

## «Результаты опытных аэромагнитных работ по измерению горизонтальных градиентов магнитного поля с использованием самолета Ан-3»

П.В. Мельников\* (НФ ФГБУ «ВСЕГЕИ»), Е.В. Каршаков (ИПУ РАН)

### Введение

В современной аэромагнитной съемке градиентометрия является дополнением к высокоточным измерениям полного вектора магнитной индукции. Измерение горизонтальных градиентов и их использование для решения геологических задач имеет определенные преимущества. Например, включение данных о поперечном горизонтальном градиенте при интерполяции маршрутных наблюдений на регулярную сеть увеличивает детальность и качество получаемого магнитного поля в интервалах между линиями полета. Особенно это актуально в ситуациях, когда на исследуемой площади имеется несколько основных направлений простирания геологических образований, часть из которых имеет азимуты близкие к рабочим курсам. В результате можно добиться условного «укрупнения» масштаба аэромагнитных съемок и соответственно повышения их эффективности. В теории, измеренные градиенты свободны от суточного хода геомагнитного поля Земли. Поэтому при выполнении расчета полного вектора магнитной индукции на основе интегрирования измеренных горизонтальных градиентов, восстановленное поле не будет иметь погрешностей, обусловленных геомагнитными вариациями. Преимущества же измерений вертикального градиента связано с возможностью выделения локальных приповерхностных аномалий, которые могут отсутствовать в поле вертикального градиента, рассчитанного математическим путем из карт полного вектора магнитной индукции.

К настоящему времени многие аэрогеофизические системы применяют все три конфигурации аэроградиентометров: вертикальную, горизонтальную продольную и горизонтальную поперечную в различных комбинациях. В зависимости от конкретного решения, магниточувствительные датчики могут быть жестко закреплены на фюзеляже воздушного судна, на конструктивных элементах выпускных устройств аэроэлектроразведочных систем, либо могут представлять собой самостоятельное выпускное устройство, обеспечивающее фиксированную геометрию нескольких измерителей магнитного поля. При измерении градиента необходимо обеспечить определенную базу между датчиками. В случае использования самолета в качестве авианосителя, горизонтальная база может достигать первые десятки метров. Однако здесь актуальной является проблема высокоточной компенсации магнитных помех самого воздушного судна, которая позволяла бы выполнять кондиционные измерения по всем магнитометрическим каналам (Каршаков и др., 2014). Кроме того, для обеспечения надлежащего качества материала просто необходимо знать и учитывать точное пространственное положение каждого измерения. Сейчас в мире наблюдается бурный рост технических реализаций аэромагнитной градиентометрии, который обусловлен доступностью высокоточных и быстродействующих квантовых магнитометров, а также систем спутниковой навигации (Noriega, 2014).

Интерес к данному направлению имеют и авторы данной работы. В течение двух последних десятилетий Норильского филиала ФГБУ «ВСЕГЕИ» выполняло опытные работы по измерению вертикальных градиентов. Применялись установки на как малой (3 м) жесткой базе, так и на большой (70 м) переменной базе. По разным причинам данный вид работ в производственную практику пока не включался. В последние годы мы ведем опытные работы, направленные на оценку возможности использования отечественных воздушных судов, прежде всего самолетов Ан-2 и Ан-3 в качестве авианосителя для измерения полного горизонтального градиента.

### Результаты работ

В ходе проведения аэромагнитной съемки в рамках одного из объектов на северо-западе России, специалисты НФ ВСЕГЕИ провели испытания аэромагнитной системы в модификации трехканального аэроградиентометра. Квантовые магнитометрические датчики были установлены на самолет Ан-3 на трех позициях. Два магниточувствительных элемента были закреплены на законцовках верхних крыльев при помощи кронштейнов длиной около метра. Третий датчик размещался в конце хвостовой балки на удалении 3 метра от фюзеляжа самолета. С целью обеспечения точной пространственной привязкой всех точек измерения магнитного поля, а также определения параметров эволюций авианосителя на фюзеляже самолета были установлены три антенны спутниковой навигационной системы (Рис.1). В качестве бортовой измерительной системы использовался четырехканальный аэромагнитометр GT-MAG (ООО «Геотехнологии»), оснащенный трехкомпонентным феррозондом и работающий на частоте 100 Гц. Сбор данных, а также управление съемочными полетами осуществлялось с помощью бортовой системы NavDat (ООО «Геотехнологии»).

Для оценки работоспособности аэромагнитометрической системы в ходе исследования был решен ряд основных задач. На начальном этапе проводилась установка квантовых датчиков «CS-3» на законцовки крыльев самолета в месте, обеспечивающим минимальные девиации при минимальном выносе за пределы контура крыла. По итогам компоновки база поперечного градиента составила 18.5 м, база продольного градиента – 11.4 м, а база вертикального градиента для условий горизонтального полета – 1.2 м. После этого произведен тестовый вылет для оценки аппаратурного шума по всем магнитометрическим каналам, а также определения величины магнитных помех самолета и их последующей компенсации. Анализ полученных данных показал, что величина высокочастотных шумов, вычисленная с использованием четвертой разности, имеет на всех каналах примерно сопоставимые значения в среднем порядка 0.076 нТл (при цикличности 100 Гц). Величина же магнитной девиации для датчика, установленного на выносной хвостовой балке и датчиков на крыльях различается почти в три раза. Для креновых эволюций это значения 0.20 и 0.60 нТл на градус соответственно. Для тангажей величина начальной девиации составила 0.15 и 0.5 нТл на градус соответственно. После выполнения процедуры математической компенсации остаточные девиации для хвостового датчика составили в среднем 0.007 нТл/град., а для измерителей магнитного поля на крыльях – 0.015 нТл/град. Принимая во внимание полученные результаты установлено, что качество данных, которые поступают со всех трех каналов надлежащее и оно соответствует требованиям современной аэромагнитной съемки.

Решение задачи определения точного пространственного положения градиентометрической установки решалось путем монтажа на фюзеляж самолета антенн спутниковой навигационной системы. Так две антенны были установлены

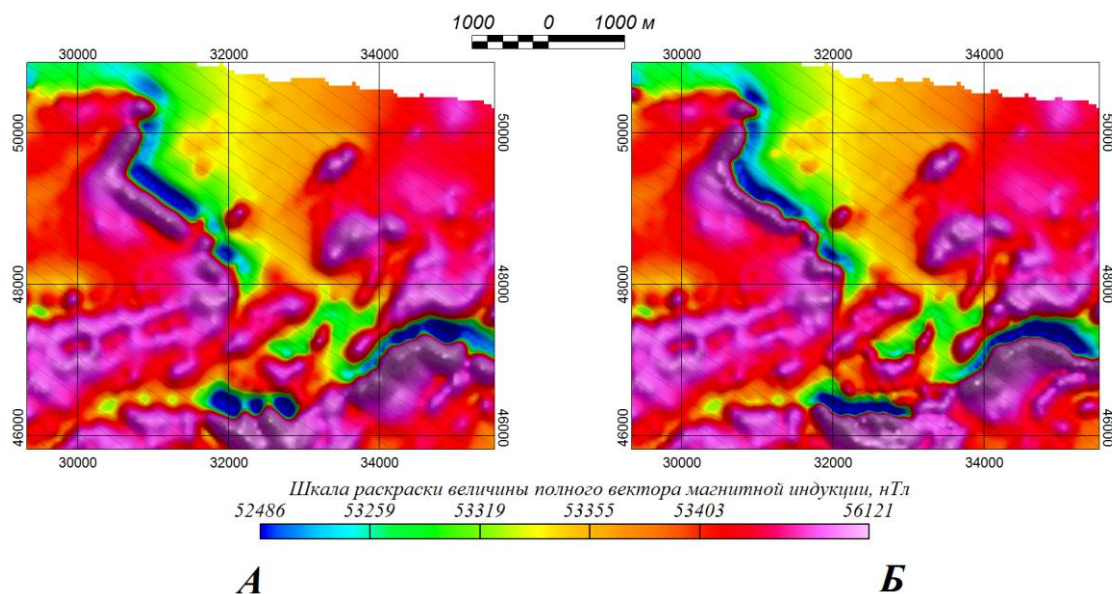
вблизи законцовок крыльев, образовав поперечную базу длиной 16.5 м, и одна антенна смонтирована в районе киля, при этом продольная навигационная база составила 5.6 м (для условий горизонтального полета). В такой компоновке на участке работ выполнена аэромагнитная съемка масштаба 1:20 000 на средней высоте полета 25 м и скорости 190 км/ч. Пространственное разрешение по линии маршрута составило в среднем 0.5 м. Данные спутниковой навигационной системы были обработаны в режиме дифференциальной коррекции. Анализ погрешностей определения высотных координат указывает на их точность в пределах первых сантиметров. В этом случае на имеющихся разносах навигационных приемников, параметры крена и тангажа измерялись с точностью до десятых долей градуса. Подобный результат может предоставлять определенные возможности в области выполнения покомпонентных аэромагнитных съемок, по крайней мере для изучения аномальных полей.

Обработанные по стандартной методике аэромагнитные данные были использованы для построения поля полного вектора магнитной индукции с использованием при интерполяции данных поперечного градиента. На данном этапе производилась оценка повышения разрешения аномалий в интервалах между линиями аэрогеофизических маршрутов. Для этого было выполнено построение псевдопрофилей в обе стороны от маршрутов съемки на дистанцию 60 м на которые с учетом угла места и горизонтального градиента экстраполированы значения магнитного поля. Эти значения при гридинге послужили оценкой для интерполяции поля на смежных профилях. Подчеркнем, что значения на псевдопрофилях имеют определенную погрешность, связанную с ограниченностью линейной экстраполяции в поперечном направлении.

Стоит отметить, что на данном участке курс рядовых маршрутов устанавливался заказчиком и, с нашей точки зрения, не являлся оптимальным. Связано это с тем, что в структуре магнитного поля ряд интенсивных линейных аномалий по простиранию совпадали с направлением полета. На завершающем этапе произведена интерполяция магнитного поля на регулярную сеть на основе метода минимальной кривизны. Первая с использованием только маршрутных данных и вторая с использованием данных поперечного градиента (Рис.2). При сравнении двух полей видно их различие на участках линейных аномалий, при этом в спокойных полях такой разницы не наблюдается. На карте полного вектора магнитной индукции, построенной с привлечением алгоритмов градиентометрии морфология параллельной маршрутам линейной аномалии, принимает более законченный и объективный вид. Следует отметить то, что для стоящих геологических задач, с целью решения которых выполнялась аэромагнитная съемка на этом участке, именно эти аномалии представляли поисковый интерес. Качественно можно судить о существенном повышении детальности съемки, особенно это касается градиентных участков поля.



**Рисунок 1** Аэромагнитная градиентометрическая система, смонтированная на самолете Ан-3.



**Рисунок 2** Результаты интерполяции данных аэромагнитной съемки М 1:20 000 на регулярную сеть методом минимальной кривизны: А - с использованием значений только по линиям наблюдений, Б – с использованием значений по линиям наблюдений и значений на псевдомаршрутах, вычисленных на основе измеренных значений поперечного горизонтального градиента полного вектора магнитной индукции.

## Выводы

В работе представлены результаты работ по измерению и практическому использованию поперечного горизонтального градиента полного вектора магнитной индукции – достаточно популярного в настоящее время направления в аэромагнитной съемке. В ходе исследования реализована аэромагнитная градиентометрическая система, смонтированная на базе отечественного авианосителя самолета Ан-3. Ядром системы является современный высокопроизводительный аэромагнитометр GT-MAG (ООО «Геотехнологии»), работающий на частоте 100 Гц. В ходе полевых работ произведены необходимые контрольно-настроечные операции на основе которых дана количественная оценка работы многоканального магнитометра. С использованием спутниковой навигационной системы решена задача позиционирования квантовых магнитометрических датчиков в трех измерениях с необходимой точностью. В производственных условиях и на реальных данных апробирована методика построения карт магнитного поля с использованием данных поперечного горизонтального градиента с построением псевдомаршрутов. Анализ двух методик интерполяции магнитного поля на регулярную сеть показал преимущества проведения градиентометрии, которые заключаются в появлении возможности более корректного построения поля в интервале между маршрутами. Данная методика также позволяет решить ряд проблем в сложнопостроенных магнитных полях, в случае некорректно выбранных съемочных курсов. Подобное вполне может иметь место на этапе планирования крупномасштабных аэрогеофизических работ на новых малоизученных территориях.

## Библиография}

Каршаков, Е.В., Павлов, Б.В., Тхоренко, М.Ю. [2014] Модели и структура бортовых измерений физических полей. *Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ 2014*, Москва, 7032–7043.

Noriega, G. [2014] Aeromagnetic compensation in gradiometry — performance, model stability, and robustness. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, **PP(99)** (early publication), 1–5.