

МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АЛМАЗОВ

УДК 550.814:553.81

Р. С. КОНТАРОВИЧ, П. С. БАБАЯНЦ (ГНПП «Аэрогеофизика»),
Ю. Г. ПОДМОГОВ (АК «АПРОСА»), Ю. М. ЭРИНЧЕК (ВСЕГЕИ)

СОВРЕМЕННЫЕ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ КОРЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АЛМАЗОВ

Рассмотрены история, современное состояние и тенденции развития аэрогеофизических методов поисков коренных месторождений алмазов. Перспективы открытия новых месторождений могут быть связаны исключительно со слабоконтрастными объектами, локализованными в сложных геолого-геофизических условиях. В обозримой перспективе базовым методом поисков будет детальная аэромагнитная съемка. Преимущества современных съемок определяются новой технологической базой проведения всех этапов работ, что показано на примере сопоставления результатов съемок масштаба 1:10 000, выполненных на севере Алакит-Мархинского кимберлитового поля (Западная Якутия) в 70-е годы и в 2002 г. Современные аэромагнитные съемки по своей эффективности значительно превосходят аналогичные работы прежнего периода.

По мере совершенствования аппаратно-технической базы и технологии интерпретации аэроэлектроразведки и аэрогравиметрии следует ожидать их широкого внедрения в практику поисков коренных месторождений алмазов.

В ближайшие годы развитие технологий геофизических методов при поисках коренных месторождений алмазов будет происходить главным образом путем повышения уровня содержательной интерпретации данных, направленных в первую очередь на разработку выделяемых перспективных аномалий и решение проблем структурно-тектонического прогнозирования.

History, modern state and developing aerogeophysical methods of primary diamond deposits prospecting are discussed. Future discoveries of new deposits can be attributed solely to low-contrast objects localized in complex geological and geophysical settings. Therefore, in the near future the detailed aeromagnetic surveys will remain as the main method of deposit locating. The advantages of modern survey techniques are attributed to new technologies used at all stages of surveying. An example of the comparison of surveys taken in 1970s to those of 2002 over the Northern part of the Alakit-Marhinsky kimberlite field in Western Yakutia in the scale of 1:10 000. Modern aeromagnetic surveys are superior in their effectiveness to those of the past.

In the course of further developing of equipment and technologies for collecting and interpreting of aereoelectro-surveying and aerogravimetry, they will be widely accepted as a means for prospecting primary diamond deposits. In the forthcoming years the development of geophysical technologies for prospecting of these deposits will focus on improving technologies of interpretation of obtained data, accompanied by selection of potential anomalies, and by solving of problems of structural-tectonic forecasting.

Как только в 1954 г. Л. А. Попугаевой была открыта первая на территории Советского Союза кимберлитовая трубка и по результатам измерения на образцах определена повышенная магнитность слагающих ее пород, по инициативе П. Н. Меньшикова (Восточная геофизическая экспедиция Западного геофизического треста) проведенные первые опытно-методические наземные магнитные съемки м-бов 1:25 000 и 1:10 000 позволили уже в 1955 г. выявить ряд новых кимберлитовых трубок.

Полученные результаты послужили основанием для проведения в 1956 г. первых производственных аэромагнитных исследований. Для съемки использовался аэромагнитометр АСГМ-25, размещавшийся на самолете Ан-2. Опытные работы, проведенные над известными кимберли-

товыми трубками «Удачная», «Мир» и др., показали, что они четко отображаются на маршрутных графиках магнитного поля в виде контрастных изолированных аномалий, фиксируемых на одном-двух, реже трех маршрутах, расстояние между которыми 250 м. Экспериментальные работы позволили выяснить также, что наиболее контрастные аномалии оставались метрически достоверными на высотах до 400 м, кроме того, они послужили основанием для выбора масштаба площадных производственных работ, который составил 1:25 000 (расстояние между рядовыми маршрутами 250 м). Локальные изометричные магнитные аномалии, наблюдаемые на земле и в воздухе над кимберлитовыми трубками, были названы П. Н. Меньшиковым аномалиями трубчатого типа.

Несмотря на невысокое качество первых аэромагнитных снимков, результаты их убедительно показали, что аэромагнитная съемка может успешно решать поставленные поисковые задачи. За период с 1956 по 1959 г. с ее помощью был выявлен ряд кимберлитовых трубок в различных районах Якутии.

За полвека, прошедшие со времени открытия первой кимберлитовой трубки, для решения задачи поисков коренных месторождений алмазов были опробованы чуть ли не все известные геофизические методы и их модификации, от самых экзотических вариантов электроразведки до тепловой инфракрасной съемки, однако устойчивую эффективность продемонстрировали лишь аэромагнитная съемка и шлиховое опробование. Эта тенденция сохраняется и сейчас, при этом роль шлихового опробования неуклонно снижается, так как возможности открытия крупных трубок, залегающих в благоприятных геолого-ландшафтных условиях, практически исчерпаны.

Причиной такого положения дел, по нашему мнению, служит отсутствие надежных критериев локализации кимберлитоперспективных участков площадью в первые десятки квадратных километров, что существенным образом снижает эффективность наземных работ и определяет приоритет аэрогеофизических исследований. В то же время основные аэрогеофизические методы и модификации, за исключением аэромагнитной съемки, существенно уступают качеству и детальности своих наземных аналогов. Нам представляется, что по мере развития аппаратно-технической, методической и интерпретационной базы аэрогеофизических методов, в первую очередь электроразведки и гравиметрии, их роль при поисках коренных месторождений алмазов будет неуклонно расти, однако этот процесс требует времени для проведения широкомасштабных опытно-методических работ.

Отметим, что активные усилия в этом направлении уже предпринимаются. В 2003 г. специалисты Амакинской ГРЭ АК «АЛРОСА» в ходе визита в Россию представителей компании ВНР Billiton ознакомились с аэрогравиметрической системой FALCON (гравитационный градиентометр), которую компания широко использует при производстве алмазописковых работ во многих странах мира, а также приняли участие в обработке и анализе полученных с помощью этой системы данных. Испытания показали, что качество материалов приближается к качеству наземных съемок м-ба 1:25 000. В 2004 г. начата опытно-промышленная эксплуатация современного аэроэлектроразведочного комплекса ДИП-4А (разработка ГНПП «Аэрогеофизика») на объектах Амакинской ГРЭ АК «АЛРОСА».

Тем не менее, в обозримой перспективе базовым геофизическим методом поисков коренных месторождений алмазов останется детальная аэромагнитная съемка. При этом необходимо отдавать себе отчет, что возможности выявления крупных,

контрастных в геофизическом отношении рудных объектов, залегающих в простых ландшафтно-геологических условиях, практически исчерпаны как в нашей стране, так и в значительной мере за рубежом. Перспективы открытия новых месторождений могут связываться практически исключительно со слабоконтрастными объектами, локализованными в сложных геолого-геофизических условиях. Необходимость их выделения и ранжирования по степени перспективности накладывает достаточно жесткие требования к аппаратуре, технологии полевых измерений и обработке данных.

Аппаратура и оборудование. Современная аэромагнитная съемка выполняется с помощью квантовых магнитометров чувствительностью до 0,0005 нТл, датчик которых размещается в специальном стингере, жестко закрепленном на борту летательного аппарата, либо в специальной выпускной гондоле. В первом случае компенсация влияния летательного аппарата на результаты измерений осуществляется, как правило, с помощью специального трехкомпонентного феррозондового магнитометра. Поскольку разрешающая способность (чувствительность) таких магнитометров существенно ниже, глубина компенсации на 2–3 порядка уступает чувствительности полевого прибора. Второй вариант представляется более предпочтительным, поскольку практически полностью исключает влияние на результаты измерений девиационных помех. Однако он более сложен технологически, так как требует размещения в той же гондоле дополнительной антенны GPS-приемника, обеспечения передачи по рабочему кабелю дополнительной информации и исключения взаимного влияния датчика магнитометра и антенны GPS-приемника.

Использование широко рекламируемых в последние годы калиевых датчиков никакого заметного выигрыша не дает, поскольку чувствительность даже цезиевых аэромагнитометров реализуется до сих пор не в полной мере. Так, при средних градиентах магнитного поля в пределах площади работ около 50 нТл/км при точности пространственной привязки данных ± 1 м связанная с ней средняя погрешность измерений магнитного поля составит 0,05 нТл, т. е. на два порядка выше чувствительности. Таким образом, существенно большее влияние на качество выполненных работ оказывают не характеристики используемого магнитометра, а точность пространственной привязки данных, методика реализации полевых измерений, корректный учет вариаций, корректный граф обработки полевой информации.

При этом сегодняшний технологический уровень аэромагнитной съемки характеризуется весьма низким уровнем высокочастотных помех, обусловленных как внутренними шумами магнитометра, так и влиянием локальных неоднородностей верхней части разреза (по нашим оценкам, его уровень не превышает $\pm 0,1$ нТл), что позволяет надежно картировать, выделять и детально изучать:

— аномалии от кимберлитовых тел размерами от первых десятков метров интенсивностью от 0,2 до 2 нТл и выше;

— слабопроявленные дайки, тектонические нарушения и зоны трещиноватости;

— области аккумуляции минералов тяжелой фракции;

— структурно-тектоническое строение пород фундамента и осадочного чехла.

Особенности методики полевых работ и первичной обработки данных. Работы выполняются обычно по системе параллельных маршрутов с генеральным обтеканием рельефа. М-бы съемки — 1:5000–1:10 000. В последние годы работами аэропартии Амакинской ГРЭ АК «АЛРОСА» показана эффективность использования ортогональной сети наблюдений, когда съемка выполняется по сети взаимно перпендикулярных маршрутов, образующих сеть наблюдений 100 × 100 м. Принципиально важно фиксировать в процессе съемки все

три координаты точек наблюдений, включая высоту над поверхностью геоида. Эти данные должны быть использованы при последующей обработке и интерпретации материалов аэромагнитной съемки.

Целесообразность такого подхода заключается в том, что измеренные значения магнитного поля представляют собой сложную суперпозицию эффектов от намагниченных объектов, залегающих на разной глубине, и форм рельефа, сложенных интенсивно намагниченными разностями пород. Эти измерения обычно определены на крайне неровной поверхности (так как наблюдения выполняются с генеральным обтеканием рельефа), что вносит дополнительные искажения в форму аномалий, обусловленные незакономерным изменением расстояния до намагниченных объектов. При этом размеры эквивалентных аномалеобразующих объектов, имитирующих влияние форм рельефа и изменения высоты полета, и реальных намагниченных объектов, как и расстояние до них, по крайней мере сопоставимы (рис. 1).

Отсюда с очевидностью следует, во-первых, низкая эффективность использования при последующей обработке данных формальных методов разделения полей, основанных на частотной селекции данных, и, во-вторых, методов интерпретации данных, базирующихся на алгоритмах трансформации (фильтрации) исходного магнитного поля, поскольку последние предполагают задание исходных данных в узлах регулярной сети.

Помимо прочего, различия в высотах прохождения смежных маршрутов аэромагнитной съемки являются основным источником профильной невязки вследствие влияния нормального вертикального градиента магнитного поля Земли. Существенно подавить «профильность» можно, например, вводя поправку за нормальное поле в каждую точку наблюдений с учетом ее высоты. Это предопределяет целесообразность использования международной модели нормального поля IGRF, поскольку опция исключения нормального поля с использованием этой модели с учетом трех координат включена как стандартная в большинство современных пакетов первичной обработки данных (GEOSOFT, INTREPID и т.п.). Модель же нормального поля ИЗМИРАН в последние годы разработчиками не поддерживается из-за закрытия большинства магнитных обсерваторий на территории страны и ближнего зарубежья.

Особенности технологий обработки и интерпретации данных. Как уже отмечалось, при поисках коренных месторождений алмазов предметом изучения все чаще становятся весьма слабоконтрастные объекты, залегающие в неблагоприятных геолого-ландшафтных условиях. Кроме того, в последние годы устойчиво растут объемы работ, выполняемых на открытых и полужакрытых территориях (Балтийский щит, Южная Африка, Канадский щит и т. п.), характеризующихся значительной дифференциацией пород по физическим свойствам и, как следствие, наличием большого числа ложных аномалий. Так, при выполнении

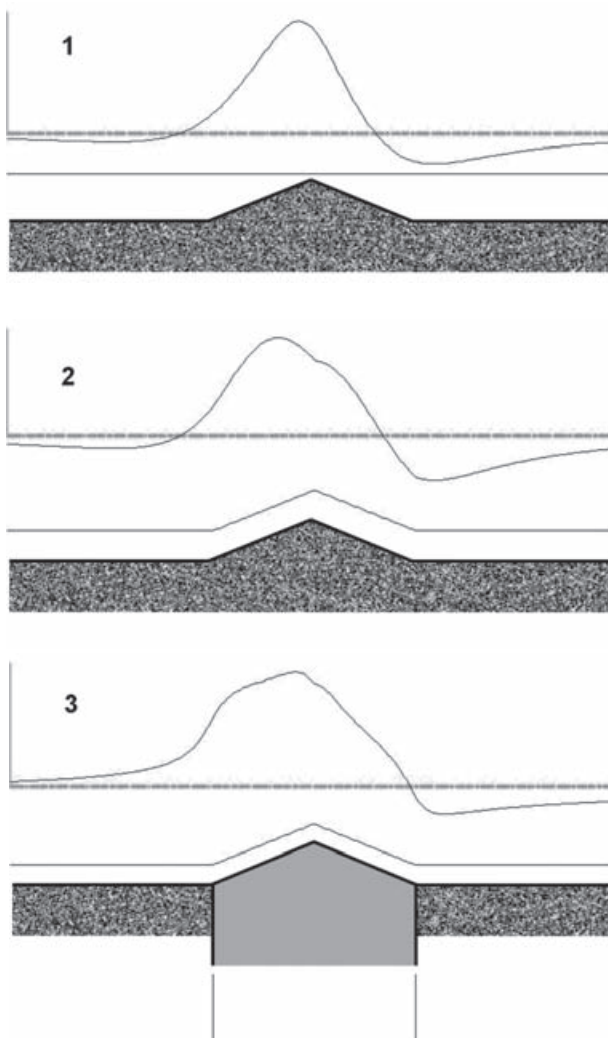


Рис. 1. Магнитные аномалии от положительной формы рельефа при съемке на постоянной высоте (1), с огибанием рельефа (2) и связанной с объектом трубчатой формы (3)

детальной аэромагнитной съемки м-ба 1:5 000 на территории Республики Ангола в 2004 г. на площади около 700 км² было выделено около 900 аномалий той или иной степени перспективности. Отсюда с очевидностью следует, что ключевой проблемой поисков коренных месторождений алмазов является не выделение аномалий трубчатой формы, а их разбраковка.

Традиционный подход к интерпретации результатов аэромагнитной съемки при поисках коренных месторождений алмазов, сложившийся исторически, заключается в использовании для интерпретации исходных маршрутных данных (двумерная интерпретация). Главный аргумент последователей этого подхода — вовлечение в интерпретацию всех измеренных точек без потери детальности. Действительно, современные аэромагнитометры обеспечивают весьма высокую детальность съемки вдоль линии маршрута (расстояние между точками наблюдения менее 1 м). Очевидно, что представление результатов съемки в форме матрицы с интерполяцией исходных данных в узлы регулярной сети неизбежно приведет к потере детальности, даже если существенно уменьшить размеры ячейки матрицы. При этом такой путь неизбежно приводит к необходимости вычисления значений магнитного поля в точках, в которых измерения не проводились вовсе, а используемые для этого методы никак не учитывают физико-математических основ магнитного поля. Заметим для примера, что для съемки м-ба 1:5 000 (расстояние между маршрутами 50 м) представление результатов в виде матрицы с размером ячейки 10 × 10 м приводит к тому, что значения магнитного поля в матрице почти на 80% являются вычисленными, при этом более 80% реально измеренных значений магнитного поля практически не используется. К недостаткам этого подхода относится также погрешность интерполяции, которая может достигать 1–1,5 нТл, т. е. величины, сопоставимой с интенсивностью полезных аномалий. Кроме того, матрица представляет собой плоскую конструкцию и не учитывает разности высот точек наблюдений.

Нами был проведен следующий эксперимент. Из исходных результатов наблюдений по ряду площадей различными методами интерполяции были получены регулярные матрицы. Затем из этих матриц извлекались значения магнитного поля в точки с координатами реальных точек наблюдений. При среднеквадратических погрешностях съемки, не превышающих 1 нТл (определялись по специальным диагональным маршрутам), стандартное отклонение разности исходного и интерполированного полей составило 0,2–1,1 нТл при амплитуде изменений до первых десятков нТл. Как видно из рис. 2, распределение этой разности, фактически характеризующей погрешность интерполяции, носит неслучайный характер, т. е. появляется множество ложных аномалий, обусловленных лишь выбранным способом интерполяции.

В то же время использование для оценки параметров квазиизометричных объектов алгоритмов, разработанных для двумерных тел, может привести к принципиальным ошибкам, многократно перекрывающим выигрыш в детальности. Кроме того, аномалии от положительных форм рельефа и объектов трубчатой формы имеют весьма сходную морфологию (рис. 1), что существенно затрудняет их идентификацию и разбраковку.

Отсюда следует, что граф обработки аэромагнитных данных, ориентированный на поиски коренных месторождений алмазов, должен базироваться на методах прямого моделирования магнитного поля, позволяющих использовать все измерения, заданные в исходных точках наблюдений. Кроме того, использование методов прямого моделирования позволяет скомпенсировать существенные искажения формы аномалий, которые вносит наклон вектора нормального магнитного поля, что особенно сказывается при работе в низких широтах.

Современный граф обработки аэромагнитных данных разработан специалистами ГНПП «Аэрогеофизика» и используется в ГНПП «Аэрогеофизика» и Амакинской ГРЭ АК «АЛРОСА», организациях, выполняющих на территории России свыше 80% общих объемов съемок. Он нацелен на поиски месторождений алмазов и включает следующие опции:

1. *Моделирование кристаллического фундамента.* Для решения этой задачи привлекаются априорные геолого-геофизические данные (сейсморазведка, бурение, гравиметрия м-бов 1:200 000 и крупнее). На первом этапе моделирования изучается морфология так называемой главной магнитоактивной поверхности, т. е. огибающей системы особых точек функции, описывающей аномальное поле. Как правило, эта поверхность оказывается достаточно тесно связанной с кровлей кристаллического фундамента. Наиболее эффективные способы построения главной магнитоактивной поверхности непосредственно базируются на методах, позволяющих оценить положение особых точек, поскольку особые точки функций, описывающих аномальные поля, локализируются по полю однозначно даже при полном отсутствии априорной информации об источниках. Самым мощным из существующих на сегодня средств анализа морфологии главной магнитоактивной поверхности является технология ROMGAS (П. С. Бабаянц, Ю. И. Блох, А. А. Трусов), включенная авторами в состав пакета программ СИГМА-3D. Она базируется на анализе амплитудных спектров потенциального поля в квадратных скользящих окнах, размер которых должен примерно на порядок превышать ожидаемые глубины.

Знание морфологии верхней кромки источников аномального магнитного поля позволяет перейти к следующему этапу моделирования кристаллического фундамента — определению намагниченности образований верхней части разреза, которая связана с вещественным составом пород

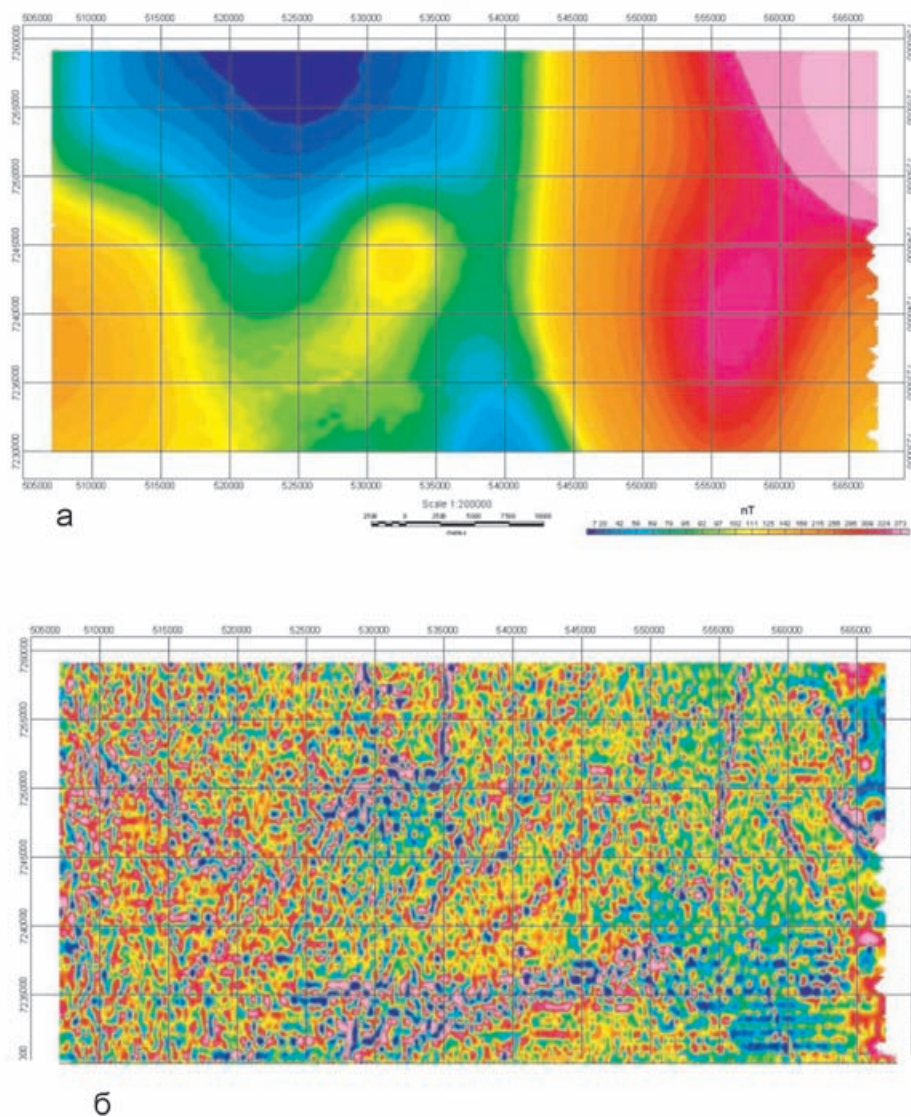


Рис. 2. Влияние погрешности интерполяции при сведении данных в регулярную матрицу
а — аномальное магнитное поле, *б* — разность между наблюдаемым и интерполированным (извлеченным из матрицы) полями

верхней части фундамента. Для решения подобных задач предназначена программа REIST из пакета СИГМА-3D.

На этом этапе обычно используется также аналогичное моделирование и для гравитационного поля. Вычисляемые модели распределения плотности и намагниченности служат ключом для оценки вещественного состава образований, слагающих верхнюю часть фундамента. Кроме того, они используются и для картирования тектонических нарушений.

Получаемая модель достаточно детально и достоверно характеризует геологическое строение фундамента изучаемых территорий, морфологию его поверхности, тектонику. Помимо того, что знание геологического строения кристаллическо-

го основания дает ключ к пониманию истории геологического развития территории в целом, такое моделирование позволяет выполнить редуцирование исходного поля за влияние фундамента.

2. *Редуцирование аномального магнитного поля* с выделением составляющей, отвечающей за строение осадочного чехла. Отметим, что формальные методы разделения полей для решения этой задачи неприемлемы, поскольку вносимые ими искажения в структуру локальной составляющей магнитного поля делают практически невозможной количественную интерпретацию остаточных аномалий, а значит, и разбраковку выделяемых перспективных аномалий.

3. *Изучение особенностей геологического строения осадочного чехла.* В первую очередь, это изуче-

ние ландшафтно-геологических и структурно-тектонических условий. Полученные данные позволяют оценить характер и степень унаследованности структур фундамента в осадочном чехле и могут быть использованы при последующей разбраковке выделяемых аномалий, а также для локализации участков, перспективных на наличие немагнитных кимберлитовых тел. Значительную помощь в этом могут оказать данные аэрогравиметрии (с точностью, сопоставимой с наземными работами м-ба 1:50 000), аэроэлектроразведки, аэрогамма-спектрометрии.

4. *Выделение перспективных аномалий.* Эта задача может быть реализована как с помощью формальных вероятностно-статистических методов анализа, так и с использованием методов распознавания образов. В числе первых можно назвать технологию КВОЛАН (В. Е. Могилевский, ГНПП «Аэрогеофизика»), с помощью которой автоматически вычисляется более 15 различных статистических характеристик изолированных аномалий, а также технологию «стандарта фона» (В. М. Керцман, ГНПП «Аэрогеофизика»). Выделение перспективных аномалий осуществляется на основе анализа получаемых обобщенных числовых характеристик аномалий (амплитуда, размеры, изометричность, энергия и т. п.) по отношению к выбранному порогу принятия решения: перспективными считаются аномалии, величина анализируемой характеристики для которых превышает пороговое значение, остальные отбрасываются. Отметим, что результатом работы подобных алгоритмов являются выделенные аномалии, эпицентры которых могут быть отнесены на значительное расстояние от эпицентров аномалеобразующих объектов вследствие неперпендикулярности вектора намагниченности (т. е. при работе в низких и средних широтах). Это может создать существенные трудности при их заверке.

Подобного недостатка лишены алгоритмы, основанные на методах распознавания образов. К их числу относится, например, специальная опция пакета программ Oasis Montaj (GEOSOFT), основанная на анализе степени соответствия исходного (остаточного) магнитного поля моделям, заданным пользователем. Суть ее сводится к следующему:

— вычисляется аномалия магнитного поля от вертикального кругового цилиндра заданного радиуса в предположении индуктивной намагниченности (направление намагниченности совпадает с направлением нормального поля в пределах площади работ);

— в скользящем окне для каждой точки площади вычисляется коэффициент корреляции анализируемого поля с расчетной аномалией. Для максимального исключения влияния тренда магнитного поля, связанного с относительно глубинными объектами, в качестве исходного наиболее эффективно использовать остаточное магнитное поле, вычисленное как разность исходного поля и поля модели, рассчитанной на главную магнитоактивную поверхность;

— задается порог принятия решения для коэффициента корреляции. Если величина последнего превышает пороговое значение, то принимается решение о наличии в этой точке искомой аномалии. Заметим, что таким способом можно выделять как положительные, так и отрицательные аномалии. В последнем случае, естественно, должны анализироваться точки с отрицательными значениями коэффициента корреляции, и благоприятное решение принимается в том случае, когда коэффициент корреляции меньше порога.

Важная особенность описываемого алгоритма — эпицентры выявленных с его помощью аномалий коэффициента корреляции должны в общем случае совпадать с эпицентрами искомого объектов. Это особенно необходимо при работе в низких широтах, при пологом залегании вектора намагниченности, когда эпицентр магнитной аномалии может находиться за пределами проекции намагниченного объекта на дневную поверхность.

Второе направление реализуется также с помощью алгоритмов оптимального приема, разработанных сотрудниками ГНПП «Аэрогеофизика» (П. С. Бабаянц) и включенных в виде отдельной программы в состав пакета программ СИГМА-3D. В них распознавание может осуществляться по расчетным статистическим моделям либо по натурным моделям поля над известным объектом. Существенными преимуществами указанных алгоритмов являются возможность учета изменчивости геометрии и свойств эталонного объекта в заданных пределах, а также возможность распознавания комплексных (многопараметровых) аномалий.

5. *Разбраковка выделенных аномалий.* Для предварительной оценки природы выделенных аномалий используются специальные методы их количественной и полуколичественной интерпретации. С их помощью можно сделать предположительное заключение о соответствии формы аномального объекта представлениям о морфологии кимберлитовой трубки, а также оценить некоторые количественные характеристики объектов, в частности глубину залегания верхней и нижней кромок.

Для оценки глубин залегания верхних и нижних кромок аномальных объектов наиболее эффективным представляется использование методов локализации особых точек, основанных на анализе двумерного спектра Фурье анализируемого поля. Преимуществом указанного подхода является его универсальность, т. е. возможность использования алгоритма для интерпретации данных большинства геофизических методов (рис. 3).

В окне выбранного размера вычисляется двумерный спектр Фурье анализируемого поля, глубина залегания верхней и нижней кромок определяется по углу наклона соответствующей ветви аппроксимирующей прямой.

Для интерпретации данных аэромагнитной съемки может быть использован метод, основанный на подборе квазиэквивалентного решения. Квазиэквивалентом n -го порядка принято называть объект простой формы, первые n гармони-

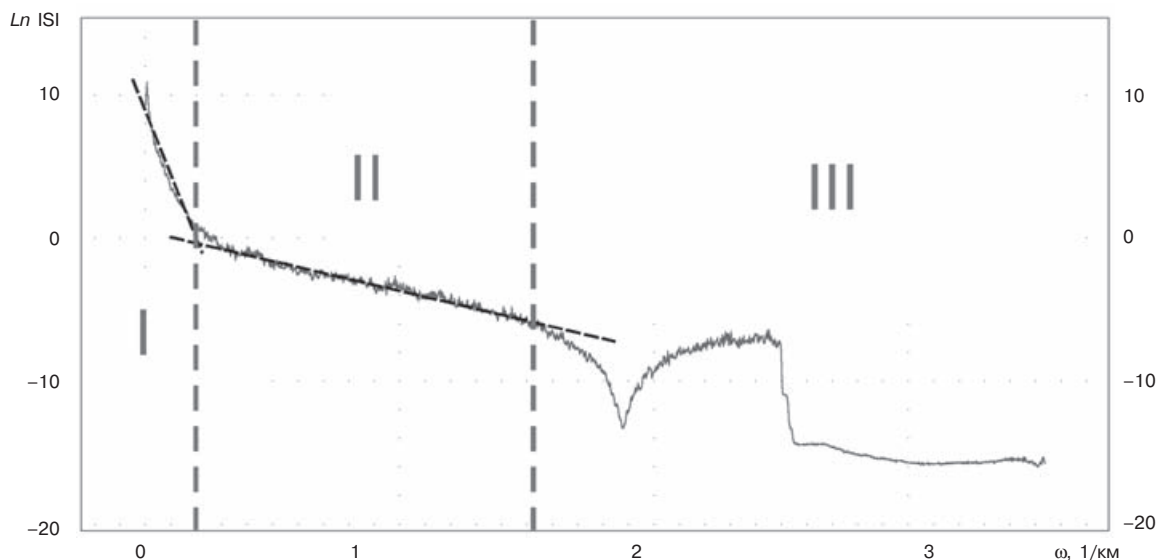


Рис. 3. График логарифма радиально осредненного двумерного спектра Фурье магнитного поля

I–III — части графика, отвечающие нижней (*I*) и верхней (*II*) кромкам объекта и помехам (*III*). Пунктиром показаны прямые, аппроксимирующие соответствующие части графика

ческих моментов которого совпадают с соответствующими моментами реального источника. Совпадение полей двух источников однозначно влечет за собой и совпадение их моментов. Поэтому при решении задач, базирующихся на определении первых моментов, удобно использовать аппроксимационный подход, т. е. подбирать наблюдаемое поле или некоторую его часть полем формальной конструкции, а затем моменты аппроксимирующей конструкции считать моментами источника. Для многих задач при этом эффективно использование формальной конструкции в виде стержня, достаточно хорошо воспроизводящего нулевой, первый и второй моменты сложных источников.

Для реализации указанного подхода составлена специальная программа QUASI, входящая в состав пакета программ СИГМА-3D. В программе QUASI подбор квазиэквивалента осуществляется в окне, назначенном пользователем для выбранной им в интерактивном режиме изолированной аномалии. На первом этапе работы выполняется позиционирование эпицентра аномалии с использованием методов локализации особых точек потенциального поля, т. е. определяются горизонтальные координаты положения эпицентра объекта.

После определения горизонтальных координат стержня для локализованной аномалии в автоматическом режиме одновременно подбираются линейный региональный фон, глубины залегания верхней и нижней кромки и величина магнитного момента. Вычисляется доля энергии остатка, которая характеризует степень исчерпывания исходного поля моделью, другими словами, релевантность подбора. По завершении расчетов вся полученная информация высвечивается во всплывающем окне и может быть помещена в специальный каталог.

Для оценки морфологии выделенных перспективных объектов весьма эффективно использование методов интерпретационной томографии в аппроксимационной постановке. С их помощью выполняется объемное моделирование перспективных объектов, заданных остаточным магнитным полем в выбранном окне. Анализ морфологии полученной объемной модели распределения эффективной намагниченности (плотности) позволяет сделать заключение о соответствии объекта представлениям о его трубчатой природе.

Эффективность работы и пути ее повышения. Современная аэромагнитная съемка по своей эффективности значительно превосходит аналогичные работы 70–90-х годов, что практически исключает необходимость массовой наземной магнитной съемки и уверенно решает задачу опознания значительных по размеру площадей.

Как уже отмечалось, преимущества современных съемок определяются абсолютно новой технологической базой. Это касается магнитных измерений, плановой и высотной привязки линий фактического полета, а также современных средств компьютерной обработки аэрогеофизической информации. Кроме технических средств большое значение имеют методические аспекты геофизических измерений. Ступенчатые сети опорных (увязочных) профилей, жесткая синхронизация аэромагнитометра и вариационной станции по каналу спутникового времени, жесткий и регулярный контроль за качеством работ и др.

Высокие поисковые возможности современных детальных аэромагнитных съемок наглядно демонстрирует пример сопоставления результатов работ, выполненных на севере Алаakit-Мархинского кимберлитового поля (Западная Якутия) в 1970 г. (рис. 4) и в 2001–2002 гг. (рис. 5). На площади

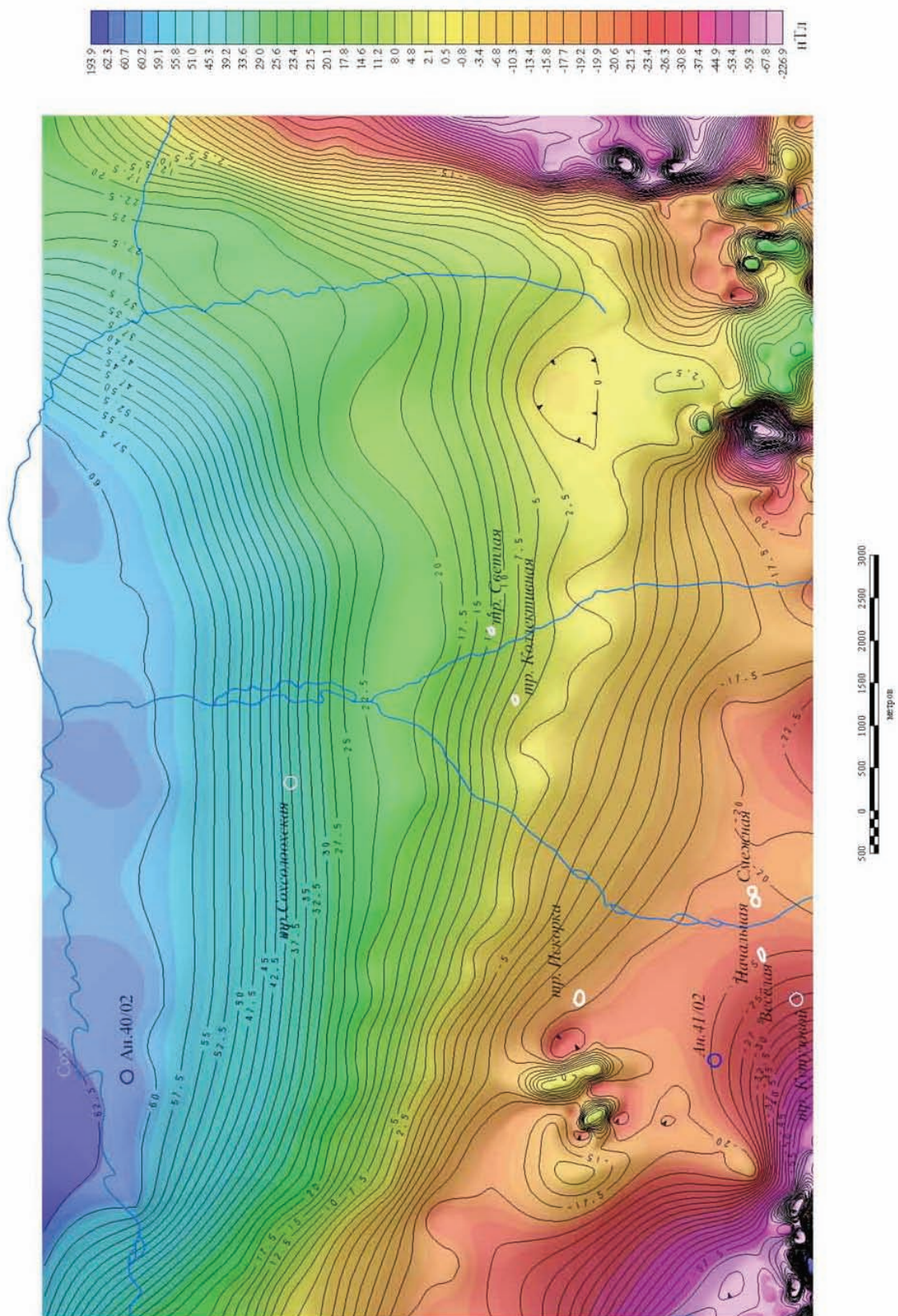


Рис. 4. Фрагмент карты изолиний (ΔT) северной части Алакит-Мархинского кимберлитового поля по данным аэромагнитной съемки масштаба 1:10 000, выполненной в 1970 г. (Ю. М. Эришечек, участок Ойгурский)

Аэромагнитометр — АМ-13; летательный аппарат — вертолет Ми-4; плановая привязка — радиоголографическая система РГС «Поиск-М»; курсопроладчик РГП-2; высота съемки 70–85 м; точность съемки $\pm 3,1$ НТЛ

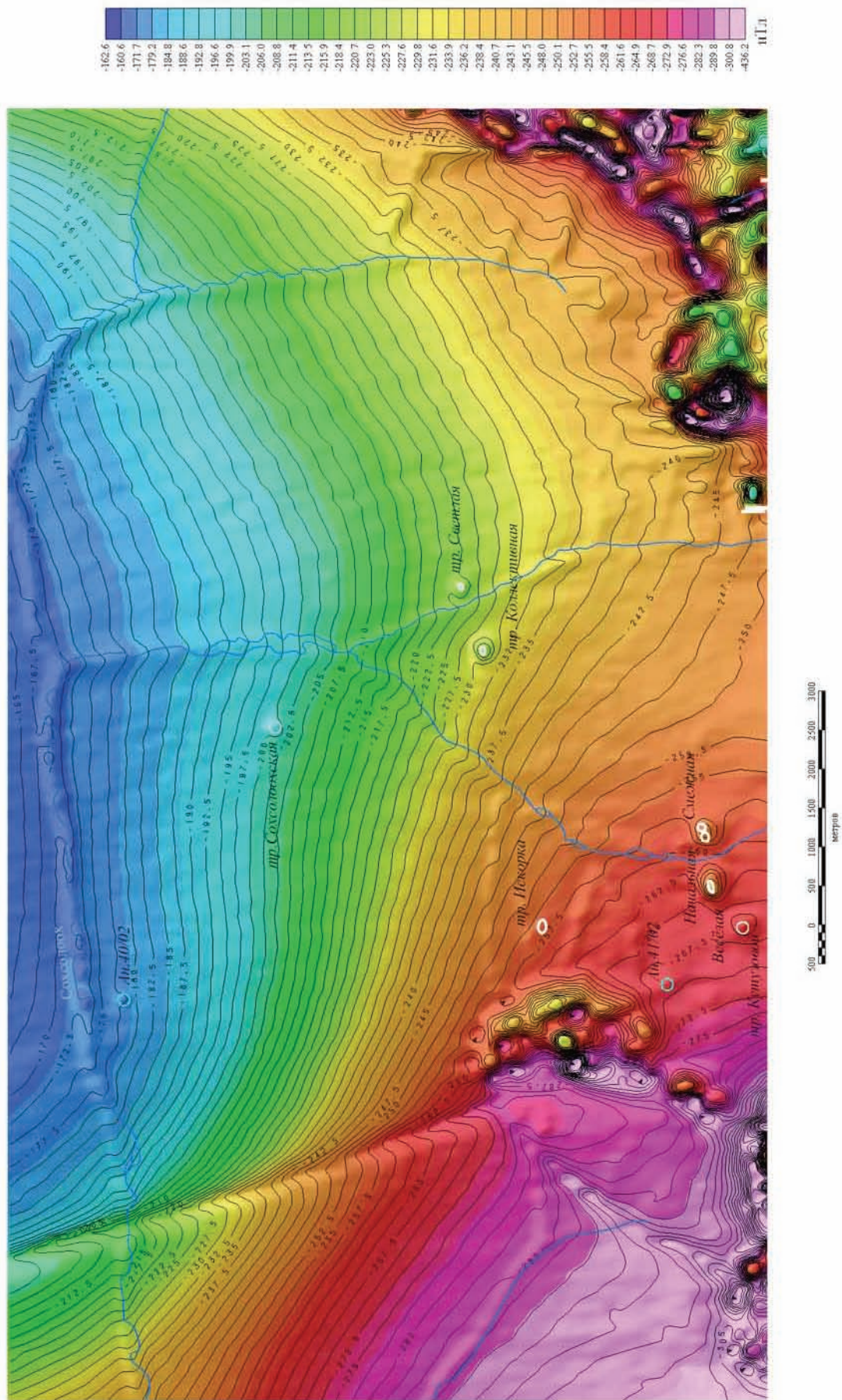


Рис. 5. Фрагмент карты изолиний северной части Алаakit-Мархинского кимберлитового поля по данным аэромагнитной съемки масштаба 1:10 000, выполненной в 2001-2002 гг. (М. Я. Фолисевиц, Н. Е. Морозова, участок Далдынский)

Аэромагнитометр — AeroMaster-1; летательный аппарат — самолет Ан-2; плановая привязка — спутниковая навигационная система GPS-ГЛОНАСС и базовая GPS-станция; высота съемки 70–90 м; точность съемки $\pm 1,08$ нПл в магнитных полях с горизонтальным градиентом до 50 нПл/км, $\pm 1,4$ нПл — с градиентом 50–100 нПл/км

Аномалия 43/02 (детальный участок)
План изолиний (ΔT_a)

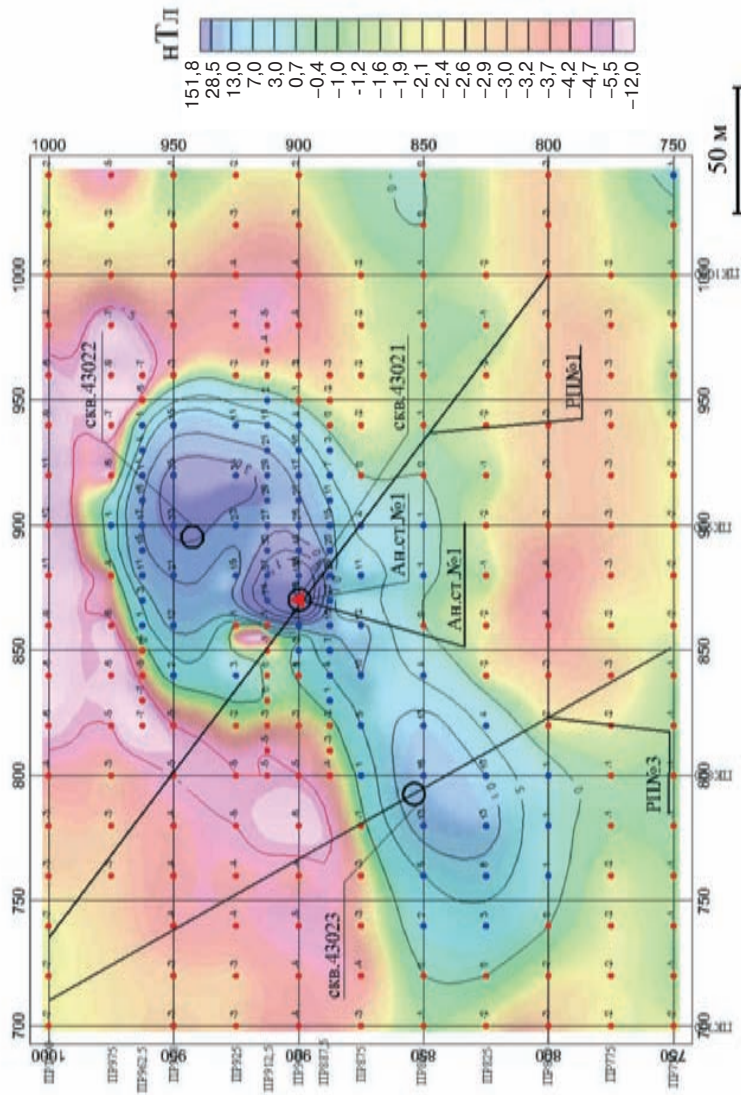
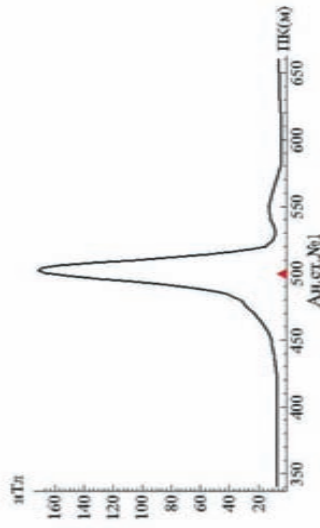
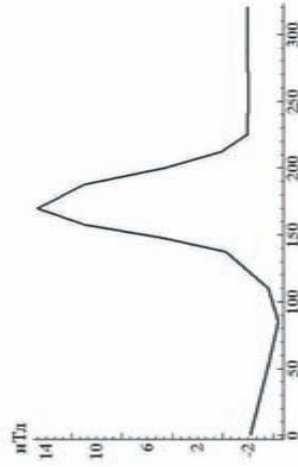


График (ΔT_a) по интегральному профилю №1. Азимут 306°



Глубина h (м) залегания верхней кромки магнитного объекта: $h=5-10$ м

График (ΔT_a) по интегральному профилю №3



Глубина h (м) залегания верхней кромки магнитного объекта: $h=15$ м

Рис. 6. Результаты наземной магнитной съемки на аэромагнитной аномалии 43/02 (трубка «Сохолоухская»)

порядка 160 км² к концу 60-х годов было известно 8 кимберлитовых тел относительно небольших размеров. Большинство из них не было зафиксировано аэромагнитной съемкой м-ба 1:10 000 1970 г. Современной съемкой м-ба 1:10 000 надежно фиксируется 7 тел из 8. Кроме того, обнаружены три новые локальные магнитные аномалии (№ 45/02, 41/02 и 40/02). Наземная заверка аномалий показала, что две из них вызваны кимберлитовыми телами (аномалия № 45/02 — трубка «Сохсолоохская», аномалия № 41/02 — трубка «Кутузовой») (рис. 6).

Развитие технологии геофизических методов при поисках коренных месторождений алмазов в ближайшие годы будет происходить в основном в направлении совершенствования содержательной интерпретации данных, направленных в первую очередь на разбраковку выделяемых перспективных аномалий и решение проблем структурно-тектонического прогнозирования.

С развитием аппаратурно-технической базы и технологии интерпретации методов аэроэлектроразведки и аэрогравиметрии следует ожидать широкого внедрения их в практику поисков коренных месторождений алмазов. При этом необходимо обес-

печить качество аэрогравиметрических работ, отвечающее по меньшей мере условиям м-ба 1:25 000. Нынешнее состояние дел и темпы развития метода позволяют предположить, что подобный прогресс (при использовании в качестве носителя вертолета) будет достигнут уже в обозримом будущем.

Целесообразность использования методов электроразведки обусловлена в первую очередь тем, что малоконтрастные по магнитным свойствам разности кимберлитов обычно имеют контрастные геоэлектрические характеристики. Нами (ГНПП «Аэрогеофизика» и Амакинская ГРЭ АК «АЛРОСА») предпринимаются усилия по внедрению современной модификации ДИП-А для решения и некоторых смежных задач. Сейчас работы подошли к этапу опытно-производственных испытаний аппаратуры.

Весьма перспективным представляется использование методов электроразведки, основанных на изучении нестационарных полей, особенно если удастся разделить аппаратурно или аналитически влияние проводимости и поляризуемости разреза. Однако этот процесс сдерживается из-за отсутствия соответствующих аппаратурных, методических и теоретических разработок.