Терригенная континентальная	
	Мезозойский	ЛЕНО-ХАТАНГСКАЯ И ПРИВЕРХОЯНСКАЯ ПЕРИКРАТОННЫЕ	Верхнеюрский- меловой (J <sub>3</sub> -K) 	Морская и континентальная терригенные угленосные
Верхнетриасовый- верхнеюрский (T <sub>3</sub> -J <sub>1</sub> ) 			Морские алеврито-глинистая, песчаная, песчано-конгломератовая	Щелочно-базальтоидная T <sub>1-2</sub> 
Нижне-среднетри- асовый (T <sub>1,2</sub> ) 			Морская терригенная, континентальные пестроцветная глинисто-алевритовая и сероцветная песчано-конгломератовая	Щелочно-ультрамафито- вая T <sub>1-2</sub> 
Верхнепалеозойский- нижнепалеозойский	АНАБАРСКАЯ ФИЛОКРАТОННАЯ  КОТУЙСКО- ОЛЕНЕКСКАЯ ТЕЛЛОРОГЕННАЯ	Нижнетриасовый (T <sub>1</sub> ) 	Толейт-базальтовая, базальтовая терригенно-пирокластическая	Трахиадезитовая T <sub>1</sub> Трахибазальтовая T <sub>1</sub> Базальт-долеритовая T <sub>1</sub> 
		Среднекаменно- угольный-верхне- пермский (C <sub>2</sub> -P <sub>2</sub> ) 	Терригенная угленосная лимническая	
Среднепалеозойский	КЮТЮНГДИНСКАЯ АВЛАКОГЕННАЯ	Среднепалео- зойский (D-C <sub>1</sub> ) 	Известняковая Пестроцветная гипсоносная аргиллито- мергельная Известняково-доломитовая Песчано-гравелитовая	Базальт-долеритовая PZ <sub>2</sub>  Кимберлитовая D <sub>3</sub> -C <sub>1</sub>  Пикрит-меланефелини- товая PZ <sub>2</sub> Ийолит-карбонатитовая PZ <sub>2</sub> 
Венд-нижне- палеозойский	ВОСТОЧНО- СИБИРСКАЯ ХАТАКРАТОННАЯ	Венд-верхне- кембрийский (V-C <sub>3</sub> ) 	Терригенно-известняковая, глинисто-известня- ковая  Карбонатная, пестроцветные терригенно-карбо- натная и глинисто-карбонатная, рифогенная, доманиковая	
Рифейский	АНАБАР- ОЛЕНЕКСКАЯ ХАТАКРАТОННАЯ	Средне-верхнери- фейский (R <sub>2,3</sub> ) 	Хатакратонные:  Пестроцветные терри- доломитовая, терриген- ная и доломито- известняковая	Авлакогенные: Пестроцветные терри- генная, глинисто-доло- митовая, глинисто-изве- стняково-доломитовая Пестроцветная алевро- литовая Базальтовая терригенно- пирокластическая
	УДЖИНСКАЯ АВЛАКОГЕННАЯ	Нижнерифейский (R <sub>1</sub> ) 	Конгломерато-песчаная  Доломитовая	Габбро-диабазовая (PR <sub>2</sub> ) 

Рис. 5.3. Условные обозначения к фрагменту тектонической схемы на площадь R-51-A,Б (см. рис. 5.2)

Оленекское сводовое поднятие расположено на северо-востоке Анабарской антеклизы и образует ее крайний северо-восточный угол, далеко вдающийся в поле развития мезозойских отложений Лено-Анабарского и Предверхоанского прогибов. Поднятие имеет форму неправильного овала северо-восточного направления, размером до 280 км по длинной оси. В целом, оно имеет довольно четкое структурное выражение, хотя границы его с окружающими прогибами проводятся в достаточной мере условно по увеличению мощностей верхнепалеозойских (на северо-западе) и мезозойских (на северо-востоке и юго-востоке) отложений. Юго-западная граница определяется системой параллельных разломов северо-западного простирания. Оленекский свод включает в себя Солоолийское и Куойкско-Далдынское поднятия, разделенные Кютюнгдинским грабеном.

Солоолийское поднятие на востоке сочленяется с Предверхоянским прогибом, на северо-западе – с Лено-Анабарским, на юге и юго-западе – с Кютюнгдинским грабеном. В наиболее приподнятой юго-восточной части поднятия на дневную поверхность выведены метаморфизованные породы раннепротерозойского фундамента, собранные в складки север-северо-западного простирания (310-340°). Складки шириной 2-3 км, асимметричные с крутыми (70-85°) восточными и более пологими (50°) западными крыльями. Как правило, они осложнены мелкими складками высоких порядков. Перекрывающие их позднепротерозойские и кембрийские осадки залегают с резким угловым несогласием. Углы падения пластов платформенных образований не превышают 2-3°. Солоолийское поднятие осложнено огромным количеством расколов сбросо-взбросового характера, обусловивших мелкоблоковое его строение. Среди расколов господствуют нарушения северо-западного направления. Зачастую разломы расположены настолько близко друг к другу, что их невозможно отразить на карте масштаба 1:200 000. Амплитуда радиальных перемещений блоков по разломам колеблется от 10 м до 300 м и более. Часто блоки оказываются наклоненными под разными углами относительно друг друга.

Блоковыми перемещениями затронуты в основном породы нижнепротерозойского, рифейского и венд-кембрийского структурных ярусов. В единичных случаях наблюдаются перемещения и более поздних структурных ярусов.

Куойкско-Далдынское поднятие расположено в юго-западной части Оленекского свода в бассейнах одноименных рек. Поднятие имеет в плане форму овала, вытянутого в северо-западном направлении, шириной до 100 км и протяженностью до 180-200 км. На северо-востоке оно примыкает к Кютюнгдинскому грабену, от которого отделено системой разломов северо-западного простирания. На востоке поднятие ограничено площадью распространения мезозойских отложений Предверхоянского прогиба, а на юге и юго-западе его граница фиксируется по распространению верхнекембрийских пород, выполняющих Суханскую впадину и Сюнгюдинскую седловину. В поперечном профиле поднятие имеет асимметричное строение: юго-западное крыло, примыкающее к Суханской впадине, широкое и пологое (падение слоев менее 1°); северо-восточное крыло – короткое и крутое. В северо-западной и юго-восточной частях поднятие осложнено более мелкими куполовидными структурами (Куойкской и Далдынской), в пределах которых вскрываются породы венда (туркютская свита) и венд-кембрия (кессюсинская свита). Между этими структурами на междуречье Оленека и Молодо прослеживается широкая пологая седловина, сложенная породами среднего кембрия. Куойкско-Далдынское поднятие, как и Солоолийское, разбито многочисленными разломами преимущественно северо-западного направления на узкие вытянутые блоки,

ориентированные в том же направлении, что и господствующие нарушения. Амплитуда перемещений по разрывам обычно составляет 20-60 м, иногда 180-200 м. Большинство разрывных нарушений относится к типу сбросов с углами падения плоскостей 75-85°.

Кютюнгдинский грабен расположен в бассейне р. Кютюнгде в центральной части Оленекского свода. Он представляет собой вытянутую в северо-западном направлении отрицательную блоковую структуру, выполненную нижнекаменноугольными отложениями. В основании грабена залегают породы позднего кембрия. Сложные тектонические движения во время накопления нижнекаменноугольных отложений привели к тому, что на позднекембрийском основании залегают различные горизонты нижнего карбона. Более поздние тектонические подвижки обусловили блоковое строение грабена, хотя, в целом четко намечается синклинальное залегание пород с погружением шарнира в юго-восточном направлении более чем на 500 м. Падение пород на крыльях структуры составляет 2-4°, постепенно выходясь в осевой части до 20-30'. Ширина грабена 45-50 км, видимая протяженность до 80-85 км. С северо-запада, юго-запада и северо-востока грабен ограничен разломами; юго-восточное его окончание перекрыто мезозойскими отложениями Предверхожанского прогиба (Фолисевич, 2000).

Помимо выше охарактеризованных сравнительно мелких разрывов, устанавливаемых геологическими наблюдениями, в пределах Оленекского сводового поднятия широко развиты и региональные разломы, фиксируемые геофизическими методами. В совокупности все нарушения образуют две зоны краевых дислокаций – Молодо-Попигайскую северо-западного направления и Оленекскую северо-восточного простирания, контролирующих размещение кимберлитовых полей (рис. 5.4). Зоны краевых дислокаций представляют собой дизъюнктивные структуры I порядка.

В прогнозном плане зоны краевых дислокаций (ЗКД) представляют собой области, наиболее благоприятные для внедрения магматических пород, в том числе и кимберлитов, поскольку находятся в зоне влияния магмогенерирующих, подвижных структур. Предположения о пространственной, а, возможно, и генетической связи коренных источников алмазов с мобильными структурами имеют многочисленных сторонников. Основные различия во взглядах на эту проблему сводятся к тому, что одними исследователями в качестве кимберлитогенерирующих признаются только рифтогенные области, другими же спектр геодинамических режимов, при которых возможно образование коренных месторождений алмазов, значительно расширяется. То есть, кроме авлакогенов, к мобильным структурам, способным активизировать алмазоносную мантию, причисляются синеклизы, краевые и внутриплатформенные прогибы, а также некоторые структуры, возникающие по обрамлению платформы (Горев, 2005).



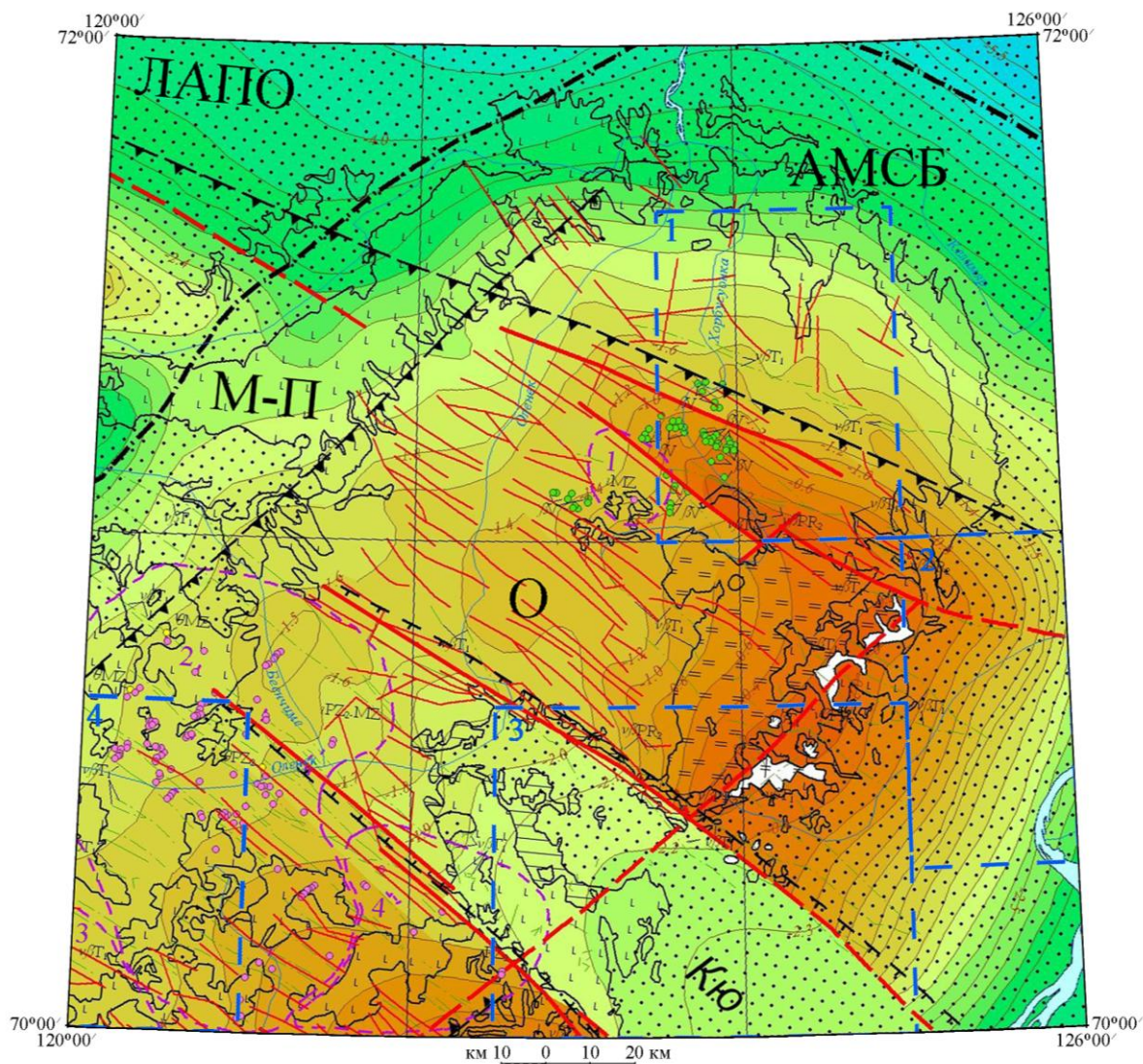


Рис. 5.4. Фрагмент карты тектонического районирования Якутской алмазоносной провинции на площадь R-51-А,Б (составлена ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА», 2005; с дополнениями автора)

Оленекская ЗКД представляет собой северо-восточный фрагмент Далдино-Оленекской зоны. Она имеет северо-восточное простирание (55-60°) и образует флексуру в рельефе фундамента, отделяющую Уджинско-Хастахский авлакоген, лежащий в основании Лено-Анабарской подвижной области, от Оленекского поднятия. Ширина зоны около 100 км, протяженность более 500 км. В осадочном чехле зона проявлена слабо и выделяется единичными непротяженными разломами, зонами трещиноватости, линеаментами, дешифрируемыми на космических снимках. Аэромагнитной съемкой в пределах зоны установлена серия непротяженных магнитных аномалий небольшой интенсивности, которые, вероятнее всего, обусловлены дайками пород основного состава, невыходящими на дневную поверхность. Зона контролирует 8 кимберлитовых полей среднепалеозойского и мезозойского возраста.

Молодо-Попигайская ЗКД занимает бассейн нижнего течения реки Оленек (между 70° и 72° северной широты). Ширина зоны более 200 км, протяженность свыше 500 км. Она практически полностью охватывает Оленекское поднятие, которое раздроблено на узкие и протяженные блоки с вертикальными смещениями по разломам, достигающими 200 м. В направлении на юго-восток и северо-запад большая часть разломов теряется под верхнепалеозойскими и мезозойскими отложениями соответственно Приверхоянского и Лено-Анабарского прогибов, что обусловлено их возрастом. Разрывные нарушения пересекают отложения верхнего протерозоя и нижнего палеозоя, а в пермских, триасовых и в юрских образованиях фиксируются лишь отдельные нарушения. Разломы часто подчеркиваются дайками основного состава среднепалеозойского и раннемезозойского возраста. Юго-западная ветвь зоны, кроме даек, контролирует силлы мезозойских долеритов. Наиболее крупные разломы – Северо- и Южно-Кютюнгинский ограничивают Кютюнгинский грабен, который расчленяет Оленекский свод на Сололийское и Куойкско-Далдынское поднятия.

Кютюнгинская секущая зона (СЗ) по отношению к ЗКД является структурой II порядка. Отличительные особенности СЗ следующие. Ширина колеблется от 20-50 до 80-100 км, протяженность составляет сотни километров. СЗ соответствует один или несколько долгоживущих, глубинных разломов, пересекающих подвижные пояса и стабильные блоки и проникающих в верхнюю мантию. В платформенном чехле СЗ отвечают или узкие желоба (если это один разлом), или ограниченные разломами опущенные блоки. В отличие от ЗКД секущие зоны не подчиняются ориентировке региональных пликативных структур платформы, а чаще сами являются структурообразующими. СЗ связаны пространственно и, по-видимому, генетически с мобильными областями, поскольку проявлены в них более отчетливо и часто

сопровождаются магматическими породами различного возраста и состава. Приуроченность к ним кимберлитовых полей свидетельствует, возможно, о том, что эти структуры, проникающие в периоды тектономагматической активности глубоко в мантию, исполняли роль кимберлитогенерирующих и кимберлитотранспортирующих структур (Горев, 2005).

По геофизическим данным на рассматриваемой площади прослеживается зона проводимости осадочного чехла (по материалам МТЗ), такие зоны в плане часто совпадают с рифтоподобными структурами. Проводящая зона подчеркивается локальными магнитными аномалиями, которым соответствуют, вероятно, дайки долеритов, а на ее выклинивании и на северо-восточном борту отмечаются депрессии магнитоактивной поверхности.

К пересечениям рассматриваемых зон приурочены кимберлитовые поля: Куойкское, Молодинское, Голуопское, Мерчимденское и Хорбусуонское.

Хорбусуонское кимберлитовое поле расположено в центральной части Оленекского поднятия в истоках р. Хорбусуонка. На площади 5 км<sup>2</sup> линейно расположены 4 кимберлитовые трубки и дайки. Трубка Гоби имеет размер 15x8.5 м, дайки Старооскольская и Заоблачная имеют мощность от 0.1 до 1.0 м, протяженность 2.3 км и 0.5 км соответственно. Ориентировка даек и трубки северо-западная. По данным рубидий-стронциевых датировок возраст тел определен как позднеюрский. Химический состав кимберлитов Хорбусуонского поля характеризуется варьирующим содержанием основных породообразующих окислов при постоянно высоком содержании кальция. По минеральному составу кимберлиты Хорбусуонского поля отличаются от пород других полей практически полным отсутствием пикроильменита, значительным содержанием хромшпинелида и пироба. По данным валового опробования алмазы в кимберлитах не установлены.

Мерчимденское кимберлитовое поле расположено в бассейне нижнего и среднего течения р. Мерчимден, вмещает 32 кимберлитовых тела. Поле характеризуется широким распространением нарушений северо-западного простиранья, подчиненных Молодо-Попигайской зоне разломов. Почти все удлиненные кимберлитовые тела этого поля обладают северо-западным простираньем (290-310°). Размеры трубок колеблются от 32x30 м до 200x200 м. Мощность жил и дайкоподобных тел изменяется от 5-30 см до 11 м. Вмещающими кимберлиты породами являются карбонатные отложения среднего кембрия. По вещественному составу среди кимберлитовых пород преобладают слюдястые разности, представленные кимберлитовыми туфами, брекчиями и туфобрекчиями. Дайки и жилы сложены порфиrowыми кимберлитами. Некоторые кимберлитовые трубки

содержат ксенолиты среднепалеозойских базитов. Алмазоносность кимберлитов данного поля не установлена. Имеются лишь единичные находки алмазов в аллювии р. Мерчимден (Фолисевич, 2000). По данным Ф.Ф. Брахфогеля (1984), надежные геологические реперы, ограничивающие возраст кимберлитов поля, отсутствуют. Единственно наличие турнейского промежуточного коллектора с признаками близости коренных источников питания в Кютюндинском грабене Нижне-Оленекского района позволяет предполагать, что кимберлиты поля могли формироваться в среднепалеозойскую эпоху (Зайцев, 2010).

Толуопское кимберлитовое поле имеет удлиненную форму северо-западной ориентировки площадью около 300 км<sup>2</sup> и вмещает 11 кимберлитовых тел, в т.ч. 7 трубок и 4 жилы. Одна из трубок погребена под толщей верхнепалеозойских терригенных пород и траппов нижнетриасового возраста, остальные тела находятся в открытом карбонатном поле среди пород кембрия. Поле можно отнести к линейному типу. Оно расположено в зоне сопряжения Куойкско-Далдынского поднятия с Кютюндинским грабеном. Ориентировка осей кимберлитовых тел различная, однако, прослеживается тенденция к локализации большей части тел в разрывных нарушениях северо-западного (310-330°) простирания. Размер кимберлитовых тел от сотен квадратных метров (трубка Ява – 35x25 м) до нескольких гектаров (трубка Закат – 410x230 м). Кимберлитовые тела Толуопского поля сложены кимберлитовыми брекчиями. Обломочный материал представлен, главным образом, ксенолитами битуминозных сланцев, известняков и другими породами осадочного чехла. Кроме того, установлены обломки пород кристаллического фундамента – пироксенитов, биотитовых гнейсов и плагиогнейсов. Все кимберлитовые тела изучены на алмазоносность. Весьма убогая алмазоносность установлена только в трубке Ивушка. Косвенные признаки вероятной алмазоносности установлены в трубке Закат, где содержание пиропов алмазной ассоциации составляет 2 %. Поисковыми работами в пределах южного фланга поля в нижнекаменноугольнопермских промежуточных коллекторах установлены минералы-спутники алмаза и сами алмазы. Это позволяет предполагать наличие здесь еще не открытых погребенных алмазоносных кимберлитовых тел.

Молодинское кимберлитовое поле расположено на правом берегу нижнего течения р. Оленек в бассейне нижнего течения его притока р. Молодо. 13 Кимберлитовых тел, не считая аномалии трубчатого типа, прорывают карбонатные породы нижнего кембрия, терригенные породы пермского, вулканогенно-осадочные образования туфолоавовой толщи нижнетриасового возраста и раннетриасовые силлы долеритов. Часто траппы на контакте с кимберлитовыми телами раздроблены, имеют зоны контактовых изменений, трещины в долеритах заполнены кимберлитовым материалом. Кимберлиты содержат



песчанистый материал пермского и, возможно, юрского возраста обломки траппов. В кварц-полевошпатовом материале нередко отмечаются палинологические остатки мезозойского возраста. Так, по данным Ф.Ф. Брахфогеля (1984), в трубке Молодо I споропыльцевой комплекс имеет поздне триасовый – раннеюрский возраст, в трубках Хризолитовая (алмазоносная) и Гранатовая – юрский. На основании всего комплекса геологических данных предполагается, что кимберлитовые тела Молодинского поля были сформированы между концом батского века средней юры и началом волжского века поздней юры (Брахфогель, 1984).

Изотопные датировки кимберлитов поля варьируют в широком диапазоне значений. Прежде всего, это касается данных, полученных Rb-Sr и K-Ar методами, отдельные датировки которых значительно превышают мезозойский возраст (332–792 млн. лет). В то же время доминирующая часть изотопных датировок кимберлитов, полученных разными методами, попадает в интервал значений 125–188 млн. лет с максимумом их значений 150–170 млн. лет.

Куойкское кимберлитовое поле располагается в бассейне р. Оленек в пределах Оленекского поднятия. С юга оно ограничивается р. Оленек, с востока – р. Бээнчиме (левый приток р. Оленек). Северная граница поля проводится по северной окраине выхода трапповых пород, расположенных в междуречье рр. Бээнчиме и Куойки, западная – по водоразделу рр. Кыран и Куойка. Все кимберлитовые тела Куойского поля располагаются среди осадочных пород кесюсинской и еркекетской свит нижнего кембрия, подстилающих их доломитов туркутской свиты верхнепротерозойского возраста и терригенных отложений нижней перми (трубки Слюдянка, Пятница). В свою очередь, трубки Молодая, Трапповая, Нюрба прорывают пермотриасовые силлы долеритов. Геологическое обоснование возраста кимберлитового магматизма в пределах поля детально рассмотрено в работе Ф.Ф. Брахфогеля (1984). Согласно приведенным им данным, в кимберлитовых телах поля отмечен ксеногенный материал долеритов, угля и песчанистого материала мезозойского возраста, ксенолиты пермских и юрских алевролитов с отпечатками листьев плохой сохранности. В кимберлитах трубки Обнаженная найдены белемниты позднеюрского возраста (Милашев и др., 1971). Кроме того, кимберлиты трубок Пятница и Слюдянка прорывают пермские отложения. В целом создается представление о мезозойском и, вероятнее всего, позднеюрском возрасте проявления магматизма в пределах поля, а кимберлиты трубки Обнаженная, возможно, формировались в нижнемеловое время. Однако, Ф.Ф. Брахфогель (1984) на основе анализа всей совокупности геологических и радиологических данных предположил о

возможности совмещения в пределах Куойкского поля кимберлитов среднепалеозойской и среднемезозойской эпох.

В пределах ЯАП выделяется область стабильной алмазоносной мантии, характеризующейся гипсометрическими отметками поверхности Мохоровичича от -42 км до -58 км не подвергавшейся в фанерозое существенной термической и тектонической проработке. Данная область характеризуется повышенными скоростями сейсмических волн земной коры и по границе Мохоровичича. Плотность земной и кристаллической коры также выше, чем на сопредельных площадях. О последней характеристике можно судить по остаточным аномалиям от кристаллической коры (рис. 5.5).

В зависимости от степени изученности для северной части ЯАП из глубинных геофизических критериев выделены аномалии размагничивания и разуплотнения (рис. 5.5), имеющие практическое значение при проведении прогнозно-поисковых исследований на потенциально перспективных площадях Сибирской платформы. В сводном отчете Горева Н.И (Горев, 2005) участки разуплотнения и размагничивания вынесены с нескольких отчетов. Для выделения зон разуплотнения использована гравиметрическая карта масштаба 1:500 000, составленная по материалам съемок масштаба 1:50 000 – 1:200 000. С помощью компьютерных технологий рассчитаны разностные аномалии после пересчета на высоты 5 и 20 км и по ним выделены отрицательные аномалии.

Для выявления участков размагничивания первоначально составлена карта регионального магнитного поля со снятой ручным осреднением высокочастотной составляющей по материалам аэромагнитных съемок масштабов 1:25 000, 1:50 000. Затем несколькими способами (метод касательных Пятницкого, метод касательных Грачева, метод полумаксимумов, метод Вейнберга) рассчитана глубина залегания верхней кромки объекта по каждой аномалии. Обычно плотность расчетных точек составляла 1 на 100 кв. км. Затем по полученным данным строилась карта глубины залегания магнитоактивной поверхности. Выделялись участки, где глубина залегания существенно (на несколько км) превышала глубину залегания консолидированного фундамента. Таким же образом рассчитывались аномалии размагничивания на северную часть территории (Манаков и др., 1998).

Глубина залегания магнитоактивных объектов рассчитывалась в программе GEOSOFT (опция Pdepth) по сводной карте результатов аэромагнитной съемки масштаба 1:10 000 – 1:25 000. Предварительно путем пересчета поля на высоту 500 м была убрана высокочастотная составляющая. Грид для расчетов 500x500 м. Для выделения участков разуплотнения были выполнены частотные преобразования остаточного поля  $\Delta g$  в пакете

GEOSOFT (фильтр BPAS,  $r_0=0.0001$ ,  $r_1=0.000005$ ) и энергетическая фильтрация окном 100 км в пакете COSCAD.

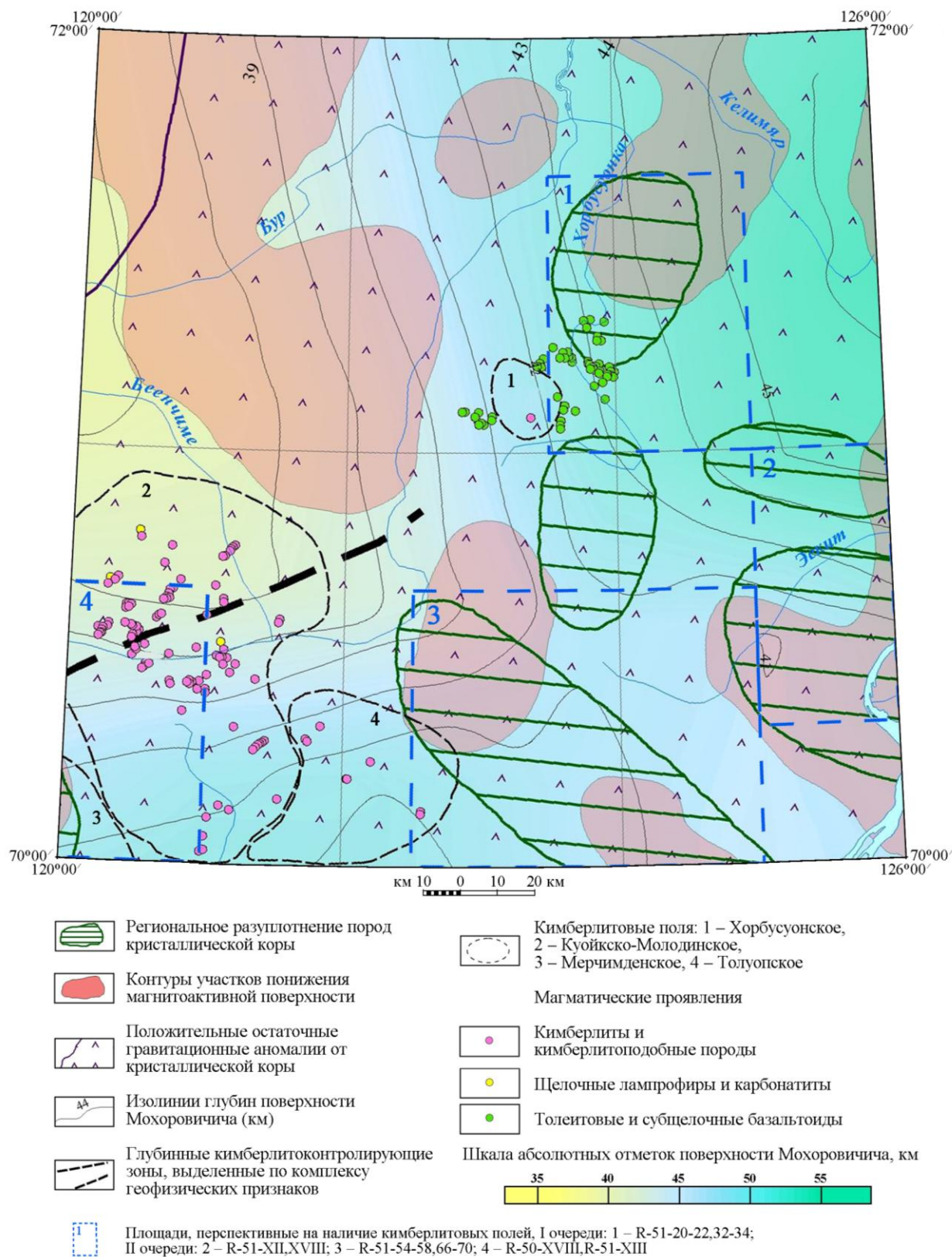


Рис. 5.5. Фрагмент карты строения тектоносферы Якутской алмазоносной провинции на площадь R-51-А,Б (составлена ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА», 2005; с дополнениями автора)

Существует несколько объяснений природы локальных гравиметрических и магнитных минимумов соответствующих кимберлитовым полям (Ваганов и др., 1995; Манаков и др., 1998; Манаков и др., 2004). Традиционно считается, что разуплотнение и размагничивание горных пород напрямую связано с внедрением кимберлитовой магмы и обусловлено процессами термального, гидротермального и механического воздействия на вмещающие породы. Масштаб механического воздействия на вмещающие породы нельзя преувеличивать, учитывая мизерные объемы кимберлитового вещества. Установлено, что зона эруптивных разрушений вокруг трубочных тел, представленная субрадиальными разрывами и тангенциальными сколами и возникшая на последних километрах подъема магм в процессе их декомпрессионного затвердевания и эксплозивного извержения, лишь на порядок превышает размеры диаметра. Периферийная зона, возникающая в чехле и сформированная субконцентрическими микротрещинами, может достигать десятка километров, но с увеличением глубины степень механического воздействия на вмещающие породы резко уменьшается. Поэтому ожидать существенного эффекта от разуплотнения пород платформенного чехла, учитывая их высокую первичную пористость и пластичность, не приходится. Тем более не заметен будет эффект размагничивания слабомагнитных образований, к которым относятся практически все осадочные породы. Разломы земной коры могут приводить к дроблению и рассланцеванию кристаллических пород, что сопровождалось бы их разуплотнением и размагничиванием. Однако в этом случае мы бы имели линейно вытянутые минимумы  $\Delta g$  и  $\Delta T$ , чего не наблюдается в действительности (Горев, 2005).

Скорее всего, наибольшую роль в явлениях разуплотнения и размагничивания могла играть гидротермальная проработка пород кристаллической коры под влиянием кимберлитовых магм (Романов и др., 1995). Данные о строении земной коры свидетельствуют о значительных преобразованиях ксенолитов метаморфических пород из кимберлитовых трубок. Наиболее часто по гранулитам проявлен регрессивный метаморфизм амфиболитовой фации с новообразованиями биотита, амфиболов, плагиоклаза. Судя по фазовой РТ-диаграмме кимберлитовые магмы вскипали на глубине 80-90 км, а в интервале кристаллической коры содержание флюидной фазы было 10 мас.%. Если объем магм под кимберлитовыми полями составлял 1 %, то при содержании во флюиде 50 % воды, ее массовая доля в земной коре под кимберлитовым полем оценивается величиной  $0.1 \times 0.01 \times 0.5 = 0.0005$ . При движении магматической колонны с флюидами вмещающие породы подвергаются гидротермальной переработке. За счет имеющегося количества воды при содержании ее в амфиболе и биотите в среднем 3 мас.% могло биотитизироваться или амфиболизироваться  $0.0005 \times 100 \times 0.3 = 0.015$

массовой доли гранатов или пироксенов пород кристаллической коры. При плотности биотита около  $3.0 \text{ г/см}^3$ , роговой обманки –  $2.6 \text{ г/см}^3$ , плагиоклазов –  $2.7 \text{ г/см}^3$ , гранатов –  $4.0 \text{ г/см}^3$ , пироксенов –  $3.4 \text{ г/см}^3$  дефицит плотности новообразованных минералов составит примерно –  $0.8 \text{ г/см}^3$ . Общее разуплотнение земной коры на участке кимберлитового поля оценивается величиной  $0.015 \times 0.8 = 0.012 \text{ г/см}^3$ . Порядок этой величины хорошо согласуется с результатами интерпретации гравиметрических данных. Возможно, что во вмещающие породы выделялось меньше 10 мас.% флюидной фазы и биотитизировался и амфиболизировался в основном не гранат, а пироксен, что может уменьшить величину полученного разуплотнения. Но с другой стороны, она должна возрастать в результате карбонатизации вмещающих пород за счет углекислоты флюида. Вещественные преобразования в земной коре, по-видимому, являются весьма существенными факторами, которые могут объяснить наличие аномалий, контролирующих размещение алмазоносных кимберлитов.

Известно, что намагниченность горных пород сложным образом зависит от температуры и давления. Например, уменьшение намагниченности гранитов начинается с температуры  $200^\circ\text{C}$ , а амфибол – или пироксеносодержащих образований с  $300\text{-}400^\circ\text{C}$  и может достигать на глубинах 10-15 км – 30 % (Петрофизика, 1992). Полное размагничивание происходит при достижении температуры Кюри ( $300\text{-}600^\circ\text{C}$ ), которая зависит от типа ферромагнетика, содержащегося в горной породе. Наиболее часто встречающийся ферромагнитный минерал – магнетит. Входящие в его кристаллическую решетку примеси титана и магния, проникающая способность которых с увеличением температуры растет, существенно понижают точку Кюри. Таким образом, прогрев пород и воздействие флюидов в результате продвижения кимберлитовых магм может приводить к размагничиванию участков кимберлитовых полей.

С увеличением тектонических напряжений в геологическом теле магнитная восприимчивость также уменьшается (Петрофизика, 1992). Причиной этого является эффект магнитоstriction ферромагнетиков – изменение намагниченности под воздействием механических напряжений. При нагрузке до 1600 МПа магнитная восприимчивость горных пород уменьшается наполовину. Градиент всестороннего (литостатического) давления в земной коре составляет около 30 МПа/км, а девиаторные (направленные) напряжения на глубинах 10-20 км могут достигать на тектонически активных участках 300 МПа (Калинин и др., 1989). Рост температуры с глубиной в стабильных блоках Сибирской платформы оценивается  $7^\circ\text{C/км}$ . Это значит, что на глубине 15 км температура (при нормальных условиях) составляет  $105^\circ\text{C}$ , на 30 км –  $210^\circ\text{C}$ , на поверхности Мохо –  $300^\circ\text{C}$  (Дучков и др., 1997). На активизированных участках

(Байкальский рифт) градиент температур примерно в два раза выше и имеет тенденцию возрастать с глубиной. Происходит также прогрев пород земной коры под воздействием самого магматического очага. В.А. Милашев (1984) приводит данные о температуре и давлении расплава, в котором формировались кимберлиты, в головной части магматической колонны на уровне заложения диатрем в земной коре. Эти данные составляют соответственно 1200°C и 300-400 МПа. Таким образом, на фоне общего глубинного размагничивания пород в процессе роста термодинамических параметров, на отдельных активизированных участках, отождествляемых с кимберлитовыми магмоводами, могут возникать размагниченные неоднородности, связанные с более интенсивными изменениями давлений, температур и перестройками кристаллической решетки (Горев, 2005).

Согласно вышеизложенным материалам первоочередное внимание уделено площадям, перспективным на наличие кимберлитовых полей, выделенных по глубинным геофизическим критериям. Алмазоносные кимберлитовые поля Якутии характеризуются гипсометрическими отметками поверхности Мохоровичича от -42 км до -58 км, где земная кора не подверглась значительной деструкции; разуплотнением пород кристаллической коры; понижением магнитоактивной поверхности.

Если площади, перспективные на наличие кимберлитовых полей, выделенных по глубинным геофизическим критериям, отличались от эталонных геофизических значений  $\Delta g$  и  $\Delta T$  (-10÷-15 мГал, -2÷-5 мЭ), то они относились к объектам прогноза второй очереди (площади R-50-XVIII, R-51-XIII; R-51-54-58, 66-70; R-51-XII, XVIII).

На площади R-51-20,21,32,33, расположенной к северо-востоку от Хорбусуонского поля, наблюдается одновременно как наличие участков понижения магнитоактивной поверхности и разуплотнения пород кристаллической коры, так и наличие участков с отрицательными значениями  $\Delta g$  и  $\Delta T$ , близкие к эталонным значениям (рис. 5.6 – 5.9), охарактеризованным в главе 3. Дальнейшая оценка каждого из объектов и детализация участков, рекомендуемых для постановки наземных геолого-разведочных работ осуществлялась с привлечением имеющихся результатов шлихо-минералогического опробования (Фолисевич, 2000) и учета рельефа по топографическим картам М. 1:100 000 – 1:50 000, сравнительный анализ которых позволяет определить возможные источники и направления сноса минералов-спутников алмаза.



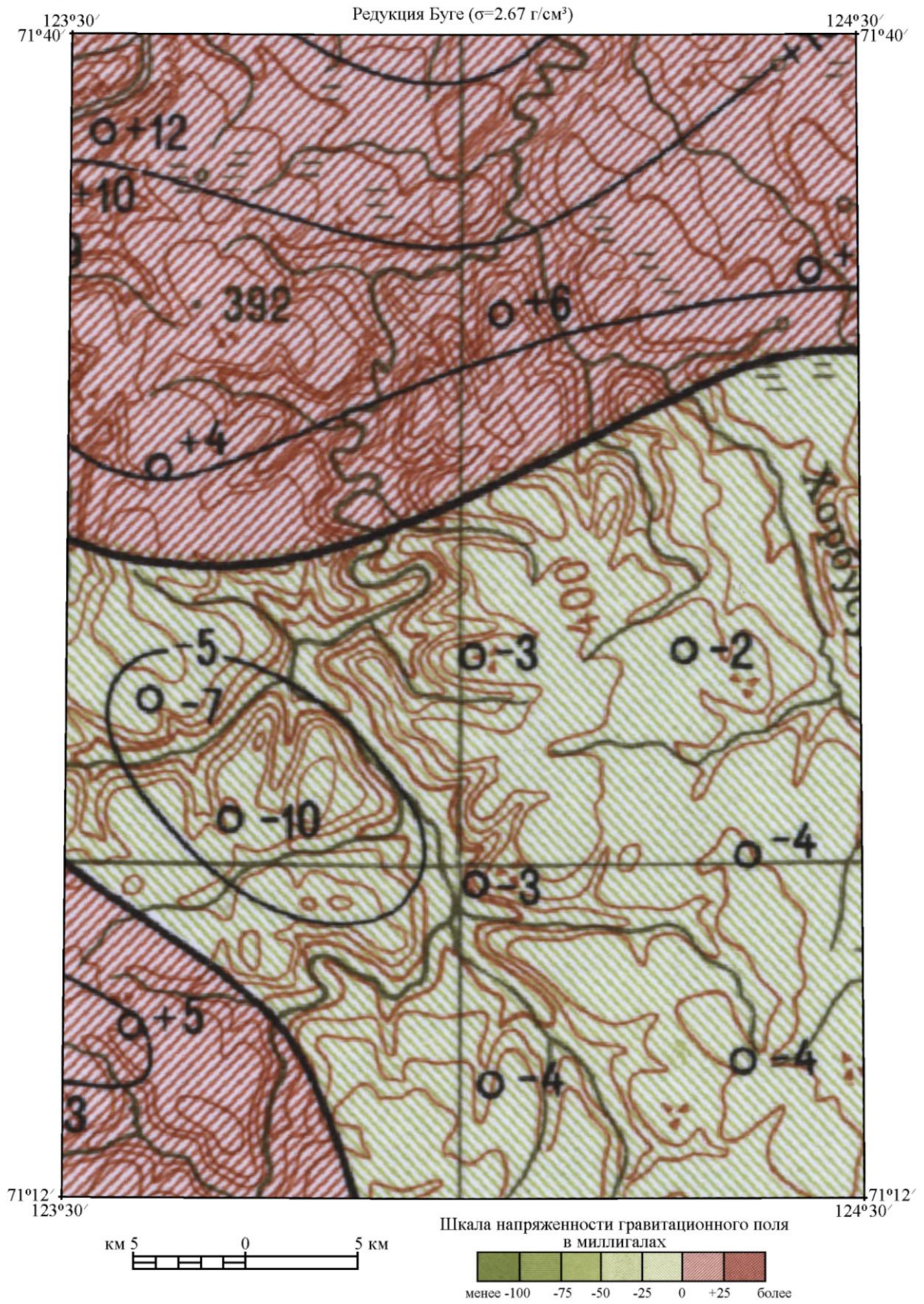


Рис. 5.6. Фрагмент гравиметрической карты М.1:1 000 000 на площадь R-51-20,21,32,33 (составлена Ляховой М.С., 1974)



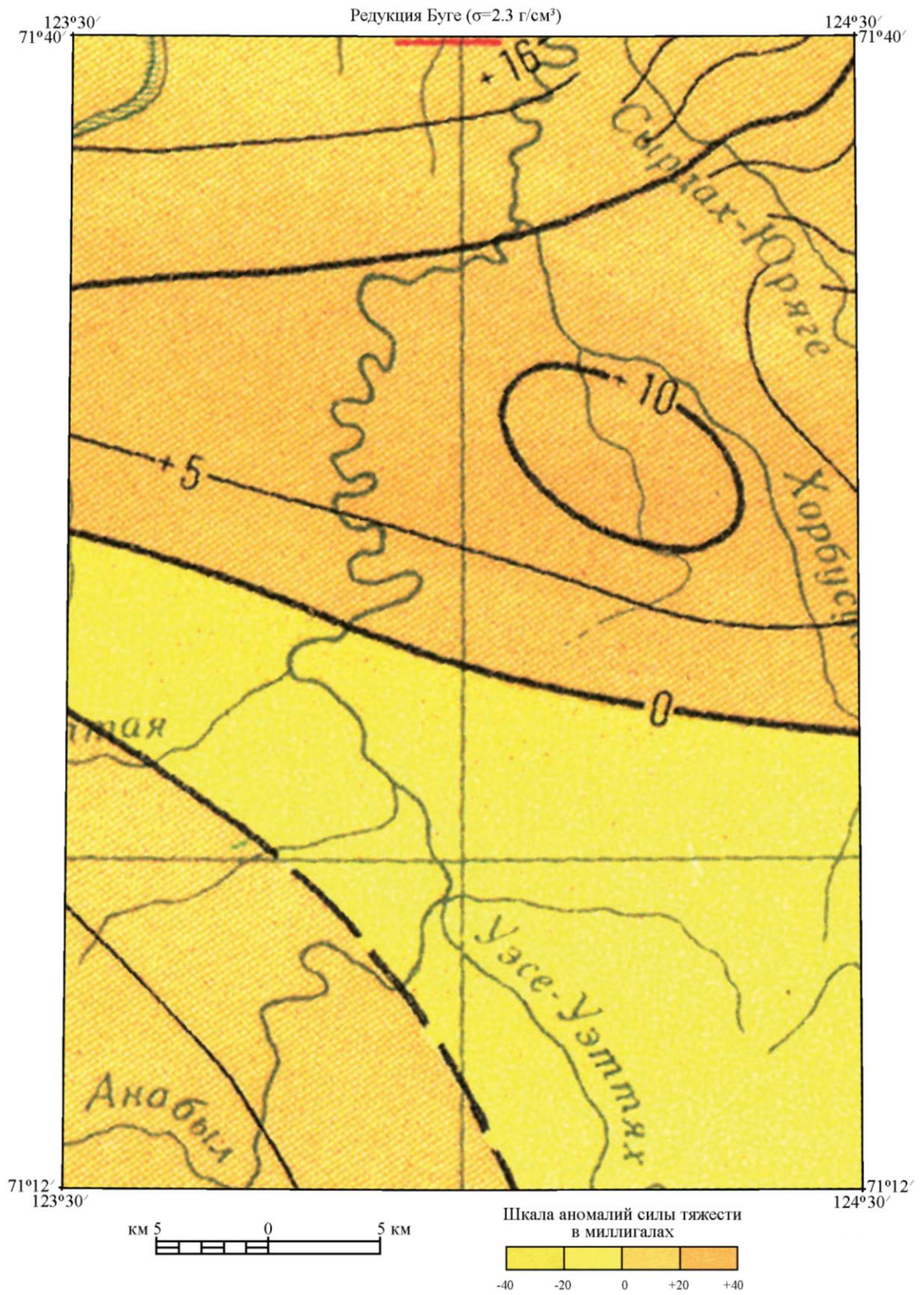


Рис. 5.7. Фрагмент гравиметрической карты М. 1:1 000 000 на площадь R-51-20,21,32,33 (составлена Сажиной Н.Б., 1973)





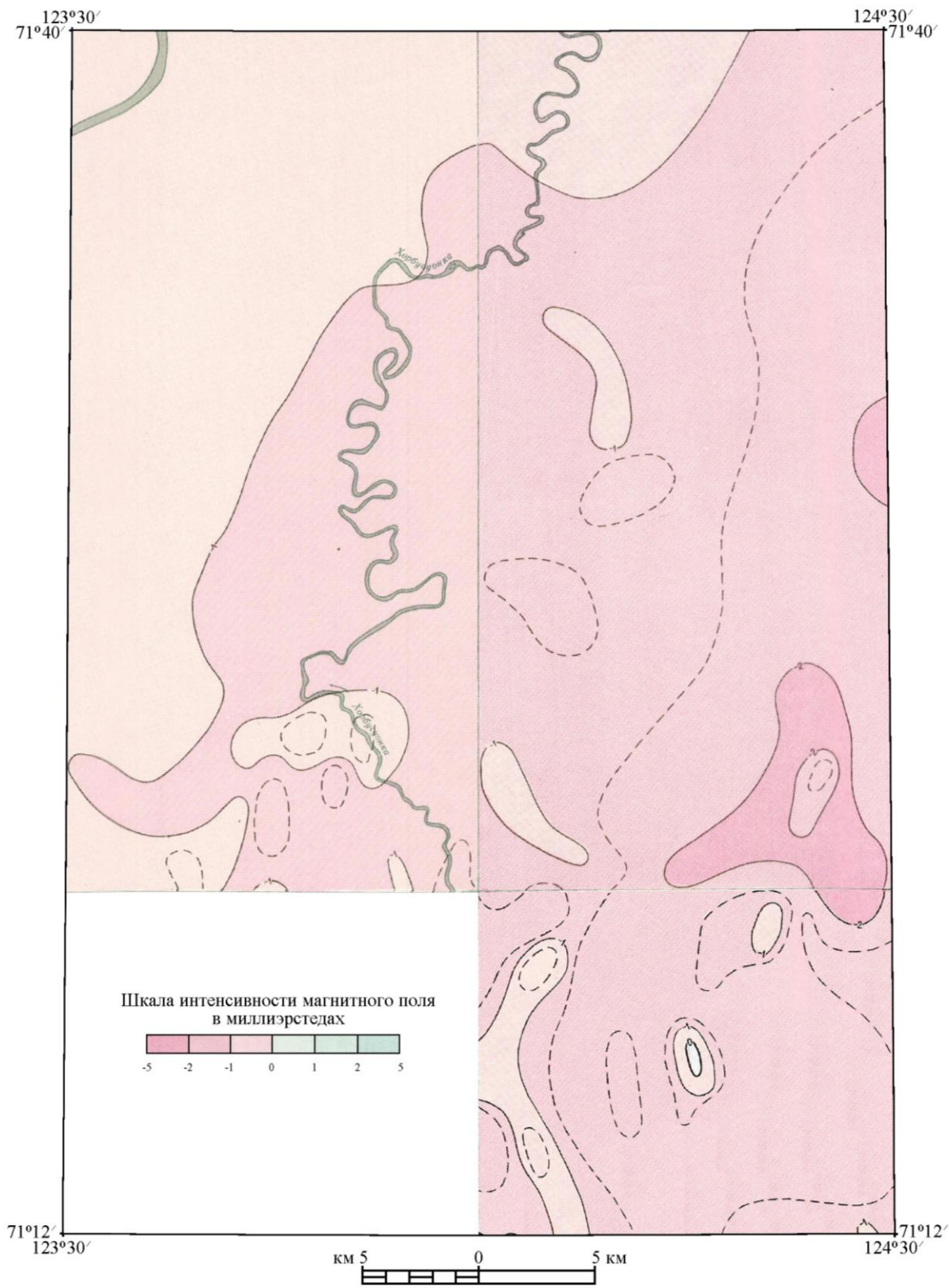


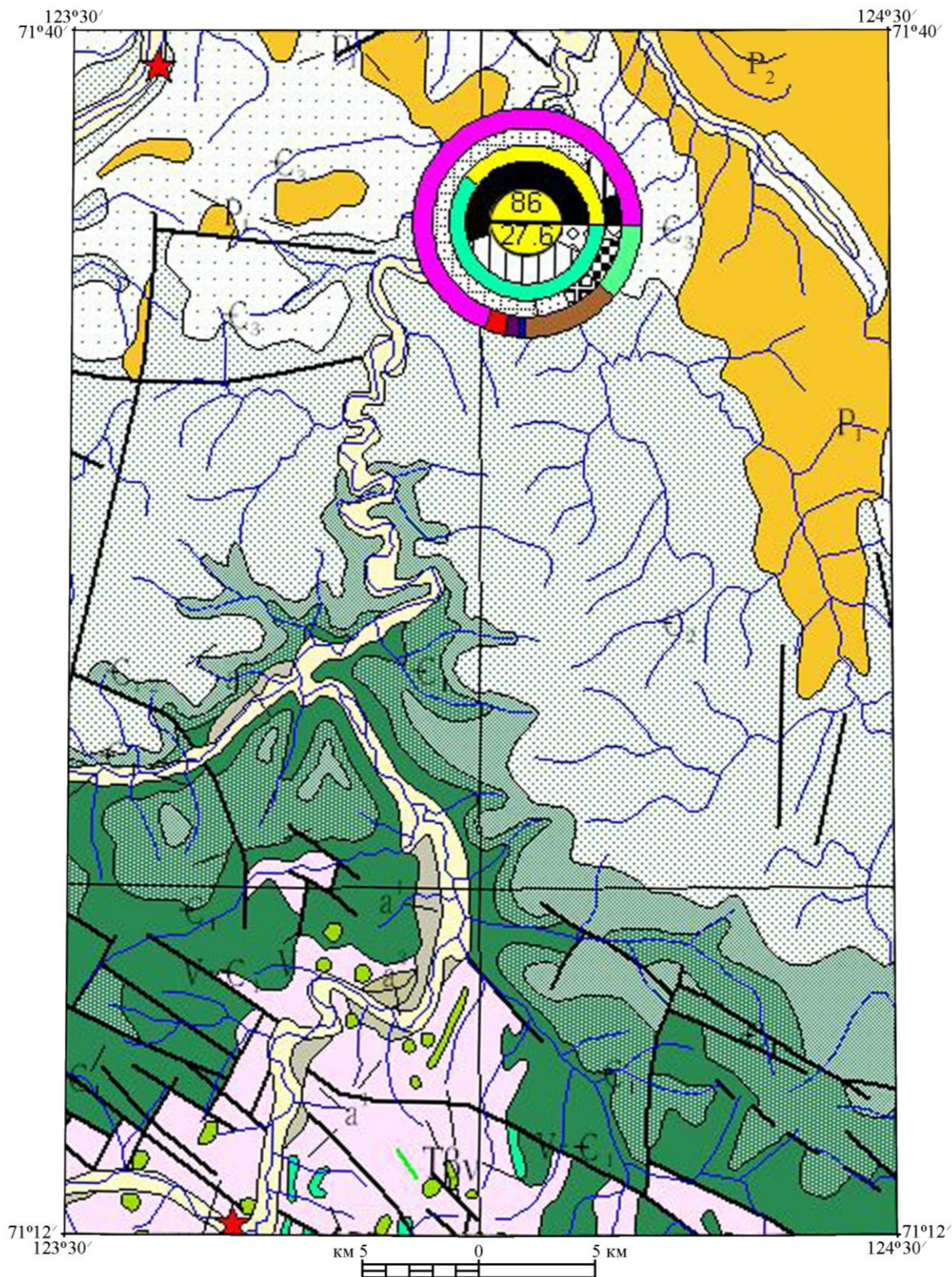
Рис. 5.9. Фрагмент карты аномального магнитного поля М.1:200 000 на площадь R-51-20,21,33 (составлена Кутузовой Т.С., 1966)



В качестве минералогических признаков алмазоносных кимберлитов выступают продукты их дезинтеграции кимберлитов – алмазы и их минералы-спутники (пироп, пикроильменит, хромшпинелиды, оливин, циркон). Алмазы, как основные минералы-индикаторы проявлений кимберлитов, нередко являются прямым прогнозно-поисковым критерием. Алмазы из различных минералого-петрографических разновидностей кимберлитов довольно существенно различаются по ряду типоморфных признаков. Комплекс типоморфных признаков алмазов в определенной степени свидетельствует об относительной близости коренного источника. Это широкий гранулометрический спектр и совместное нахождение различных по массе кристаллов, отдельные кристалломорфологические особенности, в частности специфичный набор разновидностей алмаза, наличие поликристаллических агрегатов и сростков, присутствие трещиноватых зерен, отсутствие механического износа или слабый износ типа «выкрашивания».

В пределах выделенной площади установлены находки алмазов в отдельных шлиховых пробах четвертичных аллювиальных отложений (рис. 5.10, 5.11). Преобладают I разновидность алмазов (69.2 %) по классификации Ю.Л. Орлова, по габитусу – ромбододекаэдры. Преобладающими по размеру являются зерна класса -2+1 мм (59.5 %), в меньшем количестве наблюдаются зерна класса – 4+2мм (40.5 %). Отмечается хорошая сохранность кристаллов: целые кристаллы составляют 56 %, поврежденные, обломанные и расколотые кристаллы – 37 %, обломки и осколки – 7 %.

В качестве важнейших минералогических предпосылок прогнозирования используются минералы-спутники алмаза, с выделением характерных шлихо-минералогических ассоциаций и районированием территории по типам шлиховых ореолов. В числе их основных типоморфных особенностей рассматриваются гранулометрическая характеристика, степень механического износа первичных магматогенных поверхностей зерен, типы гипергенной коррозии, концентрации в ореолах, потоках рассеяния и отдельных точках, цветовая гамма пироба, структура пикроильменита и др. Как положительные факторы, повышающие степень перспективности локальных площадей, рассматриваются находки малотранспортабельных минералов-спутников (оливина, хромдиопсида) и повышенное содержание относительно малоустойчивых в процессе транспортировки оранжевых, оранжево-красных и трещиноватых зерен пироба, а также наличие в аллювии пиробов алмазной ассоциации в количестве более 3 %.

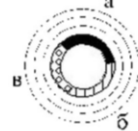
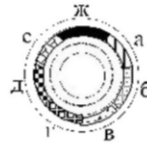
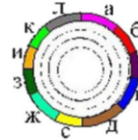


Условные обозначения на рис. 5.11

Рис. 5.10. Фрагмент карты алмазности М.1:500 000 на площадь R-51-20,21,32,33 (составлена Амакинской ГРЭ АК «АЛРОСА», 2000)



- Q<sub>IV</sub> Четвертичная система. Неоплейстоцен. Верхнее звено. Современное звено. Аллювий пойм и русла. Пески, галечники, супеси, илы, торф, морские отложения
- Q<sub>III</sub> Четвертичная система. Неоплейстоцен. Верхнее звено. Верхнее звено, четвертая ступень – современное звено. Аллювий I надпойменной террасы. Пески, галечники, суглинки, супеси, глины, илы, торф
- Q<sub>II</sub> Четвертичная система. Неоплейстоцен. Верхнее звено. Первая – вторая ступень. Аллювий III надпойменной террасы. Пески, галечники, суглинки, супеси, редко илы, торф
- P<sub>1</sub> Пермская система. Нижний отдел. Песчаники, аргиллиты, алевролиты, конгломераты, угли, линзы известняковых песчаников, гравелиты
- c<sub>1</sub> Кембрийская система. Верхний отдел. Известняки алевролитистые, глинистые и органогенные известняки; горючие сланцы; известняковые конгломераты, конгломератобрекчии, мергели, доломиты, глинистые доломиты, аргиллиты
- c<sub>2</sub> Кембрийская система. Средний отдел. Известняки, глинистые известняки, мергели, аргиллиты, известняковые конгломератобрекчии, доломиты, известково-глинистые сланцы, доломиты водорослевые, глинистые, кремнистые и кавернозные
- c<sub>3</sub> Кембрийская система. Нижний-средний отделы нерасчлененные. Сланцы горючие и известково-глинистые, битуминозные известняки, кремнистые и глинистые известняки, органогенные известняки, аргиллиты
- c<sub>4</sub> Кембрийская система. Нижний отдел. Известняки, глинистые известняки, мергели, глины, доломиты, известняковые конгломераты, пестроцветные известняки
- V-c<sub>1</sub> Венд-кембрийская система, нижний отдел нерасчлененные. Известняки, песчанистые и доломитистые известняки, алевролиты, песчаники, гравелиты, конгломераты, мергели
- T<sub>1</sub>PR Позднепротерозойские интрузивные образования. Туфы щелочно-основного состава
- V<sub>1</sub>PR Позднепротерозойские интрузивные образования. Диабазы, габбро-диабазы, конга-диабазы, конга-габбро-диабазы
- V Вендская система. Песчаники, гравелиты, доломиты, сланцы, конгломераты, песчанистые доломиты, алевролиты, доломиты оолитовые и водорослевые



**Характеристика алмазов**

1. Разновидности алмазов по Ю.Л. Орлову (%)
2. Габитус кристаллов 1-ой разновидности (%)
3. Гранулометрия кристаллов (%)
4. Сохранность кристаллов (%)
5. В числителе – общее количество изученных кристаллов, в знаменателе – средний вес кристаллов

**1. Разновидности алмазов по Ю.Л. Орлову (%)**

- а – I      г – IV      ж – VII      к – X
- б – II      д – V      з – VIII      л – XI
- в – III      е – VI      и – IX

**2. Габитус кристаллов 1-ой разновидности (%)**

- а – октаэдры
- б – ромбододекаэдры ламинарные
- в – ромбододекаэдры типично округлые
- г – переходные формы
- д – кубы и кубоиды
- е – янусы
- ж – кристаллы без типа

**3. Гранулометрия кристаллов (%)**

- а – класс +4мм      в – класс -2+1мм
- б – класс -4+2мм      г – класс -1мм

**4. Сохранность кристаллов (%)**

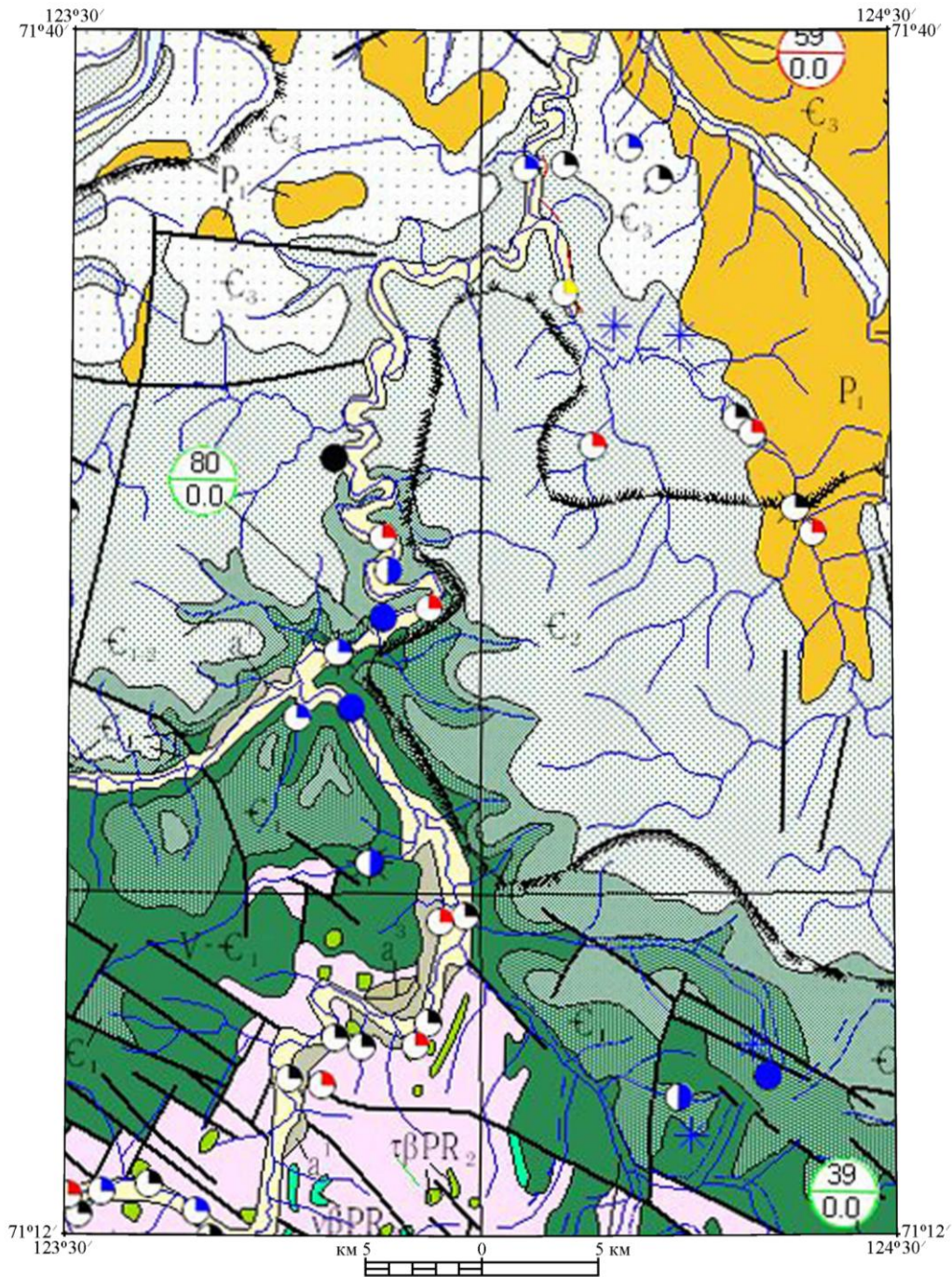
- а – целые кристаллы
- б – поврежденные, обломанные и расколотые кристаллы
- в – обломки и осколки

**5. В числителе – общее количество изученных кристаллов, в знаменателе – средний вес кристаллов (в мг)**

★ Находки алмазов в отдельных плиховых пробах отложений русловых, пойменных, террасовых

Рис. 5.11. Условные обозначения к карте алмазоносности М.1:500 000 на площадь R-51-20,21,32,33 (см. рис. 5.10)

В пределах изучаемой площади минералы-спутники алмаза пользуются широким распространением (рис. 5.12). Они образуют локальные площадные ореолы и различные по протяженности линейные потоки рассеяния. Преобладают хромшпинелидовая, пироп-пикроильменитовая, пикроильменитовая ассоциации МСА, в меньшей степени развиты хромшпинелид-пикроильменитовая, хромшпинелид-пикроильменит-пироповая, пироп-пикроильменит-хромшпинелидовая ассоциации (рис. 5.13, 5.14).



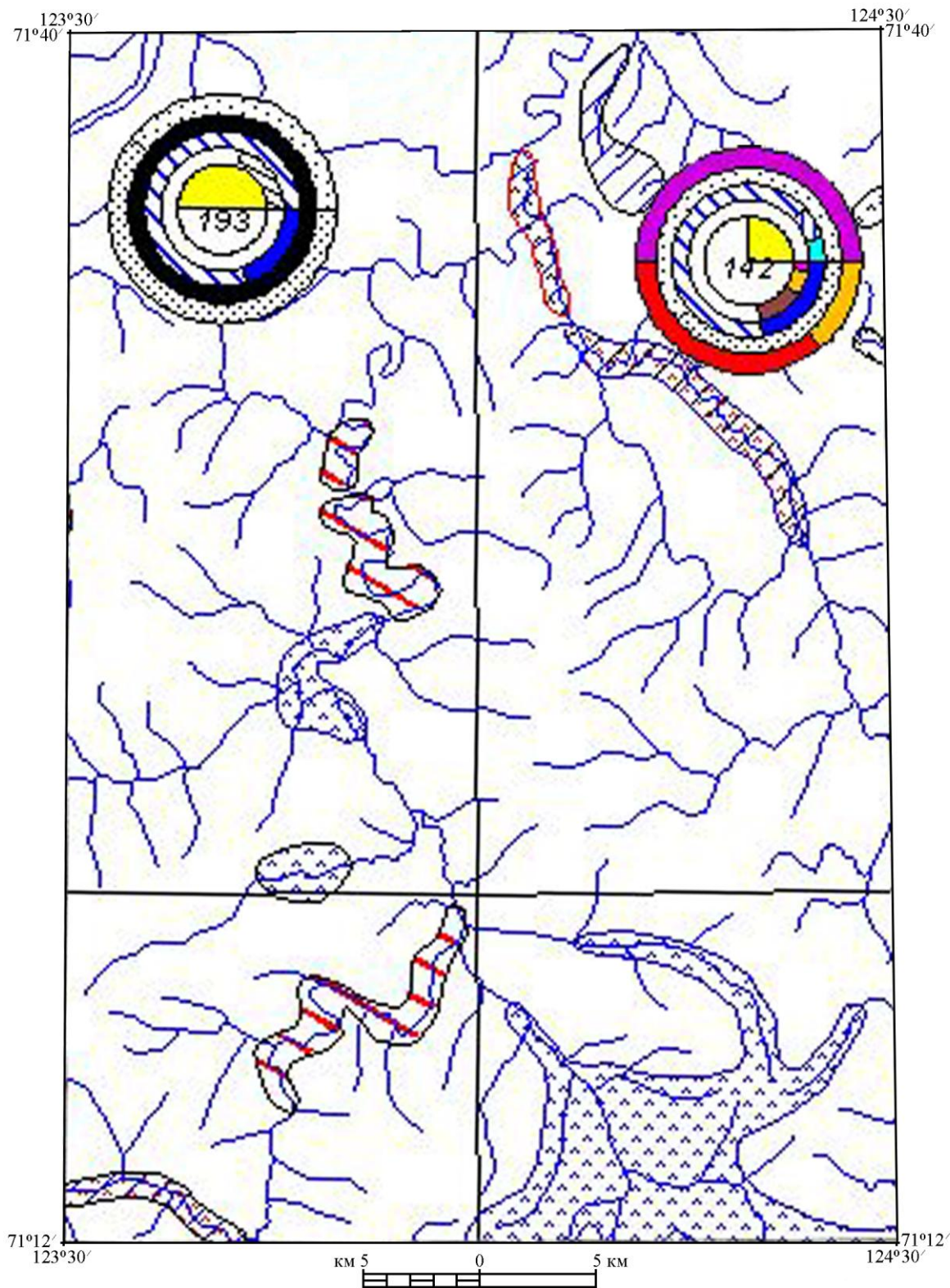
Проявления минералов-спутников алмаза в отдельных точках

Минералы-спутники алмаза	Содержание на 20-ти литровую пробу, в зернах			
	>100	51-100	11-50	<10
Пироп	●	●	●	●
Пикроильменит	●	●	●	●
Оливин	●	●	●	●
Хромдиопсид	●	●	●	●
Хромшпинелид	●	●	●	●
Циркон	●	●	●	●

- ✱ а Зерна минералов-спутников алмаза I-II классов механического износа а – в ореолах и потоках рассеяния, б – в отдельных точках
- ✱ б
- Пироп Результаты микрозондового анализа из промежуточных коллекторов
- (164/8.8) Хромшпинелид в числителе – количество изученных зерен, в знаменателе содержание зерен алмазной ассоциации, %
- (164/8.8)
- ~ Границы площадей с изученными типоморфными особенностями минералов-спутников алмаза

Рис. 5.12. Фрагмент карты распространения минералов-спутников алмаза М.1:500 000 на площадь R-51-20,21,32,33 (составлена Амакинской ГРЭ АК «АЛРОСА», 2000)





Условные обозначения на рис. 5.14

Рис. 5.13. Фрагмент схемы минералогического районирования М.1:500 000 на площадь R-51-20,21,32,33 (составлена Амакинской ГРЭ АК «АЛРОСА», 2000)

Характеристика типоморфных особенностей минералов-спутников алмаза

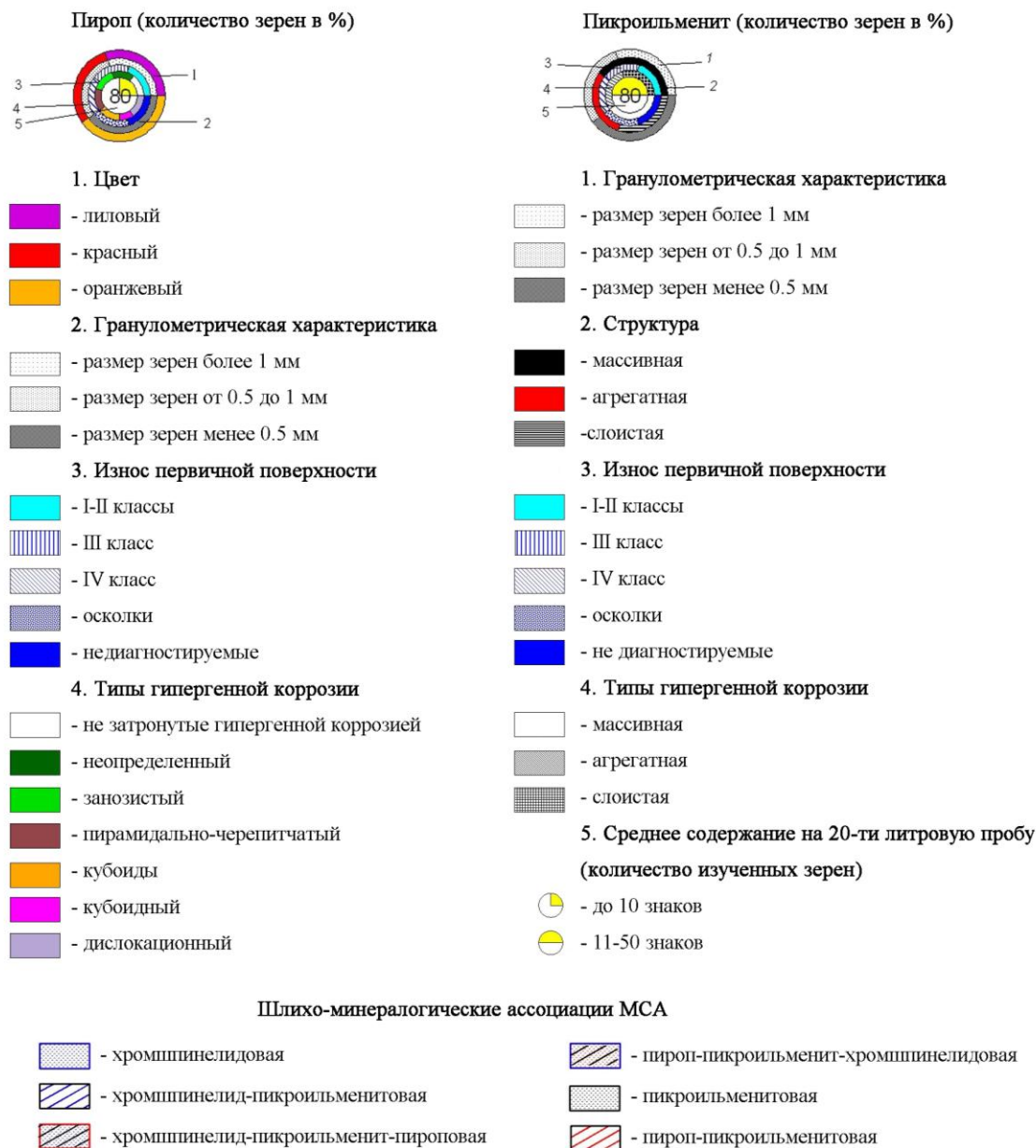
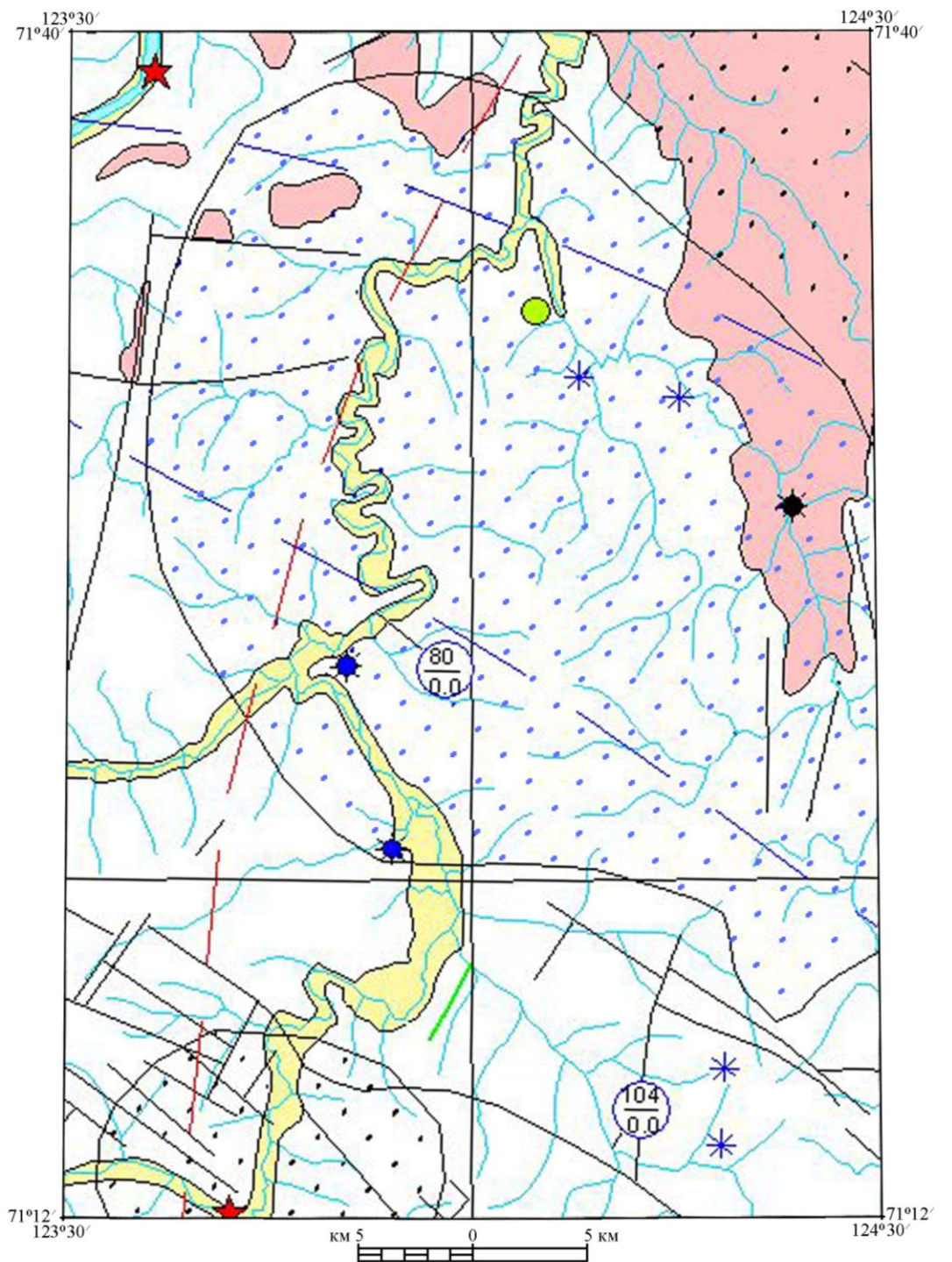


Рис. 5.14. Условные обозначения к схеме минералогического районирования М.1:500 000 на площадь R-51-20,21,32,33 (см. рис. 5.13)

Современный аллювий обогащен минералами спутниками алмаза и находками алмазов, где происходит естественное обогащение ассоциации в процессе транспортировки водными потоками и аккумуляции. На изучаемой площади отмечены находки малотранспортабельных минералов-спутников алмаза в отдельных точках – оливина, хромдиоксида; находки зерен минералов-спутников алмазов I-II классов сохранности в ореолах и потоках – хромшпинелида, в отдельных точках – пикроильменита, хромшпинелида (рис. 5.15).





- |  |  |
|--|--|
| <p>□ Открытые площади с маломощными (до 3 м) аллювиально-делювиальными покровами на терригенно-карбонатных протерозойских и палеозойских породах</p> <p>■ Площади, перекрытые терригенными палеозойскими отложениями мощностью от 20 до 200 м</p> <p>★ Находки алмазов в отдельных шлиховых пробах отложений: русловых, пойменных, террасовых</p> <p>а б Находки МСА I-II классов сохранности в ореолах и потоках (а), в отдельных точках (б)</p> <p>* Хромшпинелид</p> <p>● Пикроильменит</p> | <p>● Находки малотранспортабельных МСА в отдельных точках</p> <p>● Olivin</p> <p>● Хромдиопсид</p> <p>○ Результаты исследований МСА на рентгеновском микроанализаторе: в числителе – количество исследованных зерен, в знаменателе – количество зерен алмазной ассоциации, %</p> <p>□ Площади недостаточно изученные, с неясными перспективами алмазоносности</p> <p>□ Рекомендуемые к доизучению в первую очередь</p> <p>□ Рекомендуемые к доизучению во вторую очередь</p> |
|--|--|

Рис. 5.15. Фрагмент карты прогноза коренной алмазоносности М.1:500 000 на площадь R-51-20,21,32,33 (составлена Амакинской ГРЭ АК «АЛРОСА», 2000)

Для пироба в целом по площади характерны невысокие концентрации менее 10 знаков на шлиховую пробу. Преобладающими по размеру являются зерна более 1 мм (61.1 %), в меньшем количестве наблюдаются зерна от 0.5 до 1 мм (38.9 %). В цветовом спектре преобладают лиловые разновидности – 50 %, красные зерна составляют 36.4 %, оранжевые – 13.6 %. По износу первичной поверхности преобладают зерна IV класса (66.1 %). 78.6 % зерен пироба не затронуты гипергенной коррозией.

Пикроильменит содержится в концентрациях более 100 знаков на шлиховую пробу, представлен преимущественно размерами зерен от 0.5 до 1 мм (59.7 %), размер зерен более 1 мм составляют 40.3 %. Для него характерна довольно высокая степень механического износа – зерна IV класса сохранности составляют 80.6 %.

Первичные геохимические ореолы характеризуются повышенными значениями местного геохимического фона пород нижнего палеозоя и аномальными содержаниями Cr, Ni, Co, Ti, Ba, Sr, Mn. Для литохимических потоков рассеяния характерны повышенные содержания Nb, V, Zn, Cr, Mn, Ag, Ce, Y, Sn, Pb (Фолисевич и др., 2000).

Указанные глубинные геофизические и минералогические признаки, а также тектоническая позиция свидетельствуют о перспективности выделенной площади. Она является недостаточно изученной, имеет неясные перспективы алмазности и рекомендуется к доизучению в первую очередь (рис. 5.15). По ландшафтно-геологической обстановке изучаемая площадь является открытой с маломощными (до 3 м) аллювиально-делювиальными покровами, на которой можно применить предложенную методику дешифрирования материалов космической съемки при крупномасштабном прогнозировании и поисках кимберлитовых трубок, апробированной на эталонных площадях Далдыно-Алакитского алмазоносного района.

В пределах выделенной прогнозной площади I очереди R-51-21-В,Г;-33-А,Б, перспективной на наличие кимберлитового поля, проведено дешифрирование материалов космической съемки LANDSAT 7 ETM+ для выявления объектов, соответствующих алмазоносным кимберлитовым телам открытого типа. Исследование проводилось по обработанным цифровым материалам KC LANDSAT 7 ETM+ в цветовой модели RGB в каналах 4 (0.76–0.90 мкм), 5 (1.55–1.75 мкм), 7 (2.08–2.35 мкм) сканированием методом «скользящего окна». В результате исследования по яркостным характеристикам выявлены объекты, аналогичные эталонным алмазоносным трубкам НИИГА и Маршрутная Алакит-Мархинского кимберлитового поля.

Большинство выявленных аномалий имеет в плане изометричную форму и выделяется на космоснимке в виде овального или округлого пятна, отличающегося от фототона окружающей территории. Следует отметить, что дешифровочные признаки, характерные для кимберлитов, не являются специфическими только для них. Изометричная форма пятен могут быть вызваны и иными причинами и далеко не всегда отражают выход на поверхность кимберлитового тела. Поэтому предварительное дешифрирование новых тел дает эффект только в тех случаях, когда достаточно определенно геологическими и геофизическими исследованиями установлена высокая перспективность территории на возможность их обнаружения.

Большое значение для дешифрирования кимберлитовых тел имеет их приуроченность к районам интенсивного проявления разрывной тектоники, а в их пределах к тектоническим линиям определенных простираний и к пересечениям разрывов. Как правило, отдельные тела и группы тел располагаются на разломах в виде цепочек. Следовательно, одним из методов дешифрирования кимберлитовых тел является прослеживание их по простиранию разрывных нарушений. Один из ведущих признаков при дешифрировании кимберлитовых тел – их групповое расположение. При дешифрировании кимберлитовых тел в перспективном районе следует, прежде всего, обращать внимание на зоны разрывных нарушений и, особенно, на пункты их пересечения.

Поэтому для дальнейшей интерпретации выделенных аномалий были привлечены топографические карты, анализ которых в комплексе с полученными данными позволяет выделить потенциально алмазоносные участки в связи с особенностями рельефа и приуроченности выявленных объектов к зонам разрывных нарушений (рис. 5.16, 5.17).

В результате изучения выделенной прогнозной площади R-51-21-В,Г;-33-А,Б, установлено 18 объектов, перспективных на наличие кимберлитовых тел, локализованных в известняках, известняковых конгломерато-брекчиях и доломитах среднего кембрия (юнкюлябит-юряхская свита €1-2jn). Выявленные объекты представлены аномалиями ярко зеленого цвета, выделяющиеся на фоне различного сочетания фиолетовых и зеленых оттенков, соответствующие предполагаемым перспективным участкам на наличие кимберлитовых тел. Площадь выявленных аномалий по результатам дешифрирования материалов космической съемки составляет от 1 до 4.55 га (табл. 5.1). С учетом околотрубной зоны метасоматически измененных пород площадь прогнозируемой отдельной кимберлитовой трубки составит в среднем от 0.5 до 3 га.



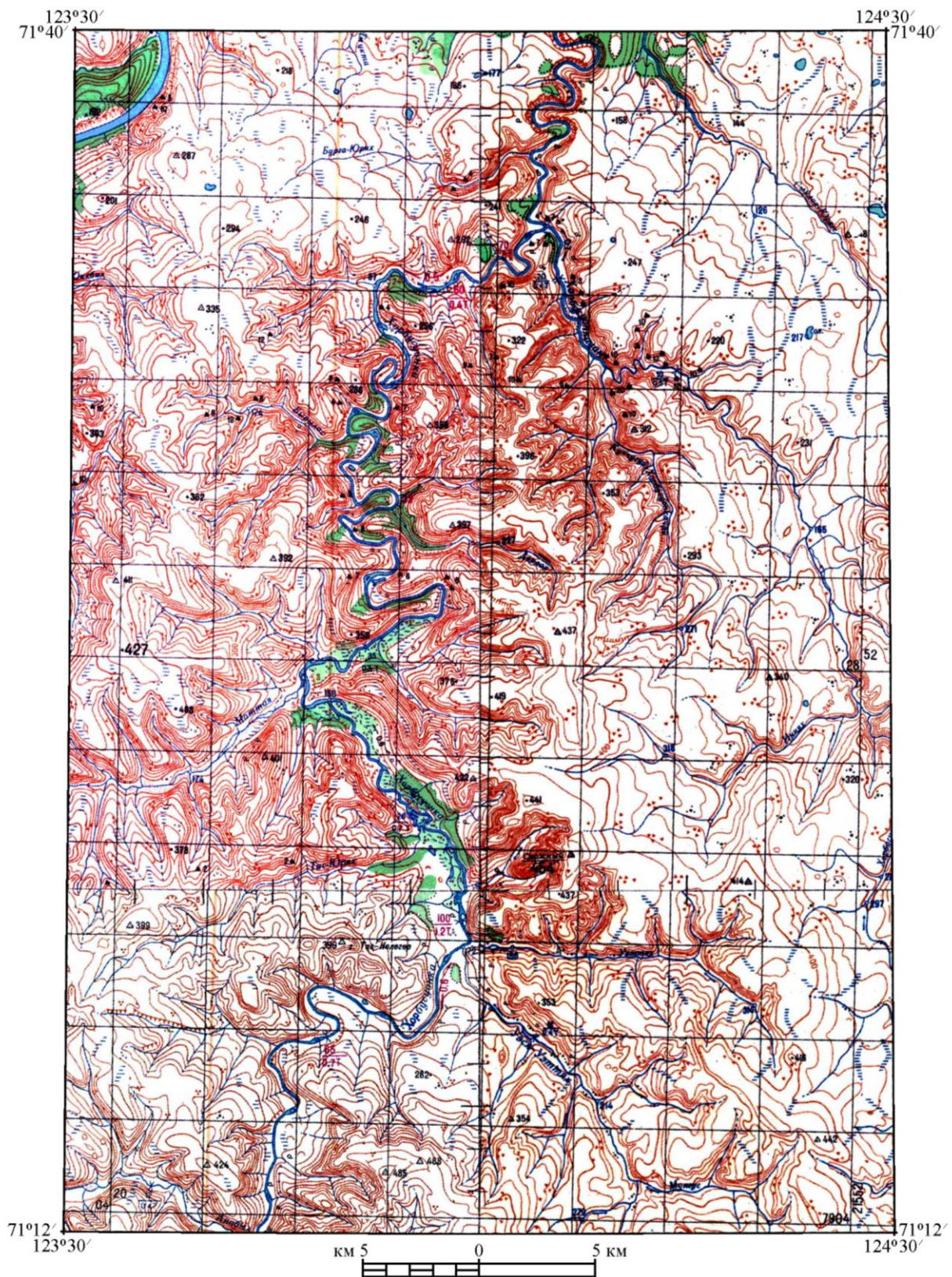


Рис. 5.16. Фрагмент топографической карты М.1:200 000 на площадь R-51-20,21,32,33 (издание 1987 г.)



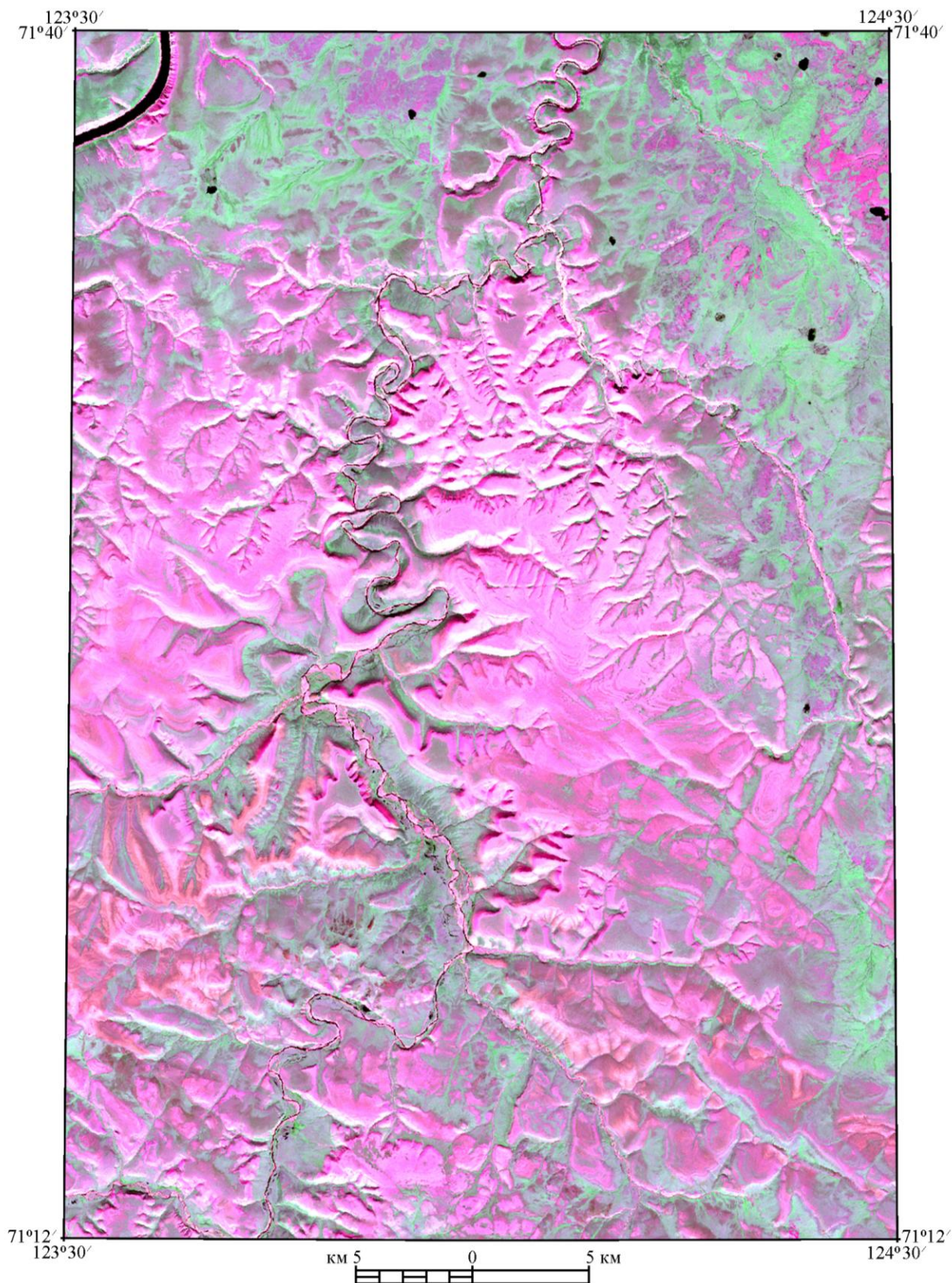


Рис. 5.17. Фрагмент дистанционной основы на площадь R-51-20,21,32,33 в цветовой модели RGB 4-го (0.76–0.90 мкм), 5-го (1.55–1.75 мкм) и 7-го (2.08–2.35 мкм) каналов КС LANDSAT 7 ETM+

Таблица 5.1

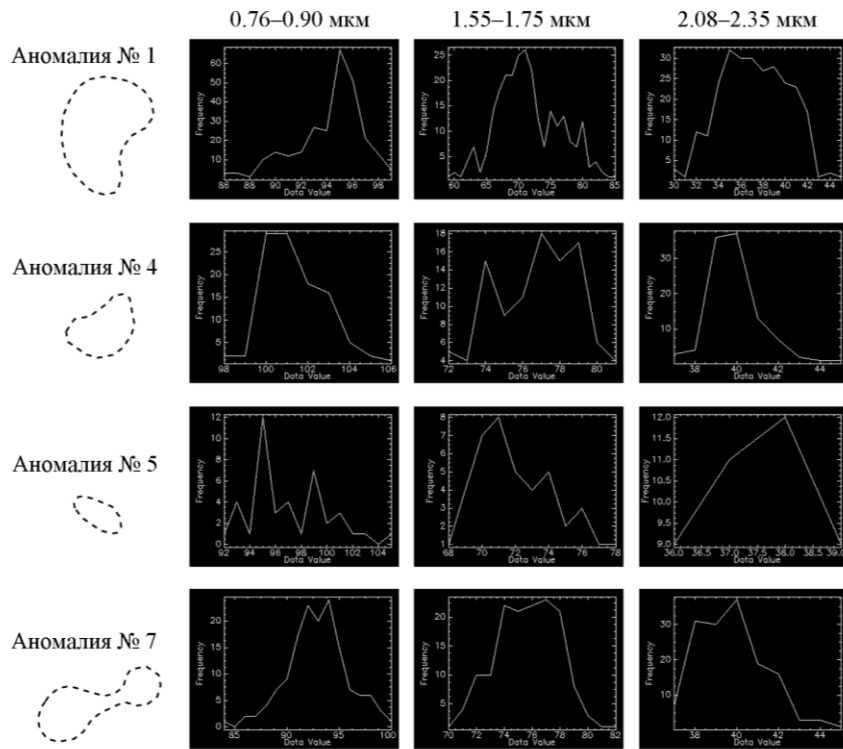
Участки, перспективные на наличие кимберлитовых тел,  
выявленные средствами ДЗЗ в пределах площади R-51-21-B,Г;-33-A,Б

Выявленные объекты	$\Delta g$ , мГал Редукция Буге ( $\sigma=2.67$ г/см <sup>3</sup> )	$\Delta g$ , мГал Редукция Буге ( $\sigma=2.3$ г/см <sup>3</sup> )	$\Delta T$ , мЭ	Размер аномалии, га
Аномалия 1	-5 ÷ 0	-5 ÷ 0	-5 ÷ -2	3,46
Аномалия 2	-5 ÷ 0	-5 ÷ 0	-5 ÷ -2	1,26
Аномалия 3	-5 ÷ 0	-5 ÷ 0	-5 ÷ -2	1,00
Аномалия 4	-5 ÷ 0	-5 ÷ 0	-2 ÷ -1	1,35
Аномалия 5	-5 ÷ 0	-5 ÷ 0	-5 ÷ -2	1,00
Аномалия 6	-5 ÷ 0	-5 ÷ 0	-2 ÷ -1	1,15
Аномалия 7	-5 ÷ 0	-5 ÷ 0	-2 ÷ -1	1,91
Аномалия 8	-5 ÷ 0	-5 ÷ 0	-2 ÷ -1	1,15
Аномалия 9	-5 ÷ 0	-5 ÷ 0	-2 ÷ -1	1,15
Аномалия 10	-5 ÷ 0	-5 ÷ 0	-2 ÷ -1	1,20
Аномалия 11	-5 ÷ 0	-5 ÷ 0	-2 ÷ -1	1,52
Аномалия 12	-5 ÷ 0	0 ÷ +5	-2 ÷ -1	4,55
Аномалия 13	-5 ÷ 0	0 ÷ +5	-2 ÷ -1	1,00
Аномалия 14	-5 ÷ 0	0 ÷ +5	-5 ÷ -2	1,21
Аномалия 15	-5 ÷ 0	0 ÷ +5	-5 ÷ -2	1,95
Аномалия 16	-5 ÷ 0	-5 ÷ 0	-5 ÷ -2	1,10
Аномалия 17	-5 ÷ 0	-5 ÷ 0	-5 ÷ -2	1,00
Аномалия 18	-5 ÷ 0	-5 ÷ 0	-5 ÷ -2	1,70

Некоторые из перспективных аномалий группируются в «кусты» трубок: №№ 1, 2, 3; №№ 6, 7; №№ 9, 10; №№ 11, 12; №№ 14, 15; №№ 16, 17, 18.

Дальнейшая интерпретация выявленных аномалий заключалась в разбраковке выявленных объектов. Разбраковка выполнена по значениям гравимагнитных данных (рис. 5.6 – 5.9, табл. 5.1) и по гистограммам распределения яркости в каналах 4 (0.76–0.90 мкм), 5 (1.55–1.75 мкм) и 7 (2.08–2.35 мкм) (рис. 5.18, 5.20, 5.22).

Результаты обработки в цветовой модели RGB 4-го (0.76–0.90 мкм), 5-го (1.55–1.75 мкм) и 7-го (2.08–2.35 мкм) каналов КС LANDSAT 7 ETM+ участков 1-й, 2-й, 3-й очереди, перспективных на наличие кимберлитовых тел, для площади R-51-21-B,Г;-33-A,Б представлены на рис. 5.19, 5.21, 5.23.



Data Value – значение яркости; Frequency – частота встречаемости

Рис 5.18. Гистограммы распределения яркости участков 1-й очереди, перспективных на наличие кимберлитовых тел, в 4-м (0.76–0.90 мкм), 5-м (1.55–1.75 мкм) и 7-м (2.08–2.35 мкм) каналах КС LANDSAT 7 ETM+ для площади R-51-21-В,Г; -33-А,Б

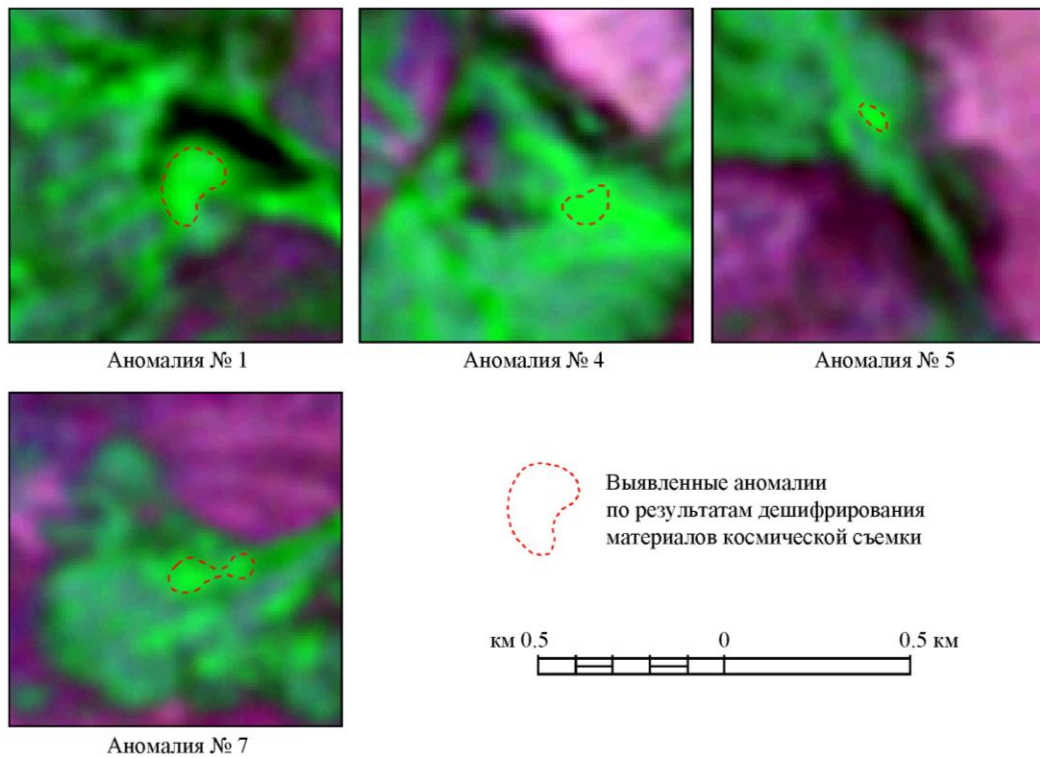
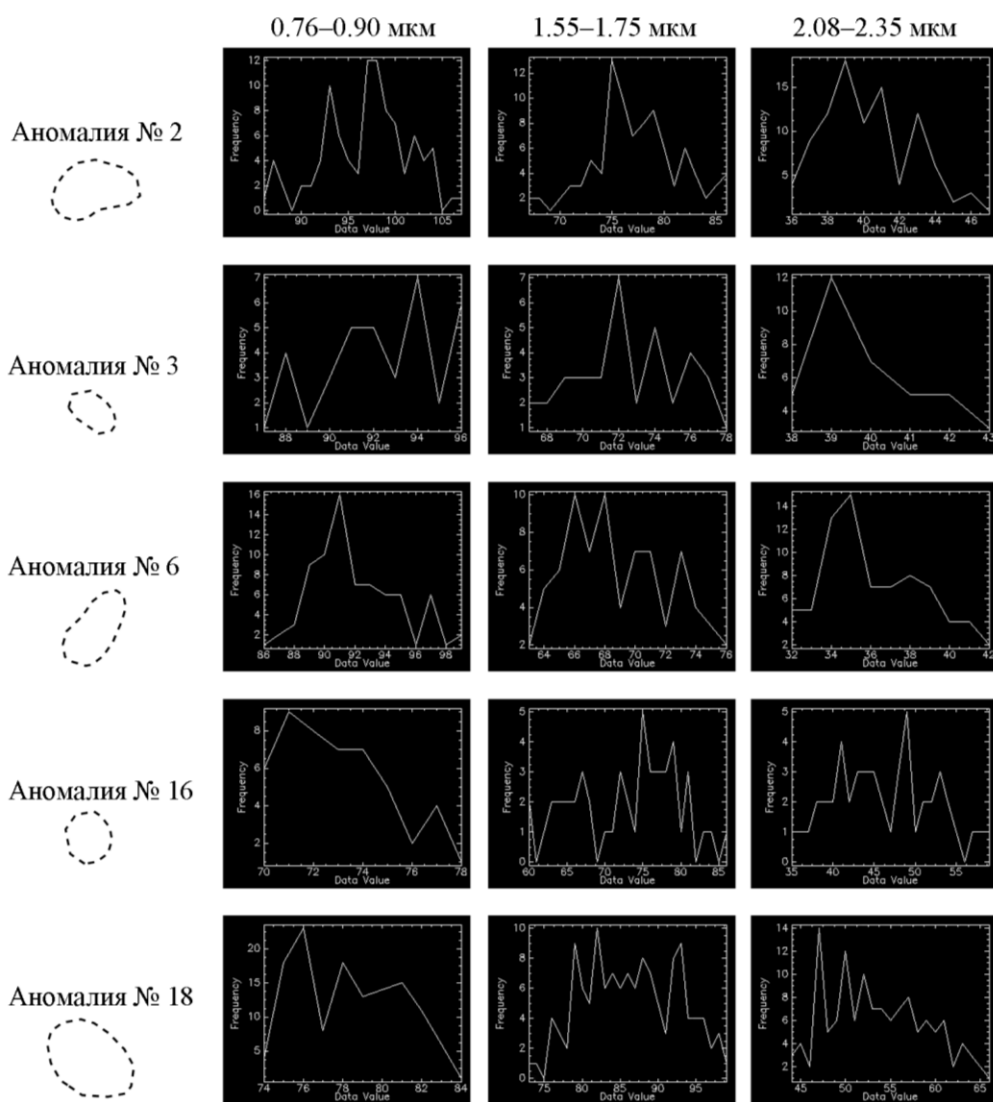


Рис. 5.19. Результаты обработки в цветовой модели RGB 4-го (0.76–0.90 мкм), 5-го (1.55–1.75 мкм) и 7-го (2.08–2.35 мкм) каналов КС LANDSAT 7 ETM+ участков 1-й очереди, перспективных на наличие кимберлитовых тел, для площади R-51-21-В,Г; -33-А,Б



К первоочередным для постановки заверочных работ отнесены аномалии: № 1, № 4, № 5, № 7 (табл. 5.1, рис. 5.19). Выделенные аномалии характеризуются диапазонами значений  $\Delta g = -5 \div 0$  мГал,  $\Delta T = -5 \div -1$  мЭ. Размер аномалий варьируется от 1 до 3.6 га.

К участкам 2-й очереди, перспективным на наличие кимберлитовых тел, выделены аномалии: № 2, № 3, № 6, № 16, № 18 (табл. 5.1, рис. 5.21). Выделенные аномалии характеризуются диапазонами значений  $\Delta g = -5 \div 0$  мГал,  $\Delta T = -5 \div -1$  мЭ. Размер аномалий варьируется от 1 до 1.26 га.



Data Value – значение яркости; Frequency – частота встречаемости

Рис 5.20. Гистограммы распределения яркости участков 2-й очереди, перспективных на наличие кимберлитовых тел, в 4-м (0.76–0.90 мкм), 5-м (1.55–1.75 мкм) и 7-м (2.08–2.35 мкм) каналах KC LANDSAT 7 ETM+ для площади R-51-21-B,Г;-33-A,Б

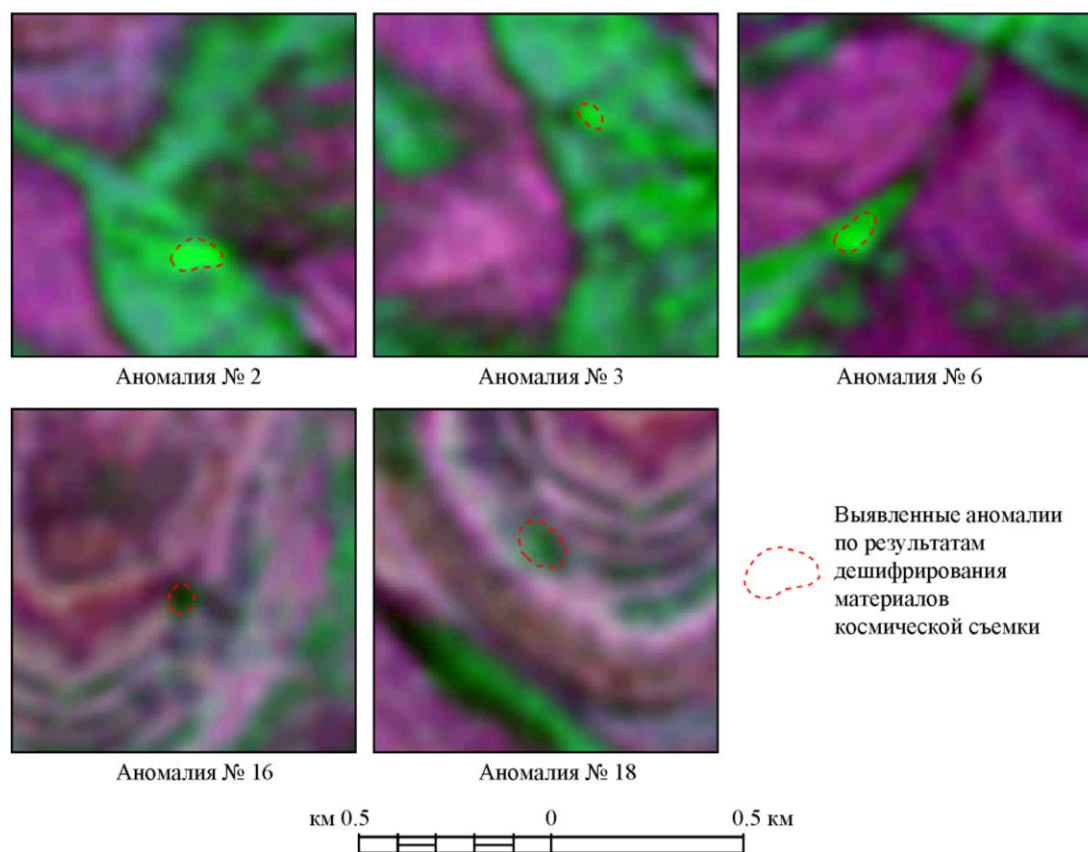
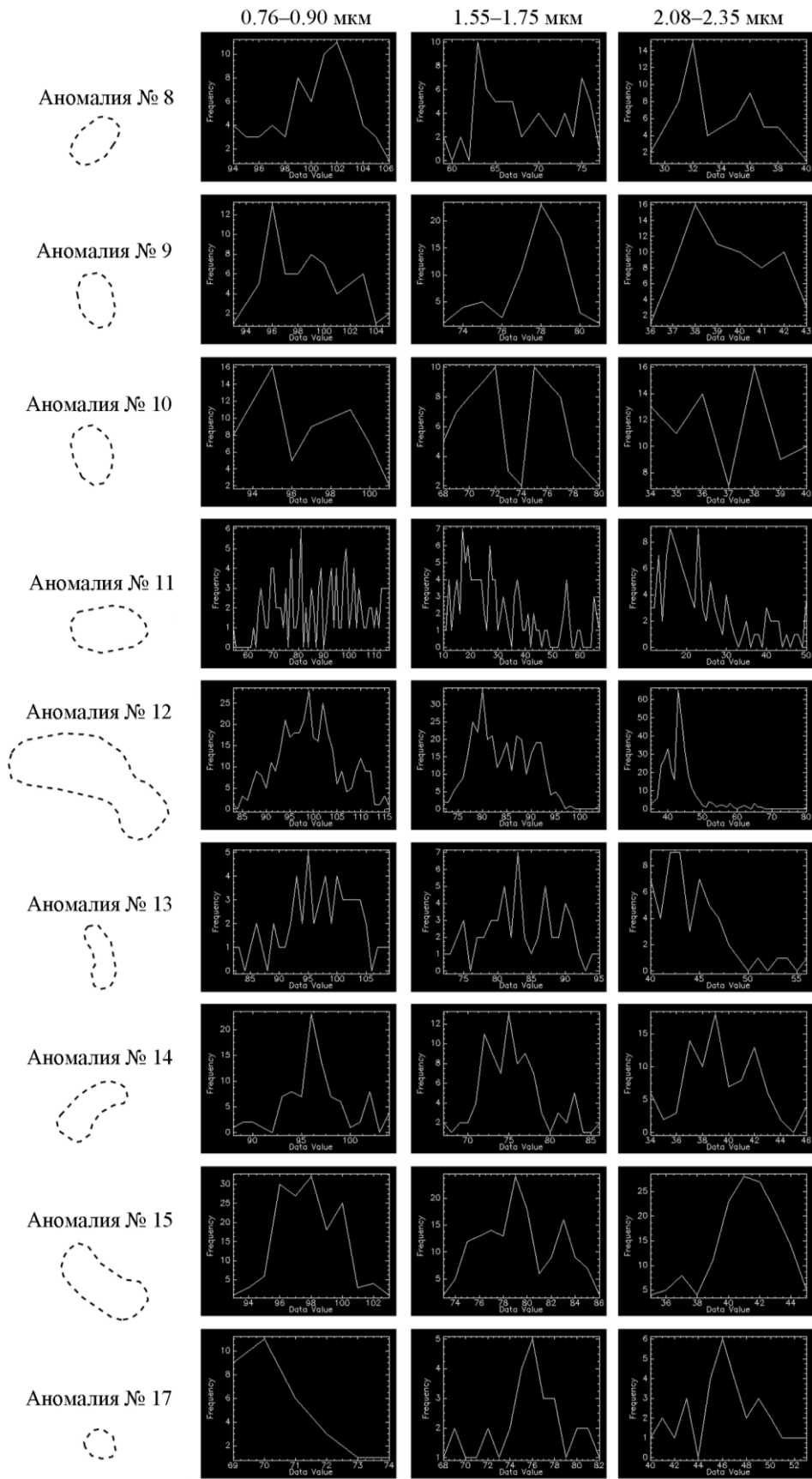


Рис. 5.21. Результаты обработки в цветовой модели RGB 4-го (0.76–0.90 мкм), 5-го (1.55–1.75 мкм) и 7-го (2.08–2.35 мкм) каналов КС LANDSAT 7 ETM+ участков 2-й очереди, перспективных на наличие кимберлитовых тел, для площади R-51-21-В,Г;-33-А,Б

К участкам 3-й очереди, перспективным на наличие кимберлитовых тел, выделены аномалии: № 8, № 9, № 10, № 11, № 12, № 13, № 14, № 15, № 17 (табл. 5.1, рис. 5.23). Выделенные аномалии характеризуются диапазонами значений  $\Delta g = -5 \div +5$  мГал,  $\Delta T = -5 \div -1$  мЭ. Размер аномалий варьируется от 1 до 4.55 га.

Таким образом, в результате изучения площади R-51-20,21,32,33 установлено, что в пределах листов R-51-21-В,Г;-33-А,Б можно ожидать выявление нового кимберлитоперспективного поля (Инняхское поле), приуроченного к узлу пересечения разломов север-северо-восточного и северо-западного простирания.

Следует отметить, что установленные 18 объектов располагаются в пределах выделенной площади, рекомендуемой к доизучению в первую очередь. По материалам АК «АЛРОСА» площадь является недостаточно изученной, с неясной перспективой алмазности.



Data Value – значение яркости; Frequency – частота встречаемости

Рис. 5.22. Гистограммы распределения яркости участков 3-й очереди, перспективных на наличие кимберлитовых тел, в 4-м (0.76–0.90 мкм), 5-м (1.55–1.75 мкм) и 7-м (2.08–2.35 мкм) каналах КС LANDSAT 7 ETM+ для площади R-51-21-В,Г;-33-А,Б

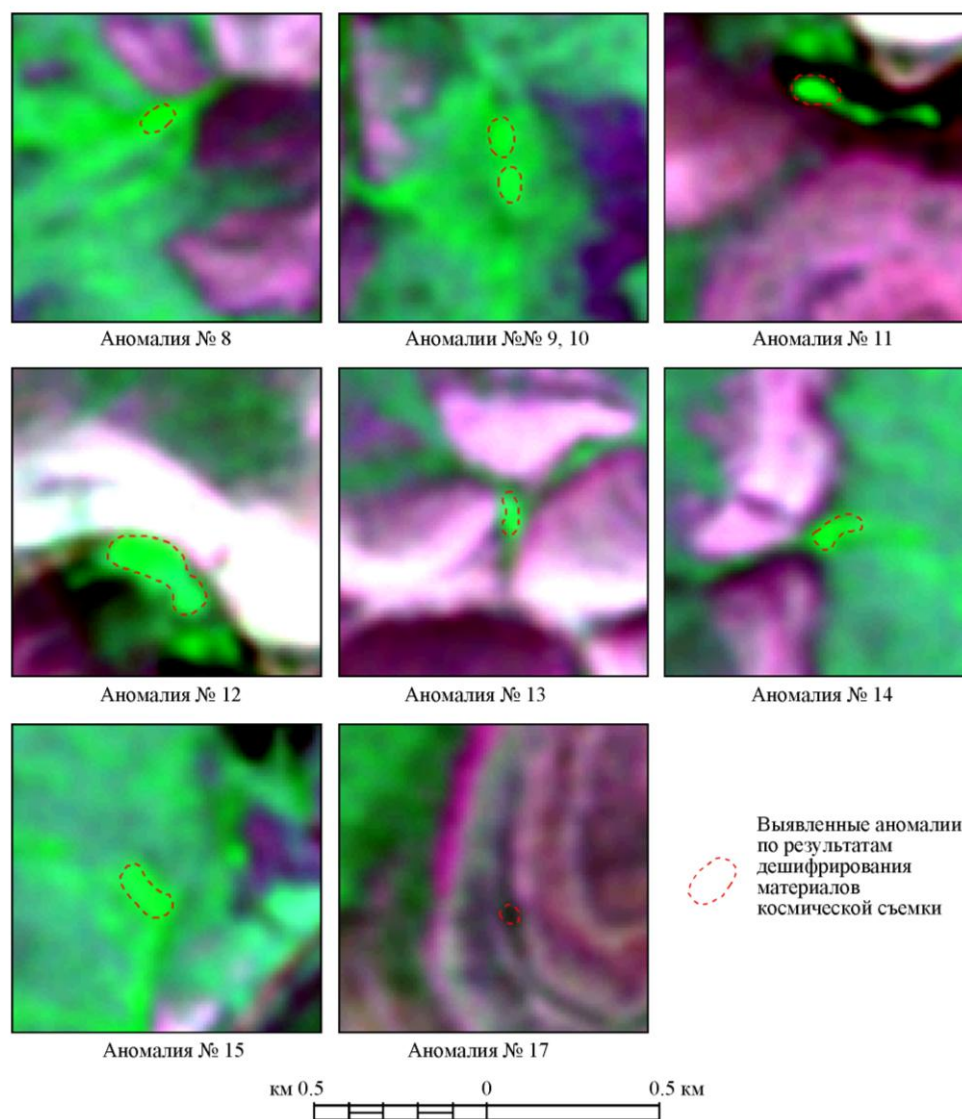


Рис. 5.23. Результаты обработки в цветовой модели RGB 4-го (0.76–0.90 мкм), 5-го (1.55–1.75 мкм) и 7-го (2.08–2.35 мкм) каналов КС LANDSAT 7 ETM+ участков 3-й очереди, перспективных на наличие кимберлитовых тел, для площади R-51-21-В,Г;-33-А,Б

Резюмируя изложенное выше, следует сделать вывод, что дешифрирование кимберлитовых тел по космическим снимкам дает особенно большой эффект в совокупности с наземными геологическими и геофизическими исследованиями. Необходимо подчеркнуть, что дешифрирование космических снимков при поисках кимберлитовых тел дает максимальный эффект при предварительном изучении эталонных участков, перспективность которых установлена наземными исследованиями. Как правило, шлиховым опробованием и геофизическими работами оконтуривается район, перспективный на поиски кимберлитовых тел, однако, обнаружение и вскрытие тела в пределах даже ограниченного участка требует очень большого объема горных выработок. В таких случаях дешифрирование космических снимков может оказать очень большую

помощь и резко облегчит нахождение кимберлитового тела. Прежде всего, в пределах перспективного участка следует отдешифрировать все разрывные нарушения включая и, кажущиеся на первый взгляд несущественными, тектонические трещины. Затем, вдоль линий разрывов следует отметить все изометричные аномалии, а также малейшие изменения в поведении мелких водотоков и линий выходов пластов, слагающих район, и в этих пунктах сосредоточивать дальнейшие поисковые работы, так как подавляющее большинство кимберлитовых тел, выходящих на дневную поверхность, отчетливо видны на обработанных космических снимках (как было показано в главах 3, 4).

Рекомендуемые к постановке детальных работ и координаты участков, перспективных на наличие кимберлитовых тел, выявленные средствами ДЗЗ в пределах изученной поисковой площади, переданы в АК «АЛРОСА» (вх. № А01-100/1307 от 16.11.2015 г.).



## Заключение

Предложен принципиально новый метод выделения алмазоносных кимберлитовых трубок на фоне вмещающих их пород на основе дешифрирования материалов многозональной космической съемки LANDSAT 7 ETM+, позволяющий локализовать площади на перспективных участках, выделенных другими методами.

Показана эффективность применения результатов дешифрирования материалов космической съемки на основе ГИС-технологий в комплексе с геологическими, геофизическими, шлихоминералогическими данными при прогнозировании кимберлитовых месторождений алмазов, как на изученных площадях, так и на новых, плохо исследованных территориях.

На объектах Алакит-Мархинского и Далдынского кимберлитовых полей установлены статистически достоверные различия между алмазоносными кимберлитовыми телами и вмещающими породами в диапазонах 0.76-0.90, 1.55-1.75, 2.08-2.35 мкм КС LANDSAT 7 ETM+. Значения яркости в этих диапазонах в сочетании с гравимагнитными данными могут быть использованы в качестве информативных признаков при крупномасштабном прогнозировании алмазоносных кимберлитовых трубок открытого типа.

Для апробации предложенной методики выявления аномалий, соответствующих кимберлитовым трубкам, привлечены структурно-прогнозные схемы кимберлитолокализующих дислокаций Милашева В.А., установленные по методике структурного анализа изотропной мегатрещиноватости в Алакит-Мархинском и Далдынском кимберлитовых полях. Выявленные аномалии в пределах точек тройного сочленения кимберлитолокализующих дислокаций, обладают различными яркостными характеристиками КС LANDSAT 7 ETM+ и по-разному проявлены в гравитационном и магнитном полях. Разбраковка их по яркости и геофизическим данным позволила выявить в пределах полей новые участки, перспективные для выявления кимберлитовых трубок.

На малоизученной перспективной площади на севере Сибирской платформы, выделенной с использованием традиционного комплекса прогнозно-поисковых признаков, с учетом результатов ранее выполненных работ и рекомендаций предшественников в пределах листов R-51-21-В,Г,-33-А,Б впервые выделена площадь, соответствующая новому перспективному кимберлитовому полю (Инняхское поле). В пределах прогнозируемого кимберлитового поля на основе предложенной методики дешифрирования материалов многозональной космической съемки LANDSAT 7 ETM+ и комплексного анализа геологических данных, материалов геофизических и шлихо-

минералогических исследований с использованием ГИС-технологий в Приленском районе Лено-Анабарской субпровинции, к северо-востоку от Хорбусуонского поля, выявлены 18 локальных участков, перспективных на обнаружение потенциально алмазносных кимберлитовых тел.

## Литература

1. Антонова И.Б. Методика поисков трубок взрыва в условиях развитого осадочного чехла северо-запада СССР на материалах дистанционных съемок // Принципы и методика дистанционных исследований при прогнозировании твердых полезных ископаемых. Сб. науч. трудов // Всесоюз. н.-и. геол. ин-т им. А.П. Карпинского; (Отв. ред. Д.В. Лопатин). – СПб.: ВСЕГЕИ, 1992. – 144 с.
2. Аргунов К.П. Алмазы Якутии: физические, морфологические, геммологические особенности. – Новосибирск: СО РАН, 2005. – 402 с.
3. Афанасьев Н.Ф. Композиции многоспектральных изображений Земли как информационные модели структуры геосистемы // Поиск, изучение и освоение открытий в России. – 1992, С. 32-35.
4. Афанасьев Н.Ф. От аэрофотоизображения поверхности Земли к его геологическому содержанию (эволюция идеи космоаэрогеологических исследований) // Региональная геология и металлогения. – 2004. – № 21. – С. 13-20.
5. Афанасьев Н.Ф., Викторов С.В., Вострогнутов Е.П., Перцов А.В., Смирнов М.Ю., Смирнова И.О., Попова Т.А. Система использования космической информации в целях исследования природных ресурсов Земли // Отечественная геология. – 2004. – № 3. – С. 8-17.
6. Барыгин В.М. Методика и техника поисков коренных месторождений алмазов с применением аэрометодов // Применение аэрометодов при поисках коренных месторождений алмазов. Изд-во АН СССР. – М. 1960. – С. 115-131.
7. Барыгин В.М. Признаки дешифрирования кимберлитовых тел на аэроснимках в северо-восточной части Сибирской платформы // Применение аэрометодов при поисках коренных месторождений алмазов. Изд-во АН СССР. – М. 1960. – С. 5-18.
8. Браxfогель Ф.Ф. Геологические аспекты кимберлитового магматизма северо-востока Сибирской платформы. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1984. 128 с.
9. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов: Учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2010. 608 с.
10. Ваганов В.И. Алмазные месторождения России и мира (Основы прогнозирования). – М.: Геоинформмарк, 2000. – 371 с.
11. Ваганов В.И., Волчков А.Г., Константинов М.М., Кривцов А.И., Курбанов Н.К., Мигачев И.Ф. Методика крупномасштабного и локального прогноза месторождений цветных, благородных металлов и алмазов (Алмазы). – М.: ЦНИГРИ, 1989 г. – 272 с.

12. Ваганов В.И., Голубев Ю.К., Минорин В.Е. Методическое руководство по оценке прогнозных ресурсов алмазов, благородных и цветных металлов. Выпуск «Алмазы» / Отв. редактор Голубев Ю.К. – М.: ЦНИГРИ, 2002. – 80 с.
13. Ваганов В.И., Варламов В.И., Фельдман А.А., Голубев Ю.К., Прусакова Н.А., Олофинский Л.Н., Бойко А.Н. Прогнозно-поисковые системы для месторождений алмазов // Отечественная геология. – 1995. – №3. – С 42-52.
14. Ваганов В.И., Волчков А.Г., Кочнев-Первухов В.И. Пространственные металлогенические таксоны. Серия «Модели месторождений алмазов, благородных и цветных металлов»: Справочное пособие. – М.: ЦНИГРИ. 2002. – 82 с.
15. Волчкова В.И., Лукина Н.В., Макаров В.И. и др. Космическая информация в геологии. – М.: Наука, 1983. – 534 с.
16. Гладков А.С., Борняков С.А., Манаков А.В., Матросов В.А. Тектонофизические исследования при алмазопроисковых работах. Методическое пособие. – М.: Научный мир, 2008. – 175с.
17. Глуховский М.З., Моралев В.М., Жаворонкин В.И. Прогнозирование алмазоносных кимберлитов с использованием космических снимков в пределах Воронежского кристаллического массива // Исследование Земли из космоса. – 1993. – №6. – С. 84-93.
18. Говорова Н.Н., Загубный Д.Г., Корчуганова Н.И. Отражение Попигайской структуры в материалах обработки дистанционного зондирования (Якутия) // Исследование Земли из космоса. – 2011. – №2. – С. 60-65.
19. Голубев Ю.К., Ваганов В.И., Прусакова Н.А. Принципы выделения алмазоперспективных площадей на различных стадиях прогнозных работ // Эффективность прогнозирования и поисков месторождений алмазов: прошлое, настоящее и будущее (Алмазы-50) = Diamond deposits prediction and prospecting: past, present and future (Diamonds-50): материалы науч.-практ. конф., посвящ. пятидесятилетию открытия первой алмазоносной кимберлитовой трубки «Зарница», 25-27 мая 2004 г. / (гл. редакторы: А.Ф. Морозов, О.В. Петров). – СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. – С. 94-96.
20. Горев Н.И., Веретенников В.А. Мелкомасштабное районирование Сибирской платформы на алмазы // Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях: материалы конференции, посвященной 40-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА», 18-20 марта 2008 г., г. Мирный / (Отв. ред. С.И. Митюхин). – Якутск: ЯНЦ СО РАН, 2008. – С. 237-244.
21. Горев Н.И., Зайцев С.А. Прогнозирование коренных источников алмазов по тектоническим критериям // Вопросы методики прогнозирования и поисков

месторождений полезных ископаемых (применительно к объектам геологоразведочных работ АК «АЛРОСА»). – Якутск: ЯФ ГУ «Изд-во СО РАН», 2004. С. 77-82.

22. Горев Н.И., Коробков И.Г., Иванов В.М. и др. Отчет о проведение научно-исследовательских работ по теме: «Прогнозный мониторинг геологоразведочной деятельности АК "АЛРОСА" (ЗАО) на Сибирской платформе на основе составления специализированных на алмазы разномасштабных карт» в 2002–2005 г.г. (объект «Прогнозный-2») в 3 кн. Росгеолфонд. Инв. № 485957. ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА», 2005 г.

23. Громцев К.В. Перспективы алмазности восточной части Балтийского щита по данным дистанционного зондирования: Дис... кандидата геолого-минералогических наук: 25.00.11 / Громцев Кирилл Владимирович; [Место защиты: Специализ. фирма «Минерал»]. – Москва, 2010.

24. Дучков А.Д., Соколова Л.С. Термическая структура литосферы Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 1997. – Т.1, № 2. – С.494-503.

25. Енгальчев С.Ю. О результатах использования материалов космического зондирования при прогнозировании алмазносных площадей // Разведка и охрана недр. – 2010. – №6. – С. 8-11.

26. Загубный Д.Г. Выявление информативных признаков распространения кимберлитовых тел Восточной Сибири и сейсмогенных структур Горного Алтая на основе обработки дистанционных данных в авторской программе «Lineament»: Дис...кандидата геолого-минералогических наук: 25.00.35 / Загубный Дмитрий Геннадьевич; [Место защиты: Ин-т геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН]. – Москва, 2010.

27. Зайцев А.И., Смелов А.П. Изотопная геохронология пород кимберлитовой формации Якутской провинции. – Якутск: Офсет, 2010. – 108 с.

28. Загребина Н.Л. Дешифрирование на аэроснимках растительности в алмазносных районах северо-западной Якутии // Применение аэрометодов при поисках коренных месторождений алмазов. Изд-во АН СССР. – М. 1960. – С. 47-51.

29. Зинчук Н.Н., Савко А.Д., Шевырев Л.Т. Историко-минерагенический анализ коренной алмазности Сибирской платформы // Труды научно-исследовательского института геологии Воронежского государственного университета. Вып. 61. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2010. – 100 с.

30. Использование аэрометодов при исследовании природных ресурсов (сборник статей) // Акад. наук СССР. Лаборатория аэрометодов. Отв. ред. Н.Н. Соколов. Москва, Ленинград: Изд-во Акад. наук СССР, 1961. – 279 с.



31. Ишмухаметова В.Т. Исследование критериев, получаемых средствами дистанционного зондирования для выявления кимберлитовых трубок в Далдыно-Алакитском районе Якутии // Исследование Земли из космоса, 2014, № 4, С. 39–47.
32. Ишмухаметова В.Т. Анализ результатов космического и геофизического дистанционного зондирования для выявления кимберлитовых трубок в Далдыно-Алакитском районе Якутии // XXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2014», 7 – 11 апреля 2014 г., Москва, МГУ им. Ломоносова.
33. Ишмухаметова В.Т. Применение комплекса геофизических и космических методов прогнозирования кустов кимберлитовых трубок в центральной Якутии // Материалы Второй Международной конференции «Новые технологии обработки и использования данных дистанционного зондирования Земли в геологоразведочных работах и при ведении мониторинга опасных геологических процессов», 22-24 апреля 2014 г., Санкт-Петербург, ФГУП «ВСЕГЕИ», С. 48-50.
34. Ишмухаметова В.Т. Прогнозирование коренных месторождений алмазов на основе дешифрирования материалов космической съемки // XXII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2015», 13-17 апреля 2015 г., Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова.
35. Ишмухаметова В.Т. Крупномасштабный прогноз кимберлитовых трубок в Далдынском и Алакит-Мархинском полях на основе ГИС-технологий // Вестник компьютерных и информационных технологий, 2015, № 5, С. 15–19.
36. Ишмухаметова В.Т. Прогнозирование кимберлитовых месторождений алмазов на севере Сибирской платформы на основе дешифрирования материалов космической съемки //
37. Калинин В.А., Родкин М.В. и др. Геодинамические эффекты физико-химических превращений в твердой среде. – М.: Наука. 1989. – 157 с.
38. Карпов Г.П. Трапповая формация Сибирской платформы и другие проблемы геологии. – Красноярск, 2011. – 136 с.
39. Кирсанов А.А. Технология использования данных дистанционного зондирования при прогнозе и поисках месторождений алмазов // Эффективность прогнозирования и поисков месторождений алмазов: прошлое, настоящее и будущее (Алмазы-50) = Diamond deposits prediction and prospecting: past, present and future (Diamonds-50): материалы науч.-практ. конф., посвящ. пятидесятилетию открытия первой алмазоносной кимберлитовой трубки «Зарница», 25-27 мая 2004 г. / (гл. редакторы: А.Ф. Морозов, О.В. Петров). – СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. –С. 163-164.

40. Кобец Н.В., Комаров В.Б. Некоторые вопросы методики поисков коренных месторождений алмазов на основе аэрометодов // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1958. – № 2. – С. 85-93.
41. Кобец Н.В., Комаров В.Б. Применение аэрометодов при поисках кимберлитовых тел // Труды Лаборатории аэрометодов АН СССР. Т.8. – Госгеолтехиздат, 1959. С. 120-125.
42. Кобец Н.В. Применение аэрометодов при поисках кимберлитовых тел в Далдынском алмазоносном районе Якутии // Применение аэрометодов при поисках коренных месторождений алмазов. Изд-во АН СССР. – М. 1960. – С. 19-46.
43. Колганов В.Ф. Коренные месторождения алмазов Западной Якутии. Справочное пособие АК «АЛРОСА». – Новосибирск: Гео, 2011. – 215 с.
44. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 832 с.
45. Костин А.В., Глушкова Е.Г., Каженкина А.Г. Конвертация данных LANDSAT ETM+ в значения температуры на примере современных разломов Лено-Вилуйского водораздела // Геология и минерально-сырьевые ресурсы северо-востока России: Материалы всероссийской научно-практической конференции 2-4 апреля 2013 г. Том I. – Якутск 2013. С. 264 – 267.
46. Кривошапкин И.И. Разломы кимберлитовых полей, выявленные по температурным полям (данные LANDSAT ETM+) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы всероссийской научно-практической конференции, 2-4 апреля 2013 г. – Якутск: ИПК СВФУ, 2013. – Том I. – С. 271-272.
47. Леонов Б.Н., Сусов М.В. Использование метода дешифрирования аэрофотоснимков при поисках кимберлитовых трубок // Изв. ВУЗов. Геология и разведка. – 1958. - №11. –С. 59-62.
48. Лопатин Д.В. Поиски трубок взрыва на территории Восточно-Европейской платформы с использованием аэрокосмической информации // Исследование Земли из космоса. – 2001. – №1. – С. 62-72.
49. Мавричев В.Г., Гололобов Ю.Н., Ладнер Г.А., Атаков А.И. Комплекс дистанционных съемок для диагностики структурно-вещественных неоднородностей при поисках алмазов // Эффективность прогнозирования и поисков месторождений алмазов: прошлое, настоящее и будущее (Алмазы-50) = Diamond deposits prediction and prospecting: past, present and future (Diamonds-50): материалы науч.-практ. конф., посвящ. пятидесятилетию открытия первой алмазоносной кимберлитовой трубки «Зарница», 25-27

мая 2004 г. / (гл. редакторы: А.Ф. Морозов, О.В. Петров). – СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. –С. 204-205.

50. Макаров Д.В. Особенности структуры и перспективы алмазоносности Новгород-Тверской площади по данным дистанционного зондирования: Дис.... кандидата геолого-минералогических наук: 25.00.11 / Моск. гос. геологоразведочная акад. – Москва, 2011.

51. Малышев Н.А., Тавризов В.Е., Трофимов Д.М., Евдокименков В.Н. Прогнозирование зон трещиноватости по космическим, сейсморазведочным и промысловым данным (на примере резервуаров рифея Камовского свода) // Геоматика. – 2009. - №1. – С. 57-59.

52. Манаков А.В., Романов Н.Н., Полтарацкая О.Л. и др. Комплексная интерпретация геофизических данных на основе современных компьютерных технологий с целью совершенствования глубинных критериев прогноза коренной алмазоносности. – Мирный. – ЯНИГП ЦНИГРИ. – 1998.

53. Манаков А.В., Матросов В.А., Поспеева Е.В. и др. Отчет по теме: «Адаптация современных геофизических и компьютерных технологий в геологоразведочное производство АК «АЛРОСА» с целью прогнозирования и поисков прочвлений кимберлитового магматизма». – Мирный. – ЯНИГП ЦНИГРИ. – 2004.

54. Меньшиков П.Н. Опыт применения геофизических методов разведки при поисках кимберлитовых трубок // Разведка и охрана недр. – 1957. №4. С.

55. Методическое руководство по составлению и подготовке к изданию листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1 000 000 (третьего поколения). – СПб.: ВСЕГЕИ, 2009. 288 с. + графич. прил. 49 л. (Минприроды России, Роснедра, ФГУП «ВСЕГЕИ»).

56. Милашев В.А. Введение в геологию коренных месторождений алмазов // Труды ВНИИОкеангеология. Т. 212. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2007. – 141 с.

57. Милашев В.А. Геология кимберлитов // Труды ВНИИОкеангеология. Т. 217. – СПб.: ВНИИОкеангеология, 2010. – 334 с.

58. Милашев В.А. Проблема поисков погребенных коренных месторождений алмазов // Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых территориях: материалы конференции, посвященной 40-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА», 18-20 марта 2008 г., г. Мирный / (Отв. ред. С.И. Митюхин). – Якутск: ЯНЦ СО РАН, 2008. – С. 261-265.

59. Милашев В.А., Третьякова Ю.В. Режим и факторы образования кимберлитов. – СПб, Российский научно-исследовательский институт культурного и природного наследия им. Д.С. Лихачева, Северо-Западный НИИ Наследия, 2003. – 112 с.
60. Милашев В.А. Структуры кимберлитовых полей. – Л., Недра, 1979. – 183 с.
61. Милашев В.А. Трециноватость, блоковое строение платформенного чехла и локализация диатрем. – СПб, ВНИИОкеанология, 1997. – 145с.
62. Милашев В.А., Табунов С.В., Томановская Ю.И. Кимберлитовые поля северо-восточной части Сибирской платформы // Кимберлитовый вулканизм и перспективы коренной алмазности северо-востока Сибирской платформы. – Л.: НИИГА, 1971. С. 5-42.
63. Миловский Г.А., Ишмухаметова В.Т., Ненадов Я.В., Сысолин А.И. «Разработка методов управления работами по дистанционному прогнозированию месторождений алмазов, меди и никеля на севере Сибирской платформы на основе использования физических полей и космических данных». Отчет о создании научно-технической продукции по теме, утвержденной Отделением энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН. Гос. регистр. № 01201352174. М.: НГИЦ РАН, 2013 г. – 135 с.
64. Миловский Г.А., Ишмухаметова В.Т. «Разработка способов комплексного анализа физических полей и космической информации для совершенствования методов управления работами в геологоразведке и в зонах радиоактивного загрязнения». Этап 2. Отчет по Программе фундаментальных научных исследований на создание научно-технической продукции. Гос. регистрация № 01201451731. М.: НГИЦ РАН, 2015 г. – 69 с.
65. Миловский Г.А., Малышев Н.А., Бородулин А.А., Ишмухаметова В.Т., Орлянкин В.Н. Прогнозирование месторождений углеводородов в Чукотско-Камчатском регионе на основе обработки космических и геолого-геофизических данных // Исследование Земли из космоса. – 2015. – № 5. – С. 62-72.
66. Натапов Л.М., Осташкин И.М., Музис В.А. Дистанционные методы при прогнозировании и поисках кимберлитов // Разведка и охрана недр. – 1982. – 1. С. 26-28.
67. Никаноров Н.Г. Возможности дешифрирования аэрофотоснимков при поисках кимберлитовых трубок. Тр. ВАГТ, Вып. 8. Госгеолтехиздат, 1962.
68. Объяснительная записка к государственной геологической карте М. 1:1 000 000. Лист Q-49 (Марха) // Булгатов А.Н.– М. 1958. 29 с.
69. Объяснительная записка к государственной геологической карте М. 1:1 000 000. Лист Q-49 (Марха). Полезные ископаемые // Булгатов А.Н.– М. 1958. 29 с.

70. Объяснительная записка к геологической карте М. 1:1 000 000. Лист R-(50)-52-Тикси // Межвилк А.А., Марков Ф.Г. – Ленинград. 1983. 68 с.
71. Объяснительная записка к геологической карте М. 1:200 000. Лист R-51-V,VI // Яшин Д.С., Вольнов Д.А.– М. 1965. 26 с.
72. Островский Э.Я., Портнов А.М., Рудерман Е.Н., Урсов А.А. Геофизические и геохимические методы поисков кимберлитовых тел // Региональная, разведочная и промысловая геофизика: Обзор/ВНИИ экон. минер. сырья и геол.-развед. работ. ВИЭМС. – М., 1983. – 60 с.
73. Петрофизика: Справочник. Кн. 3 Земная кора и мантия // Под ред. Н.Б. Дортман. – М.: недра, 1992. – 286 с.
74. Подчасов В.М., Минорин В.Е., Богатых И.Я. и др. Геология, прогнозирование, методика поисков, оценки и разведки коренных месторождений алмазов. Книга 1. Коренные месторождения. – Якутск: ЯФ ГУ СО РАН, 2004. – 548 с.
75. Подчасов В.М. Отчет о результатах тематических работ по составлению сводки находок алмазов за пределами Якутской провинции на территории Республики Саха и прилегающих регионов за 1995–1997 гг. Росгеолфонд. Инв. № 470216. Сахагеолфонд. Якутск, 1997 г.
76. Программа проведения опытно-методических работ на лицензионных площадях АК «АЛРОСА» (ОАО) и ОАО «Севералмаз» для корректировки существующих методов поисков коренных месторождений алмазов в Северо-Западном регионе РФ на 2013-2021 г.г. (пояснительная записка). – Архангельск, 2012.
77. Пуговкин А.А., Калашников В.И. Некоторые аспекты методики прогнозирования алмазоносных площадей с использованием материалов космических съемок // Исследование Земли из космоса. – 2003. – №1. – С. 82-87.
78. Пуговкин А.А., Мухина О.В. Использование материалов космических съемок при локальном прогнозировании на алмазы на примере Чидвинской площади // Региональная геология и металлогения. – 2008. – №36. – С. 84-87.
79. Романов Н.Н., Манаков А.В., Полтарацкая О.Л. и др. Отчет по теме: «Создать многофакторную модель алмазоносного кимберлитового поля на основе комплексного анализа геолого-геофизической информации с целью совершенствования критериев регионального прогноза». – Мирный, фонды ЯНИГП ЦНИГРИ, 1995 г.
80. Салихов Р.Ф., Гапотченко П.И., Зюзин Ю.М., Морозова Н.Е., Салихова В.В., Цой И.Г. Крупномасштабная прогнозная оценка территории на алмазы на основе ГИС-технологий (на примере юго-западной части Алакит-Мархинского кимберлитового поля) // Проблемы прогнозирования и поисков месторождений алмазов на закрытых



территориях: материалы конференции, посвященной 40-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА», 18-20 марта 2008 г., г. Мирный / (Отв. ред.: С.И.Митюхин). – Якутск: ЯНЦ СО РАН, 2008. – С. 274-281.

81. Салихов Р.Ф. Траппы и кимберлитовые отторженцы: проблема соотношения и использования в прогнозных целях // Эффективность прогнозирования и поисков месторождений алмазов: прошлое, настоящее и будущее (Алмазы-50) = Diamond deposits prediction and prospecting: past, present and future (Diamonds-50): материалы науч.-практ. конф., посвящ. пятидесятилетию открытия первой алмазоносной кимберлитовой трубки «Зарница», 25-27 мая 2004 г. / (гл. редакторы: А.Ф. Морозов, О.В. Петров). – СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. –С. 295-297.

82. Серокуров Ю.Н., Калмыков В.Д., Зуев В.М. Космические методы при прогнозе и поисках месторождений алмазов. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2001. – 198 с.

83. Серокуров Ю.Н., Калмыков В.Д., Корчуганова Н.И. Геолого-тектоническая позиция кимберлитов Далдыно-Алакитского района в материалах обработки зональных космических снимков // Эффективность прогнозирования и поисков месторождений алмазов: прошлое, настоящее и будущее (Алмазы-50) = Diamond deposits prediction and prospecting: past, present and future (Diamonds-50): материалы науч.-практ. конф., посвящ. пятидесятилетию открытия первой алмазоносной кимберлитовой трубки «Зарница», 25-27 мая 2004 г. / (гл. редакторы: А.Ф. Морозов, О.В. Петров). – СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. –С. 321-323.

84. Серокуров Ю.Н., Калмыков В.Д. Системы очаговых магмотектонических структур – основной фактор контроля фанерозойского магматизма в районе Зимнего Берега // Руды и металлы. – 2006. – №4. – С. 43-48.

85. Смирнов М.Ю., Афанасьев Н.Ф., Атакова М.М. Возможности применения материалов дистанционного зондирования при поисках коренных месторождений алмазов. 2006.

86. Требования к опережающей геофизической основе Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1: 1000 000 третьего поколения (вторая редакция). – М.–СПб.: Роснедра, 2012. – 23 с. + 3 вкладки.

87. Трофимов В.С. Геология месторождений природных алмазов. – М., Недра, 1980. – 304 с.

88. Трофимов Д.М. Эволюция космических методов, результаты их использования в нефтегазопроисловых работах за период 1987-2007 гг. и потенциальные возможности в будущем // Геоматика. – 2009. – №1. – С. 7-15.

89. Трофимов Д.М., Евдокименков В.Н., Шуваева М.К. Современные методы и алгоритмы обработки и анализа комплекса космической, геолого-геофизической и геохимической информации для прогноза углеводородного потенциала неизученных участков недр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 320 с.
90. Тюленев А.Е., Кушев В.Г. Региональная закономерность размещения очагов щелочно-ультраосновного и эксплозивного магматизма на территории Сибирской и Китайско-Корейской платформ // Принципы и методика дистанционных исследований при прогнозировании твердых полезных ископаемых. Сб. науч. трудов. (Отв. ред. Д.В. Лопатин). – СПб.: ВСЕГЕИ, 1992. – С. 77-85.
91. Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Коренные месторождения алмазов мира. – М.: Недра, 1998. – 555 с.
92. Хилько А.П. Использование космоснимков, цифровых и теневых моделей рельефа при решении вопросов неотектоники, прогноза нефтегазоносности и поисков кимберлитовых тел (на примере отдельных площадей Сибири) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2011. – №2 (6). С. 19-28.
93. Фолисевич М.Я., Кирий А.Н., Литовская М.Д. и др. Отчет о ревизионно-поисковых работах масштаба 1:500 000 по оценке перспектив коренной алмазоносности Лено-Анабарского междуречья в 1995-1999 гг. (в 7-ми томах). Росгеолфонд. Инв. № 476859. Амакинская ГРЭ АК «АЛРОСА», 2000 г.
94. Фомин Ю.М. Рудоконтролирующие структуры на алмазы и роль космоснимков при их выявлении // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1991. - №11. С. 145-149.
95. Фомин Ю.М. Структурная позиция алмазоносных полей востока Сибирской платформы // Известия Академии наук. Российская академия наук. Серия геологическая. – 1992. - №12. – С. 152-155.
96. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
97. Щепин М.В., Евдокимов С.В., Головченко Ю.В. Выявление кольцевых структур по результатам обработки изображений космических снимков // Исследование Земли из космоса. – 2007. – №4. – С. 74-87.
98. Щепин М.В., Евдокимов С.В. Выявление геологических объектов по материалам космической съемки // Исследование Земли из космоса. – 2008. – №2. – С. 44-56.
99. Щепин М.В., Евдокимов С.В. Выявление алмазоносных кимберлитов на материалах космической съемки // Исследование Земли из космоса. – 2009. – №4. – С. 71-77.