

Практика, проблемы и новые разработки в магнитной

аэроградиентометрии

Practicalities, pitfalls and new developments in airborne magnetic gradiometry

Скотт Ногг (Scott Hogg), владелец компании Scott Hogg&Associates, Торонто, Канада, выполняющей работы в области поисковой и аэрогеофизики, дает обзор новшеств в возрождающейся магнитной аэроградиентометрии при решении рудных задач.

азвездка на нефть и газ стимулировала создание первых магнитных аэроградиентометров. Мотивом послужило желание применить уравнение Эйлера к результатам измерения вертикального градиента для расчета глубины источников магнитного поля.

В 1960-х годах авиаторы предложили системы как для вертолетов, так для подвески под крыло. Интерес к теории Эйлера для анализа данных магниторазведки при решении рудных задач возродился около 20 лет и до сих пор лежит в основе многих новых методов интерпретации.

В 1970-х годах канадская компания GSC разработала вертикальный градиентометр. В начале 1980-х началось выполнение национальной программы картирования, и канадские исполнители аэрогеофизических работ создали ряд подкрыльных и вертолетных систем. В рудной отрасли интерес к аэроградиентометрии был связан в основном с возрастающим пространственным разрешением и детальностью: легко обнаруживались малые аномалии по краям крупных структур. Карты градиента, рассчитанные по полному магнитному полю простой фильтрацией, казалось, дают, при меньших затратах, почти те же преимущества, что и построенные по результатам измерений, и коммерческий спрос на измерение вертикального градиента почти исчез.

В 1983 г. компания Geometrics представила горизонтальный градиентометр. Эта разработка имела особое значение, поскольку включала в себя методику Набигьяна-Хансена (Nabighian and Hansen) для расчета аномального «псевдо-полного поля» (pseudo total field) по измеренному горизонтальному градиенту. С закрытием изыскательского подразделения Geometrics горизонтальный градиент на время исчез с горизонта. Десять лет спустя тот же подход использовал Нельсон (Nelson) из компании NRC, а также в ряде недавних разработок De Beers и других компаний.

Первый трехкомпонентный градиентометр применялся в начале 1990-х компанией Geodass (ныне – Fugro) в Ботсване. При измерении градиента с этим прибором были возможны различные режимы для решения различных задач, для которых нужна такая информация. В Канаде первый горизонтальный градиентометр изготовила компания Tetraquest, а первый трехкомпонентный градиентометр с подвеской под крыло – компания Goldak. В настоящее время почти все исполнители аэрогеофизических работ имеют системы измерения горизонтального градиента, а несколько компаний могут выполнять трехкомпонентные съемки с одновременным измерением вертикального и горизонтального градиента.

В последние годы интерес к магнитной градиентометрии значительно возрос. Некоторые преимущества градиента имеют веские основания, некоторые еще недооцениваются, а многие – не до конца понятны. Результаты съемки градиента дают преимущество при интерпретации. Карты вертикального градиента, карты расчетных полей, эйлеровские методы – для всего этого нужна информация о градиенте. Эта информация может быть получена расчетным путем или путем измерений. В этом обзоре речь идет о методах основанных на измерениях, а не на расчете. В настоящее время есть три области применения таких методов. Первая из них – борьба с суточными вариациями, вторая – расчет поправок в поле за высоту полета, и третья – значительное увеличение точности и разрешения карт магнитного поля.

Суточные вариации и градиент

Уже 40 лет утверждение, что данные градиентометрии не подвержены влиянию суточных вариаций, приводится в качестве мотива для проведения работ по съемке градиента. Однако внедрение идеи в практику до сих пор затруднительно. Идея проста: разность одновременно измеренных значений даст значение градиента и исключит влияние вариаций, которое должно быть одинаковым на обоих датчиках. Далее, интегрируя градиент, можно получить полное поле, свободное от суточных вариаций.

Градиент всегда можно рассчитать по карте полного поля, а градиент всегда можно проинтегрировать, получив карту «полного псевдополя». Приставка «псевдо-» отражает тот факт, что по градиенту нельзя определить постоянную составляющую (уровень значений) поля, а на практике – и компоненты с большими пространственными периодами находятся за пределами возможностей измерительной аппаратуры. Слабые мелкие аномалии при съемке градиента также могут быть пропущены просто из-за недостаточной чувствительности и разрешения.

Продольный градиент измеряется по направлению полета, вдоль профиля. Такие данные проще всего понять и использовать для иллюстрации идеи учета вариаций. Если построить график продольного градиента в координатах «расстояние в метрах по оси X – продольный градиент в нТл/м по оси Y», то изменение полного поля от точки к точке будет просто приращением площади под графиком. Графики на рис. 1 построены по полевым данным, снятым с подкрыльной системой. Черный график внизу представляет измеренное полное поле после вычитания постоянной составляющей. Синим показан результат интегрирования продольного градиента.

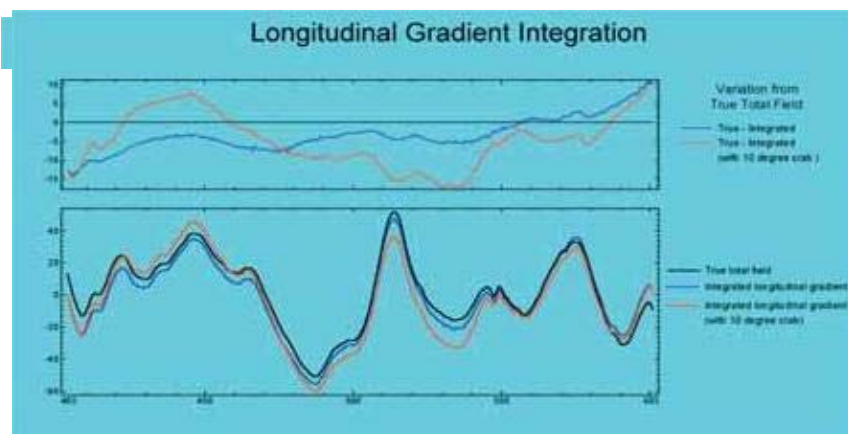
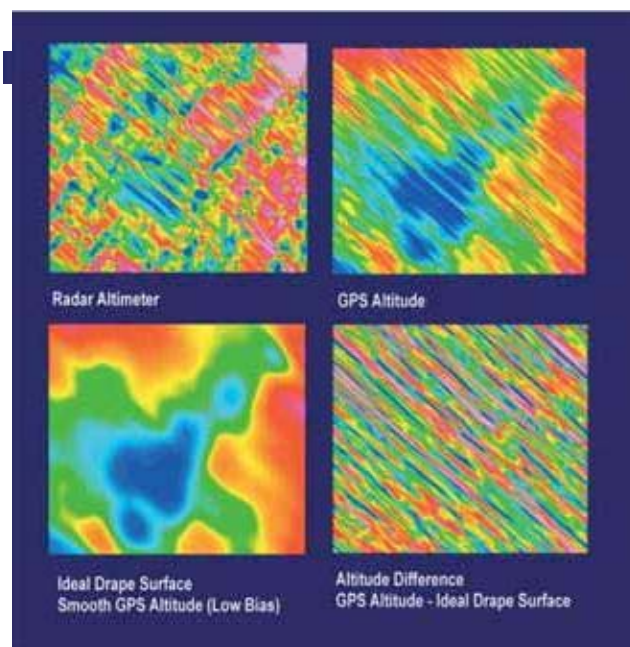


Рис. 1. Интегрирование продольного градиента



Синий график сверху представляет разность измеренного и расчетного полного поля. Теоретически эта разница соответствует суточным вариациям, но на практике это не всегда так.

При измерении полного поля источником ошибок являются суточные вариации; при измерении градиента могут быть свои источники ошибок. При боковом ветре летательный аппарат будет несколько развернут относительно направления полета. Направление оси аппарата и, следовательно, направление измерения продольного градиента не будут совпадать с направлением профиля съемки. Внизу красным показан результат интегрирования градиента, который был бы получен при угле разворота 10 градусов. Это может случиться на скорости 200 км/ч при боковом ветре 35 км/ч. Красный график сверху представляет разность измеренного и расчетного полного поля для этого случая. Проблема очевидна. При измерениях градиента суточные вариации не влияют, но появляются другие специфические источники ошибок и неточностей. С чем связаны обширные изменения разности:

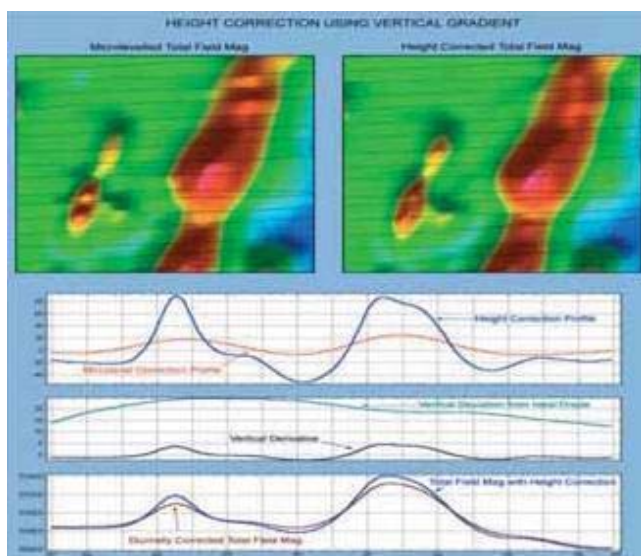
и с фактическими изменениями полного поля за пределами чувствительности градиентометра? С чем связаны мелкие изменения разности: с вариациями или с внезапным порывом бокового ветра?

В этом примере рассмотрен просто продольный градиент, но то же относится ко всем другим составляющим градиента и методам интегрирования. Измерение градиента действительно дает независимые оценки суточных вариаций, но практические ограничения не позволяют безошибочно оценивать или устранять влияние вариаций. Следует принять, что результат интегрирования градиента свободен от влияния вариаций, но не обязательно свободен от ошибок.

Поправки за высоту полета

Проверенная область практического применения результатов съемки вертикального градиента – расчет поправок в полное поле за изменение высоты полета. В условиях средне и сильно изрезанного рельефа расстояние от летательного аппарата до поверхности может значительно меняться от профиля к профилю. В значительной степени это связано с тем, что летательный аппарат снижается быстрее, чем набирает высоту. Чтобы летчики могли вести машину по гладкой огибающей, разработаны системы трехмерной навигации; их применяла компания GSC при съемках в некоторых гористых районах на западе Канады. Будучи надежной, эта практика не получила широкого распространения при решении рудных задач, возможно, из-за увеличения затрат и усложнения транспортных проблем.

Измерение вертикального градиента может быть полезно при исправлении ошибок, связанных с изменениями высоты полета; GSC пользовалась этим способом при выполнении своих работ. На рис. 2 показан пример данных, снятых над местностью с умеренно изрезанным рельефом. Слева сверху представлена карта расстояний от летательного аппарата до поверхности по данным радиовысотомера. Вверху справа – карта абсолютных высот аппарата над уровнем моря по данным GPS. Внизу слева представлена сглаженная карта абсолютных отметок, смещенная в сторону меньших высот. Она соответствует тому, как можно было бы пролететь в идеальных условиях и считается идеальной огибающей поверхностью. Внизу справа показана разность высот идеальной огибающей и фактической высоты полета.



На нижнем графике рис. 3 красной линией показан график полного поля, исправленного за вариации, по которому построена карта вверху слева. На среднем графике представлены вертикальный градиент магнитного поля (черная линия) и высота над идеальной огибающей (синяя линия). По этим данным можно рассчитать поправки за высоту в полное поле. Магнитное поле, исправленное за высоту, показано синей линией на нижнем и верхнем графиках. По этим данным построена карта магнитного поля вверху справа. После ввода поправок исчезли некоторые ложные изменения формы аномалии от профиля к профилю, связанные не с геологией, а с изменением высоты над поверхностью или вариациями.

Такой подход к поправкам за высоту может быть полезен при определении уровня поля и при расчете поправок за вариации. Если контрольные и секущие профили сняты на разных высотах, то разность значений поля характеризует как высоту, так и вариации. На рис. 4 вверху показан график магнитного поля по контрольному профилю с указанием разности значений поля в точках пересечения секущих профилей с контрольным (квадратики). Если значения по секущему и контрольному профилям не различаются, квадратик окажется на нулевой линии (показана красным). Данные по секущим и контрольным профилям исправлены за вариации по данным магнитовариационной станции. На нижнем графике показаны те же данные после исправления за высоту полета. Значительное уменьшение разности значений поля говорит о том, что поправки за вариации по данным МВС были введены правильно, а различия аномального поля в точках пересечения связано в основном с различной высотой полета. Обычно такие изменения поля, связанные с изменением высоты, связывают с суточными вариациями и применяют методы расчета изолиний с малым сечением, что приводит к сложным вычислениям для расчета неверных поправок.

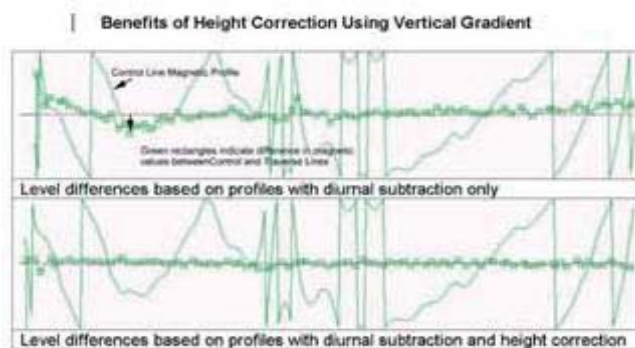


Рис. 4. Ввод поправок за высоту полета и суточные вариации

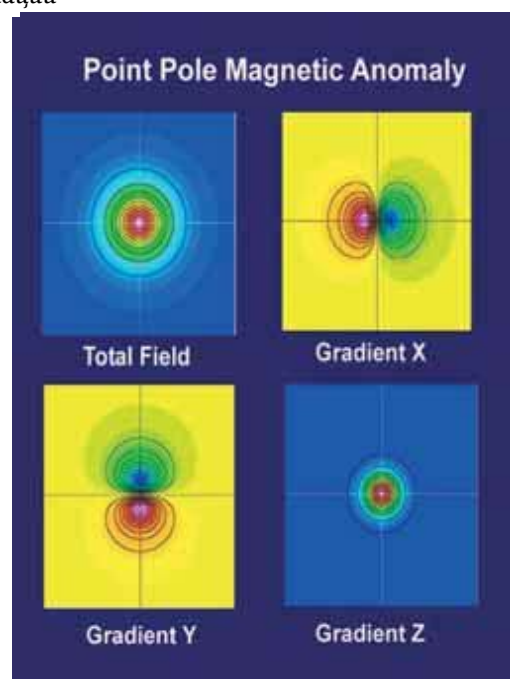


Рис. 5. Аномалия уединенного магнитного полюса

Процесс ввода поправок за высоту полета сравнительно прост и может оказаться весьма эффективным, особенно при работах в районах с сильными магнитными аномалиями и значительными вертикальными градиентами. В таких условиях малые изменения высоты полета могут привести к сильным изменениям полного поля, что особенно заметно на краях сильных аномалий. Применительно к съемке градиента проблема состоит в том, что измеренное полное поле можно исправить за высоту, а горизонтальный градиент – нет. Если поправки за высоту полета велики, то измеренные значения горизонтального градиента не будут связаны с исправленным полем..

Улучшение карт магнитного поля

Возможность повышения точности и разрешения карт магнитного поля – одно из главных преимуществ измерения горизонтальных градиентов магнитного поля. Для иллюстрации этой идеи важно понять

природу измеряемых градиентов. На рис. 5 показана аномалия полного магнитного поля от уединенного магнитного полюса. Полное поле (вверху слева) имеет круговую структуру. Аномалия вертикального градиента (внизу справа) также имеет круговую структуру, но гораздо резче. Такой малый размер аномалии отражает разрешающую способность вертикального градиента, о чем и говорят, когда призывают его использовать. Аномалии горизонтального градиента и, особенно, полного поля больше по размерам, и их в каком-то смысле проще картировать. Горизонтальные градиенты показаны внизу слева и вверху справа. Красным показаны положительные градиенты, говорящие о росте поля по направлению оси X или Y. Синим показаны отрицательные градиенты, говорящие об убывании поля по направлению оси X или Y.

Нулевое значение градиента достигается в точке максимума полного поля. Таким образом, если аномалия оказывается между профилями, и на одном из них отмечен максимум, а на другом – минимум, то максимум должен быть между профилями.

На рис. 6 показаны графики полного магнитного поля и горизонтального градиента представляющие небольшую аномалию над уединенным магнитным полюсом. По горизонтальной оси отложено расстояние по профилю в единицах глубины залегания (высоты полета над источником поля). Заметим, что расстояние между экстремумами градиента примерно равно глубине. Предположим, что профили съемки направлены перпендикулярно плоскости рисунка. Если пролететь непосредственно над объектом, то в полном поле получится максимум, а в градиенте – ноль. Если расстояние между профилями равно глубине до объекта (скажем – 100 м), мы подсечем аномалию в нескольких точках. Приведены варианты для трех значений расстояния между профилями: 1, 1.5 и 2 глубины до объекта. Графики по результатам съемки показаны пунктиром. Профили расположены наихудшим образом, причем для градиента и полного поля эти наихудшие расположения различны.

Как видно из рисунка, даже в худшем случае сигнал всегда измеряется. При расстоянии между профилями, равном высоте над объектом, в ближайших к экстремумам точках измеренные величины полного

соответствующих экстремумов. При расстоянии между профилями в 1.5 высоты получим амплитуды не менее 50% истинных. При расстоянии между профилями в 2 высоты амплитуды будут все еще не менее 30% истинных, но это уже близко к пределу уверенного выделения аномалий. При увеличении расстояния между профилями до трех глубин и более сигнал от малого объекта между профилями может быть пропущен. Эта простая модель показывает, что при расстоянии между профилями, не превышающем двух глубин до объекта, можно обнаружить даже самую слабую аномалию.

Безусловно, снижая высоту полета, можно получить более высокие амплитуды аномалий и более отчетливо передать их форму. Однако, как показано выше, при уменьшении высоты полета следует также сгущать сеть профилей до приемлемых значений расстояния между профилями – 1 – 2 глубины до объекта. Сгущение профилей увеличивает налет, тем самым, стоимость работ. Увеличение расстояния между профилями со 150 до 100 м увеличивает стоимость работ на 50%, поэтому любые средства улучшения выделения аномалий при заданном расстоянии между профилями улучшает соотношение затраты-результаты. Измерение горизонтального градиента может улучшить качество интерполяции между профилями и, тем самым, повысить точность и разрешение карты магнитного поля без увеличения затрат.

Для построения нужно выполнить интерполяцию между профилями; этот процесс называется пересчет на прямоугольную сеть (gridding). Обычно для этого используют двумерную сплайн-интерполяцию или расчет поверхности с минимальной кривизной. На вход процедуры подается один набор данных – значения полного поля по профилям. Имеются и новые методы пересчета, использующие данные по горизонтальному градиенту. В методе Нельсона-Набигьяна используется два набора данных – меридиональный и широтный градиенты. Вариант этого метода (метод MagGrad) разработан в компании DeBeers. Другой метод, разработанный компанией Scott Hogg and Associates, называется пересчет по тензору градиента (gradient tensor gridding, GT-Grid). В этом методе используется три входных набора данных – полное поле и меридиональный и широтный градиенты. Оба метода имеют преимущества перед обычными способами пересчета на прямоугольную сеть.

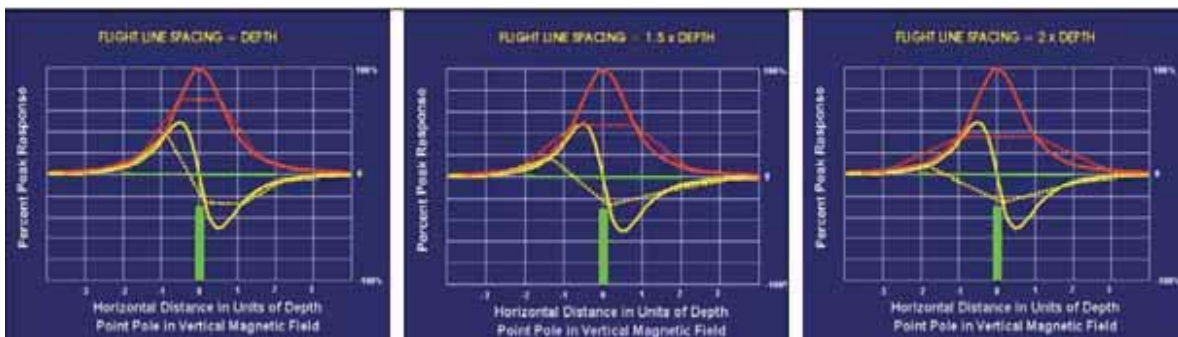
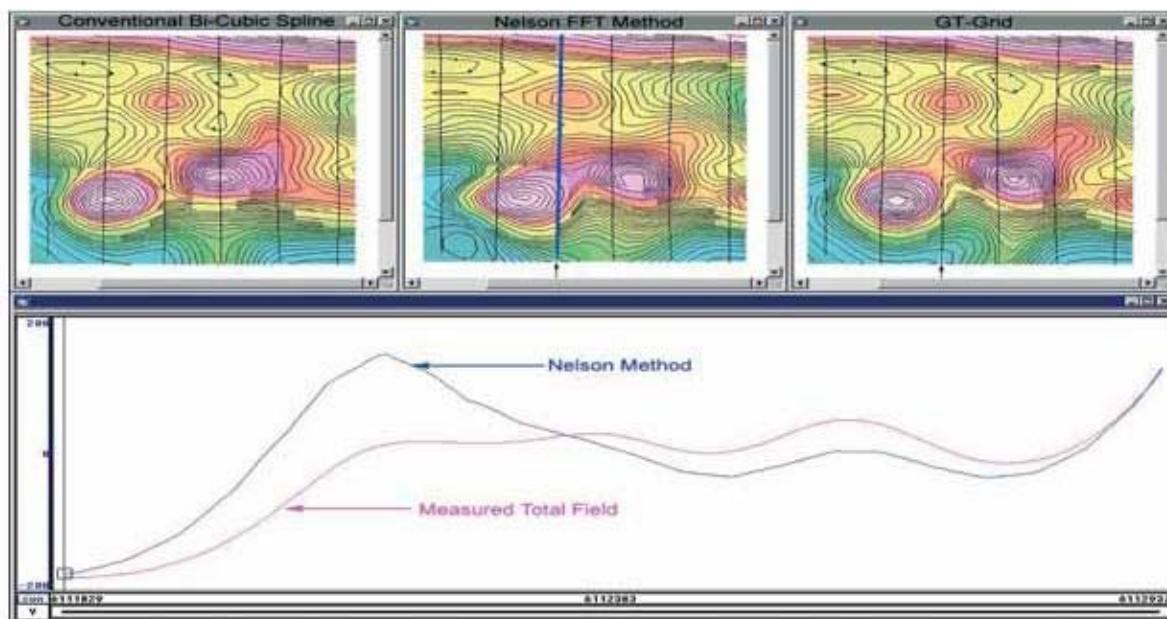


рис. 6. Влияние высоты полета на результаты съемки над уединенным магнитным полюсом



ичным

2D сплайном, интегрированием горизонтальных градиентов по методу Нельсона и по методу тензора градиента. Отметим смещение округлой аномалии (нижний левый угол карты) в положение между профилями при применении методов Нельсона и тензора градиента. Внизу показаны графики измеренного полного поля и псевдополя, восстановленного по методу Нельсона. Форма и амплитуда аномалий последнего не всегда соответствуют измеренному полю. Карты, построенные с помощью 2D сплайна и метода тензора градиента, полностью соответствуют измеренному полю.

Метод Нельсона основан на соотношении вертикального и горизонтального градиента, выведенном Набигьяном. Градиенты всегда можно вычислить по полному полю, обратное также верно, если речь не идет о полях, постоянных в пространстве, поэтому такое расчетное поле называют псевдополем. Брэд Нельсон (Brad Nelson) из компании NRC выдвинул идею восстановления полного поля путем объединения полного псевдополя с аппроксимацией регионального полного поля. Этот подход, рассчитанный на применение в условиях сильных суточных вариаций, используется иногда и при обычном построении карт магнитного поля. Для краткости далее метод Нельсона-Набигьяна будем называть просто методом Нельсона.

Метод Нельсона для интегрирования горизонтального градиента начинается с пересчета измеренных продольных и поперечных составляющих градиента в меридиональные и широтные. Для такого пересчета есть ряд простых способов; затем каждый набор данных независимо пересчитывается на прямоугольную сеть. По этим двум наборам данных в спектральной области рассчитывается полное псевдополе. Полное псевдополе имеет ряд преимуществ перед обычным полным полем. Одно из них – более точное оконтуривание мелких аномалий, находящихся между профилями. Второе – узкие линейные аномалии, пересекающие профили, прослеживаются легче и точнее. Третье преимущество – не нужно учитывать суточные вариации. К недостаткам метода следует отнести то что, теряются линейные структуры, субпараллельные профилям. Кроме того, амплитуда аномалий полного

псевдополя может значительно отличаться от результатов прямых измерений.

Другой подход к использованию горизонтального градиента разработан компанией Scott Hogg and Associates, называется метод тензора градиента (GT, Gradient Tensor). В этом методе для пересчета полного поля на прямоугольную сеть используются измеренные по профилям значения полного поля и составляющих градиента. В любой точке по составляющим градиента можно установить направление наиболее быстрых изменений, то есть направление на экстремум аномалии. Перпендикулярно этому направлению идет направление нулевых изменений, то есть направление изолинии в точке профиля. В процедуре GT-Grid при пересчете поля на прямоугольную сеть используются как значения полного поля, так и информация о направлении.

В обычных методах пересчета на прямоугольную сеть увязка с результатами измерений идет только по одному параметру – полному полю. В методе Нельсона для увязки используется два параметра – измеренные составляющие градиента. В процедуре GT-Grid таких параметров три – составляющие градиента и полное поле. В результате получаются значения полного поля по прямоугольной сети, совместные как с измеренным полем, так и с градиентом. Как и метод Нельсона, этот метод дает верное положение аномалий между профилями, и, кроме того, не пропускает линейные аномалии, параллельные профилям, верно передает региональную компоненту и обеспечивает соответствие амплитуд расчетных и измеренных аномалий.

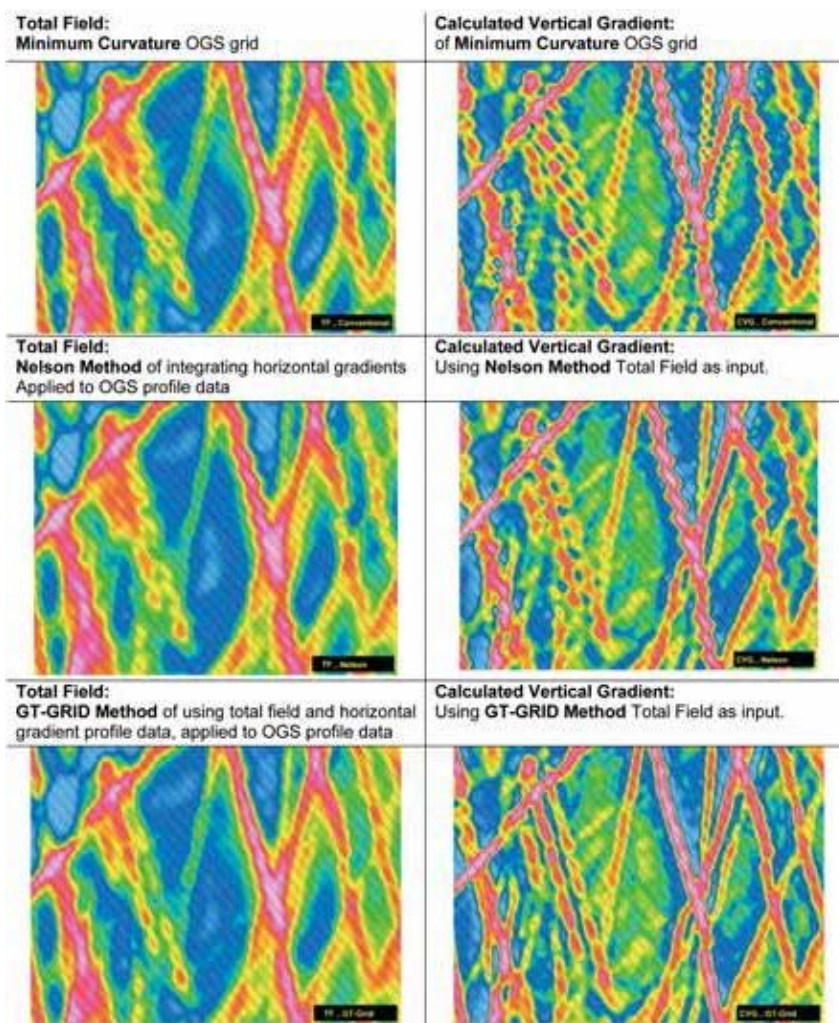


Рис. 8. Результаты применения трех способов пересчета на прямоугольную сеть к данным аэромагнитной съемки Геологической службы провинции Онтарио на участке Капускасинг-Шапло. Наборы данных одинаковы для всех трех карт, отличается только способ пересчета. Вертикальный градиент рассчитан одинаково для всех вариантов полного поля.

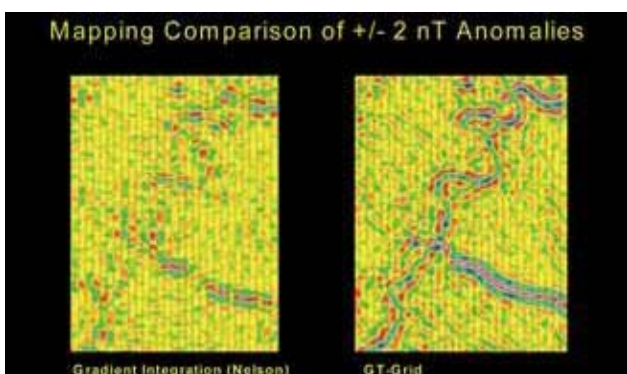


Рис. 9. Сравнение способов пересчета на прямоугольную сеть для слабых аномалий

Обеспечено также, что все аномалии, будь они выделены по полному полю, по градиенту, или по тому и другому, будут представлены на итоговой карте полного магнитного поля. Результаты сравнения методов приведено на рис. 7.

На рис. 8 показаны результаты разных методов применительно к данным Геологической службы территории Онтарио (Ontario Geological Service, OGS) по участку Капускасинг-Херст (Kapuskasing-Hearst).

Съемка горизонтальных градиентов частично выполнена компанией Goldak Airborne Geophysics. Полное поле и расчетные вертикальные градиенты взяты из открытых источников. Имеющиеся данные по градиенту позволяют сравнить различные методы построения карт. В этом примере приведены три карты полного поля: первая построена по методу минимальной кривизны, вторая – по методу Нельсона, третья – методу тензора градиента.

Расчет вертикального градиента, который должен подчеркнуть различия, проведен одинаково для всех трех карт. На всех картах линейные структуры, расположенные вкрест профилей, прослеживаются хорошо. На обычной карте по мере разворота структуры вдоль профилей линейная аномалия быстро распадается на серию четкообразных аномалий, что не наблюдается на остальных картах. На карте, построенной методом тензора градиента, линейные аномалии прослеживаются, пока структура не развернется почти вдоль профилей, а на карте построенной по методу Нельсона картина при этом становится менее ясной.

Качество карты, построенной с учетом трех независимых параметров очевидно выше, чем карт, построенных по одному или двум.

Хотя градиент магнитного поля и само поле измеряются одними и теми же приборами, чувствительность по полю и по градиенту различна. На рис. 9 приведена карта, построенная по методу тензора градиента, на которой отчетливо видна извилистая магнитная аномалия. Ее амплитуда не превышает ± 2 нТл, и связана она с руслом реки, прорезающим ледниковые отложения. Горизонтальные градиенты этой аномалии находятся на пределе чувствительности аппаратуры, и по методу Нельсона, использующему только градиенты, аномалия едва прослеживается. Это подтверждает тот факт, что съемку градиента следует использовать как дополнение к измерениям полного поля, а не как замену последних.

Заключение

Данные измерений вертикального градиента можно использовать для расчета поправок за изменение высоты полета, и эту процедуру следует включить в стандартный процесс обработки данных магниторазведки. Метод Нельсона, примененный к данным съемки градиента, дает средства борьбы с сильными суточными вариациями, а также увеличивает

разрешение карты. Если суточные вариации не столь сильны, применение метода тензора градиента к данным съемки градиента позволяет повысить как точность, так и разрешение карт.

Измерение градиентов магнитного поля действительно дает полезную информацию и является ценным дополнением к любым аэромагнитным работам. Имеющаяся аппаратура и методы обработки данных уже позволили продвинуться вперед, и в будущем можно ожидать пересмотра стандартов аэромагниторазведки и новых перспектив для этого метода.

Литература

- Nelson J.B. [1994] Leveling total-field aeromagnetic data with measured horizontal gradients. *Geophysics*, **59**, 7, 1166-1170.
- Nabighian, M.N. [1984] Towards a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transforms: Fundamental relations. *Geophysics*, **49**, 6, 780-786.
- Hogg R.L.S. [1987] Recent advances in high sensitivity and high resolution aeromagnetics. *Proceedings of Exploration '87*, Ontario Geological Survey, Special Vol. 3, 153-169.