

УДК 550.380

ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ГРАДИЕНТ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОВЫСОТНОЙ АЭРОМАГНИТНОЙ СЪЕМКИ

© 2025 г. И. М. Алёшин^{1,2,*}, член-корреспондент РАН А. А. Соловьёв^{1,2}, К. И. Холодков^{1,2},
Ф. В. Передерин^{1,2}, Я. В. Таран¹

Поступило 09.07.2024 г.

После доработки 05.09.2024 г.

Принято к публикации 09.09.2024 г.

Развитие современных средств измерений геофизических полей с учётом возможности существенного уточнения позиции регистрирующего полевого оборудования на основе глобальных навигационных систем позволяет значительно повысить качество геофизических измерений. Продемонстрированы преимущества расчёта вертикального градиента, основанного на непосредственных многоуровневых (повысотной) аэромагнитных измерениях с применением беспилотных воздушных судов, по сравнению со стандартной практикой, основанной на вычислении соответствующей трансформанты аномального магнитного поля. Выполнен сравнительный анализ магнитных аномалий двух полигонов, где на фоне спокойного регионального поля находятся в одном случае сильные, а в другом – слабые антропогенные аномалии. Сопоставление карт вертикального градиента аномального магнитного поля, рассчитанного непосредственно и полученного по результатам повысотной съёмки, для обоих регионов говорит в пользу перспективы его прямого измерения.

Ключевые слова: маловысотная аэромагнитная съёмка, повысотная съёмка, БВС, БПЛА, беспилотный аэромагнитный комплекс, трансформация магнитного поля

DOI: 10.31857/S2686739725010136 EDN: GWAJWY

Преимущества трансформант для анализа аномалий потенциальных полей известны давно. Фактически, каждая из таких трансформант представляет собой преобразование исходного поля с заданным ядром для выделения особенностей пространственного распределения аномального поля, например, границ аномалий [1]. К их числу принадлежит интересующий нас вертикальный градиент модуля аномального магнитного поля (в дальнейшем, для краткости – просто “вертикальный градиент”). Теория и практика вертикальной аэроградиентометрии были подробно описаны ещё в середине прошлого века [2].

Большинство трансформант являются результатом математического преобразования измеренного распределения аномального поля, однако вертикальный градиент может быть измерен непосредственно. На заре развития магниторазведочной аппаратуры в 1950–60-х годах этот метод считался приоритетным, но вскоре с развитием мощностей вычислительной техники численные методы трансформации потенциальных полей стали повсеместными (см., например, [3]). Однако такой подход имеет ряд ограничений, обусловленных, главным образом, зашумлённостью полевых измерений. В аэромагнитных исследованиях с применением беспилотных воздушных судов (БВС) помехи связаны с полетными девиациями в процессе измерений. Это приводит к тому, что процедура вычисления нормального градиента, как и многих других трансформант, приводит к значительному усилению высокочастотных помех. Это приводит к необходимости применения специальных

¹ Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской Академии наук, Москва, Россия

² Геофизический центр Российской Академии наук, Москва, Россия

* E-mail: ima@ifz.ru

вычислительных схем, подавляющих шум, что, однако, повышает риск потери полезной информации. Сложности возникают также в процессе анализа вычисленных данных, например, при выделении приповерхностных аномалий.

С развитием приборной базы прямое измерение вертикального градиента вновь стало актуальным. Многие современные приборы, преимущественно предназначенные для пешей съёмки, имеют два регистрирующих канала и могут быть использованы в качестве полевых градиентометров [4]. Так как измерение поля происходит на двух датчиках одновременно, то отпадает необходимость в регистрации геомагнитных вариаций. Кроме того, в этом случае нет необходимости в геологическом редуцировании влияния региональных структур. Для реализации градиентной съёмки необходимо обеспечить вертикальное расположение прямой, соединяющей устройства. Проведение аэромагнитных градиентных измерений сопряжено с дополнительными техническими трудностями. В первую очередь, это связано с необходимостью разместить пару датчиков на значительном удалении друг от друга и от носителя. Несмотря на указанные трудности, в настоящее время интенсивно разрабатываются и применяются системы аэромагнитной градиентометрии (см., например, [5]).

В настоящее время широко распространена и активно развивается аэромагнитная съёмка с применением БВС [6]. Эта методика позволяет определить вертикальный градиент с помощью так называемой повысотной съёмки. Под этим термином мы понимаем совокупность измерений над одним и тем же участком дневной поверхности на нескольких уровнях, расположенных на разных удалениях от неё. Если расстояния между уровнями достаточно мало, то такая техника позволяет оценить площадное распределение вертикального градиента. Пример практического применения измерения вертикального градиента описан в статье [7]. В отличие от пешеходной градиентометрии, применение повысотной съёмки нуждается в использовании базовой магнитовариационной станции (МВС), так как измерения на разных высотах производятся в различные промежутки времени. Методика полевых градиентных измерений в целом ничем не отличается от повысотной аэромагнитной съёмки. Основная сложность — выдержать расстояние между уровнями и обеспечить максимальный повтор схемы пролётов на разных уровнях. На практике расстояния между уровнями съёмки точно

зафиксировать невозможно, и этот недостаток компенсируется точной фиксацией положения магнитометра с помощью записей встроенного приёмника сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и наземной ГНСС-базы, установленной в непосредственной близости от места измерений.

Ниже приведены результаты эксперимента по сопоставлению карт вертикального градиента, рассчитанного по данным повысотной съёмки, с результатами численного расчёта, выполненного при помощи программы GravMagInv [8]. Сравнение проводилось по результатам измерений над двух площадках. Первая из них — загородный научный экспериментальный полигон Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (далее — полигон “ВлГУ”). Здесь на фоне спокойного регионального магнитного поля имеется несколько ярких антропогенных аномалий: вышки линий электропередач (ЛЭП), служебные и подсобные строения, стоянка служебного автотранспорта и пр. Вторая серия измерений проводилась в окрестности среднеширотного комплекса геофизических наблюдений “Михнево”, находящегося в ведении Института динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН (ИДГ РАН), где антропогенные аномалии, вызванные постройками комплекса, возмущают региональное магнитное поле существенно меньше. Чтобы повысить детальность съёмки, она выполнялась с обтеканием рельефа на минимально безопасных высотах. С этой целью предварительно была выполнена аэрофотосъёмка, и на её основе была построена цифровая модель местности. При сравнении численных расчётов с результатами повысотной съёмки в обоих случаях вертикальный градиент определялся по аномальному полю. Аномальное поле было получено на каждом уровне съёмки с помощью стандартной обработки: учёт поправок за вариации геомагнитного поля, отбор данных, увязка, интерполяция на регулярную сетку и т.п.

На обоих полигонах аэромагнитная съёмка выполнялась с использованием БВС, оснащённого квантовым скалярным магнитометром. Измерения проводились с огибанием рельефа на двух эшелонах $z_+(x, y)$, $z_-(x, y)$, отличающихся высотой над поверхностью на 15–25 м. Здесь вертикальная ось направлена к центру Земли. На полигоне “ВлГУ” пролёты БВС осуществлялись вдоль оси x на обоих эшелонах, в то время как в “Михнево” траектории пролётов на нижнем эшелоне были перпендикулярны траекториям на верхнем. Положение регистратора в пространстве определялось по измерениям встроенного ГНСС-приёмника, уточнённым

по данным установленной вблизи измеряемых участков базовой станции ГНСС. По результатам съёмок с привлечением данных базовой МВС были построены карты аномального магнитного поля $B_A(x, y, z_+(x, y))$ и $B_A(x, y, z_-(x, y))$ на соответствующих эшелонах. Затем по формуле

$$B'_A(x, y, z_0(x, y)) = \frac{dB_A(x, y, z_0(x, y))}{dz} \approx \frac{B_A(x, y, z_+(x, y)) - B_A(x, y, z_-(x, y))}{z_+(x, y) - z_-(x, y)} \quad (1)$$

были рассчитаны распределения вертикальных градиентов по данным повысотной съёмки. Поверхность

$$z_0(x, y) = (z_+(x, y) + z_-(x, y))/2,$$

на которой определен градиент, находится посередине между эшелонами съёмок.

На рис. 1 на панелях A_1 и A_2 представлены распределения аномального магнитного поля $B_A(x, y, z_+)$ на нижнем эшелоне съёмки $z_+(x, y)$, полученные на полигонах “ВлГУ” и “Михнево” соответственно. На обоих участках аномальное поле коррелирует с рельефом, то есть оно в значительной степени обусловлено региональным магнитным полем. На картах полигона “ВлГУ” отчётливо выделяются локальные аномалии, связанные с антропогенными объектами: вышка и линия ЛЭП в северной части карты и служебные строения с подъездной дорогой в южной. На полигоне “Михнево” аномалии связаны с объектами геомагнитной обсерватории, поэтому они заведомо слабо проявляются в аномальном поле, их амплитуда значительно меньше, чем на полигоне “ВлГУ”. Однако эти аномалии хорошо выделяются на картах вертикального градиента магнитного поля, как измеренного, так и вычисленного.

На панелях B_1 и B_2 рис. 1 представлены карты вертикальной производной $B'_A(x, y, z_+)$, вычисленной для двух полигонов с помощью программы GravMagInv [8]. Наконец, на панелях C_1 и C_2 показан вертикальный градиент $B'_A(x, y, z_0)$, рассчитанный по результатам измерений на двух полигонах согласно формуле (1). Общая картина вертикальных производных, вычисленных разными методами, совпадает. Видно, что после трансформации аномалии проявляются значительно ярче, структура аномального поля отображается существенно лучше по сравнению с исходными картами (панели A_1 и A_2). Это утверждение справедливо для обоих полигонов независимо от способа, которым

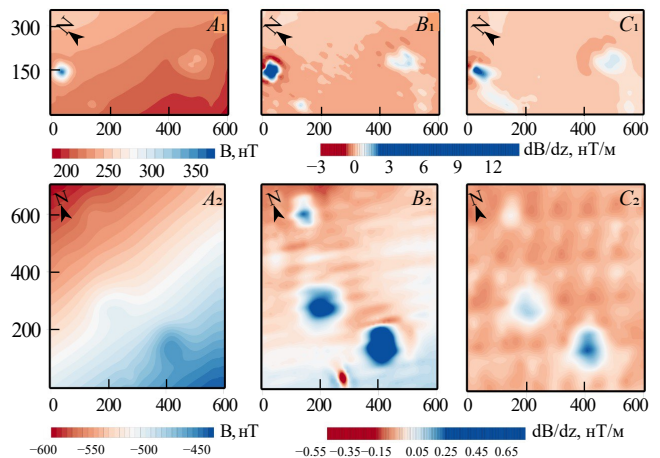


Рис. 1. Сопоставление результатов обработки и трансформации аномального поля повысотной аэромагнитной съёмки. Для полигона “ВлГУ” на панелях A_1 , B_1 и C_1 показаны карты аномального магнитного поля (панель A_1), численной вертикальной производной поля (панель B_1) и рассчитанной по результатам повысотной съёмки (панель C_1) соответственно. Для полигона “Михнево” аналогичные карты представлены на панелях A_2 , B_2 и C_2

вертикальные градиенты были получены. Амплитуды абсолютных величин градиентов, полученных по многоуровневым измерениям, меньше, чем рассчитанных численно, что объясняется тем, что эти две величины определены на разных эшелонах съёмки. Так, второй из них задан на уровне $z_+(x, y)$, а второй — на уровне $z_0(x, y)$, что в среднем на 10–20 метров дальше от источников аномалий.

По полученным картам видно, что вертикальная производная в обоих случаях позволяет частично подавить влияние регионального фона, но на вертикальном градиенте, вычисленном по результатам повысотной съёмки этот эффект подавляется значительно сильнее, причём без применения дополнительного редуцирования. На картах вертикального градиента полигона “Михнево” (панель C_2 , рис. 1) заметны рудименты профилей, возникшие вследствие неполного совпадения полётных заданий на разных уровнях. При этом на полигоне “ВлГУ” (панель C_1 , рис. 1), где повысотная съёмка была выполнена на полностью совпадающей в плане системе профилей на двух уровнях с разницей высот порядка 10 м, этот эффект отсутствует. Однако не исключено, что дефект может быть подавлен заменой алгоритма интерполяции при расчёте грида.

Проведённый эксперимент показал, что полученный по результатам повысотной аэромагнитной съёмки вертикальный градиент позволяет производить качественную интерпретацию по разделению магнитных аномалий не хуже, чем традиционными вычислительными методами.

Исходные данные, по которым рассчитывается вертикальная производная, неизбежно осложнены неточностями модели нормального поля и допущениями при вычислении региональной составляющей. Метод определения вертикального градиента по данным повысотной съёмки естественным образом редуцирует обе эти составляющие и выглядит потенциально более выигрышным при переходе к количественной интерпретации. При этом его применение потребует существенной доработки методики планирования и проведения полевых работ. В частности, необходима дополнительная работа по уточнению методики выбора оптимальных высот съёмки, количества эшелонов, оптимальных для вычисления градиента и пр. Но даже на данном этапе описанный метод потенциально может быть использован для решения современных геолого-геофизических задач.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы искренне благодарны руководству и сотрудникам ВлГУ, ИДГ РАН за помощь в организации и проведении полевых исследований, ООО “Лолгео” за содействие в численной обработке данных.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования были выполнены в рамках проекта РНФ № 24-17-00346. В работе использовались данные и сервисы ЦКП “Аналитический центр геомагнитных данных” Геофизического центра РАН

(<https://ckp.gcras.ru/>), оборудование ИФЗ РАН и ГЦ РАН, приобретённое благодаря программе по обновлению приборной базы в рамках национального проекта “Наука и университеты”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Prasad K. N. D., Pham L. T., Singh A. P. A Novel Filter “ImpTANG” for Edge Detection and a Case Study from Cambay Rift Basin, India // *Pure Appl. Geophys.* 2022. № 179. P. 2351–2364.
2. Hood P. Gradient measurements in aeromagnetic surveying // *Geophysics.* 1965. № 30 (5). P. 891–902.
3. Блох Ю. И. Обнаружение и разделение гравитационных и магнитных аномалий. М.: Издательство МГГА, 2009. 80 с.
4. Соловьёв А. А., Сидоров Р. В., Красноперов Р. И., Груднев А. А., Хохлов А. В. Новая геомагнитная обсерватория “Климовская” // *Геомагнетизм и аэрономия.* 2016. Т. 56. № 3. С. 365–379.
5. Kulike C., Virgil C., Stoll J., Hördt A. A new system to measure the gradient vector of the magnetic field on unmanned aerial vehicles — data processing and field experiment // *RAS Techniques and Instruments.* April, 2022. V. 1. Iss. 1. P. 65–80.
6. Алёшин И. М., Соловьёв А. А., Алёшин М. И., Сидоров Р. В., Соловьёва Е. Н., Холодков К. И. Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов в геомагнитных исследованиях // *Наука и технологические разработки.* 2019. Т. 98. № 3. С. 32–48.
<https://doi.org/10.21455/std2019.3-3>
7. Walter C., Braun A., Fotopoulos G. High-resolution unmanned aerial vehicle aeromagnetic surveys for mineral exploration targets // *Geophysical Prospecting.* 2020. № 68. P. 334–349.
8. Ченуго Л. С. GravMagInv. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022610137, 10.01.2022.

VERTICAL GRADIENT OF THE GEOMAGNETIC FIELD BY MULTIPLE ALTITUDE AEROMAGNETIC SURVEY

© 2025 I. M. Aleshin^{a,b,#}, Corresponding Member of the RAS A. A. Soloviev^{a,b}, K. I. Kholodkov^{a,b}, F. V. Perederin^{a,b}, Ya. V. Taran^a

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[#] *E-mail: ima@ifz.ru*

Modern geophysical survey technologies are progressing fast. One notable milestone of this progress is substantial increase of georeferencing performance with benefits of advanced satellite radionavigation. This article delves into the advantages of employing multiple altitude (also referred to as multilevel) aeromagnetic measurements conducted using unmanned aerial vehicles for deriving vertical gradient. This approach contrasts with conventional methods that rely on the calculation of the corresponding transform of the anomalous magnetic field. A comparative analysis was conducted on two study areas, characterized by distinct magnetic anomalies. One region exhibited strong anthropogenic disturbances against a background of a relatively calm regional magnetic field, while the other demonstrated weaker anthropogenic anomalies. The comparison between the maps of the anomalous field gradient calculated directly and derived from multilevel survey in both regions underscores the potential benefits of straightforward gradient measurement methods.

Keywords: low altitude survey, multiple altitude survey, UAV, drone, airborne magnetic survey, magnetic field transform