

Бабаянц П.С.¹, Блох Ю.И.¹, Зубов Е.И.², Лаврова Т.Ю.¹, Трусов А.А.¹
(1 – ГНПП «Аэрогеофизика», 2 – ЗАО «ВИРГ-Рудгеофизика»)

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ ПРИ ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Современное состояние аэрогеофизических методов и технологий позволяет использовать их результаты практически на всех стадиях геологоразведочного процесса: от рекогносцировочных работ на этапе общего опоискования территории до поисково-оценочных работ и предварительной разведки месторождений. Масштабы выполняемых съемок меняются при этом от 1:50 000 до 1:5 000. Отличительные особенности аэрогеофизических съемок (высокая производительность, комплексность, дешевизна, информативность) определяют целесообразность их использования в качестве опережающих, с тем, чтобы можно было использовать результаты их интерпретации для оперативного управления поисковым процессом на основном этапе работ.

При выполнении среднемасштабных работ на стадии общих и специализированных поисков [6] целевое назначение аэрогеофизических работ часто бывает размыто – в этих случаях должны быть оценены перспективы на все виды минерального сырья, которые, с учетом минералогической специализации региона, потенциально могут быть обнаружены. При повышении детальности работ их специализация, естественно, обозначается более четко. Однако во всех случаях на первом этапе анализа результатов аэрогеофизических работ выполняется тотальная (общая геофизическая) интерпретация, нацеленная на решение общих геологических задач (структурно-тектоническое и вещественно-петрофизическое картирование, ландшафтно-геологическое районирование и т.п.). На этом этапе интерпретации используются методы и технологии, не использующие, или использующие ограниченно, априорную информацию. Конечно, и некоторые результаты тотальной интерпретации могут нести информацию о локализации поисковых объектов (тектонический контроль, стратиграфическая приуроченность и т.п.), однако поисковая направленность работ в основном отрабатывается на следующем этапе интерпретации, с привлечением всего объема априорной геолого-геофизической информации, имеющейся в наличии.

В зависимости от характеристик объекта локализации, методы, используемые на втором этапе интерпретации, могут существенно различаться. Если объект исследований хорошо локализован, характеризуется наличием четких физических границ, то наибольшей эффективностью обладают методы локальной интерпретации, нацеленные на выявление и оценку параметров изолированных геологических тел. Наиболее ярким примером объектов подобного класса являются коренные месторождения алмазов, приуроченные к кимберлитовым трубкам взрыва. Как правило, к числу подобных объектов относятся и месторождения черных металлов. В случае если такие месторождения представлены ассоциациями ферромагнитных минералов, содержательная интерпретация геофизических материалов может потребовать использования довольно изощренных методов количественной интерпретации [5], однако в ряде случаев удастся даже обеспечить оценку запасов месторождения по геофизическим данным.

Значительная часть коренных месторождений цветных и благородных металлов, а также большинство россыпных месторождений характеризуются отсутствием четких физических границ – контуры месторождений очерчиваются величиной бортового содержания, которая может изменяться в широких пределах в зависимости от применяемых технологий обогащения, а также от конъюнктуры рынка. В этих случаях наиболее целесообразным является использование

методов интерпретации, направленных на выявление косвенных критериев и признаков локализации оруденения.

Конечно, граница между двумя классами объектов достаточно условна: при поисках месторождений первого типа может оказаться весьма полезным выявление дополнительных косвенных критериев локализации оруденения, с помощью которых можно осуществлять, например, разбраковку выделенных перспективных объектов. Наоборот, при изучении месторождений второго типа во многих случаях могут помочь методы локальной интерпретации. Важно отметить лишь, что в первом случае базовыми должны выступать методы количественной и полуколичественной интерпретации данных, а во втором – методы вероятностно-статистического анализа.

Ниже на некоторых наиболее характерных примерах будут проиллюстрированы особенности технологии интерпретации аэрогеофизических данных при поисках месторождений, относящихся к двум описанным выше классам.

Поиски коренных месторождений алмазов. За прошедшие со времени открытия первой кимберлитовой трубки в России полвека 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 в настоящее время, при этом роль шлихового опробования неуклонно снижается в связи с тем, что 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 существенно снижает эффективность наземных работ и определяет приоритет аэрогеофизических исследований.

Нам представляется, что 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 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 накладывают достаточно жесткие требования к аппаратуре, технологии полевых измерений и обработке данных.

Достигнутый к настоящему времени технологический уровень аэромагнитной съемки характеризуется весьма низким уровнем высокочастотных помех, обусловленных как внутренними шумами магнитометра, так и влиянием локальных неоднородностей верхней части разреза, что позволяет выделять и детально изучать:

- аномалии от кимберлитовых тел размерами от первых десятков метров интенсивностью от 0.2 до 2 нТл и выше;

- слабопроявленные малые интрузивные тела, тектонические нарушения и зоны трещиноватости;

- области аккумуляции минералов тяжелой фракции;

- структурно-тектоническое строение пород фундамента и осадочного чехла.

Аэромагнитная съемка выполняется обычно при поисках кимберлитов по системе параллельных маршрутов, с генеральным обтеканием рельефа, в масштабе 1:5 000 ÷ 1:10 000. Принципиально важным является фиксирование в процессе съемки всех трех координат 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 пред-

ставляют 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 (т.к. наблюдения выполняются с генеральным обтеканием рельефа), что вносит дополнительные искажения в форму аномалий, обусловленные изменением расстояния до намагниченных объектов. При этом размеры эквивалентных аномалообразующих объектов, имитирующих влияние форм рельефа и изменения высоты полета, и реальных намагниченных объектов, как и расстояние до них, по крайней мере, сопоставимы (рис. 1).

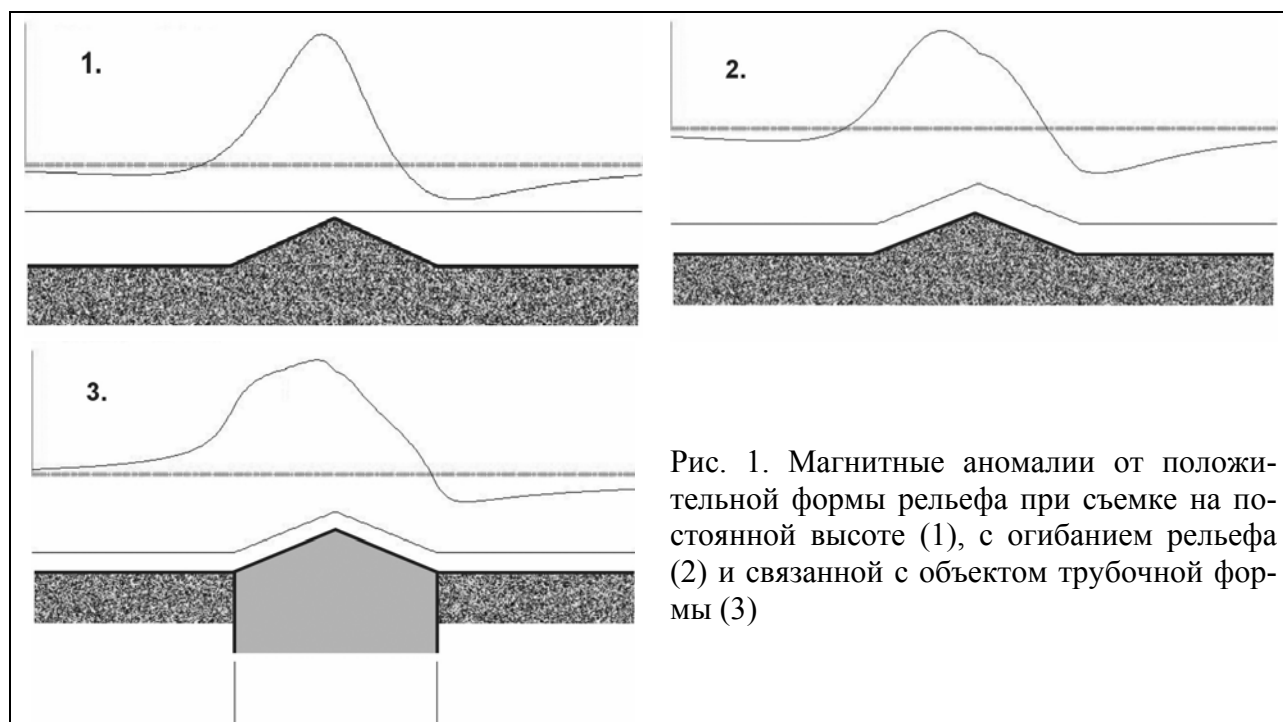


Рис. 1. Магнитные аномалии от положительной формы рельефа при съемке на постоянной высоте (1), с огибанием рельефа (2) и связанной с объектом трубочной формы (3)

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 для этого 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, в связи с закрытием большинства магнитных обсерваторий на территории страны и ближнего зарубежья.

Особенности технологии 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 полузакрытых 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 детальной аэромагнитной съемки масштаба 1:5 000 на территории республики Ангола в 2004 году 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 в настоящее время является не выделение аномалий трубчатой формы, а их классификация.**

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 приводит 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 фактически пренебрегают физическими и математическими основами теории поля. Заметим для примера, что для съемки масштаба 1:5 000 (расстояние между маршрутами 50 м) представление результатов в виде матрицы с размером ячейки 10×10 м приводит к тому, что около 80% значений магнитного поля в матрице являются вычисленными, при этом более 80% реально измеренных значений магнитного поля практически не используются. Недостатком такого подхода является также погрешность интерполяции, которая может достигать 1-1.5 нТл, т.е. величины, сопоставимой с интенсивностью изучаемых аномалий. Кроме того, матрица представляет собой плоскую конструкцию и не учитывает разновысотности точек наблюдений.

Для иллюстрации этого 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.

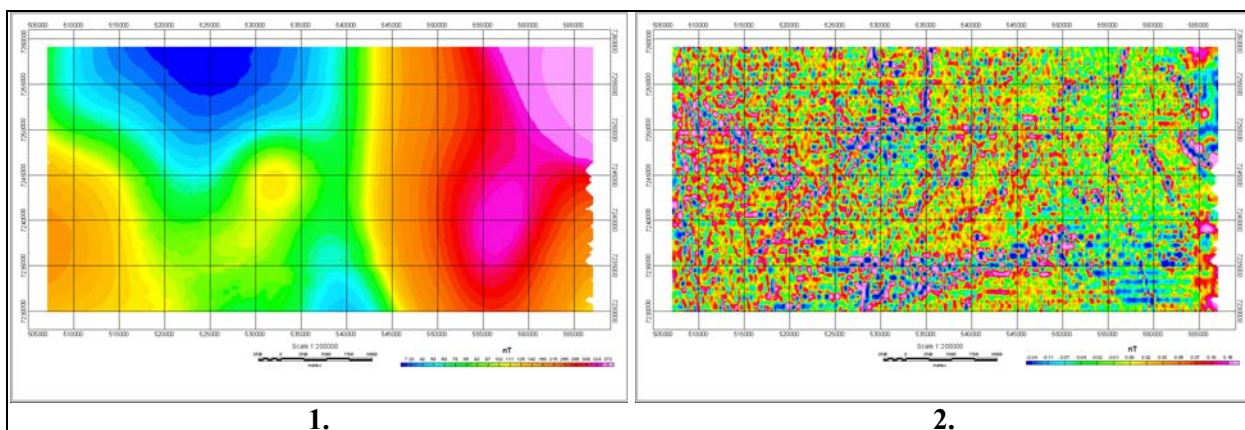


Рис. 2. Влияние погрешности интерполяции при интерполяции данных в регулярную матрицу: 1 – аномальное магнитное поле. 2 – разность между наблюдаемым и интерполированным (извлеченным из матрицы) полем

Использование для оценки параметров квазиизометричных объектов алгоритмов, разработанных для двумерных тел, может приводить к принципиальным ошибкам, многократно перекрывающим выигрыш в детальности. Кроме того, аномалии от положительных форм рельефа и объектов трубчатой формы имеют весьма сходную морфологию (см. 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 измеренные данные, 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, разработанный специалистами ГНПП «Аэрогеофизика», включает следующие опции:

1. **Моделирование кристаллического фундамента.** Решение этой задачи более детально описывается в отдельной статье, включенной в этот же номер журнала.

2. **Редуцирование аномального магнитного поля** с выделением составляющей, связанной с осадочным чехлом. Отметим, что формальные методы разделения полей для решения этой задачи неприемлемы, поскольку вносимые ими искажения в структуру локальной составляющей магнитного поля делают практически невозможным количественную интерпретацию остаточных аномалий, а значит – и классификацию выделяемых перспективных аномалий.

3. **Изучение особенностей геологического строения осадочного чехла.** В первую очередь – это изучение 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 масштаба 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 превышают пороговое значение, остальные отбрасываются. Отметим, что результатом работы подобных алгоритмов являются выделенные аномалии, эпицентры которых могут быть отнесены на значительное расстояние от эпицентров аномалообразующих объектов, вследствие невертикальности 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 заданным пользователем моделям. 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 ана-

лизируемого 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, аппроксимирующей среду ниже главной магнитоактивной поверхности;

задается порог принятия решения для коэффициента корреляции. Если величина последнего превышает пороговое значение, 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.

Важной особенностью описываемого алгоритма является то, что эпицентры выявленных с его помощью аномалий коэффициента корреляции должны в общем случае совпадать с эпицентрами искомых объектов. Это особенно важно 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» [2] 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. Классификация выделенных аномалий. Для предварительной оценки их природы используются специальные методы 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.

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

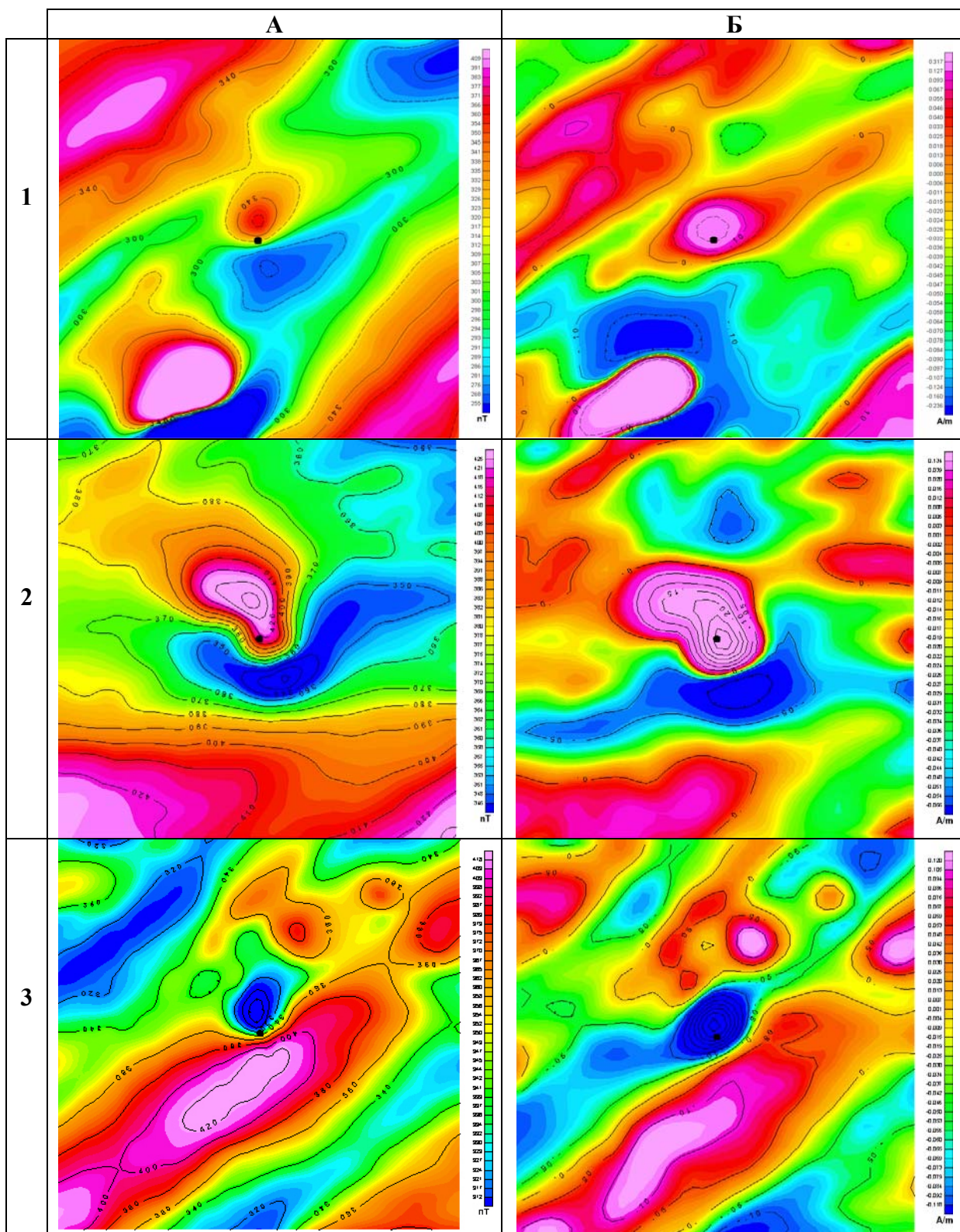


Рис. 3. Результаты моделирования магнитного поля одной из площадей республики Ангола с помощью технологии REIST: 1 – аномалия №134; 2 – аномалия №547 (трубка Kamitongo-2); 3 – аномалия №576; А – аномальное магнитное поле; Б – подобранная эффективная намагниченность

После определения горизонтальных координат стержня для локализованной аномалии, в

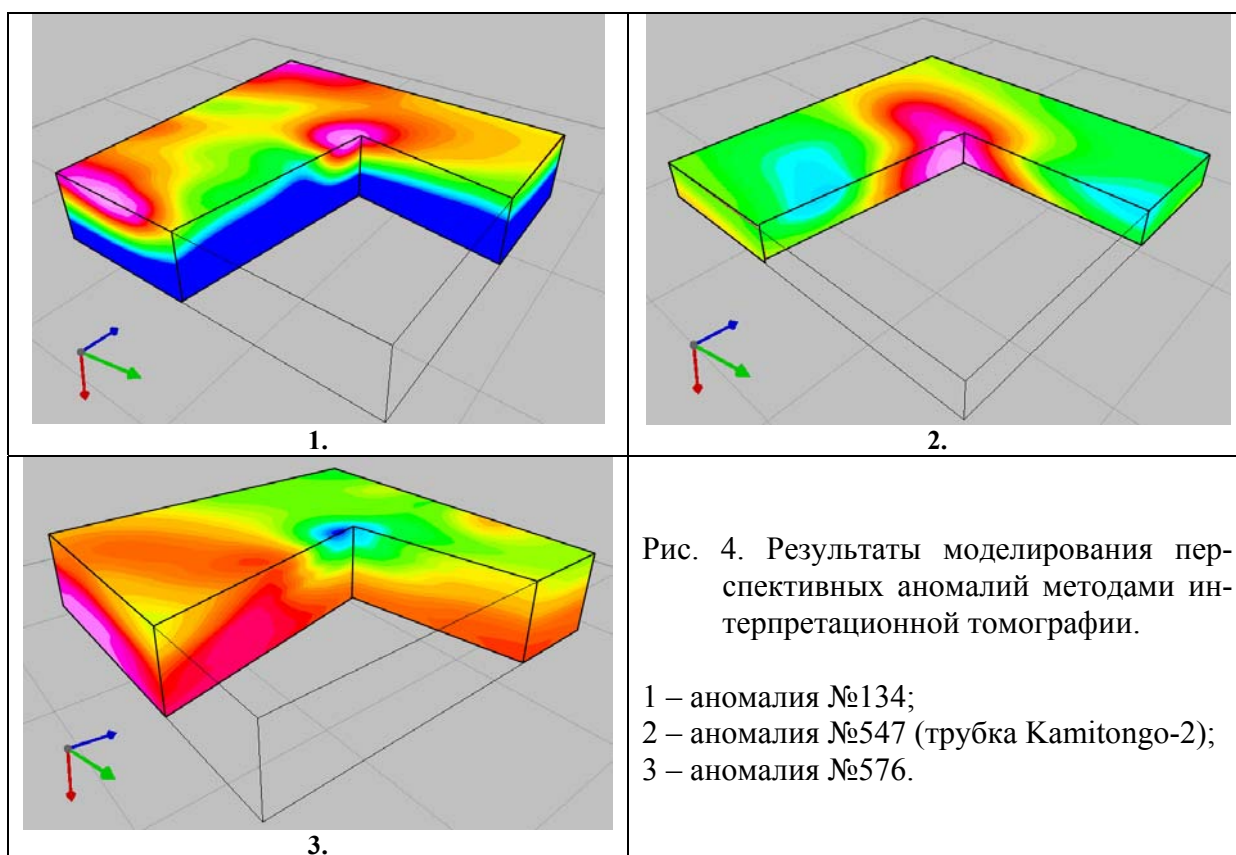
автоматическом режиме одновременно подбираются линейный региональный фон, глубины залегания верхней и нижней кромок и величина магнитного момента. Вычисляется доля энергии остатка, которая характеризует степень истощения исходного поля моделью, другими словами, релевантность подбора. По завершении расчетов вся полученная информация высвечивается во всплывающем окне и может быть помещена в специальный каталог.

На рис. 3 приводится пример моделирования магнитного поля с помощью технологии REIST в низких широтах (около 10° ЮШ), на территории республики Ангола. Модели распределения намагниченности приводятся по результатам подбора остаточного магнитного поля, полученного в результате вычитания из исходного поля - поля модели фундамента. Черной точкой на каждом рисунке показано положение эпицентра аномального объекта, распознанного алгоритмами оптимального приема.

Из рисунка отчетливо видно, что попытка заверки выделенных локальных аномалий магнитного поля бурением в их эпицентр может с высокой степенью вероятности привести к пропуску объекта: смещение эпицентра аномалии по отношению к объекту может достигать половины его сечения.

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.

Указанная технология использовалась для разбраковки приведенных на рис. 3 аномалий (рис. 4). Из рисунка видно, что аномалии №134 и 576 с высокой степенью вероятности обусловлены влиянием приповерхностных объектов.



Таким образом, комплекс интерпретационных технологий позволяет с высокой степенью надежности судить о природе и параметрах выделяемого объекта. Развитие технологий геофизических методов при поисках коренных месторождений алмазов в ближайшие годы будет происходить, в основном, в направлении совершенствования технологий содержательной интерпретации данных, направленных в первую очередь на классификацию выделяемых перспективных аномалий и решение проблем структурно-тектонического прогнозирования.

Поиски комплексной U-Au-Pt-V минерализации (на примере Онежского рудного района.) На материалах мелко-, средне- и крупномасштабных аэросъемок, выполненных в разные годы на территории Южной Карелии, иллюстрируется реализация принципов системного анализа аэрогеофизических данных. Сводные радиометрические карты Южной Карелии, охватывающие площадь около 120 000 км², представлены на рис. 5. Особенностью данной территории является сравнительно слабая дифференцированность гамма-поля. Это объясняется не только низкими содержаниями радиоактивных элементов в наиболее распространенных типах горных пород региона, но и, главным образом, широким развитием моренных отложений и заболоченностью обширных площадей.

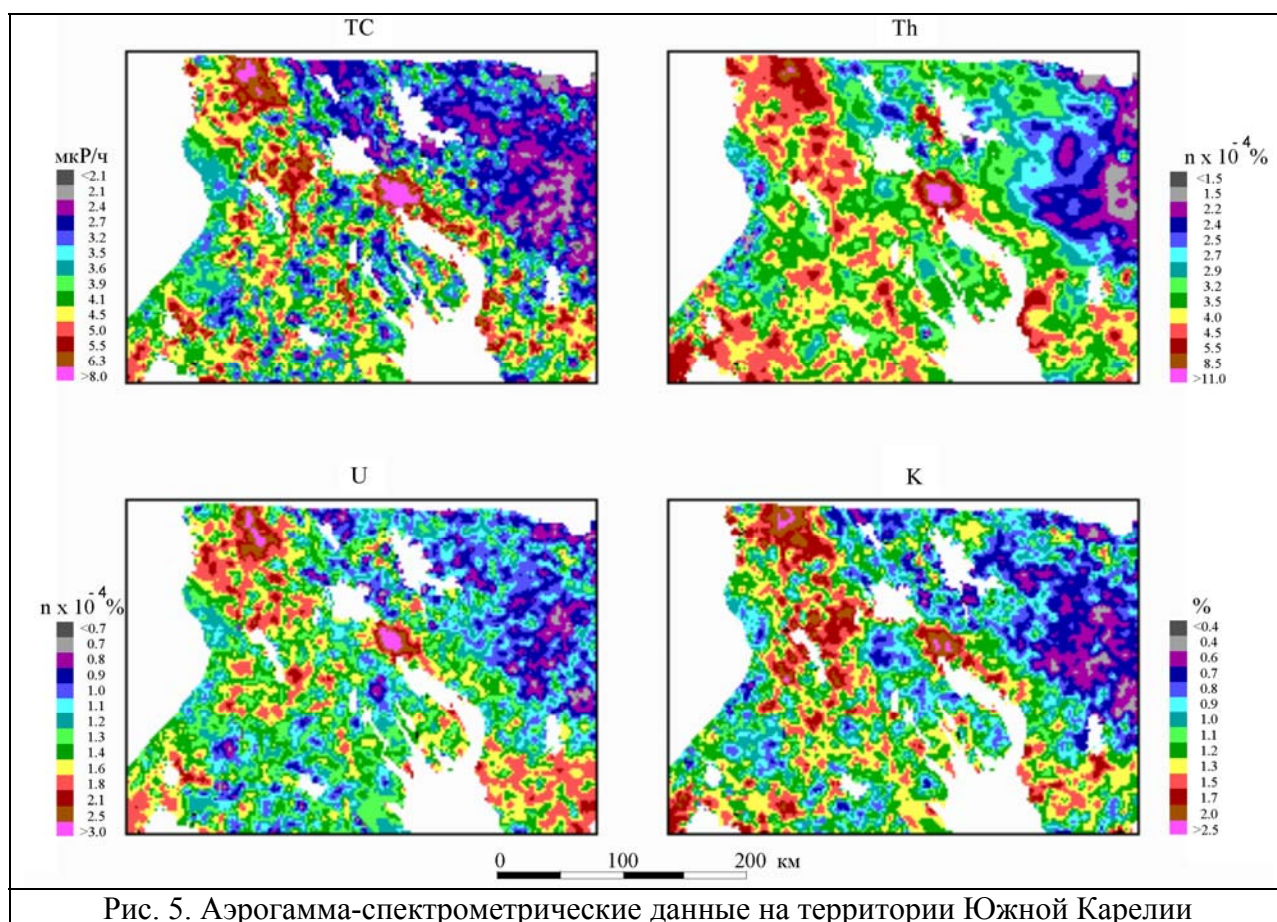
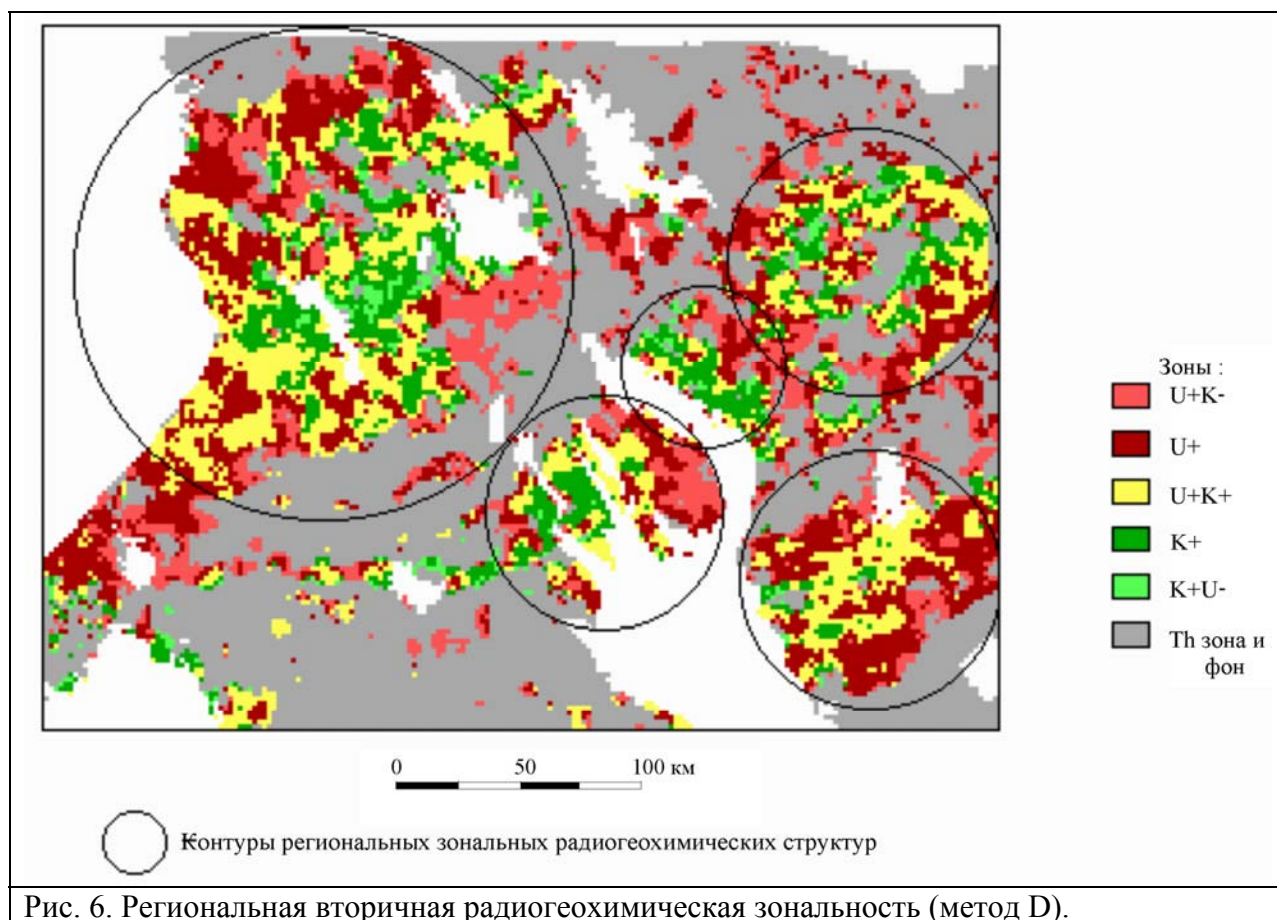


Рис. 5. Аэрогамма-спектрометрические данные на территории Южной Карелии

Для снижения негативного влияния неблагоприятных ландшафтных факторов и картирования пород с аномальным распределением радиоактивных элементов выполнено разложение вектора измеренного поля $R = (U, Th, K)$ на первичную (R_1) и вторичную (R_2) составляющие методом "D" [1]. В соответствии с принятой в этом методе моделью радиогеохимического поля величина R_1 характеризует фоновые (типичные для данных породы и ландшафта) соотношения между содержаниями урана, тория и калия. R_2 отражает, в основном, влияние эпигенетических (в том числе и рудных) факторов и используется как главный прогнозный элемент радиогеохимического поля при металлогеническом анализе. Численное значение этого параметра рассчи-

тывается как разность между полным вектором R и его фоновой компонентой R_1 . Модуль R_2 характеризует интенсивность проявленности наложенных процессов, а направление этого вектора в признаковом пространстве - доминирующую природу радиоактивности.

В общем виде: $R_2 = R - R_1$, где $R_1 = F(U, Th, K)$ - функция от измеренных содержаний радиоактивных элементов или их бинарных отношений (Th/U , Th/K , U/K) на соответствующем иерархическом уровне. Коэффициенты функции F зависят от параметров исследуемой совокупности данных. Последовательный анализ радиометрических данных в серии вложенных металлогенических объектов разного порядка показывает, что каждый член иерархического ряда: рудный район $\Rightarrow$ рудный узел $\Rightarrow$ рудное поле (месторождение) контролируется концентрически зональной радиогеохимической структурой, которая, по-видимому, отражает метасоматическую зональность на соответствующем уровне организации вещества. Эта закономерность хорошо видна на примере Онежского рудного района с уникальными по составу руд комплексными $U - Au - Pt - V$ месторождениями.



Район комплексных месторождений расположен в юго-западной части Центральной региональной радиогеохимической структуры, выделенной методом "D" по материалам аэроаудиоэкологической съемки масштаба 1:1 000 000. Всего на территории Южной Карелии установлено три таких структуры с размерами от 4000 км² до 15 000 км² (рис. 6). Все они сформированы однотипными региональными аномалиями R_2 с концентрически-зональным строением следующего вида:

ядерная зона с доминантой калия ($K+$, $K+U-$). Тяготеет к центру структуры и является наиболее компактной, образуя иногда несколько сближенных локальных очагов, ориентированных согласно с преобладающим простираанием пород;

промежуточная калий-урановая зона (K+U+). Окаймляет относительно небольшие калиевые ареалы, значительно превышая их по площади развития;

периферическая урановая зона (U+, U+K-). Наименее компактная, проявлена в виде отдельных фрагментов разной величины. Граничит с областью выноса урана и калия (ториевая зона и фон).

Ядерные зоны этих аномалий тесно ассоциируют с участками гранитизированной земной коры, выделенными при анализе поля силы тяжести. Пространственная корреляция калиевых аномалий R_2 с областями пониженных значений Δg хорошо видна на рис. 7.

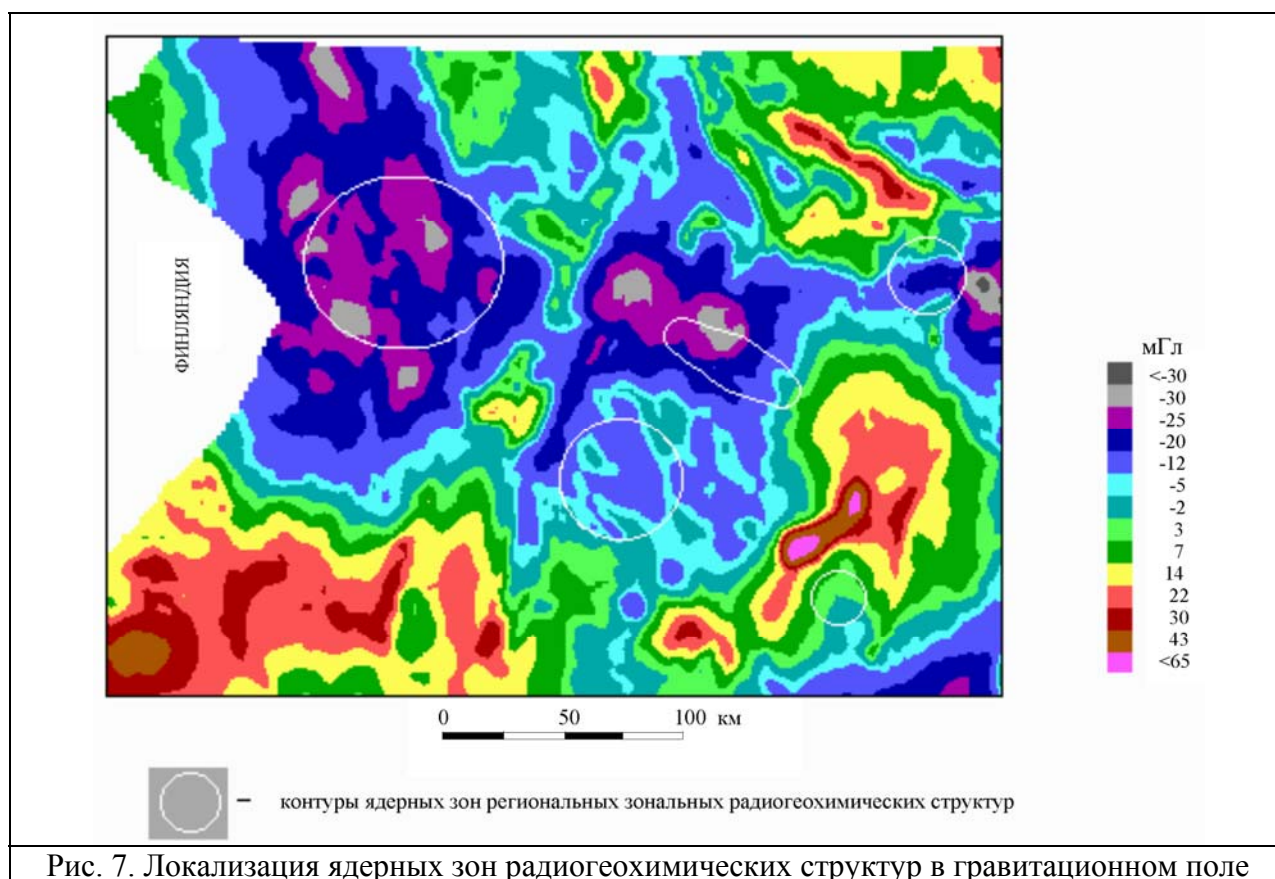


Рис. 7. Локализация ядерных зон радиогеохимических структур в гравитационном поле

Необходимо отметить, что практически все известное эпигенетическое оруденение региона (редкие металлы, золото, платина, молибден и др.) сосредоточено в Западной и Центральной структурах, тяготея к их внешней (барьерной) урановой зоне. По данным крупномасштабных съемок в пределах Центральной радиогеохимической структуры выявлена зональность второго порядка, имеющая ядерную урановую, промежуточную уран-калиевую и менее выраженную внешнюю калиевую зоны (рис. 8). Ядро этой структуры при аномальных значениях модуля R_2 сохраняет размеры в десятки кв. км, контролируя размещение основных урановорудных узлов региона. С аномальной калиевой зоной в северо-западном обрамлении структуры связаны проявления вкрапленной медной минерализации в вулканогенных диабазах нижнего протерозоя.

Дальнейший анализ аэрогеофизических данных в зонах второго порядка позволил выделить вытянутые в северо-западном направлении локальные радиогеохимические ореолы, в которых непосредственно залегает рудная минерализация (месторождения Космозерское, Верхняя и Средняя Падма, Весеннее, Царевское и др., рис. 9). Зональность этих ореолов, подчеркивающая тенденцию к убыванию урана от центра к периферии при относительном дефиците калия, вызвана, вероятно, теми же процессами, что привели к формированию рудоконтролирующих

магнезиально-щелочно-карбонатных метасоматитов и собственно рудных тел. Пространственно они совпадают с основными рудоносными зонами складчато-разрывных дислокаций Онежского района (Кузорандовской, Тамбицкой, Нулицкой, Космозерской), оси которых показаны на правом фрагменте рис. 9. Отчетливо просматривается также влияние серии мощных СВ разломов, осложняющих конфигурацию рудоконтролирующих зон.

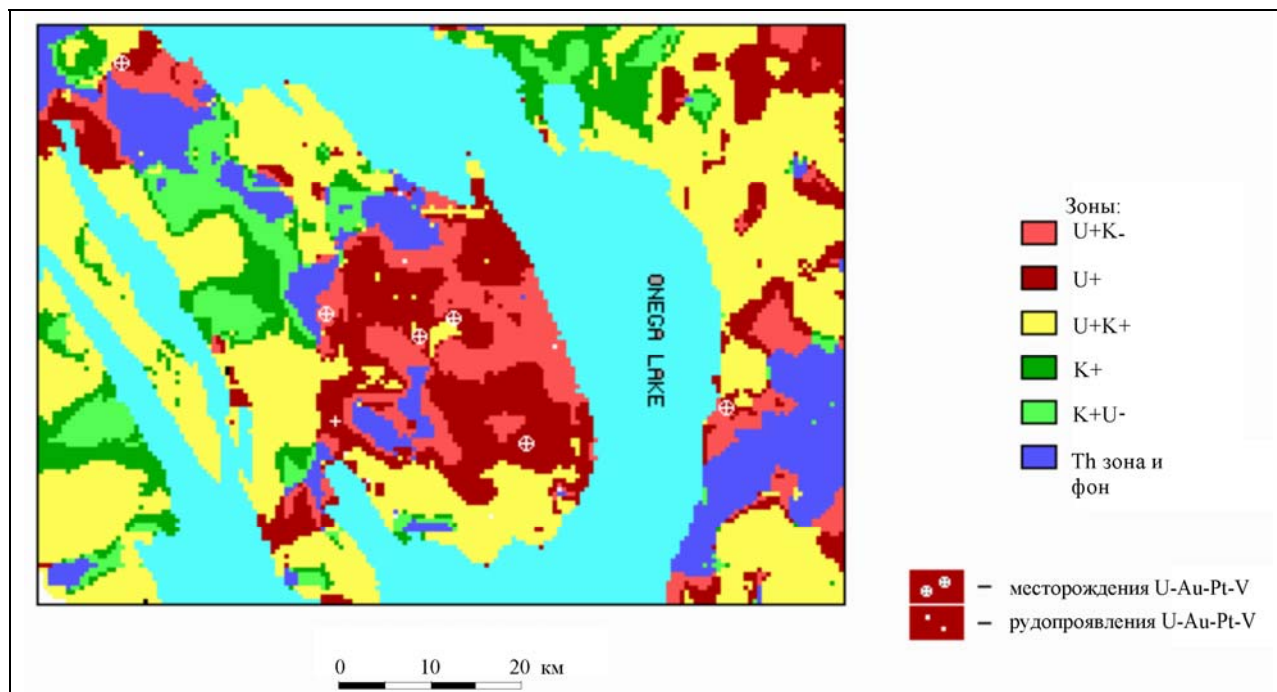


Рис. 8. Радиогеохимическая зональность Онежского рудного района.

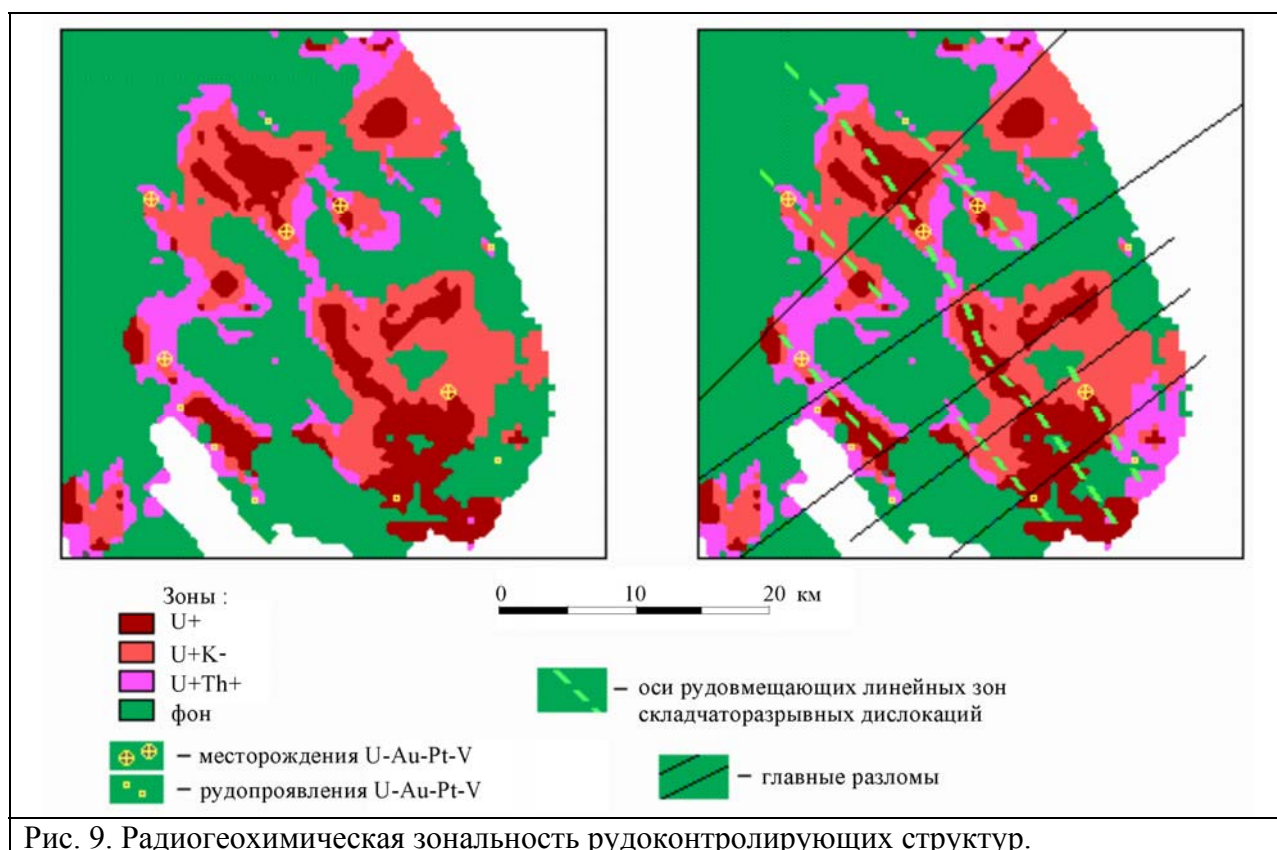


Рис. 9. Радиогеохимическая зональность рудоконтролирующих структур.

Таким образом, в результате выполненного анализа материалов аэрорадиометрических съемок Южной Карелии в пределах Онежского рудного района выделены зональные радиогеохимические структуры трех уровней (рис. 10):

1-го порядка, обусловленные, главным образом, процессами гранитизации земной коры;

2-го порядка, связанные с региональной метасоматической зональностью СВ части Онежского прогиба;

3-го порядка, картирующие зоны складчато-разрывных дислокаций с участками интенсивного развития магнезиально-щелочно-карбонатных метасоматитов, к которым приурочена комплексная U-Au-Pt-V минерализация.

Дальнейшая локализация перспективных площадей до уровня рудного поля (рудного участка) возможна при наличии данных детальных аэрорадиометрических съемок масштабов 1:25 000 (1:10 000).

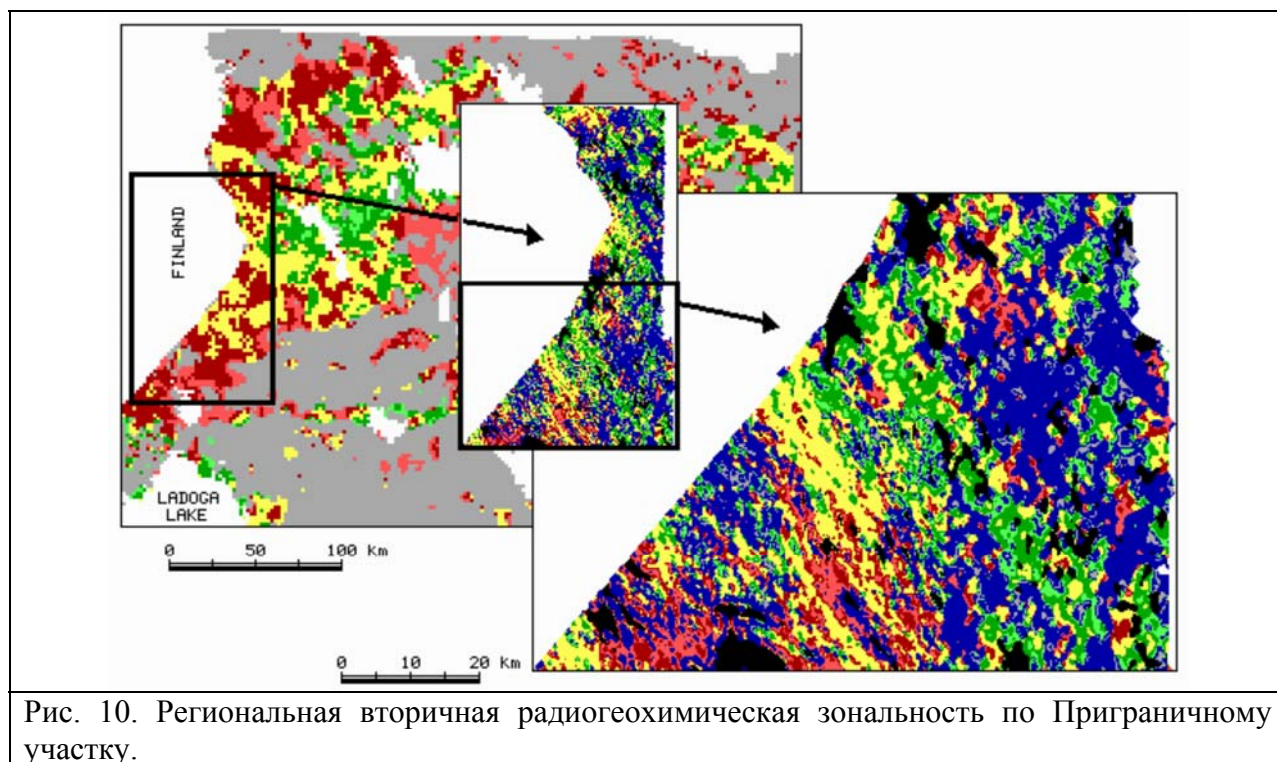


Рис. 10. Региональная вторичная радиогеохимическая зональность по Приграничному участку.

Пример картирования аналогичной системы вложенных радиогеохимических структур с иным типом зональности, характерным для кварц-серицитовых березитов, иллюстрируется материалами по Приграничному району. На заднем плане рис. 10 показано положение этого участка в пределах региональной радиогеохимической структуры, выделенной по данным съемки масштаба 1:1 000 000. На крупных планах видна зональность 2-го порядка, полученная по результатам съемок масштаба 1:50 000.

С позиций прогноза золотого оруденения в зонах березитизации с включениями калишпатовых метасоматитов наибольший интерес представляют радиогеохимические структуры 2-го и 3-го порядков, имеющие урановое ядро с уран-калиевым обрамлением. Одна из них хорошо видна в ЮЗ части рис. 10. С локальными ореолами R_2 пространственно связаны практически все найденные на данной площади проявления молибденовой и золото-полиметаллической минерализации, а на северо-западном продолжении включающей их структуры второго порядка находится известное финское месторождение золота Импилахти.

Описанная методика выявления вторичной радиогеохимической зональности показала себя эффективным способом регионального и локального прогноза гидротермального оруденения Au, Cu, Mo, U, W, Sn, Pb, Zn и других металлов. Разумеется, каждый из изучаемых рудных

объектов имеет свою специфику и, следовательно, свои особенности в интерпретации геофизических материалов. Тем не менее, современные методы целевой интерпретации данных аэро-геофизических съемок дают возможность решать весьма широкий спектр геологических задач при поисках самых разнообразных твердых полезных ископаемых.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтшулер М.И., Кузьмин Г.Н. Крупномасштабный прогноз золоторудных объектов по комплексным аэрогеофизическим данным. - С.- Петербург, ВИРГ - Рудгеофизика, 1993. 160 с.
2. Бабаянц П.С. Возможности повышения избирательности алгоритмов оптимального приема. //Изв. ВУЗов. Геология и разведка. 1989, № 10.
3. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А. Изучение рельефа поверхности кристаллического фундамента по данным магниторазведки // Геофизика. 2003. № 4. с. 37-40.
4. 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.
5. Блох Ю.И. Комплексное моделирование сильномагнитных геологических объектов // Геофизика. 1997. № 2. с. 60-63.
6. Бродовой В.В. Комплексирование геофизических методов. / М.: "Недра", 1991. 330 с.