

подготовка к оснащению системы *GPS* спутниками нового 3-го поколения, которые, как ожидается, повысят точность позиционирования более чем в 3 раза. Началось развертывание Европейской системы *Galileo*. Совершенствуется ГЛОНАСС.

Разработчики аэрогравиметра GT-2A работают над повышением его стабильности и надежности, улучшением стабилизации оси чувствительности датчика на основе новых конструктивных разработок и использования современной элементной базы. Совершенствуются алгоритмы обработки.

Эти и ряд других факторов позволят без потери точности уменьшить интервал сглаживания данных с нынешних 100 с (при благоприятных условиях — 80 с) до преимущественно 60 с и менее, что, в свою очередь, существенно повысит разрешающую способность аэрогравиметрии, а значит — и область ее применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болотин Ю.В., Голован А.А., Парусников Н.А. Уравнения аэрогравиметрии. Алгоритмы и результаты испытаний. — М.: МГУ, 2001.
2. Инструкция по гравиразведке. — М., 1980.
3. Инструкция по магниторазведке. — М., 1981.
4. Могилевский В.Е., Контарович Р.С. Аэрогравиметрия — новый метод изучения труднодоступных территорий, перспективных на углеводородное сырье // Приборы и системы разведочной геофизики. — 2004. — № 2. — С. 40–43.
5. Торпе В. Гравиметрия. — М.: Мир, 1999.
6. Argyle M., Ferguson S., Sander L., Sander S. AIRGrav results: a comparison of airborne gravity data with GSC test site data / The Leading Edge, Ottawa, 2000, 19. — P. 1134–1138.
7. Mogilevsky V., Kaplun D., Kontarovich O., Pavlov S. Airborne Gravity in Aerogeophysics Inc. // IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: static and mobile measurements, S. Petersburg, 2010. — P. 42–46.

© Могилевский В.Е., Бровкин Г.И., Контарович О.Р., 2015

Могилевский Владимир Ефимович // volmog@list.ru
Бровкин Герман Игоревич // germanbrovkin@maol.ru
Контарович Олег Рафаилович // olegk@aerogeo.ru

МЕТОДОЛОГИЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

УДК 550.83, 550.8.052

Бабаянц П.С. (АО «ГНПП «Аэрогеофизика»)

АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ — ЭФФЕКТИВНОЕ СРЕДСТВО ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНОГО ПРОЦЕССА

*На основе анализа особенностей и преимуществ современных аэрогеофизических технологий показана их эффективность для решения широкого круга задач при среднемасштабном геологическом картировании, поисках месторождений углеводородов и твердых полезных ископаемых. Аэрогеофизические технологии являются эффективным средством оптимизации геологоразведочного производства за счет сокращения времени на опоскование территории и более точного позиционирования дорогостоящих сейсмических и горно-буровых работ, что делает их использование особенно актуальным в условиях кризиса. **Ключевые слова:** аэрогеофизические методы, интерпретация, картирование, поиски углеводородов, поиски месторождений твердых полезных ископаемых.*

Babayants P.S. (Aerogeophysics)

AIRBORNE GEOPHYSICAL TECHNOLOGIES ARE THE EFFICIENT MEANS FOR OPTIMIZING GEOLOGICAL EXPLORATION

After analyzing special features and advantages of the state-of-the-art airborne geophysical technologies, their efficiency for performing a wide range of tasks for middle scale geological mapping, search for hydrocarbon and solid mineral deposits was demonstrated. Airborne geophysical technologies are efficient means to optimize geological exploration through reducing the amount of time spent on prospecting the territory and on exact positioning of cost-intensive seismic and rock drilling

*works, which makes them even more relevant in a down economy. **Key words:** airborne geophysical methods, interpretation, mapping, search for hydrocarbon and solid mineral deposits.*

В последние годы наблюдается устойчивый рост доли аэрогеофизических работ в общей структуре геологоразведочного производства как в абсолютном, так и в относительном выражении. Повышение спроса потенциальных недропользователей на аэрогеофизические съемки обусловлено в первую очередь резким увеличением их информативности и поисковой отдачи по сравнению с аналогичными работами прошлых лет.

В числе главных факторов, обусловивших резкий рост эффективности аэрогеофизических работ, следует отметить:

1. Внедрение микропроцессорных технологий в геофизическом приборостроении, что обеспечило возможность цифровой регистрации и обработки сигналов и соответственно позволило существенно усилить помехозащищенность измерительного канала, заметно увеличить чувствительность и разрешающую способность аппаратуры.

2. Внедрение цифровой регистрации сигналов, а также использование высокопроизводительных компьютеров для обработки и регистрации данных, что позволило увеличить пропускную способность измерительного канала и тем самым заметно улучшить пространственное разрешение съемки.

3. Использование для привязки результатов измерений спутниковых навигационных систем, освоение которых позволило не только увеличить более чем на порядок точность плановой привязки результатов измерений, но и осуществлять с высокой точностью их высотную привязку.

Перечисленные изменения привели к тому, что аэрогеофизические методы стали успешно конкурировать с наземными аналогами по точности и пространственному разрешению, существенно превосходя их по производительности и стоимости.

Особенности современных аэрогеофизических технологий

Современные аэрогеофизические съемки характеризуются следующими основными особенностями [4]:

1. Экспрессность аэрогеофизических технологий, возможность за короткое время покрывать съемками высокого разрешения значительные участки; возможность работы на труднодоступных территориях; отсутствие техногенной нагрузки на изучаемые площади, что позволяет выполнять исследования на объектах, закрытых для других видов работ.

2. Объемный характер получаемой информации, выражающийся в том, что в процессе съемки обычно изменяется как альтитуда, так и высота пунктов наблюдения. Кроме того, имеется возможность выполнения съемок на разных высотных уровнях, а также совместной интерпретации аэро- и наземных данных.

3. Возможность и целесообразность комплексирования разнородных методов: использование дополнительного информационного канала, как правило, увеличивает себестоимость работ не более чем на 10–15 %.

4. Работа во многих случаях на малоизученных территориях, когда 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 точности; высокая точность плановой и высотной привязок точек наблюдения; получение дополнительного канала информации из данных спутниковой навигации и показаний радиовысотомера — цифровой модели рельефа местности.

Резкое повышение качества и пространственного разрешения аэрогеофизических съемок потребовало усовершенствования технологий интерпретации полученных данных, вследствие чего развитие последних на рубеже 20–21-го веков также осуществлялось довольно стремительно. С учетом перечисленных выше особенностей могут быть сформулированы общие требования к интерпретационным технологиям, используемым для анализа аэрогеофизических данных.

1. Аэрогеофизические съемки, как правило, выполняются на ранних стадиях изучения территорий (опережающие работы), и их результаты служат основой для постановки наземных заверочных (оценочных) работ. Срок, отводящийся на геологическое изучение площадей, обычно весьма ограничен (лицензии выдаются сроком до 5 лет). Это диктует необходимость получения итоговой информации в весьма сжатые сроки, т.е. время, затраченное на интерпретацию данных, не должно существенно превышать времени, за которое выполнена съемка. Следовательно, интерпретационные технологии должны быть в значительной мере автоматизированы и унифицированы.

2. Поскольку в большинстве случаев аэрогеофизические исследования выполняются на малоизученных территориях, используемые интерпретационные тех-

нологии и алгоритмы должны сохранять работоспособность при дефиците и даже полном отсутствии априорной информации.

3. Дефицит априорной информации в определенной мере может быть скомпенсирован комплексированием разнородных аэрогеофизических данных. Элементы комплексной интерпретации должны использоваться при этом 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.

Выполняемые на различных территориях комплексные аэрогеофизические съемки, по сути, являются элементом высококачественной геофизической основы для геологического изучения территории и могут впоследствии использоваться многократно для целевой интерпретации, направленной на оценку перспектив территории на те или иные виды сырья [4]. Тем не менее, в последние годы сложилось три направления исследований, принципиально отличающиеся как составом комплекса методов, так и спектром решаемых геологических задач:

опережающие работы в помощь геологическому картированию территории;

работы на нефтегазоперспективных территориях, нацеленные на оценку перспектив нефтегазоносности; поиски месторождений твердых полезных ископаемых.

Опережающие аэрогеофизические исследования в помощь геологическому картированию

Среднемасштабные аэрогеофизические съемки, выполняемые в помощь геологическому картированию, имеют конечной целью оценку перспектив территории на весь спектр возможных в ее пределах видов минерального сырья посредством изучения особенностей ее геологического строения, фактически реализуя существовавшую прежде стадию общих поисков.

При выполнении среднемасштабных работ на стадии общих и специализированных поисков 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 уже обозначается более четко. Однако во всех случаях на первом этапе анализа результатов аэрогеофизических работ выполняется тотальная (общая геофизическая) интерпретация, нацеленная на изучение геологического строения площади работ в целом (структурно-тектоническое и вещественно-петрофизическое картирование, ландшафтно-геологическое районирование и т.п.). На этом этапе интерпретации применяются 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, страти-

графическая приуроченность и т.п.). Однако поисковая направленность работ в основном обрабатывается на следующем этапе интерпретации с привлечением всего объема априорной геолого-геофизической информации, имеющейся в наличии.

Многоцелевой характер опережающих геофизических работ определяет целесообразность максимального расширения используемого комплекса аэрогеофизических методов, тем более что использование дополнительного канала информации на одном носителе лишь незначительно увеличивает себестоимость работ. При этом следует иметь в виду, что совместное использование разных по своим физическим основам геофизических методов может создать определенные трудности при определении оптимальной методики съемки, так как в ряде случаев они предъявляют взаимно исключающие требования к ее технологии.

Для решения задач геологического картирования в АО «ГНПП «Аэрогеофизика» разработана специальная технология, базирующаяся на физико-математическом моделировании потенциальных полей и последовательном редуцировании их вверх по разрезу, что позволяет с необходимой степенью детальности выделять элементы геологического строения фундамента и осадочного чехла, осуществлять тектоническое картирование и оценку минерагенического потенциала территорий вплоть до прогноза оруденения. Описанию методики и результатов ее применения посвящены многочисленные публикации наших сотрудников [1, 2 и др.]. Отметим лишь, что существенный прирост информативности за счет использования современных данных высокого разрешения и передовых методов интерпретации имеет место даже при выполнении региональных работ и мелкомасштабном картировании (рис. 1).

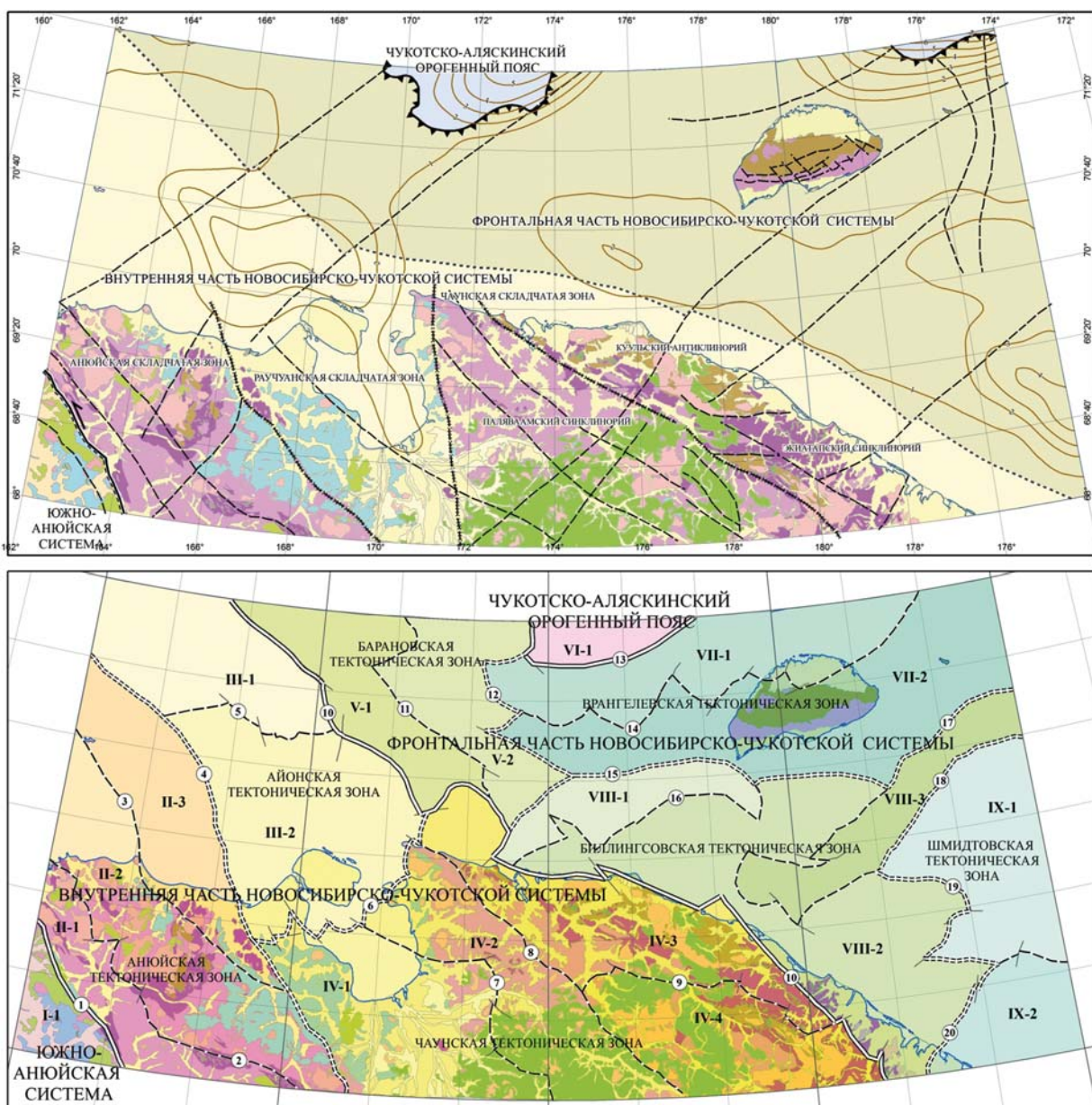


Рис. 1. Складчато-надвиговые системы и зоны на картах тектонического районирования по ретроспективным данным (ГК-1000, сверху) и по геофизическим материалам (внизу) на площади листов R-58, 59, 60, 01

Аэрогеофизические работы с целью оценки перспектив нефтегазоносности

Начало использования современных аэрогеофизических методов для изучения потенциально нефтегазоносных площадей связано с внедрением прецизионных (квантовых и протонных) аэромагнитметров в 1970-х годах. С тех пор аэромагнитная съемка и по объемам использования, и по информативности является основным аэрогеофизическим методом поисков углеводородов.

Примерно к этому же времени относятся первые опыты по использованию аэроэлектроразведки методом переходных процессов (АМПП, или *Time Domain* в западной транскрипции) и аэрогамма-спектрометрии [11]. Основанием для использования этих методов послужило предположение (впоследствии доказанное на минералогическом и геохимическом уровне) о наличии зоны вторичных изменений над залежью, связанных с миграцией флюидов [11].

На прямые поиски залежей углеводородов нацелено выполнение газовой аэросъемки (дистанционное определение концентраций метана и его гомологов, некоторых циклических и ароматических углеводородов, либо суммы всех углеводородов в приземном слое атмосферы), основанное на использовании кюветных или трассовых (лазерных) газоанализаторов.

Резкому повышению эффективности и поисковой отдачи аэрогеофизического комплекса при изучении нефтегазоперспективных территорий способствовало использование аэрогравиметрической съемки, в современном виде появившейся на рубеже 20–21-го веков [10].

Совместное использование всех перечисленных аэрогеофизических методов может столкнуться с определенными трудностями, связанными с технологическим конфликтом вследствие различия методических требований к выполнению тех или иных видов работ. Кроме того, эффективность использования непотенциальных методов сильно зависит от внешних условий. Так, современные модификации аэроэлектроразведки и аэрогамма-спектрометрия не обладают достаточной глубинностью и не могут быть использованы в условиях обводнения территории и на акваториях. Использование газовой аэросъемки ограничивается присутствием в атмосфере биогенного метана и тем, что исследуемые газовые компоненты тяжелее воздуха и «скатываются» в понижения рельефа (т.е. картируется не залежь, а рельеф). Таким образом, в настоящее время при поисках углеводородов в основном используется комплекс аэрогеофизических методов, состоящих из аэромагнитной и аэрогравиметрической съемок.

Изучение строения фундамента осадочных бассейнов.

Сведения о геологическом строении фундамента помогают правильному пониманию процесса формирования осадочного чехла и закономерностей размещения в нем нефтяных и газовых месторождений. Важно, что ведущим аэрогеофизическим методом в решении этой задачи является магниторазведка. Дело в том, что в пределах осадочных бассейнов основная часть энергии аномального магнитного поля связана именно с верхней частью фундамента. Фактически в таких реги-

онах аэромагнитная съемка является прямым методом его изучения.

1. *Оценка морфологии поверхности фундамента.* Решение этой задачи основывается на том, что фундамент осадочных бассейнов обычно сложен контрастными по магнитным свойствам породами, в то время как осадочный чехол представлен немагнитными и слабомагнитными образованиями. Тогда оценка глубин источников магнитного поля в скользящем окне по всей площади исследований позволит получить искомую карту глубин (альтитуд) поверхности фундамента.

Современные методы оценки глубин источников гравитационных и магнитных аномалий основаны на анализе их спектров. Впервые определять глубины особых точек функции, описывающей аномальное поле, по ее спектру предложил В.К. Иванов в 1956 г. За рубежом практически та же идея на основе анализа полей мультиблочных моделей была предложена в 1970 г. А. Спектором и Ф. Грантом применительно к магнитным данным [12]. Нами при изучении рельефа фундамента применяется технология *ROMGAS*, которая входит в пакет программ СИГМА-3D [2]. По результатам опробования технологии в различных осадочных бассейнах в условиях древних и молодых платформ относительная точность определения глубин составляет около 10 %.

Конечно, точность определения глубин по аэромагнитным данным заметно уступает сейсморазведке, однако во многих случаях поверхность кристаллического фундамента является плохо отражающей. В сейсморазведке в таких случаях используют понятие «акустический фундамент», имея в виду самый нижний устойчиво прослеживающийся отражающий горизонт. В этих случаях результаты интерпретации аэромагнитных данных позволяют существенно уточнить мощность осадочного чехла.

2. *Картирование структурно-вещественных комплексов фундамента.* Данные о рельефе поверхности фундамента могут быть использованы на следующем этапе интерпретации для вычисления эффективных (избыточных) значений плотности и намагниченности образований, слагающих верхнюю часть его разреза. Для этого нами используется программа *REIST* из упомянутого выше пакета программ СИГМА-3D [2].

Результатом моделирования являются две карты эффективных физических свойств фундамента: петромагнитная (полученная по магнитному полю) и петроплотностная (полученная по гравитационному полю). Их двумерная классификация (автоматическая или интерактивная) позволяет получить карту петрофизических классов (комплексов) — однородных по плотности и намагниченности образований фундамента. Геологическая идентификация выделенных петрофизических комплексов выполняется с использованием априорных данных о петрофизических характеристиках пород фундамента района работ, либо (при их отсутствии) по аналогии с территориями сходного строения, с учетом характерных значений физических свойств и особенностей структурной позиции каждого комплекса.

3. *Объемное моделирование гравитационного и магнитного полей.* Программа *REIST* строит интерпретацион-

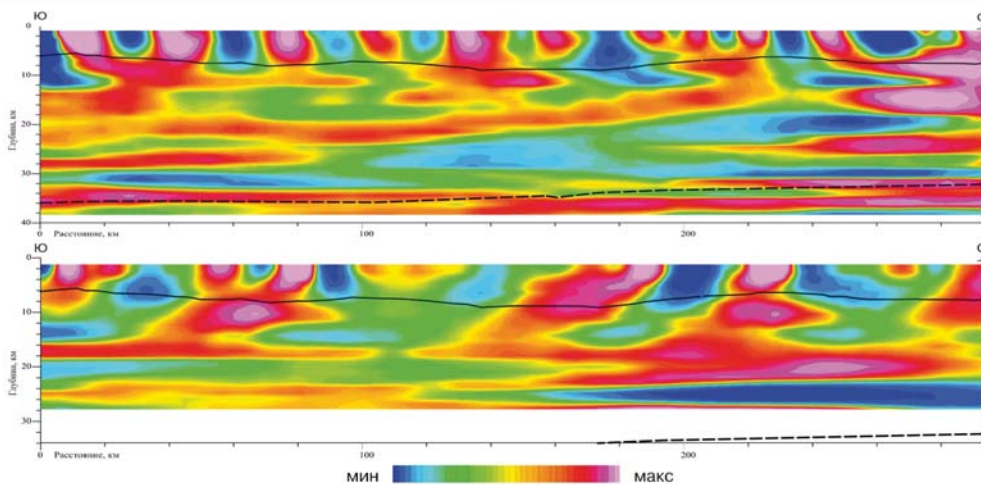


Рис. 2. Пример вертикальных разрезов эффективных параметров, полученных методом интерпретационной томографии: вверху — разрез эффективной плотности; внизу — разрез эффективной намагниченности. Сплошная черная линия — поверхность фундамента, пунктир — поверхность Мохо по сейсмическим данным

ную модель, в которой эффективные физические свойства могут изменяться в пределах заданного слоя лишь по латерали. Очевидно, что природные объекты проявляют изменчивость и по вертикали, что в рамках данной модели практически не отражается.

Направление в теории интерпретации потенциальных полей, связанное с изучением послойного распределения некоторых параметров, характеризующих неоднородности в нижнем полупространстве, по данным магнито- и гравиразведки, получило название интерпретационной томографии. Обзор методов, реализующих такой подход, приводится, например, в работе [7].

Нами используется технология, основанная на последовательном послойном моделировании гравитационного или магнитного полей [3]. С ее помощью строится трехмерная модель распределения физических свойств горных пород, из которой затем извлекаются отдельные разрезы или погоризонтные планы.

Представленные в такой форме данные весьма удобны для совместной интерпретации с сейморазведкой, как по отдельным сейсмическим профилям, так и в 3D-варианте. Сейморазведка — метод в значительной мере структурный, и наилучшим образом работает на горизонтально слоистых разрезах. Потенциальные же методы в большей степени зависят от вещественного состава пород и наиболее чувствительны к латеральному изменению свойств. Таким образом, полученные данные взаимно дополняют друг друга. На рис. 2 приводятся примеры вертикальных разрезов 3D-моделей эффективных параметров, полученных по результатам интерпретационной томографии гравитационного и магнитного полей.

4. Картирование разрывных нарушений. Одним из важных направлений интерпретации гравимагнитных данных является картирование разрывных нарушений фундамента. В силу того, что аэрогеофизические данные покрывают изучаемые площади с весьма высокой плотностью и метрологически однородны, решение указанной задачи оказывается значительно более достоверным, чем по данным 2D-сейморазведки.

Разрывные нарушения выделяются по картам эффективных плотности и намагниченности фундамента, их трансформантам (локальным составляющим, горизонтальным градиентам и т.п.), а также непосредственно по карте классификации петрофизических свойств по несогласным границам между контрастными петрофизическими классами. Также могут быть использованы специальные методы линейментного анализа моделей, в частности, фильтрация методом главных компонент [5].

Изучение геологического строения осадочного чехла

1. Разделение полей.

Ключевой проблемой при изучении относительно мало контрастных по плотности и намагниченности образований осадочного чехла является разделение полей от разных по глубине источников в составе фундамента и чехла.

С учетом того, что использование трансформаций в конечном счете приводит к невозможности дальнейшей количественной интерпретации разделенных компонент, для изучения элементов геологического строения осадочного чехла наиболее адекватным представляется подход, при котором выполняется редуцирование магнитного и гравитационного полей за счет влияния нижней части разреза, т.е. вычисляется разность между исходными гравитационным и магнитным полями и соответствующими полями моделей фундамента.

Остаточные магнитное и гравитационное поля, полученные в результате моделирования как неподобранная часть поля, во многих случаях оказываются весьма информативными без применения дополнительных методов анализа. Так, на одной из площадей юга Якутии положительные аномалии остаточного гравитационного поля с высокой надежностью картируют антиклинальные структуры и связанные с ними месторождения углеводородов (рис. 3).

2. Объемное моделирование и оценка морфологии субгоризонтальных границ в составе осадочного чехла. По отношению к остаточным полям могут быть использованы те же технологии обработки и интерпретации данных, какие использовались к исходным полям, например, 3D-моделирование с получением «куба» плотностей и намагниченностей для осадочного чехла, или технология ROMGAS с получением альтитуд опорного горизонта в составе осадочного чехла, если таковой имеется. При обработке используются опции программы, позволяющие добиться максимальной сходимости результатов обработки с данными бурения.

3. Картирование разрывных нарушений и оценка суммарной степени дислоцированности осадочного чехла. Для картирования разрывных нарушений в толще осадочного чехла применяются те же технические средства

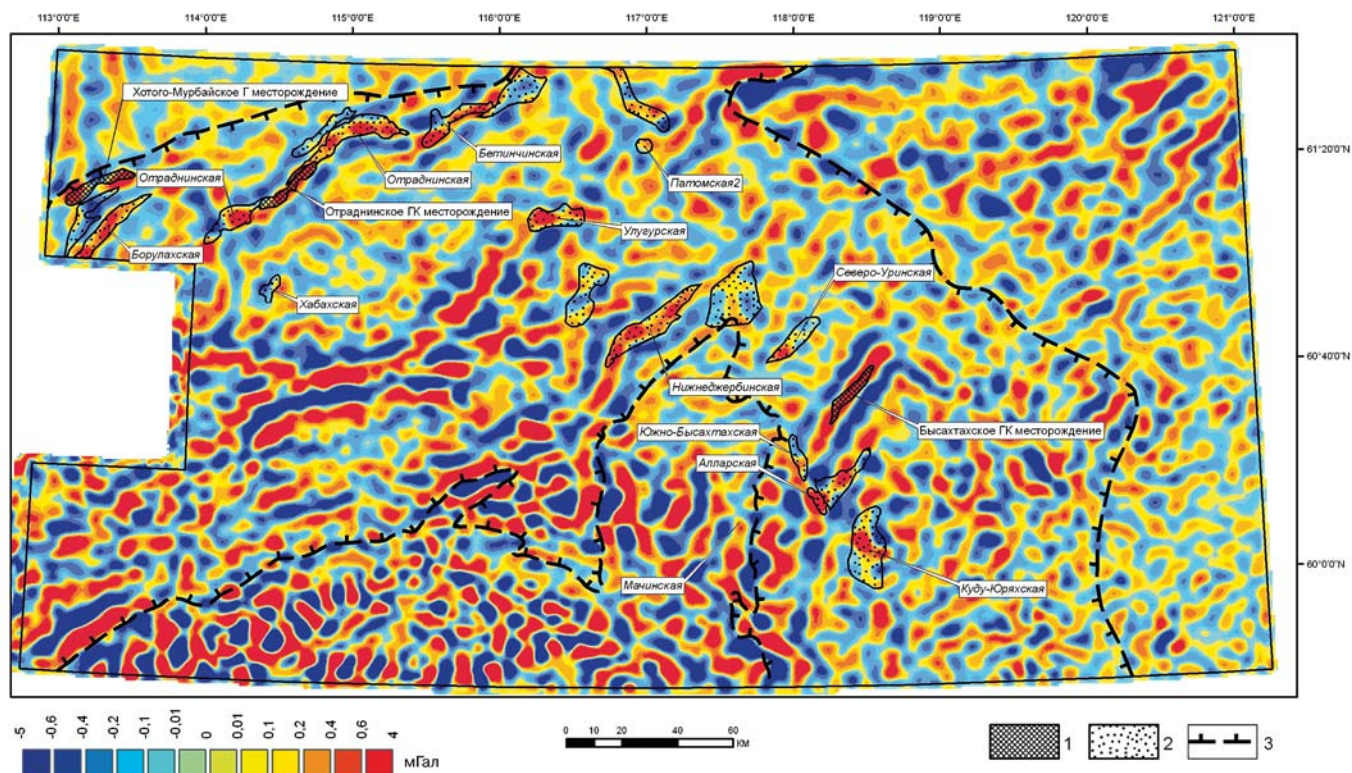


Рис. 3. Распределение месторождений УВ и локальных положительных структур осадочного чехла по данным сейсморазведки на карте аномалий остаточного гравитационного поля: 1 — месторождения УВ; 2 — локальные положительные сейсмоструктуры; 3 — границы распространения складчатых венд-палеозойских комплексов пород

и способы, что и для фундамента, но в качестве исходных параметров для анализа используются остаточные гравитационное и магнитное поля. При этом удается установить их взаимосвязи и характер унаследованности с разломами фундамента.

Важным направлением исследований является анализ морфологии остаточного гравитационного поля. Как правило, степень его изменчивости на различных участках площади существенно различается. Логично предположить, что области с наиболее спокойным полем должны отвечать участкам, где образования осадочного чехла наиболее однородны по латерали, т.е. наименее подвержены дислокациям и фаціальным изменениям. Выделение таких областей можно выполнять, например, путем расчета стандартного отклонения анализируемого поля в скользящем окне выбранного размера. Нами для этой цели используется специально разработанный для решения подобных задач интегральный фильтр, с помощью которого осуществляется вычисление нормированной суммы абсолютных значений аномального поля в окне выбранного размера.

Решение целевых задач

При наличии априорной геолого-геофизической информации (в первую очередь, данных сейсморазведки) аэрогеофизические материалы могут быть с успехом использованы для решения целого ряда специальных (целевых) задач, в т.ч. направленных непосредственно на прогноз залежей углеводородов, например:

3D-моделирование изолированных гравитационных и магнитных аномалий с целью определения

их метрических характеристик и возможной природы (интрузии, соляные диапиры, рифовые постройки и т.п.);

определение распределения избыточной плотности в слое между двумя сейсмическими горизонтами (может характеризовать качество коллектора);

предположительная вещественная идентификация отложений отдельных горизонтов по изучению корреляционных связей мощности слоя по априорным данным и остаточного гравитационного поля, и т.п.

Поиски месторождений твердых полезных ископаемых

Аэрогеофизические модификации наземных геофизических методов изначально разрабатывались и с успехом использовались для поисков месторождений твердых полезных ископаемых. С их помощью во второй половине прошлого века были открыты и оценены месторождения железных руд, алмазов, рудного золота, радиоактивного сырья и др. В последние годы вследствие повышения качества и разрешающей способности методов удалось существенно расширить состав изучаемых объектов, поскольку стало возможным исследование малоcontrastных залежей, залегающих в неблагоприятных ландшафтно-геологических условиях.

В настоящее время комплекс аэрогеофизических методов, используемый при поисках месторождений твердых полезных ископаемых, включает в себя аэромагнитную съемку, аэрогамма-спектрометрию и (в последние 10–15 лет) одну из модификаций аэроэлектро-разведки. При наличии дополнительно привлекаются данные наземной гравиметрии.

Привлечение в комплекс электроразведочного канала позволило существенно расширить спектр решаемых задач. Так, использование частотных модификаций метода (дипольное индуктивное профилирование — ДИП) позволяет дополнительно осуществлять:

выделение и картирование разноранговых зон разрывных нарушений, проницаемых зон трещиноватости и дробления, выраженных линейными зонами проводимости;

изучение внутреннего строения площадных деструктивных зон по характеру распределения проводимостей;

выделение локальных аномалий проводимости, перспективных на обнаружение рудных залежей;

выделение и картирование погребенных палеодолин с целью прогнозирования россыпных месторождений;

выявление погребенных кор выветривания и связанных с ними залежей полезных ископаемых;

картирование геологических тел с контрастными электрическими свойствами.

Из приведенного перечня очевидно, что метод ориентирован в первую очередь на решение картировочных задач. Однако во многих случаях последовательное решение задач, нацеленных на картирование структурных, вещественных, литолого-фациальных и других неоднородностей выводит практически на прямое обнаружение объекта.

Выраженной поисковой направленностью обладает модификация аэроэлектроразведки, основанная на изучении нестационарных полей (метод переходных процессов, или *Time Domain* на Западе). Он нацелен на:

детальные поиски сульфидных медно-никелевых месторождений;

детальные поиски полиметаллических свинцово-цинковых руд;

выделение аномалий, благоприятных на обнаружение кимберлитовых трубок (совместно с другими геофизическими методами);

изучение внутреннего строения рудоконтролирующих тектонических зон и прослеживание рудо локализирующих структур по латерали и на глубину;

изучение геологического строения верхней части разреза посредством детального зондирования;

выделение аномалий поляризуемости.

Как уже отмечалось, высокое качество и пространственное разрешение современных аэрогеофизических данных позволяют использовать их практически на всех стадиях геологоразведочного процесса. При этом если при выполнении среднemasштабных работ целевой объект, как правило, не определен, то детальные съемки нацелены обычно на локализацию объектов, относящихся к вполне конкретному промышленному (генетическому) типу.

Во всех случаях вначале выполняется общая геофизическая интерпретация данных, нацеленная на решение задач общегеологического назначения (структурно-тектоническое и вещественно-петрофизическое картирование, ландшафтно-геологическое районирование и т.п.). Здесь применяются методы и технологии, не использующие, или использующие ограниченно, априорную информацию. Безусловно, результаты та-

кой интерпретации могут нести информацию и о локализации поисковых объектов (тектонический контроль, стратиграфическая приуроченность и т.п.). Однако поисковая направленность работ реализуется главным образом на следующем этапе с привлечением всего объема априорной геолого-геофизической информации, имеющейся в наличии.

В зависимости от характеристик поискового объекта 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 [8]. Как правило, к числу подобных объектов относятся и месторождения черных металлов. В случае если такие месторождения представлены ассоциациями ферромагнитных минералов, интерпретация геофизических материалов может потребовать использования довольно изощренных методов количественной интерпретации [6]. При этом в ряде случаев удается 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 оконтурены величиной бортового содержания, которая может изменяться в широких пределах в зависимости от конъюнктуры рынка. В этих случаях наиболее целесообразным представляется использование методов интерпретации, направленных в т.ч. 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, что в первом случае в качестве основных выступают методы количественной и полуколичественной интерпретации данных, а во втором — методы вероятностно-статистического анализа, в т.ч. алгоритмы распознавания образов с обучением на эталонных объектах.

На рис. 4 представлены результаты прогноза молибденового оруденения на территории Полярного Урала по результатам комплексной аэрогеофизической съемки масштаба 1:50 000. В качестве эталонов для распознавания использовались известные в регионе месторождения (красные треугольники). Группа рудопроявлений, в т.ч. другой генетической природы (точки), использовалась как контрольная выборка.

В качестве исходного набора признаков для распознавания учитывались результаты физико-математиче-

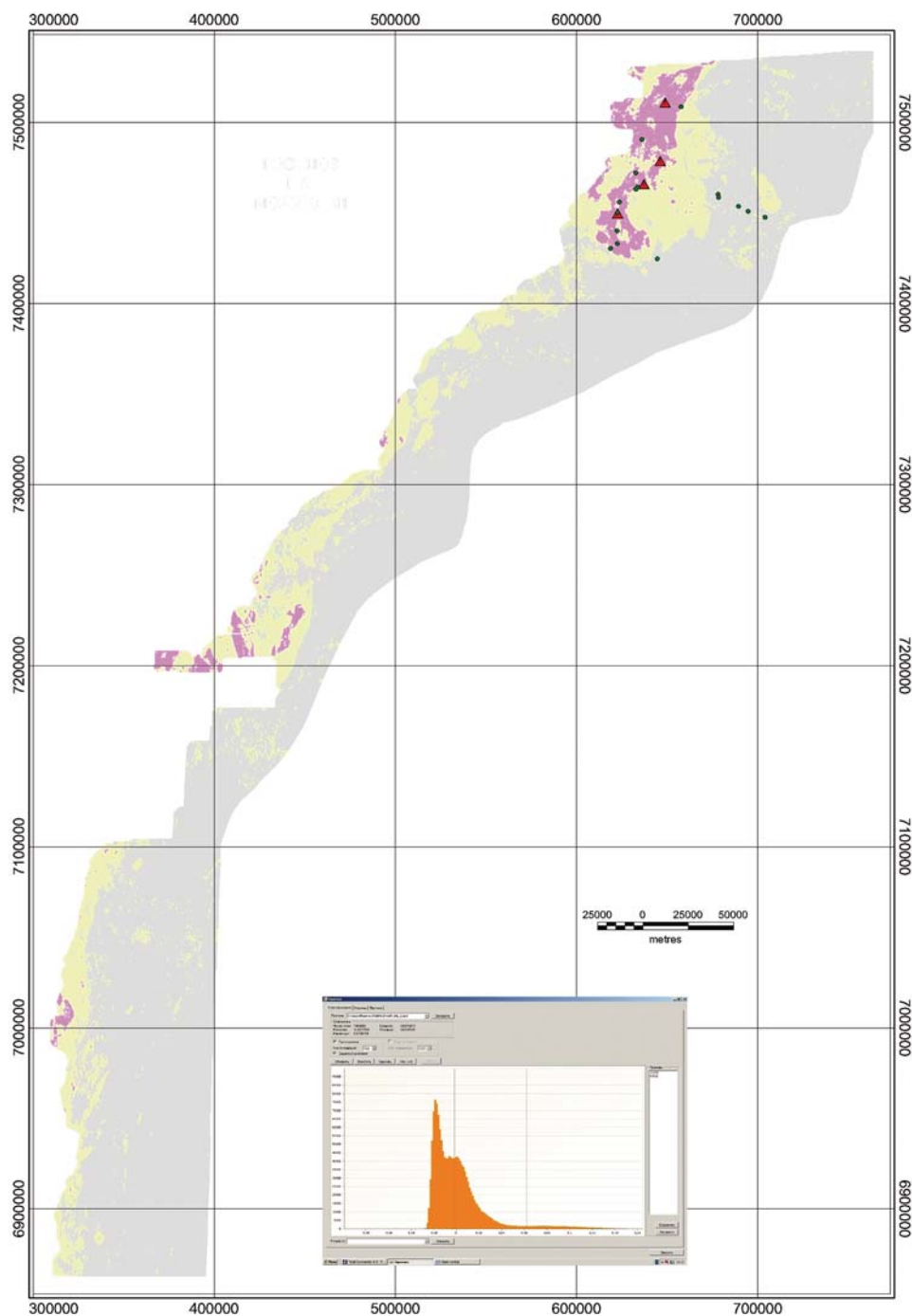


Рис. 4. Полярный Урал. Результаты прогноза молибденового оруденения по комплексу аэрогеофизических данных [4]

ского моделирования и специализированной обработки геофизических полей, различные трансформации и комбинации исходных параметров. Всего в распознавании участвовало 47 признаков.

Выбор порога принятия решения осуществлялся по результатам анализа гистограммы распределения оценки наличия объекта (в нижней части рис. 4). В зависимости от выбранного порога принятия решения, по результатам прогноза оконтуриваются потенциально перспективные площади ранга рудного поля (розовая заливка), либо ранга рудного района (желтая заливка).

Особенности аэрогеофизических съемок (высокая производительность, комплексность, дешевизна, информативность) определяют наибольшую эффективность их использования в качестве опережающих с тем, чтобы можно было, опираясь на результаты их интерпретации, оперативно управлять поисковым процессом на основном этапе работ. Тем самым аэрогеофизические технологии являются эффективным средством оптимизации геологоразведочного производства за счет сокращения времени на опосредованное обнаружение территории и более точного позиционирования дорогостоящих сейсмических и горно-буровых работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Буш В.А. и др. Интерпретация аэрогеофизических данных при геологическом картировании и изучении глубинного строения территорий // Разведка и охрана недр. — 2006. — № 4. — С. 8–13.
2. 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.
3. 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: матер. 31-й сессии междунар. семинара им. Д.Г. Успенского. — М: ОИФЗ РАН, 2004.
4. Бабаянц П.С. Новые подходы к комплексной интерпретации аэрогеофизических данных / Комплексный анализ электромагнитных и других геофизических данных. — М.: КРАСАНД, 2011. — С. 108–133.
5. Бабаянц П.С., Трусов А.А. Программа MGK — эффективное средство картирования разрывных нарушений на основе анализа матриц распределения геофизических параметров / Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: матер. 34-й сессии междунар. семинара им. Д.Г. Успенского. — М: ОИФЗ РАН, 2007. — С. 27–29.
6. Блох Ю.И. Комплексное моделирование сильномагнитных геологических объектов // Геофизика. — 1997. — № 2. — С. 60–63.
7. Долгаль А.С., Шархимуллин А.Ф. О гравитационной томографии и путях ее дальнейшего развития // Вестник пермского университета. Геология. — Вып. 11 (37). — 2009. — С. 114–122.
8. Калмыков Б.А., Трусов А.А. Технология выделения перспективных малоамплитудных аэромагнитных аномалий при поисках кимберлитовых тел // Разведка и охрана недр. — 2011. — № 7. — С. 49–56.
9. Каменецкая Р.М., Каменецкий Ф.М., Мамаев В.А. и др. Применение аэроэлектроразведки при прогнозировании нефтеперспективных участков // Сов. геология. — 1991. — № 6. — С. 24–28.

10. Могилевский В.Е. Контарович Р.С. Аэрогравиметрия — новый метод изучения труднодоступных территорий, перспективных на углеводородное сырье // Приборы и системы разведочной геофизики. — 2004. — № 2. — С. 40–43.

11. Morse J.G., Zinke R. The origin of radiometric anomalies in petroleum basins—a proposed mechanism // Oil & Gas Journal. — 1995. — Vol. 93. — Issue 23.

12. Spector A., Grant F.S. Statistical models for interpreting aeromagnetic data // Geophysics. — 1970. — Vol. 35. — No. 2. — P. 293–302.

© Бабаянц П.С., 2015

Бабаянц Павел Суменович // bab@aerogeo.ru

УДК 551.243.550.8.05.551.243

Калмыков Б.А., Трусов А.А. (АО «ГНПП «Аэрогеофизика»)

ВОЗМОЖНОСТИ ВЫЯВЛЕНИЯ РУДОКОНТРОЛИРУЮЩИХ СТРУКТУР ПО МАТЕРИАЛАМ АЭРОЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

*Выполнена оценка возможностей и разрешающей способности аэроэлектроразведки для геологического картирования. Приведены примеры отражения в аэроэлектроразведочных данных основных типов рудоконтролирующих структур: дизъюнктивных, блоковых и пликативных, на которых показана эффективность частотной аэроэлектроразведки для решения задач структурного картирования. Высказаны предложения о целесообразности постановки электроразведки, основанной на нестационарных полях, для локализации перспективных участков в пределах выделенных рудоконтролирующих зон. **Ключевые слова:** аэроэлектроразведка, картирование, рудоконтролирующие структуры, поиски рудных залежей.*

Kalmykov B.A., Trusov A.A. (Aerogeophysica)

THE POSSIBILITIES TO DISCOVER ORE CONTROLLING STRUCTURES WITH THE HELP OF AIRBORNE ELECTROMAGNETIC SURVEY DATA

*The abilities and resolution power of electromagnetic survey for the purposes of geological mapping were estimated. The examples of main types of ore controlling structures found in electromagnetic survey data were given: disjunctive, block, fold. These examples show the efficiency of frequency electromagnetic survey to solve the problems of structural mapping. There were some suggestions to use electromagnetic survey, which is based on variable fields, to locate prospective areas within the identified ore controlling areas. **Key words:** electromagnetic survey data, mapping, ore controlling structures, search for ore deposits.*

В последние годы аэроэлектроразведка занимает традиционное место в поисковом комплексе опережающих аэрогеофизических работ на золото, уран, полиметаллы и другие рудные полезные ископаемые. Прежде всего, данный метод направлен на изучение структурных элементов строения поисковых площадей и выявление структурных предпосылок локализации оруденения. Это рудоконтролирующие структуры разного типа, влияющие на размещение рудных залежей, а также элементы их внутреннего строения, имеющие рудолокализирующий характер.

Методы аэроэлектроразведки с контролируемым источником относятся к индуктивным методам электроразведки, в которых возбуждение и прием поля производится с помощью незаземленных контуров. Возбуждающее поле в генераторной петле может изменяться во времени либо по гармоническому закону (сумма синусоид с фиксированными частотами), либо представлять собой чередование импульсов определенной формы. В первом случае говорят о низкочастотных методах электроразведки, во втором — о методе переходных процессов (МПП).

Аэроэлектроразведочная система, реализующая низкочастотный метод электроразведки (или, по-другому, метод дипольного индуктивного профилирования — ДИП), обладает рядом особенностей, определяющих высокую эффективность данной модификации для решения задач геологического картирования в рудных провинциях. Во-первых, это сравнительно широкий частотный диапазон: от 130 Гц до 8 кГц. Во-вторых, высокая чувствительность приемников и низкий уровень внутренних шумов, что дает способность дифференцировать высокоомные геологические образования с сопротивлениями в несколько тысяч Ом. В-третьих, возможность обработки синфазной компоненты вторичного магнитного поля позволяет выявлять высокопроводящие объекты. В-четвертых, высокая производительность и экономическая эффективность съемки [10].

Размеры зоны возбуждения, т.е. области, в которой распространяются вихревые токи, вносящие наибольший (до 90%) вклад во вторичное поле, зависят, главным образом, от высоты генераторной петли над поверхностью земли. При ее положении на уровне 120 м (закреплена на летательном аппарате) и при средних уровнях электропроводности разреза ее диаметр на местности может составлять около 300 м. Глубинность метода зависит как от ландшафтных условий проведения работ, так и от электрических свойств геологического разреза. Наибольшей глубиной проникновения характеризуется электромагнитное поле на самой низкой частоте (130 Гц). Мощность исследуемого разреза с преобладанием высокоомных неизменных магматических и метаморфических пород может достигать 200 м. На участках развития образований повышенной электропроводности глубинность метода уменьшается до первых десятков метров. Характерно, что пластообразные тела высокоомных пород, присутствующие в верхней части разреза, не образуют существенных помех для отражения и картирования погребенных проводящих образований.

Площадные аэроэлектроразведочные работы характеризуются системностью наблюдений. В процессе съемки производится 7 измерений в секунду, что обеспечивает шаг точек наблюдений 6–8 м. Разрешающая способность метода зависит от масштаба съемки, определяющего параметры системы наблюдений, но имеет определенные пределы. Как правило, отдельные рудные залежи в силу своей малой мощности не фиксируются даже при проведении детальных работ масштаба 1: 10 000. В то же время структуры, контролирующее положение систем рудных залежей и осложняющие их