

**РАЗВЕДКА И ОХРАНА НЕДР**  
**2006. № 5. с. 2-8.**

**Контарович Р.С.<sup>1</sup>, Бабаянц П.С.<sup>1</sup>, Блох Ю.И.<sup>1</sup>, Зубов Е.И.<sup>2</sup>, Трусов А.А.<sup>1</sup>**  
(1 – ГНПП «Аэрогеофизика», 2 – ЗАО «ВИРГ-Рудгеофизика»)

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ МАТЕРИАЛОВ  
СОВРЕМЕННЫХ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИХ СЪЕМОК**

Последние десятилетия характеризуются системным увеличением доли аэрогеофизических работ в общей структуре геологоразведочного производства. При этом объемы аэрогеофизических работ растут и в абсолютном выражении, особенно в последние годы, в связи с резким увеличением цен на основные виды минерального сырья. Рост спроса на аэрогеофизические съемки обусловлен резким увеличением их эффективности и поисковой отдачи по сравнению с аналогичными работами прошлых лет. В этой связи интересен ответ на вопрос, что же отличает современные геофизические съемки от работ прошлых лет, какие основные факторы обусловили значительный рост их эффективности?

В числе таких факторов, по нашему мнению, следует назвать внедрение микропроцессорных технологий в геофизическом приборостроении, что позволило обеспечить цифровую регистрацию и обработку сигналов. Это в свою очередь привело к возможности существенно усилить помехозащищенность измерительного канала и резко увеличить чувствительность аппаратуры. Внедрение цифровой регистрации сигналов, а также использование на борту высокопроизводительных компьютеров позволили также расширить пропускную способность измерительного канала и тем самым заметно улучшить пространственное разрешение съемки. И все же главным фактором, приведшим поистине к революционному повышению эффективности аэрогеофизических съемок, следует считать использование для привязки результатов измерений спутниковых навигационных систем. Их освоение позволило не только увеличить более чем на порядок точность плановой привязки результатов измерений, но и осуществлять с высокой точностью их высотную привязку.

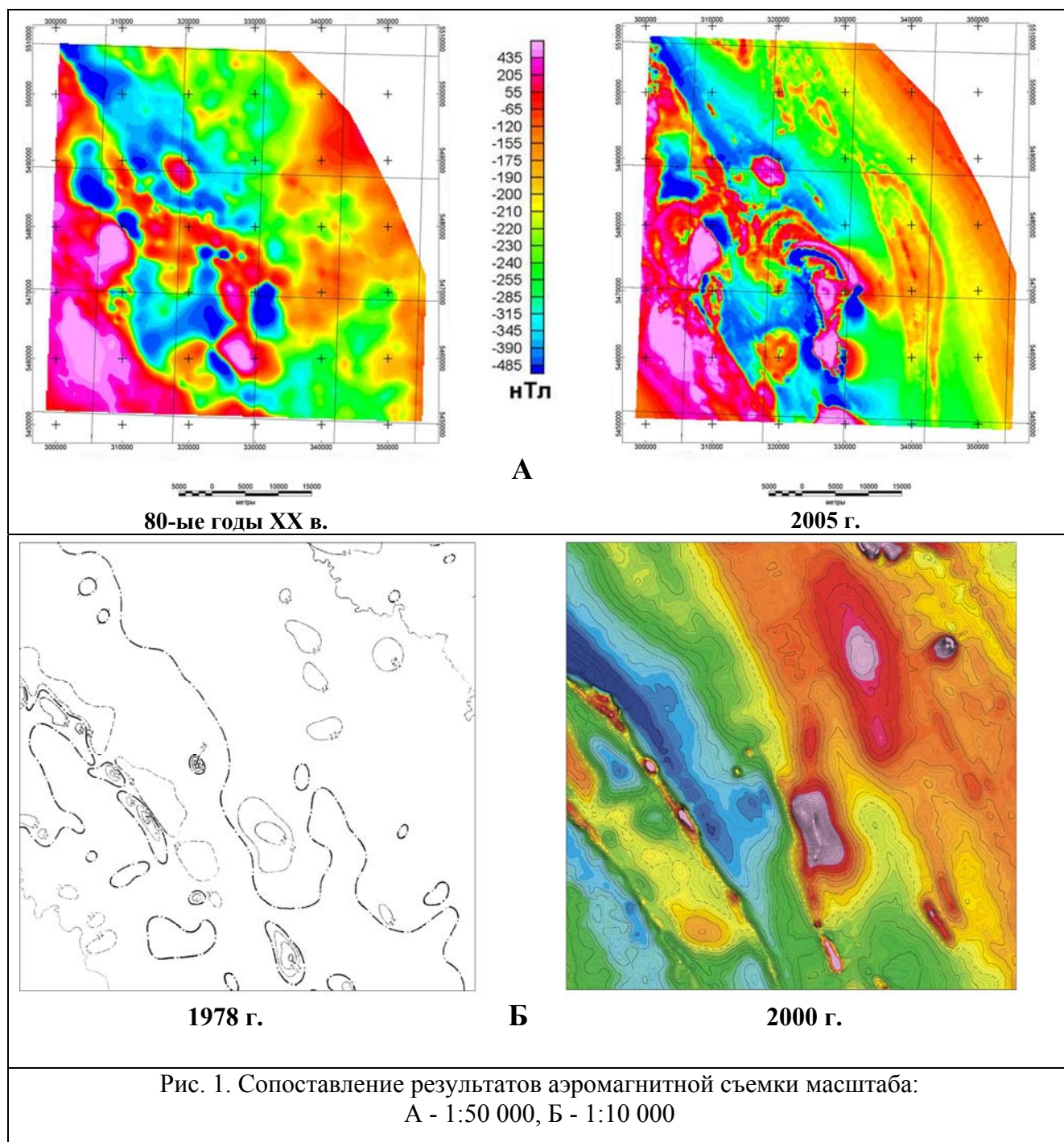
На рис. 1 представлены результаты аэромагнитной съемки: А - масштаба 1:50 000, выполненной на одной из площадей Рудного Алтая в середине 80-х годов и повторенной в 2005 году; Б - масштаба 1:10 000, выполненной на одной из площадей Среднего Тимана в 1978 году и повторенной в 2000 году. Район работ А характеризуется высокой степенью расчлененности рельефа: перепад высот в пределах площади превышает 1500 м. Заметим, что технология съемки в обоих случаях была сходной: по параллельным маршрутам через 500 м с генеральным обгибанием рельефа, частота регистрации не реже одного измерения в секунду; датчик магнитометра – в выносной гондоле. Тем не менее, разница в результатах съемок очевидна: общая структура поля в целом воспроизводится, однако современные съемки обладают существенно большим разрешением, особенно по отношению к локальным объектам.

Причина такого различия представляется очевидной: использование Доплеровской системы привязки данных при выполнении старых съемок не позволяло обеспечить точность плановой привязки лучше, чем  $\pm 25$  м, высоты пунктов наблюдений не учитывались вовсе, это требовало использования при увязке довольно серьезного сглаживания данных.

Интересно, что формальные показатели качества съемки – среднеквадратическая погрешность, вычисленная по точкам пересечения рядовых маршрутов и специально пройденного диагонального маршрута – различаются незначительно. Это, помимо прочего, свидетельствует о том, что указанная величина не является вполне адекватной оценкой качества съемки.

Таким образом, основными отличиями современных съемок от съемок прошлых лет являются применение спутниковых навигационных систем для привязки точек наблюдений, цифровая регистрация и обработка сигналов. Именно эти особенности съемок должны учитываться

в первую очередь при определении пригодности архивных материалов для переинтерпретации на базе современных технологий.



Повышение качества и разрешающей способности аэрогеофизических съемок предъявляют повышенные требования к технологии интерпретации полученных данных. Основы же методологии интерпретации аэрогеофизических данных определяются в свою очередь особенностями технологии получения материалов и типовых характеристик объектов исследований, в числе которых можно назвать следующие:

1. Экспрессность аэрогеофизических технологий, возможность за короткое время покрывать съемками высокого пространственного разрешения значительные территории; возможность работы на труднодоступных территориях; отсутствие техногенной нагрузки на изучаемые

территории, что позволяет выполнять исследования на площадях, закрытых для других видов работ.

2. Объемный характер получаемой информации, выражающийся в том, что в процессе съемки обычно изменяются как альтитуда, так и высота пунктов наблюдения. Исключение составляют аэрогравиметрические съемки, которые, как правило, выполняются на заданной альтитуде.

3. Возможность и целесообразность использования достаточно представительного комплекса методов: использование дополнительного информационного канала, как правило, увеличивает себестоимость работ не более чем на 10-15%.

4. Работа в большом числе случаев на малоизученных территориях, вследствие чего практически отсутствует априорная геолого-геофизическая информация, соответствующая масштабу исследований, либо ее объемы недостаточны.

5. Возможность работы практически на всех стадиях геологоразведочного процесса с получением данных необходимой детальности и представительности; высокая точность плановой и **высотной** привязок точек наблюдения; получение дополнительного канала информации из данных спутниковой навигации и показаний радиовысотомера – цифровой модели рельефа местности.

Указанные особенности технологии аэрогеофизических съемок и характеристики объектов исследований позволяют сформулировать общие требования к интерпретационным технологиям, используемым для анализа аэрогеофизических данных.

1. Результаты аэрогеофизических работ, как правило, служат основой для постановки наземных детализационных геолого-геофизических исследований. Это диктует необходимость получения итоговой информации в достаточно сжатые сроки. Таким образом, время, затраченное на интерпретацию данных, не должно существенно превышать времени, за которое произведена съемка, поэтому интерпретационные технологии должны быть в значительной мере автоматизированы и унифицированы.

2. Поскольку в большинстве случаев аэрогеофизические исследования выполняются на малоизученных территориях, используемые интерпретационные технологии и алгоритмы должны сохранять работоспособность при дефиците априорной информации.

3. Дефицит априорной информации в определенной мере может быть скомпенсирован выполнением комплексной интерпретации разнородных аэрогеофизических данных, элементы комплексной интерпретации данных должны использоваться как на этапе предварительного анализа, так и в процессе синтеза результатов.

4. Отсутствие во многих случаях современной геологической основы на изучаемых территориях диктует необходимость использования интерпретационных процедур, нацеленных на решение как задач общего геологического назначения (геологическое и структурно-тектоническое картирование, ландшафтно-геологическое районирование и т.п.), так и целевых, направленных на локализацию перспективных объектов.

Сказанное выше диктует необходимость и целесообразность выполнения на первом этапе общей геофизической интерпретации данных, направленной на решение типовых геологических задач (тотальная интерпретация). Граф последующей обработки данных должен быть нацелен на локализацию поисковых объектов, с использованием прямых (локальная интерпретация) и косвенных (целевая интерпретация) поисковых критериев и признаков. Отметим, что целевая и локальная интерпретация одних и тех же аэрогеофизических данных может выполняться многократно - в зависимости от решаемых задач ориентируясь на те или иные объекты. В этом смысле аэрогеофизические съемки достаточно универсальны, что необходимо учитывать при формировании комплекса аэрогеофизических методов, в первую очередь, на региональных стадиях работ.

Отдельного рассмотрения заслуживает вопрос о том, что считать исходными аэрогеофизическими данными для интерпретации. Основным источником неустойчивости обратных за-

дач геофизики являются помехи разнообразного происхождения в самой исходной информации. К сожалению, до сих пор влияние помех зачастую искусственно усиливают, подвергая интерпретации не сами исходные данные, а их суррогаты, т. е. то, что принято называть картами. Очевидно, все съемки реально проводятся по нерегулярным сетям, причем высоты пунктов наблюдений могут изменяться в достаточно широких пределах. Тем не менее, традиционно, прежде чем приступить к интерпретации, строят карты элементов полей. Для этого путем формальной интерполяции, зачастую с полным пренебрежением высотами пунктов наблюдений редуцируют исходные данные на плоские, горизонтальные и равномерные сети. Только после этой, вносящей дополнительные погрешности, операции начинают проводить основные аналитические и синтетические процедуры интерпретации.

Реже при проведении предварительного построения карт пользуются аппроксимационными методами, редуцируя исходные данные на горизонтальную плоскость, проходящую на уровне самых больших альтитуд пунктов наблюдений. Данный подход, конечно, более адекватен, но и он вносит свои погрешности в исходные данные. Дело в том, что в нем фактически производится аналитическое продолжение измеренного поля вверх на уровень редуцирования и при этом подавляется высокочастотная часть поля, регистрируемая на нижних уровнях съемки. Отсюда вытекает первый из важнейших принципов интерпретации:

**исходной информацией для интерпретации являются не карты, полученные путем формальной интерполяции без учета высот пунктов наблюдений, а электронные цифровые базы данных.**

Карты же могут служить лишь в качестве удобных и привычных, но не вполне адекватных средств визуализации этих данных. Программы интерпретации для каждой точки наблюдения должны использовать все три ее координаты и значение интерпретируемого поля. Соответственно, все получаемые модели не будут содержать искажений из-за неадекватного учета высот пунктов.

В процессе моделирования не могут подвергаться количественной интерпретации никакие формальные трансформанты исходных полей; для разделения полей могут быть использованы только истокообразные аппроксимации. Интерполяция вносит свои искажения, зависящие от применяемого способа, и в условиях неустойчивости способные существенно и практически непредсказуемо исказить разделяемые компоненты.

Тем не менее, это не означает, что мы являемся противниками применения трансформаций вообще – они крайне важны при решении задач обнаружения и распознавания, но, по нашему мнению, трансформироваться должны не сами аномальные поля. Дело в том, что поля зависят от множества разнообразных факторов. Среди них упомянутая выше разновысотность пунктов наблюдения, различные глубины источников, а в магниторазведке также мешающее влияние сопряженных индукционных экстремумов, по-разному проявляющееся в разных регионах Земли. Традиционные подходы при распознавании подразумевают поэтапное проведение вначале формальной интерполяции поля в точки равномерной сети, затем трансформации интерполированных полей. Наконец, все трансформанты надо непосредственно анализировать, чтобы не принять не связанные с геологическим строением сопряженные экстремумы за проявления изучаемых объектов, что крайне нетехнологично. Не в полной мере помогают повышению технологичности процедур распознавания и вспомогательные трансформации типа редуцирования к полюсу. После их выполнения сопряженные экстремумы остаются, хотя, действительно, идентифицировать их несколько проще, нежели по исходным полям.

В соответствии со сказанным, второй из методологических принципов можно сформулировать следующим образом:

**в процессе разделения компонент поля, вызванных разными геологическими источниками, должны применяться исключительно истокообразные аппроксимации, с помощью которых строятся содержательные параметризованные модели, а задачи обнаружения и**

**распознавания могут решаться путем анализа этих моделей, в том числе с применением формальных трансформаций.**

Необходимо отметить, что изложенное выше в первую очередь относится к потенциальным методам, поскольку данные, например, аэрогамма-спектрометрии в процессе первичной обработки приводятся к уровню дневной поверхности. Тем не менее, использование для визуализации этих данных стандартных плоских конструкций – геофизических карт – также может приводить к существенным ошибкам в интерпретации, т.к. не позволяет учитывать приуроченность аномалий к конкретному гипсометрическому уровню (рис. 2).

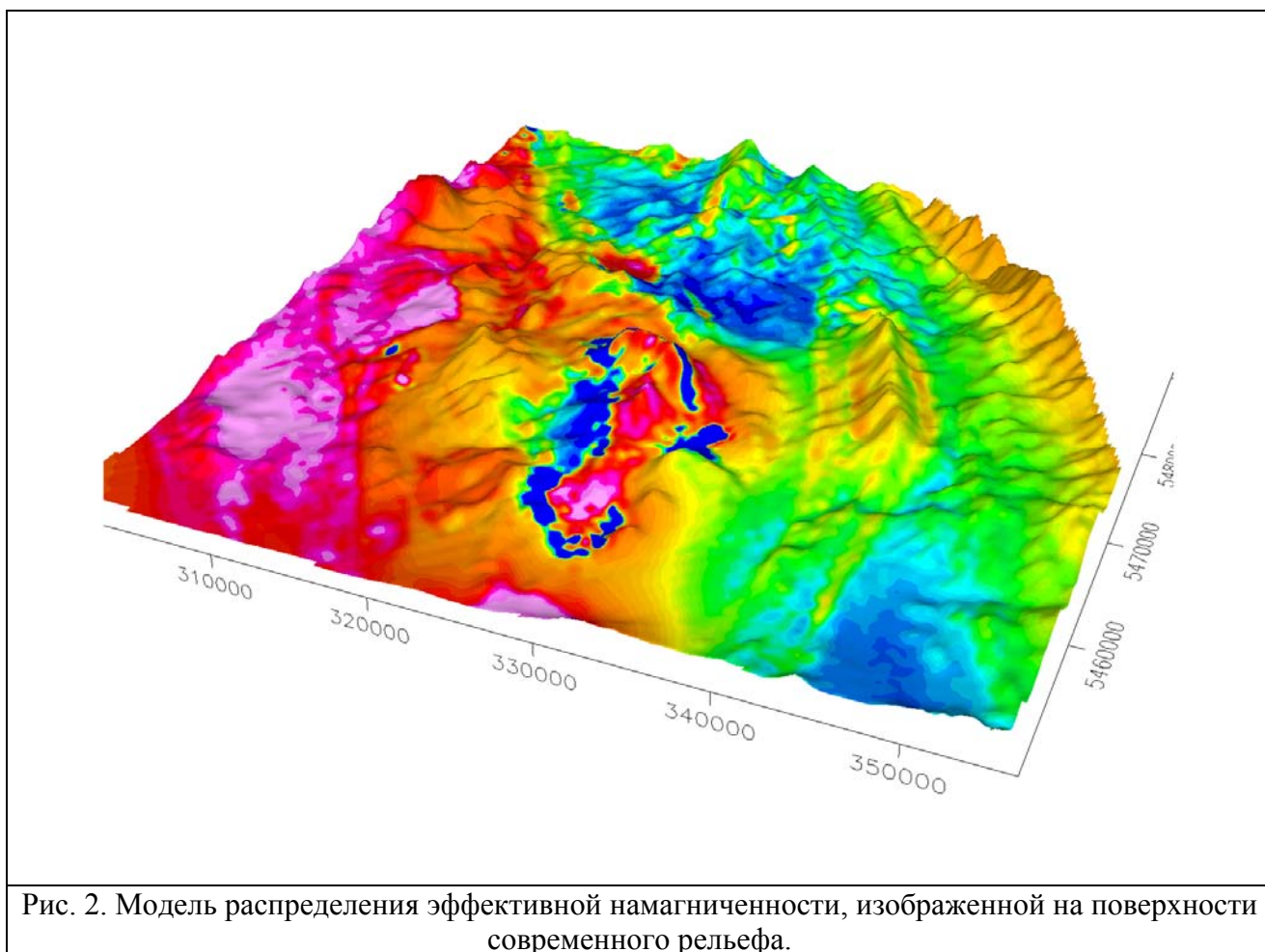


Рис. 2. Модель распределения эффективной намагниченности, изображенной на поверхности современного рельефа.

Сказанное необходимо обязательно учитывать при выполнении содержательной интерпретации аэрогеофизических данных. В то же время карты физических полей остаются пока наиболее удобным и привычным средством визуализации данных, и полностью отказываться от их использования, даже с учетом сделанных оговорок, по-видимому, преждевременно.

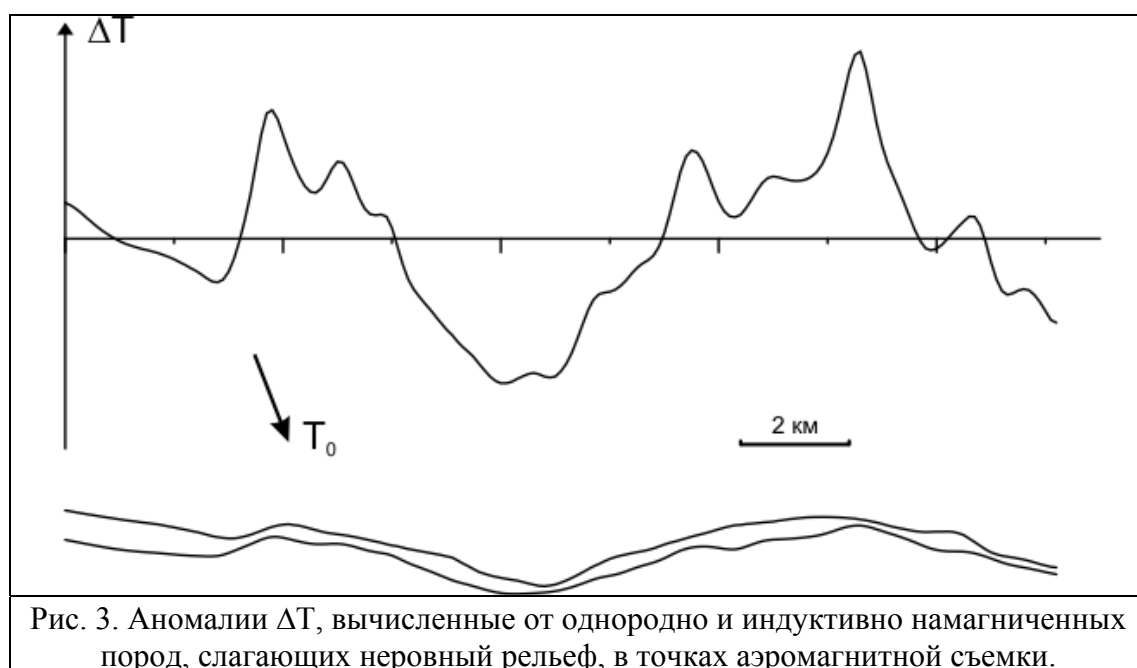
Рассмотрим теперь состав и особенности общей геофизической интерпретации данных для основных аэрогеофизических методов.

**Потенциальные методы (гравиметрия и магнитометрия).** Методика интерпретации магнитных и гравитационных аномалий определяется в первую очередь влиянием разновысотности точек наблюдения (главным образом для аэромагнитной съемки) совместно с рельефом местности. Этот фактор самым существенным образом влияет на аномальные поля. На рис. 3 показан синтетический пример аномалий  $\Delta T$ , вычисленных от однородно и индуктивно (по направлению нормального поля Земли) намагниченных пород, слагающих неровный рельеф, в



точках аэромагнитной съемки. При этом рельеф дневной поверхности (нижняя кривая на рисунке) и линия полета взяты реальные, зафиксированные в процессе съемки в Бурятии.

Совокупность отмеченных факторов привела здесь к достаточно сложному характеру вычисленного поля  $\Delta T$ . Обратим внимание, что с геологической точки зрения модельная среда – абсолютно однородна, а амплитуда создаваемых ею рельефных аномалий, естественно, тем больше, чем выше намагниченность рельефообразующих пород, и может достигать до нескольких сотен нТл. Морфология рельефных аномалий весьма сложна и, как видно даже из приведенного примера, вовсе не сводится к примитивной корреляции с рельефом. Отметим также, что характер магнитного поля принципиально не поменяется, если выполнять съемку по горизонтали – на заданной барометрической высоте, или, что то же, на заданном уровне над поверхностью геоида.



В этих условиях даже привычные для геофизиков простейшие приемы качественной интерпретации, заключающиеся в визуальном анализе наблюдаемых полей и их трансформаций, выполняемых в скользящих окнах, становятся абсолютно бессмысленными. Человек-интерпретатор не в состоянии одновременно и эффективно оценивать такое количество разнородных факторов, принимающих участие в формировании аномальных полей. Сами же трансформации, строго говоря, могут выполняться только когда рельеф – плоский и горизонтальный. При неустойчивости, свойственной решениям обратных задач, когда даже бесконечно малые помехи или неадекватности в подходах приводят к пагубным последствиям, традиционные технологии, пренебрегающие разновысотностью пунктов наблюдения, становятся не просто неэффективными, а вредными.

Наиболее популярный путь борьбы с указанными трудностями, реализуемый многими геофизиками, состоит в предварительном редуцировании аномального поля на горизонтальную плоскость, проходящую на уровне самых высоких отметок рельефа. После этого уже можно применять разнообразные технологии, ориентированные на плоский горизонтальный рельеф. Тем не менее, и этот путь не является оптимальным, поскольку при редуцировании локальные аномалии, регистрируемые при малых высотах пунктов наблюдений, фактически аналитически продолжают вверх на сотни метров и даже километры и в итоге непомерно сглаживаются и маскируются.

В данных сложных условиях наиболее эффективным путем интерпретации, по нашему мнению, является трехмерное моделирование, направленное на построение петрофизической модели по данным наблюдений в реальных пунктах. При этом компьютером автоматически учитываются переменные альтитуды пунктов наблюдений, рельеф дневной поверхности, а в магниторазведке также сопряженные индукционные экстремумы, возникающие в условиях не-вертикальной намагниченности пород и не связанные ни с какими геологическими факторами. После построения модели и устранения отмеченных мешающих факторов становится реально возможным ее анализ с применением трансформаций, в т.ч. направленных на распознавание геологических объектов.

Оптимальна в этом плане модель субгоризонтального слоя со строго латеральными изменениями плотности или намагниченности, единственность решения обратной задачи для которой была доказана В.М.Новоселицким в 1965 г. Конечно, хотелось бы, чтобы модель состояла из нескольких таких слоев и сразу аппроксимировала сложные трехмерные структуры, но на непосредственное построение подобных моделей существует теоретический запрет. Дело в том, что подобные модели т.н. сеточного типа обладают специфическим недостатком – автоматизированный подбор в их рамках неминуемо приводит к тому, что модель становится патологической.

Для потенциальных методов в процессе тотальной интерпретации в рамках описанного выше подхода могут быть решены следующие геологические задачи:

изучение морфологии субгоризонтальных границ раздела (поверхности погребенного фундамента, отдельных горизонтов в составе осадочного чехла и т.п.) с использованием методов локализации особых точек [2];

вещественно-петрофизическое картирование территории (как дневной, так и погребенной поверхностей) с помощью упомянутой выше технологии моделирования потенциальных методов в слой, ограниченный двумя контактными поверхностями, с последующей двумерной интерактивной классификацией полученных моделей распределения эффективных плотности и намагниченности [3, 4];

структурно-тектоническое картирование территории с использованием специальных технологий линейного анализа моделей распределения эффективных плотности и намагниченности [4];

объемное геологическое картирование на основе оценки морфологии аномальных объектов с помощью методов интерпретационной томографии [5].

**Аэрогамма-спектрометрия.** Данные аэрогамма-спектрометрии (АГС), по сути своей отражающие особенности геохимического строения территории, нацелены, в основном, на оценку минерагенического потенциала изучаемых территорий, хотя и содержат информацию о строении самой верхней части разреза, которая может быть извлечена посредством ландшафтно-геохимического районирования территории.

Предварительную оценку перспективности отдельных малоизученных территорий целесообразно начинать с позиций системного подхода [1, 7, 8]. В основе его лежит известный тезис о том, что крупные по масштабам месторождения могут возникать лишь при совпадении благоприятных глобальных, региональных и локальных рудоконтролирующих факторов. Применительно к оценке средне-крупномасштабных АГС данных системная иерархия соподчиненных геолого-структурных уровней включает в себя следующий ряд: металлогеническая провинция ( $n \times 10^4 \div 10^5$  км<sup>2</sup>), - рудный район ( $n \times 10^3 \div 10^4$  км<sup>2</sup>) - рудный узел ( $n \times 10^2 \div 10^3$  км<sup>2</sup>) - рудное поле (до  $5 \times 10^2$  км<sup>2</sup>) - месторождение (первые км<sup>2</sup>). При этом важнейшим признаком промышленно значимых рудных объектов является совмещение (“телескопирование”) благоприятных критериев на всех без исключения иерархических уровнях (рис. 4). Объекты, не проявившиеся хотя бы на одном из них, как правило, не представляют интереса и не должны иметь существенного веса при выделении перспективных площадей.

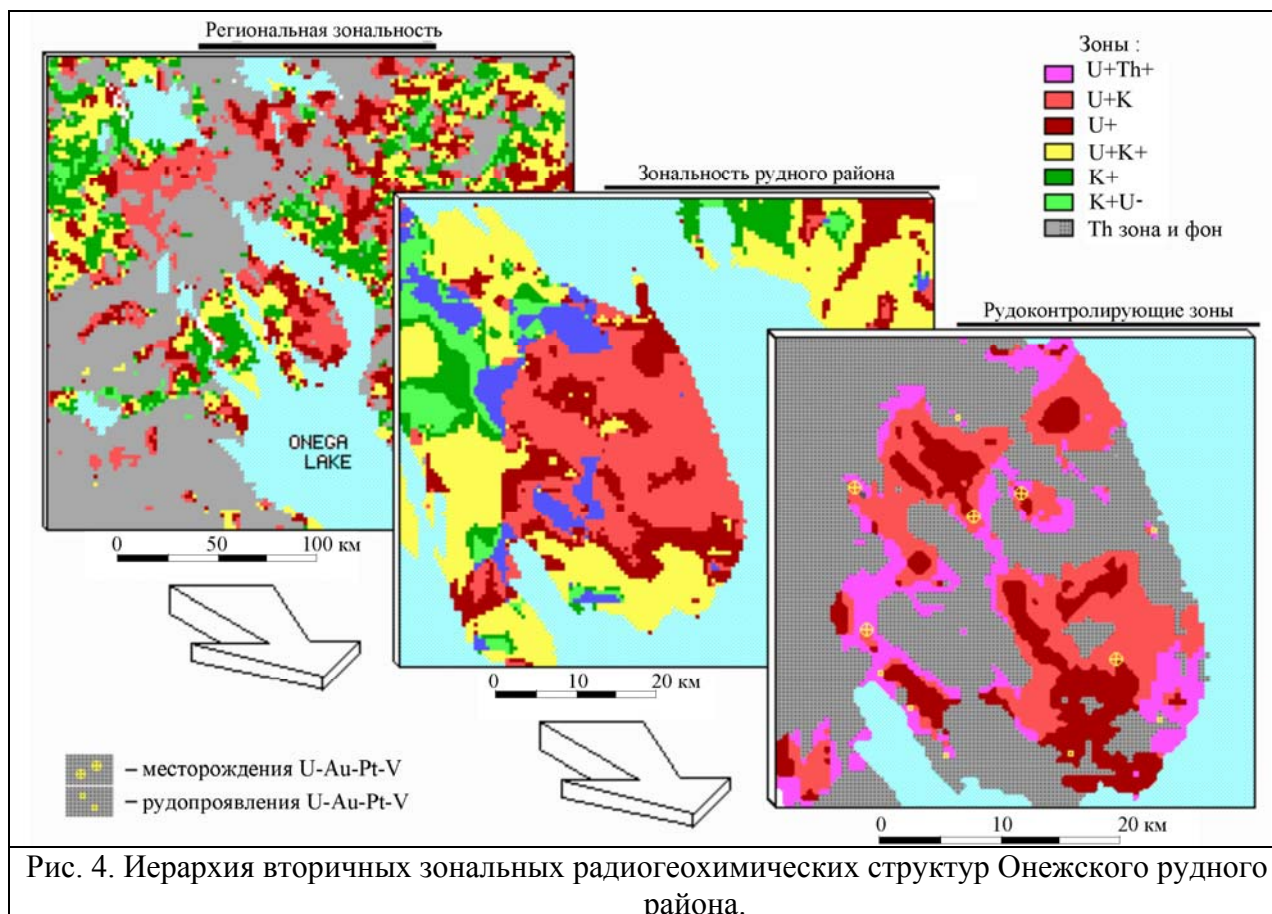


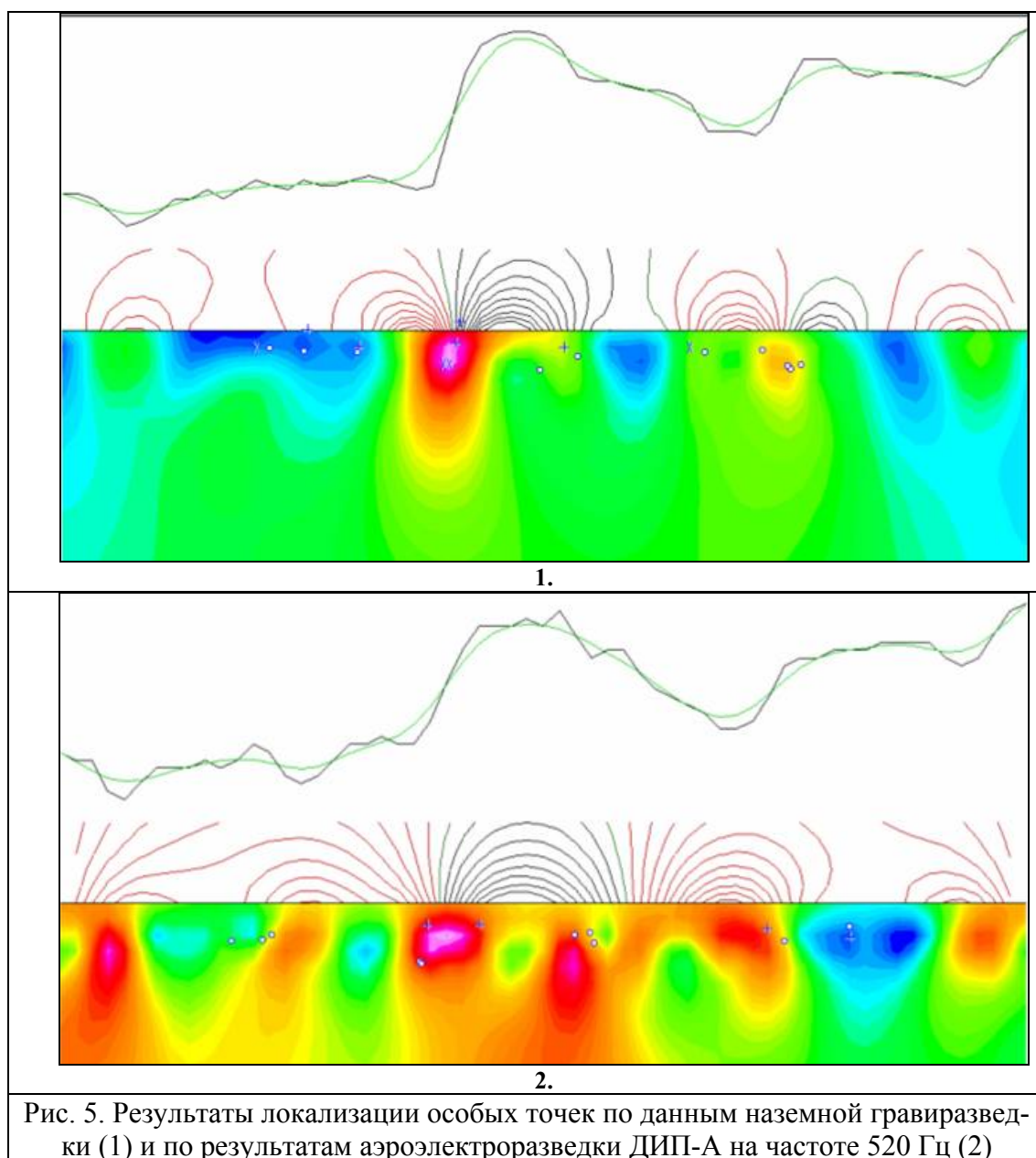
Рис. 4. Иерархия вторичных зональных радиогеохимических структур Онежского рудного района.

Наличие надежной радиогеохимической основы, построенной по материалам разномасштабных АГС съемок на всю исследуемую территорию, открывает возможность исследовать различные уровни пространственной связи иерархии рудных таксонов с соответствующими радиогеохимическими аномалиями и выполнить так называемый "сквозной" прогноз, последовательно выделяя перспективные площади на разных уровнях организации вещества. Эффективность такого подхода показана в работах А. Б. Каждана [7, 8], Е. В. Плющева и В. В. Шатова [9], В. А. Арсеньева [1] и др. Для реализации его по АГС данным разработана методика картирования эпигенетической радиогеохимической зональности, характерной для различных типов рудоконтролирующих метасоматитов, позволяющая снизить влияние мешающих ландшафтно-литологических факторов и выделить т. н. «вторичную» составляющую радиометрического поля ( $R_2$ ) [10]. В основу вычисления  $R_2$  положено нарушение типичных для неизмененных пород региона соотношений и взаимосвязей радиоактивных элементов (РЭ) под воздействием наложенных процессов. Вторичная компонента оценивается двумя параметрами: знаком (S) и модулем (M). Величина M отражает интенсивность эпигенетических изменений в метасоматических структурах разного порядка (рудный район, рудный узел, рудное поле), а параметр S – изменение доминирующей природы радиоактивности по латерали, т.е. радиогеохимическую зональность, по которой определяется тип метасоматоза. Последовательный анализ аномальных значений  $R_2$  на разных уровнях организации вещества позволяет установить региональную радиогеохимическую зональность соответствующего ранга и выявить в перспективных зонах локальные потенциально рудные участки.

**Аэроэлектроразведка.** Традиционно используемыми модификациями аэроэлектроразведки в России в последние годы являлись самолетный вариант метода дипольного индуктивного профилирования (ДИП) и СДВР. Однако опыт полевых работ 2005 года показал, что в настоящее время длительность работы специальных сверхдлинноволновых радиостанций не пре-



вышает 1.5-2 часов в сутки, что практически исключает возможность использования метода для эффективного покрытия значительных площадей. Используемая модификация ДИП, в которой генераторный диполь жестко закреплен на борту летательного аппарата, а измерительные катушки размещаются в выносной гондole, за счет увеличенной мощности излучающего диполя позволяет, в частности, существенно уменьшить нижнюю частоту, характеризуется повышенной чувствительностью и глубиной по сравнению с зарубежными аналогами. Однако отличительной способностью такой системы измерений является непрерывно изменяющаяся в процессе полета геометрия установки. Вследствие этого, получаемые результаты в районах, где модель горизонтально слоистой среды – неадекватна, могут быть использованы только для качественной интерпретации. В то же время отдельные эксперименты свидетельствуют о возможности построения оригинальной технологии интерпретации с использованием нетрадиционных для электроразведки приемов.



В процессе экспериментальных работ на одном из алмазоносных рудных полей Якутии были получены весьма обнадеживающие результаты (рис. 5). Работы выполнялись в районе

развития трапповой формации, на площади, в пределах которой была выполнена детальная наземная гравиметрия. На рисунке черной линией показаны графики исходных полей, зеленой – аппроксимирующие графики, восстановленные из спектра Фурье по заданному числу гармоник. Приводятся также изолинии вертикального градиента аномального поля (метод Страхова) и вертикальный план полного нормированного градиента (метод Березкина).

Из рис. 5 видно, что по данным обоих методов уверенно локализуются одни и те же особенности. Таким образом, аэроэлектроразведка может с эффективностью использоваться, как минимум, для картирования трапповых покровов. Кроме того, принципиальная возможность локализации особенностей по данным электроразведки с помощью методов, разработанных для потенциальных полей (в спектральной области), позволяет предположить также возможность эффективного использования для интерпретации данных электроразведки ДИП методов интерпретационной томографии в фильтрационной постановке [5]. Данные аэроэлектроразведки используются, как правило, на этапе целевой или локальной интерпретации данных.

Комплексная интерпретация разнородных по физическим основам данных должна осуществляться на основе синтеза результатов тотальной интерпретации каждого метода, с учетом анализируемого гипсометрического уровня. Как было отмечено выше, такие исследования выполняются обычно на этапе локальной (целевой) интерпретации. Примеры целевой интерпретации данных при поисках различных видов минерального сырья рассмотрены в других статьях, включенных в настоящий номер журнала.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Арсеньев В.А., Бартенев Ю.В. Способ обработки данных АГС съёмки для выделения признаков радиогеохимически специализированных блоков различных рангов. - Геология урановых месторождений, вып.83., 1983, с. 123 - 127.
2. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А. Изучение рельефа поверхности кристаллического фундамента по данным магниторазведки // Геофизика. 2003. № 4. с. 37-40.
3. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А. Изучение строения кристаллического основания платформенных областей по данным магниторазведки и гравиразведки // Геофизика. 2003. № 6. с. 55-58.
4. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А. Возможности структурно-вещественного картирования по данным магниторазведки и гравиразведки в пакете программ СИГМА-3D // Геофизический вестник. 2004. № 3. с. 11-15.
5. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А. Интерпретационная томография по данным гравиразведки и магниторазведки в пакете программ СИГМА-3D // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы 31-й сессии международного семинара им. Д.Г.Успенского. М: ОИФЗ РАН. 2004. с. 11.
6. Воробьев В.П., Зубов Е.И., Асламов Ю.В. Иерархия вторичных радиогеохимических структур как отображение рудно-метасоматических систем разного порядка. – Тезисы докладов Международной геофизической конференции 15-18 сентября 1997 г., Москва, 1997, G18.
7. Каждан А.Б., Пахомов В.И. Обработка исходных эмпирических данных с позиций системного подхода к изучению недр. – Сов. Геология, № 11, 1986, с. 3-11.
8. Каждан А.Б. Прогнозирование, поиски и разведка месторождений урана. – М., Энергоатомиздат, 1983. – 189 с.
9. Плющев Е.В., Шатов В.В. Геохимия и рудоносность гидротермально-метасоматических образований. Л.: Недра, 1985.-247с.