

ПОВЫСОТНАЯ АЭРОМАГНИТНАЯ СЪЕМКА ДЛЯ IN SITU ИЗМЕРЕНИЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ

И.М. Алешин^{1,2}, А.А.Соловьев¹, Я.В.Таран²

¹ Геофизический центр Российской Академии Наук (ГЦ РАН, Россия)

² Институт Физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской Академии Наук (ИФЗ РАН)

Владивосток, 2025

Вычисление трансформант аномального магнитного поля позволяет производить дополнительный качественный анализ при выделении различных структур.

Вертикальная производная поля используется для разделения аномалий по глубине источника.

В середине 20 века были разработаны технологии повысотной аэромагнитной съемки, от которых позднее отказались в пользу вычислительных методов.

С развитием технологий появилась возможность вернуться к вертикальной градиентометрии при помощи аэромагнитной съёмки с БВС.

В докладе обсуждаются некоторые методические аспекты, связанные с *in situ* измерениями вертикального градиента

Постановка задачи



Аэромагнитные измерения: маловысотная детальная съемка с БВС

Выполняется в 2 этапа:

- фотограмметрия для построения цифровой модели местности и рельефа, формирования полетных заданий
- аэромагнитная съемка с квантовым аэромагнитометром GeoShark на носителе Геоскан-401

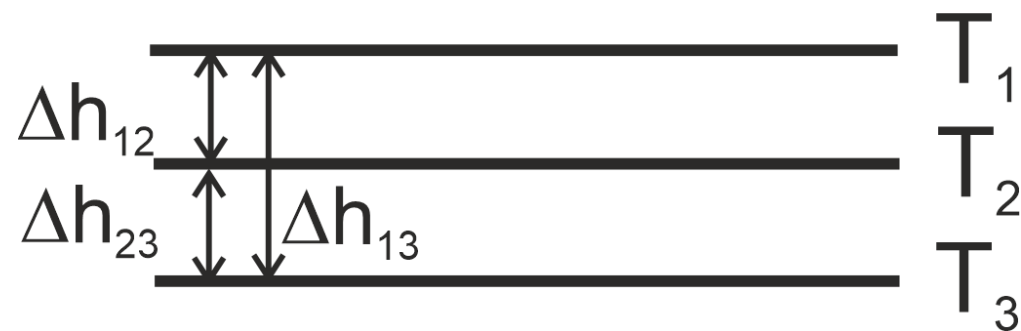
Съёмка выполняется с обтеканием рельефа на постоянных условных уровнях над дневной поверхностью.

Обработка аэромагнитных данных и вычисление вертикального градиента

Карты аномального магнитного поля на каждом из уровней построены после введения поправок за нормальное поле и вариации, а также увязки профилей по методике ВИРГ.

Среднеквадратическая погрешность 0.5-5 нТл.

Карты вычисленного вертикального градиента аномального магнитного поля строятся на основании карт аномального поля и высотных полетных поверхностей. Ось Z направлена к центру Земли. Так как формы полетных поверхностей съемки совпадают, вертикальный градиент, вычисленный по уровням T_1 и T_3 приблизительно соответствует поверхности их среднего арифметического уровня T_2 аналогичной формы

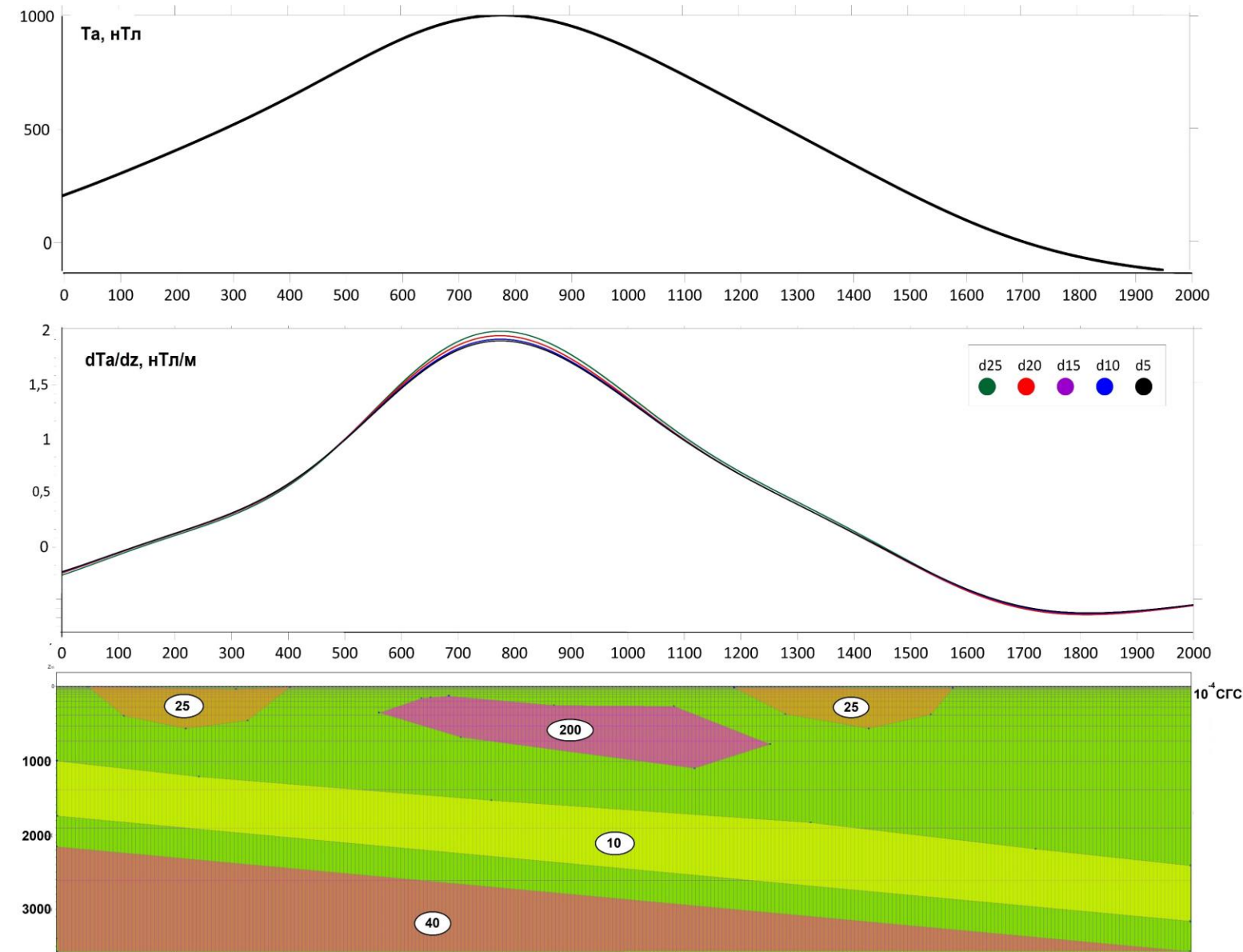


$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{T_3 - T_1}{\Delta h_{13}}$$

Влияние расстояния между уровнями съёмки

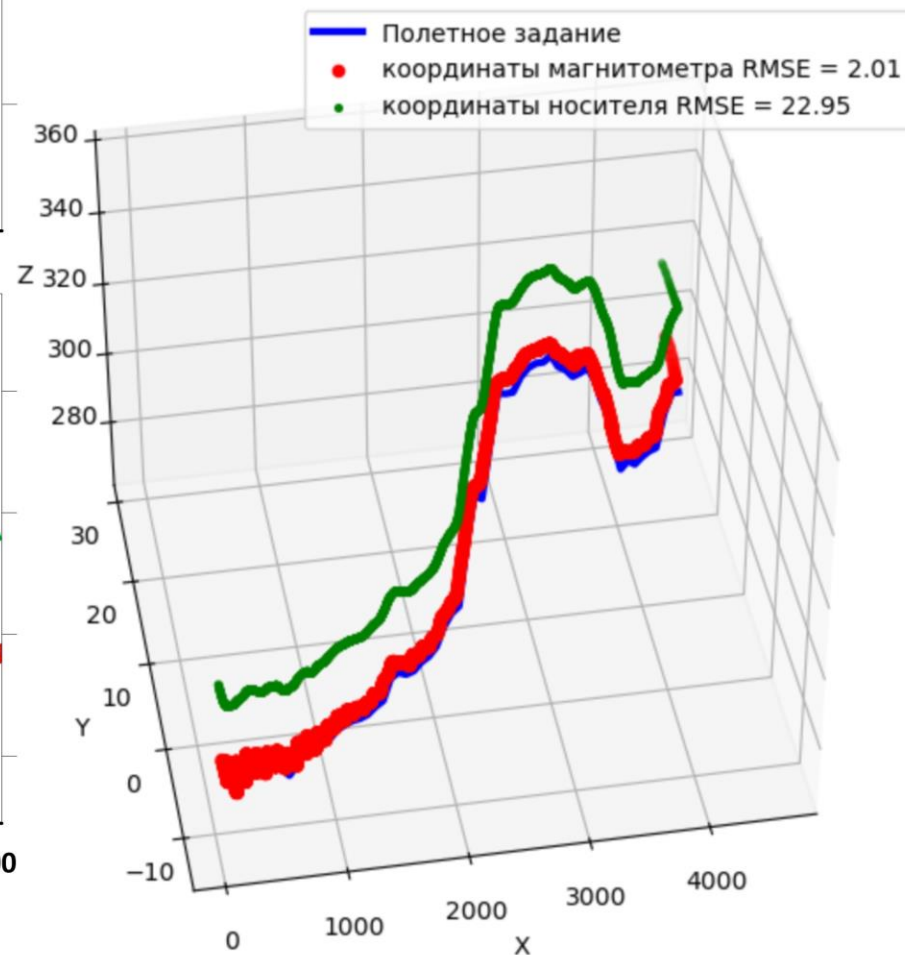
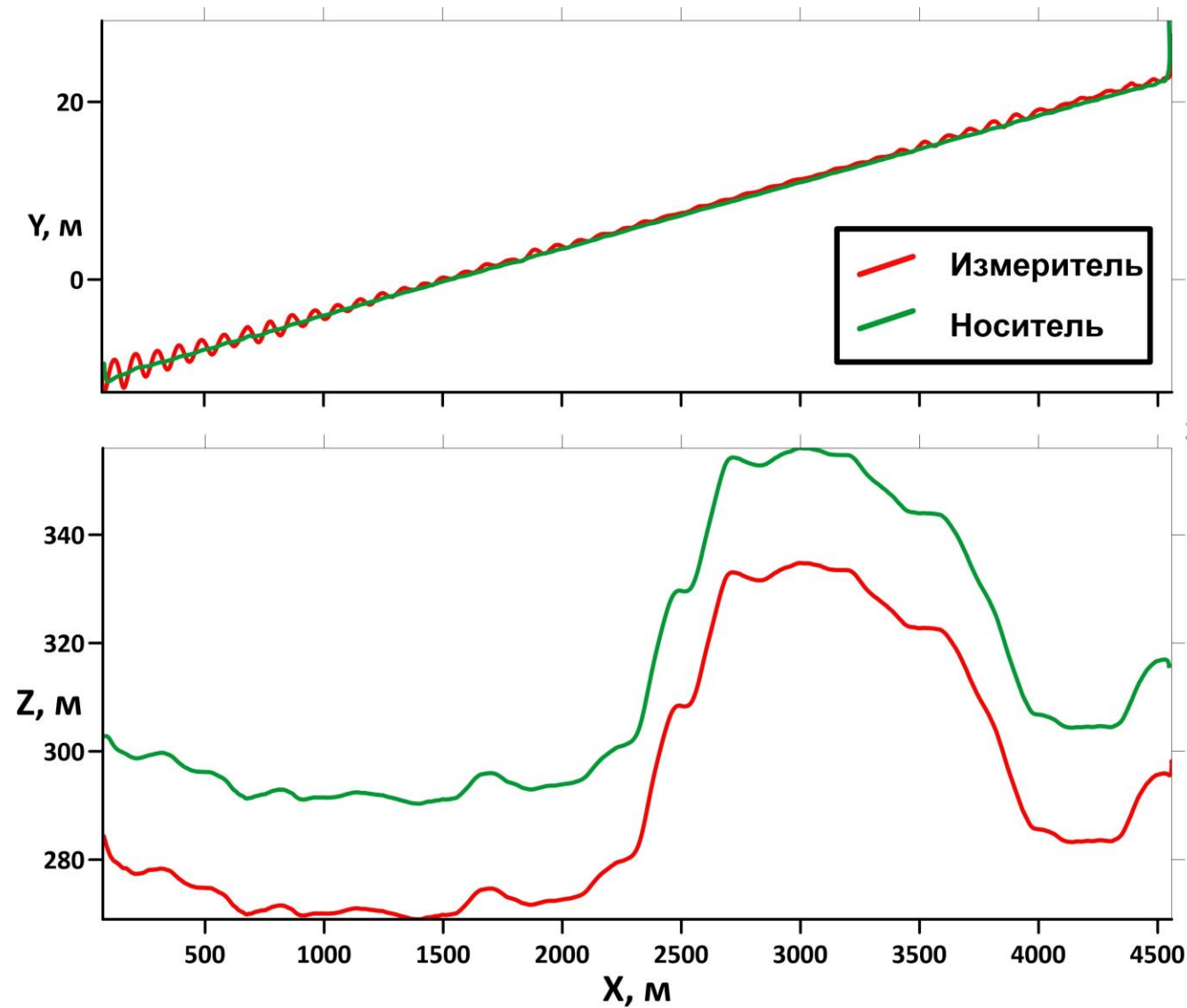
Решение прямой задачи по вычислению вертикального градиента при разнице между уровнями съёмки до 5 до 25 метров (Zondgm2d)

Вверху – аномальное магнитное поле
Посередине – вертикальный градиент аномального магнитного поля с разницей между уровнями от 5 до 25 метров
Внизу – модельный разрез эффективной магнитной восприимчивости

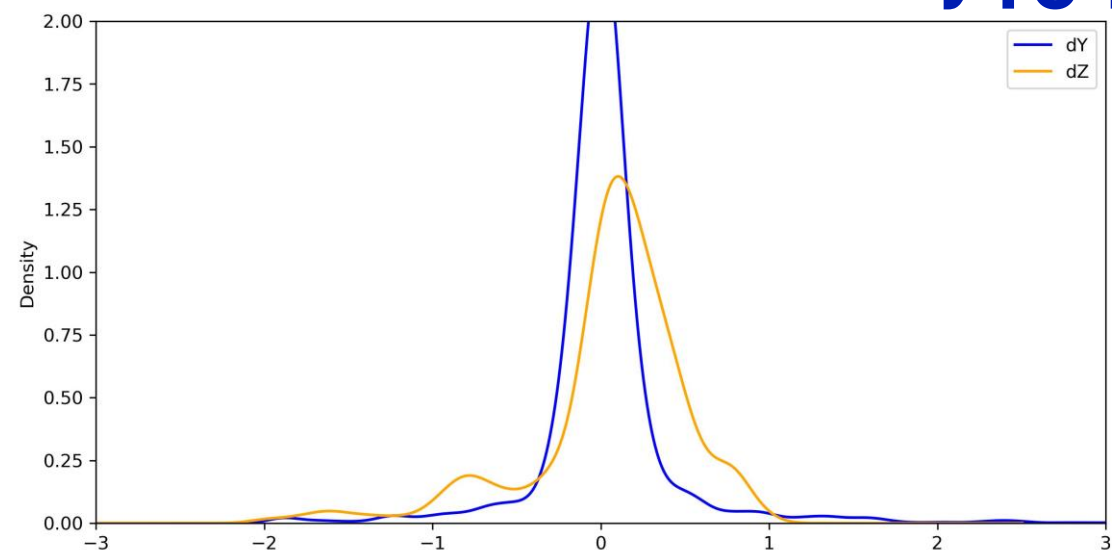


Технические возможности соблюдения полетного задания

Фактическое расхождение высоты пролета измерителя от полетного задания составляет 1-10 м в зависимости от условий съемки



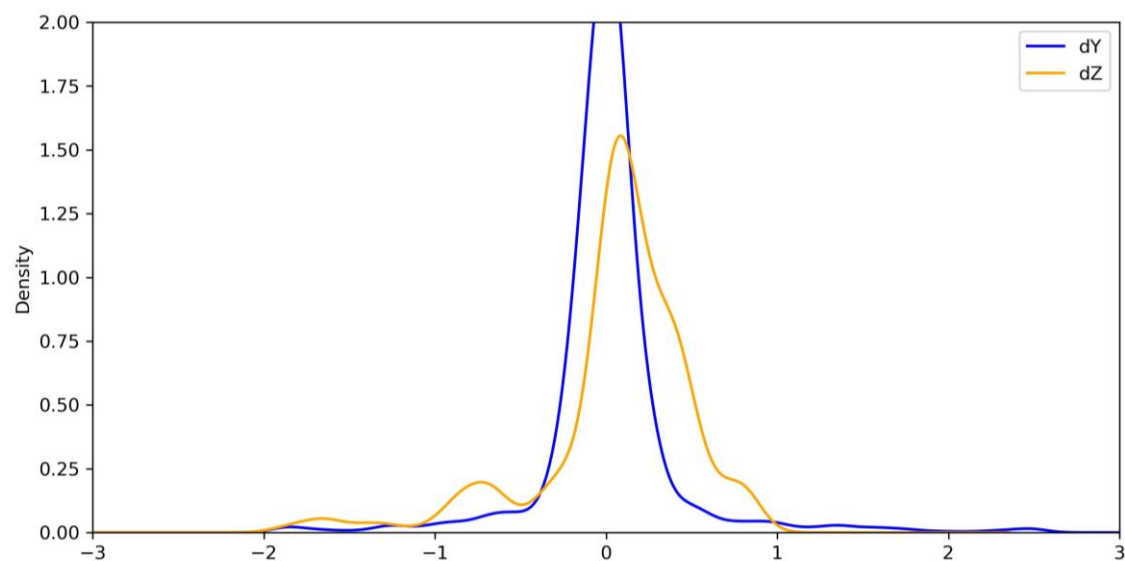
Уточнение положения измерителя



Для решения позиционной задачи в дифференциальном режиме задействуется опорная станция ГНСС.

Исследования производятся с комбинацией приемника OC-113 (Orient Systems) и антенны типа Choke-Ring (CHCNAV).

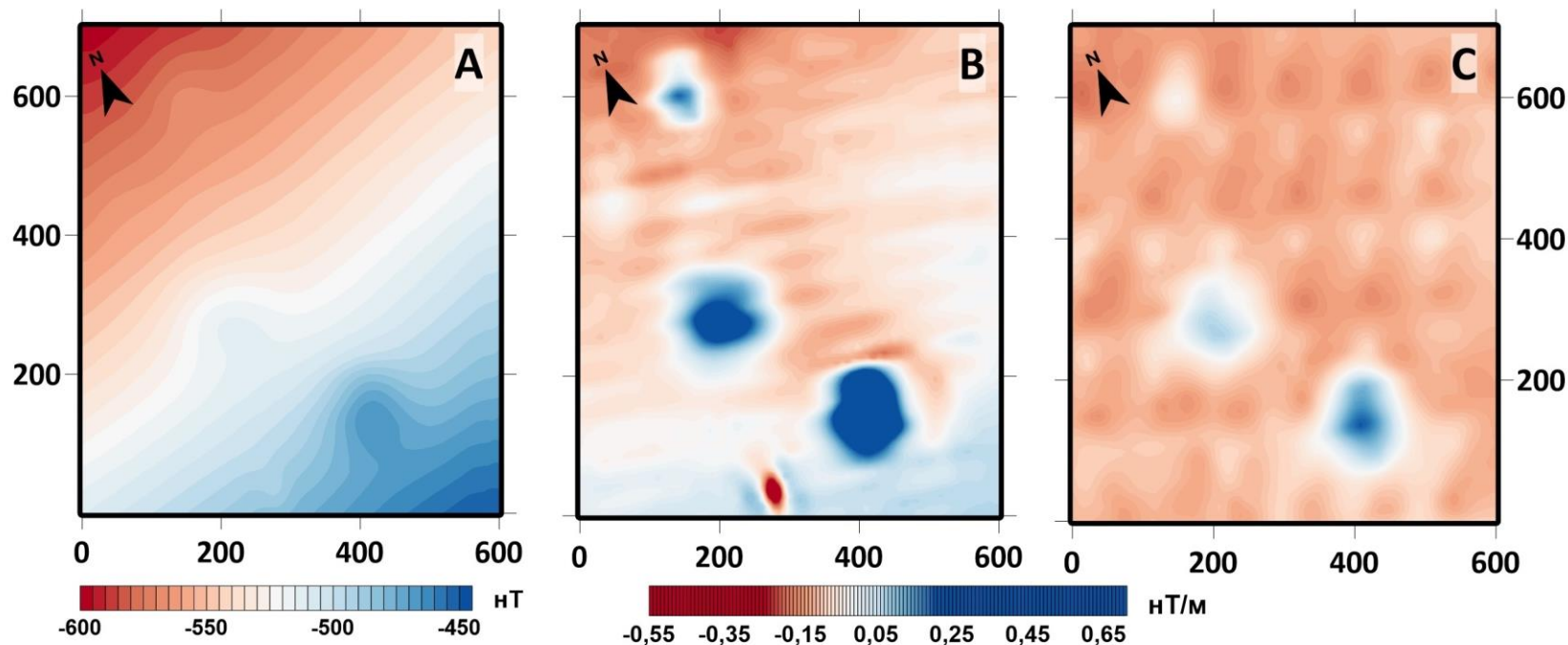
После введения поправок точность позиционирования носителя и измерителя составляет первые десятки сантиметров.



Вверху – плотность распределения отклонения в метрах: от прямолинейного профиля в плане (dY) и от сплайна обтекания рельефа (dZ) до процедуры уточнения

Внизу – после процедуры уточнения

Влияние несовпадения систем профилей



Для наилучшего результата при вычислении вертикального градиента необходимо соблюдать максимальный повтор системы профилей на всех высотных уровнях

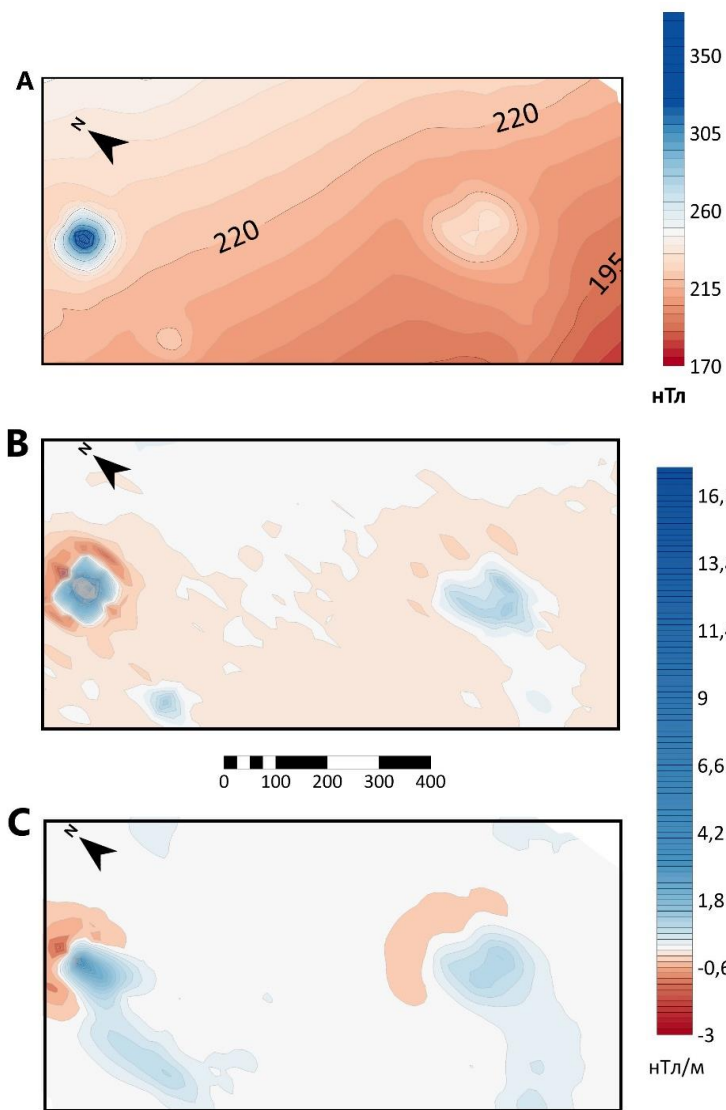
Результат измерений над обсерваторией Михнево [Алёшин и др., 2025].

А – аномальное магнитное поле

В – вертикальная производная аномального магнитного поля (GravMagInv)

С – вертикальный градиент, вычисленный по уровням с несовпадающими системами профилей

Сопоставление с вертикальной производной МП



Результат измерений над полигоном ВлГУ [Алёшин и др., 2025].

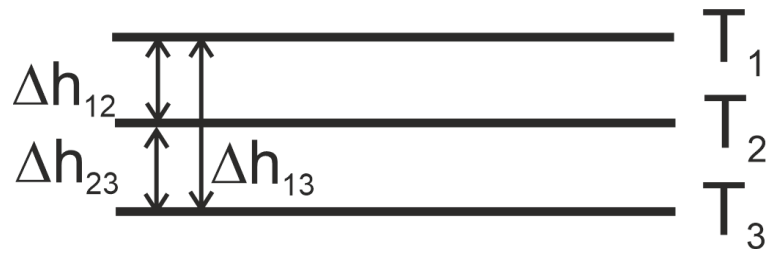
На фоне линейного регионального поля выделяются антропогенные аномалии разной амплитуды: ЛЭП, служебные строения, подъездная дорога. При вычислении вертикального градиента происходит естественная редукция регионального поля и приповерхностные объекты выделяются более чётко

А – аномальное магнитное поле

В – вертикальная производная аномального магнитного поля (GravMagInv)

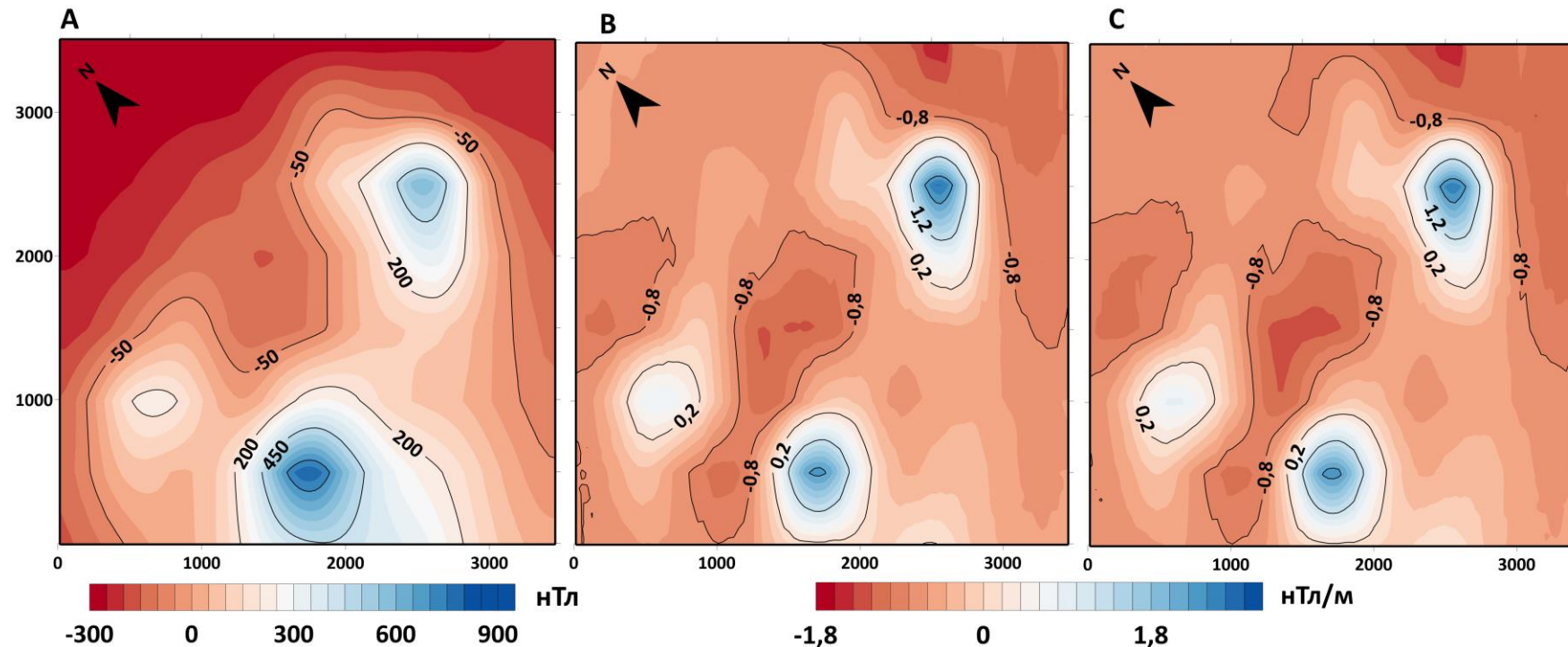
С – вертикальный градиент

Эксперимент на трех высотах



$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{2} \left(\frac{T_3 - T_2}{\Delta h_{23}} + \frac{T_2 - T_1}{\Delta h_{12}} \right)$$

Цель эксперимента:
определить, увеличивается
ли точность расчёта
градиента при включении
дополнительных уровней
съёмки.

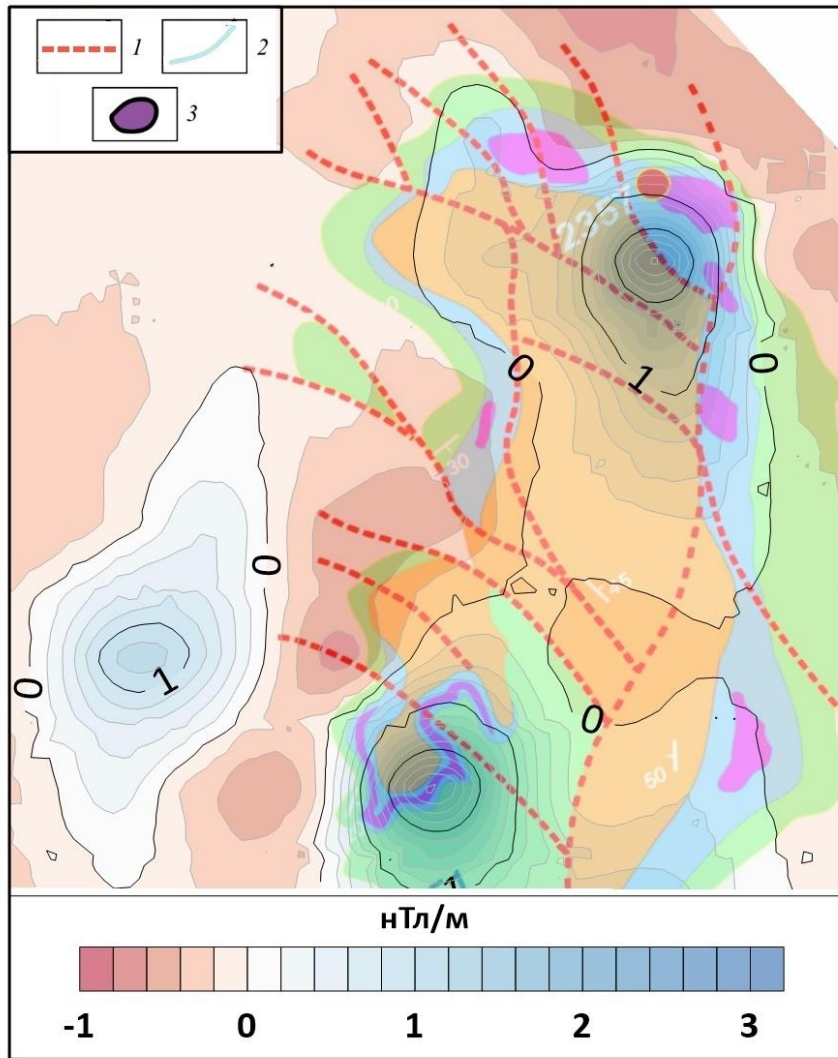


Результаты измерений над
массивом Вялимяки
(Северное Приладожье)
[Таран и др., 2025]:

А – аномальное магнитное
поле на среднем уровне;
В – вертикальный градиент,
вычисленный по данным
верхнего и нижнего
уровней:

С – вертикальный градиент,
вычисленный по данным
трех уровней

Выделение рудных тел



Геологическая схема массива Валимяки [Алексеев, 2020] с изолиниями вертикального градиента аномального магнитного поля.

1 – разломы; 2 – границы зонального строения; 3 – известные разработанные приповерхностные рудные пироксениты

По аналогичным максимумам вертикального градиента можно предположить наличие ранее неизвестных более глубоких рудных структур

Положение массива Валимяки на тектонической карте [Алексеев, 2020]
а – Калаамский массив
б – Валимякский массив



Выводы о технических требованиях к повысотной съемке для вычисления вертикального градиента

1. Технические возможности соблюдения полётного задания диктуют необходимость задания расстояния между уровнями съемки не менее 20 метров. Моделирование прямой задачи подтверждает возможность качественной интерпретации таких данных без существенного ущерба для точности решения
2. В большинстве случаев внутренняя навигационная система носителя и магнитометра показывает более точное соблюдение прямолинейности профиля, чем в действительности. Обтекание сплайна рельефа хотя и соблюдается весьма точно, но может в целом отличаться от реального уровня до 10-15 м. В связи с этим необходимо использовать удалённые станции ГНСС для решения позиционной задачи
3. Полётные задания на разных уровнях должны полностью повторяться в плане, включая положение контрольных точек пролёта
4. Съемка на двух высотных уровнях является достаточной для получения данных о вертикальном градиенте на одной высоте

Список литературы

1. Алексеев И.А. Валимякский комплекс // Ладожская протерозойская структура (геология, глубинное строение и минералогия). Отв. ред. Н.В. Шаров. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2020. С. 85-90.
2. Алёшин И.М., А. А. Соловьёв А.А., К. И. Холодков К.И., Передерин Ф.В., Таран Я.В. Вертикальный градиент геомагнитного поля по результатам повысотной аэромагнитной съемки // Доклады Академии Наук. Науки о земле. Т.520 № 1 (2025) С.116-120.
3. Таран, Я. В., Алёшин, И. М., Матвеев, М. А., Мокров, Д. К., Морозов, Ю. А., Передерин, Ф. В., Розенберг, Н. К., Холодков, К. И., В. М. Щербаков. Предварительные результаты полевых геолого-геофизических исследований массива валимяки (северное приладожье) // Геофизические процессы и биосфера 24, 1 (2025), 63–73.
4. Холодков К.И., Иванов С.Д., Алёшин И.М., Передерин Ф.В., Корягин В.Н., Холодков И.Н., Алёшин М.И., Матвеев М.А., Морозов Ю.А. Опыт применения беспилотных летательных аппаратов для построения цифровой модели рельефа // Наука и технологические разработки. 2021. Т. 100, № 4. С.44–56.
5. Чепиги Л.С. GravMagInv. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2022610137, 10.01.2022.
6. Cowan D. R., Baigent M., Cowan S. Aeromagnetic Gradiometers-a Perspective // Exploration Geophysics, 1995. №26(2-3), P 241-246.
7. Hood P. Gradient measurements in aeromagnetic surveying // Geophysics. 1965. № 30 (5). P. 891-902.
8. Kulüke 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.
9. Walter C., Braun A., Fotopoulos G. High-resolution unmanned aerial vehicle aeromagnetic surveys for mineral exploration targets // Geophysical Prospecting. 2020. № 68. P. 334–349.

Спасибо за внимание!

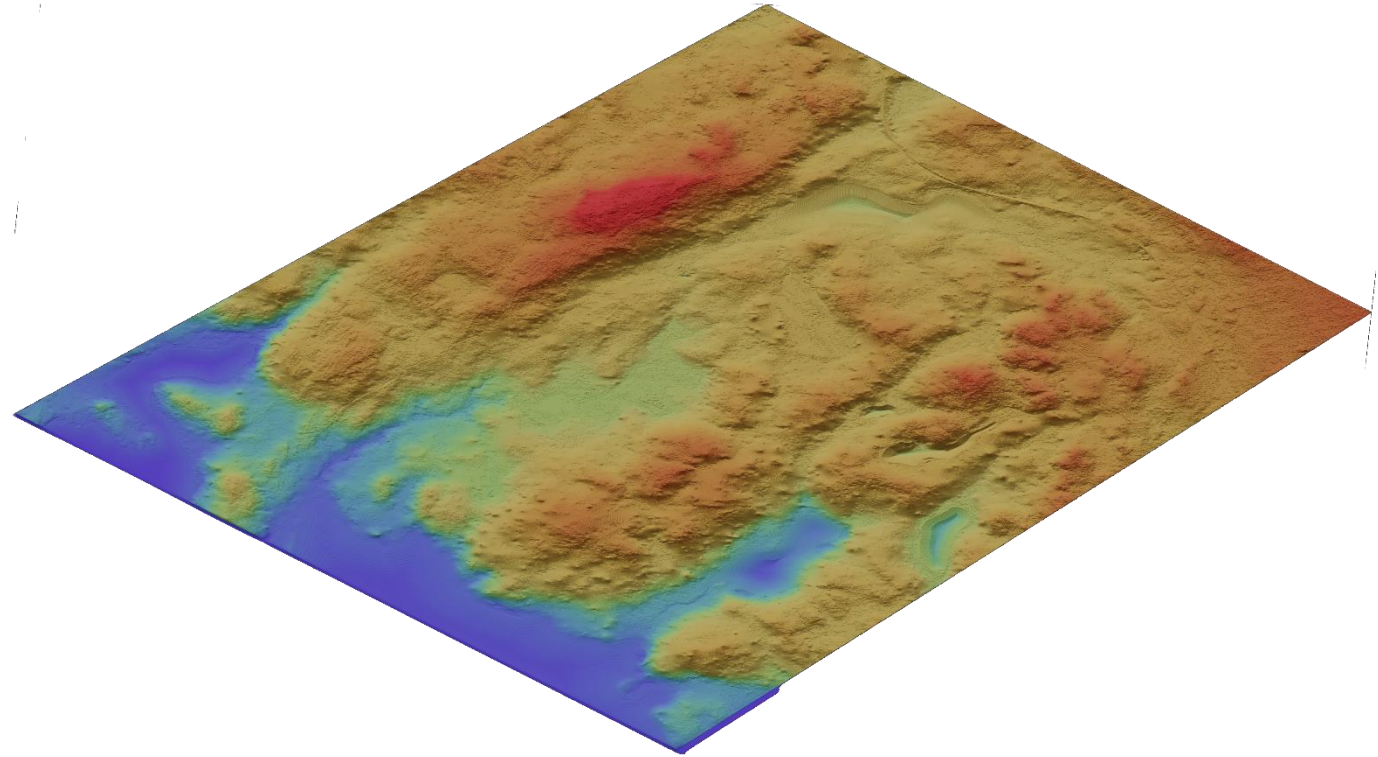
Методика исследований: ЦМР



Геоскан-101 с полнокадровой фотокамерой

Методика исследований: ЦМР

Для реконструкции рельефа используются методы фотограмметрии и совместной интерпретации облака точек по результатам лидарной съемки в ПО Agisoft Metashape



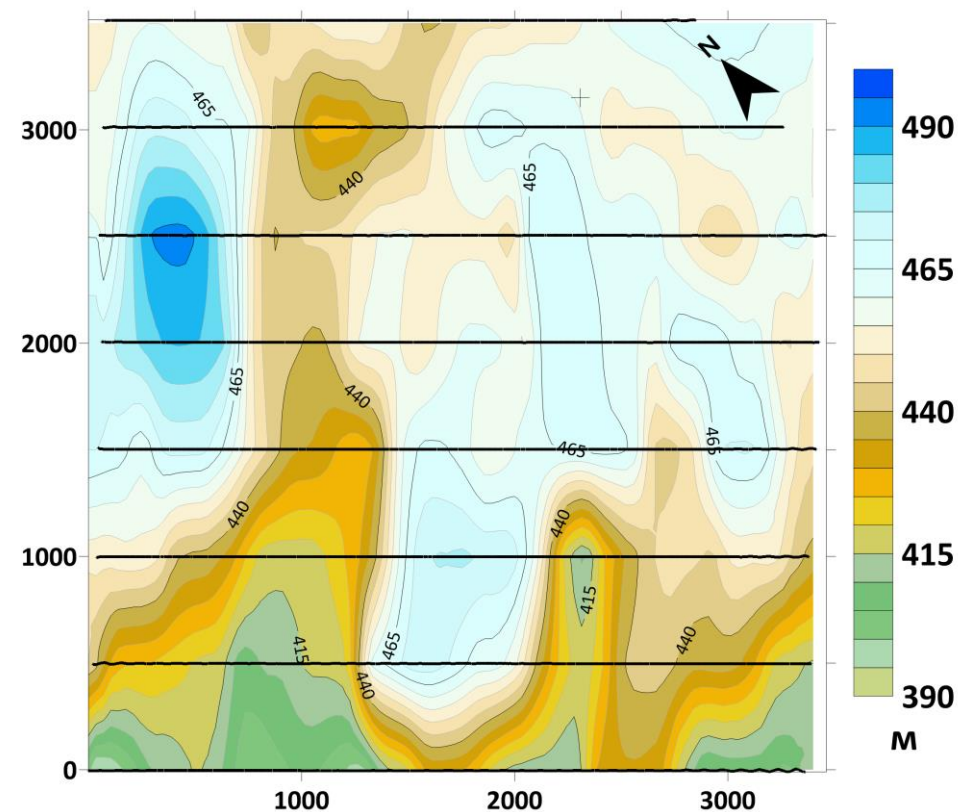
Цифровая модель рельефа северной части массива
Валимяки(Северное Приладожье)

Методика исследований: магнитная съёмка

Съёмка выполняется с обтеканием рельефа на постоянных условных уровнях над дневной поверхностью по идентичным полетным заданиям с совпадающими контрольными точками



Фрагмент полётного задания аэромагнитной съёмки



Пример полетной поверхности с обтеканием рельефа