

ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ РОССИИ



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'А.С. Егоров', written over a horizontal line.

**Руководитель программы
аспирантуры
профессор А.С. Егоров**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ
МЕТОДОВ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ**

Подготовка научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре

Область науки:	1. Естественные науки
Группа научных специальностей:	1.6. Науки о Земле и окружающей среде
Научная специальность:	1.6.9. Геофизика
Отрасли науки:	Геолого-минералогические, технические
Форма освоения программы аспирантуры:	Очная
Срок освоения программы аспирантуры:	3 года
Составитель:	к.г.-м.н., доц. Н.П. Сенчина

Санкт-Петербург

1. Введение поправки за дрейф нуля-пункта

В теории механических гравиметров предполагается, что деформация упругой системы пропорциональна силе тяжести, то есть связь между нагрузкой и деформацией соответствует закону Гука. В реальных телах зависимость деформации от нагрузки гораздо сложнее. Опыт свидетельствует, что даже при малых нагрузках деформация материала не строго соответствует закону Гука. Отклонения от закона пропорциональности при наблюдениях с гравиметрами проявляются как непрерывные изменения отсчета, которые называются смещением «нуль – пункта».

При изготовлении гравиметров принимают меры для повышения стабильности упругих систем. Так упругие системы изготавливаются из плавленного кварца и элинвара (особого сплава никеля и хрома), которые обладают малыми температурными коэффициентами и относительным постоянством упругих свойств во времени.

Тем не менее, смещение нуля-пункта существует у всех гравиметров. Данный факт является основным недостатком статических гравиметров и требует соблюдения специальных методик выполнения гравиметрических работ. Так гравиметрические измерения выполняют отдельными *гравиметрическими рейсами*, понимая под каждым рейсом совокупность последовательных измерений гравиметром в точках земной поверхности, объединенных общей характеристикой смещения нуля-пункта, и в результаты этих измерений вводят поправку за смещение нуля-пункта гравиметра.

Для определения смещения нуля-пункта («нуля») наблюдения в рейсе начинают и заканчивают на одном том же пункте или на исходных пунктах, приращение ускорения силы тяжести между которыми известно. В течение рейса скорость смещения нуля-пункта отдельного гравиметра обычно предполагается постоянной, а поправка за смещение нуля-пункта изменяется по линейному закону пропорционально времени, то есть поправка в пункт, который наблюдался через два часа после начала наблюдений в рейсе, будет в два раза больше по величине поправки в пункт, на котором производились гравиметрические измерения, спустя один час после начала рейса. Поэтому перед выполнением полевых работ каждый гравиметр исследуют на линейный характер смещения нуля-пункта гравиметра. На основании этого исследования продолжительность гравиметрического рейса при работе со статическими гравиметрами обычно ограничивается 6 часами.

Поправку за «нуль-пункт» в рядовые наблюдения вводят пропорционально времени, прошедшему с момента выполнения наблюдения на начальном опорном пункте до наблюдения на данном рядовом пункте в предположении, что «нуль-пункт» изменяется линейно:

$$\Delta g_{n-n}^i = \frac{(\Delta g_{набл} - \Delta g_{оп}) \cdot (t_i - t_1)}{(t_2 - t_1)},$$

где Δg_{n-n}^i - поправка за дрейф «нуля» гравиметра для каждой i -й точки наблюдения, $\Delta g_{набл}$ - величина разности значений силы тяжести между опорными пунктами по наблюдениям, $\Delta g_{оп}$ - «твёрдое» значение силы тяжести между опорными пунктами,

t_i - время наблюдения на рядовой точке с i -м номером, t_1 - время начала рейса, t_2 - время окончания рейса. Величина $\Delta g_{испр}$ (исправленное за дрейф «нуль-пункта» значение силы тяжести) получается путем вычитания поправки за дрейф нуль-пункта из измеренного значения.

Поправку за смещения «нуль-пункта» на рядовом пункте можно определять также графическим способом. Для этого в декартовой системе координат по оси абсцисс в удобном масштабе откладывается время наблюдения на опорных точках, а по оси ординат – поправка за дрейф «нуль-пункта» (в мГал) на первом ОГП, равное нулю, а на втором ОГП, равное изменению отсчета на ОГП за время рейса. Полученные точки соединяются прямой линией. С этого графика для рядовых пунктов снимается значение поправки за смещение «нуль-пункта» в соответствии со временем наблюдения.

Далее исправленные значения приводятся к абсолютному уровню с использованием абсолютного значения на опорном пункте - $g_{абс}$. В результате этой операции во всех рядовых точках рейса будут вычислены наблюдаемые абсолютные значения силы тяжести, являющиеся исходными данными для дальнейшей обработки.

ПР 0 ПК 1 – ОГП – опорный гравиметрический пункт ($g_{абс}=981000$ мГал), ПР 1 ПК 300 – контрольная точка.

Задание состоит из результатов измерения с гравиметром в течение двух рейсов одного дня съемки. ПР 0 относится к измерениям на опорных пунктах. Пикеты профиля 1 – рядовые точки съемки.

В практической работе требуется:

внести поправку за дрейф «нуля» с учетом линейности смещения нуль-пункта между опорными измерениями,

построить график осредненных значений с поправкой за дрейф «нуля» в зависимости от расстояния в метрах (соответствует номерам пикета профиля 1),

привести данные к абсолютному уровню гравитационного поля,

определить среднеквадратическое отклонение для контрольной точки до и после введения поправки (по четырем измерениям),

проанализировать результат, оценить изменение погрешности съемки (среднеквадратического отклонения на контрольной точке).

2. Оценка плотности пород промежуточного слоя

При определении аномалий силы тяжести вводится поправка Буге

$$\Delta g_B = (0,3086 - 0,0419\sigma)H,$$

где H — высота пункта наблюдений гравиметрами над уровнем моря, м; σ — плотность пород промежуточного слоя, г/см³.

Значения аномалий Буге вычисляются по формуле

$$\Delta g_a = g_H + \Delta g_B - \gamma_0,$$

где g_H — наблюдаемое значение силы тяжести γ_0 — нормальное значение силы тяжести в точке с горизонтальными координатами точки наблюдения на поверхности геоида [§105.Инструкции по гравиразведке...]

Аномалии Буге следует относить к вертикальной и горизонтальным координатам пункта наблюдения.

Нормальное значение силы тяжести на территории РФ учитывается по формуле Гельмерта с поправкой 14 мГал

$$\gamma_0 = 978030(1 + 0.005302\sin^2 \varphi - 0.000007\sin^2 2\varphi) - 14 \text{ мГал}$$

где φ — широта точки определения силы тяжести [§ 94.. Инструкции по гравиразведке...]

При вычислении поправки за влияние промежуточного слоя в качестве поверхности относимости принимается уровень моря. При решении некоторых задач за поверхность относимости может быть принята другая горизонтальная плоскость, например, проходящая через низшую (высшую) точку рельефа.

При решении задач выделения малого гравитационного эффекта на рудных и других подобных объектах в условиях близкого залегания к земной поверхности известной плотностной границы вычисляются поправки за влияние этой границы. Для этого используются данные бурения и имеющиеся материалы комплексных геофизических исследований.

Для расчета аномалии Буге необходимо определить плотность пород, слагающих рельеф. По результатам съемки обязательно построение карт аномалий Буге с плотностью промежуточного слоя, равной 2,30 г/см³ и 2,67 г/см³, для мелкомасштабных съемок, включая съемки масштаба 1:50 000. При этом карты с плотностью промежуточного слоя 2,30 г/см³ составляются без введения поправки за рельеф.

Для геологической интерпретации строятся карты и графики аномалий Буге с истинной (реальной) постоянной или переменной плотностями промежуточного слоя (см. § 185). В этих случаях поверхность относимости не обязательно должна совпадать с поверхностью геоида. При выборе поверхности относимости

используется принцип, в силу которого мощность промежуточного слоя должна быть наименьшей.

Знание плотности горных пород необходимо для обработки (введения поправки за промежуточный слой, за рельеф дневной поверхности и т. п.) и интерпретации результатов гравиметрических измерений.

При введении поправки за рельеф и для интерпретации следует использовать значения плотности, определенные в условиях естественного залегания горных пород. Такие значения плотности называются истинными ($\sigma_{ист}$)

При введении поправок за влияние промежуточного слоя можно пользоваться значениями плотности, полученными по наземным или скважинным измерениям силы тяжести или ее производных. Такие значения плотности называются кажущимися (σ_k) вследствие того, что на них оказывают действие аномалиеобразующие массы.

Все вышесказанное рассмотрим на конкретном примере. В реальных условиях наблюдения проводятся на поверхности Земли, при этом каждая точка наблюдения будет характеризоваться своей высотой над поверхностью геоида.

Известно, что простой подъем гравиметра в воздухе на высоту h , м уменьшает измеряемое значение на величину вертикального градиента поля силы тяжести, т.е. примерно на $308,6 \cdot h$ мкг. В свою очередь наличие плоского слоя горных пород с плотностью σ г/см³ от поверхности геоида до точки наблюдения увеличивает показания гравиметра на величину $41,9 \cdot h \cdot \sigma$, мкг. Для того, чтобы при подъеме гравиметра вверх его показания не изменялись плотность горных пород должны быть не менее плотности чистых марганца, железа или олова. Естественно, горные породы такой плотности в приповерхностных условиях не встречаются и практически всегда показания гравиметра при подъеме вверх по рельефу будут уменьшаться.

Сказанное иллюстрируется рис.1. В верхней части рисунка приведен график рельефа местности. Ниже график показаний гравиметра, которые уменьшаются при подъеме вверх по рельефу. На графиках «С» приведены аномалии Буге, рассчитанные при различной плотности пород промежуточного слоя.

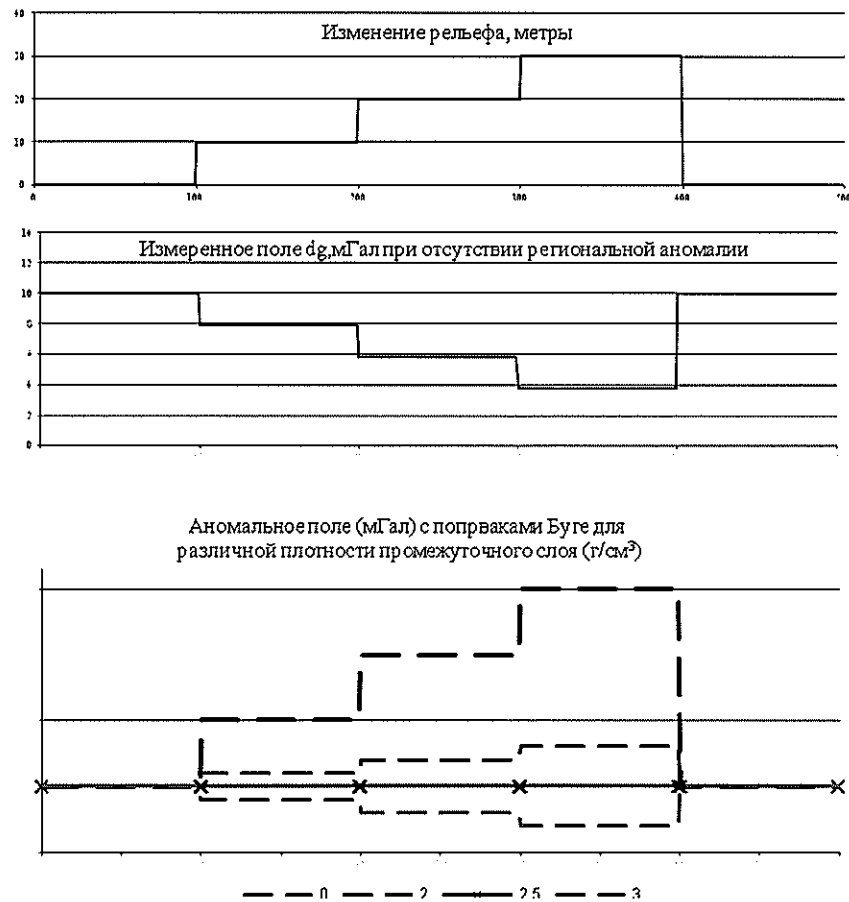


Рис.1. Изменение рельефа местности, поля силы тяжести и аномалий Буге при различной плотности пород промежуточного слоя для случая отсутствия аномалий от нижележащих пород

При плотности равной нулю, аномалия Буге становится аномалией Фая (поправка в свободном воздухе). Эта аномалия ведет себя синхронно с рельефом. Если взять плотность пород промежуточного слоя равной 2 г/см^3 , (т.е. меньшее значение, чем реальная плотность равная $2,5 \text{ г/см}^3$), то расчетная аномалия Буге будет вести себя синхронно с рельефом, т.е. рельеф «недокомпенсирован». Если принять плотность пород промежуточного слоя 3 г/см^3 , то аномалия Буге будет обратной рельефу («перекомпенсированной»). При плотности пород промежуточного слоя равной $2,5 \text{ г/см}^3$ – аномалия Буге не будет наблюдаться. Именно в этом случае исключается влияние рельефа на геологическое истолкование результатов гравиразведки. Поэтому определение плотности пород промежуточного слоя представляет собой крайне важную задачу, особенно при работах в условиях сложного рельефа местности.

В реальных условиях задача оценки плотности пород, создающих рельеф усложняется наличием аномалий от нижележащих геологических образований. В этом случае аномалия Буге не представляет собой прямую линию, показанную на рис.9. Один из вариантов аномалии Буге, представляющей собой степенную функцию приведен на рис.10. Рельеф профиля аналогичен рельефу, приведенному на рис.9.

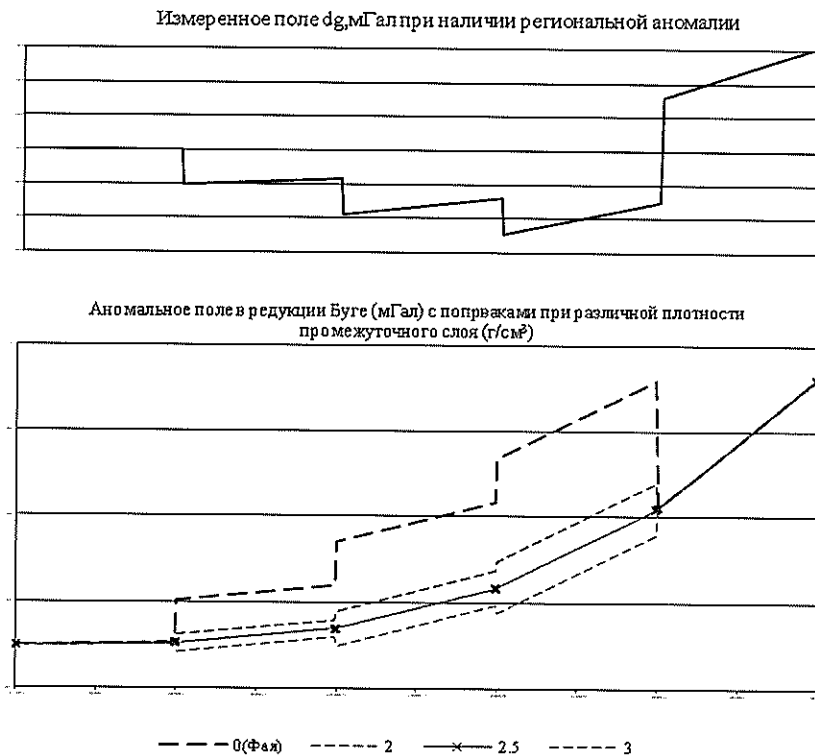


Рис.2. Изменение поля силы тяжести и аномалий Буге при различной плотности пород промежуточного слоя при наличии аномалии от нижележащих пород

Плотность пород промежуточного слоя может быть определена по изучению физических свойств пород региона, по результатам каротажных измерений плотности пород. При региональных исследованиях силы тяжести принято в регионах с мощным чехлом осадочных отложений плотность пород считать равной $2,3 \text{ г/см}^3$, в регионах с кристаллическими породами — $2,67 \text{ г/см}^3$.

Оценить плотность пород промежуточного слоя можно и по результатам гравиметрических работ. При этом предполагается, что на исследуемом участке плотность пород, слагающих рельеф — постоянна.

На рис.1 приведен достаточно простой пример, в котором отсутствует аномалия Буге от глубинных источников. В реальных условиях определять плотность пород необходимо, чаще всего на сложном фоне глубинной аномалии Буге (Рис.10). Для этих случаев существует несколько методов оценки плотности пород рельефа. Наиболее подробно эти способы рассмотрены в монографии Миронова «Курс гравиразведки».

В работе необходимо рассмотреть два способа оценки плотности пород промежуточного слоя изложенных в учебнике Миронова стр. 320-326: Способ Неттлетона и способ Гладкова К.И. В первом из этих способов строят графики аномалии Буге, рассчитанные при различных плотностях промежуточного слоя (поэтому этот способ называют графическим) через вершины холмов или овраги. При истинной плотности график имеет вид прямой (рис.11). Однако это относится к случаю, когда аномалия Буге на данном участке профиля изменяется линейно. В случае рис.11. плотность пород рельефа равна $1,8 \text{ г/см}^3$.

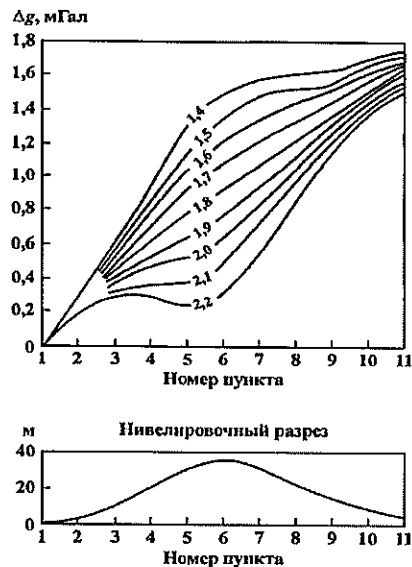


Рис.3. Способ Неттелтона. Графики изменения аномалии Буге при различных плотностях пород рельефа и рельефа по линии профиля

Ход выполнения работы

1. Ознакомиться с понятием плотность горной породы и со способами ее определения в различных условиях. Отдельно рассмотреть способы и формулы определения плотности пород в скважинах и горных выработках. Особое внимание обратить на способы расчета плотности пород промежуточного слоя по гравиметрическим данным.

2. Выбрать свой вариант задания, соответствующий номеру в списке группы. Таблица после п.4. В программе Excel составить таблицу расчета в которой в вертикальных колонках вставить расстояния по профилю, высоты, значения поля силы тяжести.

3. Рассчитать по способу Неттелтона аномалии Буге для различных плотностей промежуточного слоя и построить графики изменения рельефа и полученных аномалий Буге в целочисленном масштабе, укладывающиеся на лист формата А4. Определить графически плотность пород рельефа. Для построения графиков применять программу Grafer или подогнать графики Excel к целочисленному масштабу в документе Word.

4. В следующих за исходными данными колонках таблицы в скользящих окнах по трем и четырем соседним значениям рассчитать плотности пород. Проанализировать изменения полученных значений по линии профиля и определить плотность пород для расчета аномалии Буге. Построить масштабный график изменения аномалии Буге по линии профиля.

3. Редукция Буге. Поле уступа

Поле в редукции Буге получить и проанализировать в сравнении с картами рельефа и измеренного поля, оперируя с цифровыми моделями (гридами). Рассмотрим результаты измерения гравитационного поля на участке с изрезанным рельефом – рис. 4. В пределах участка имеются 2 ложбины, соответствующие водотокам (синий цвет, абсолютные отметки высот – до 500 м, красный цвет – горки).

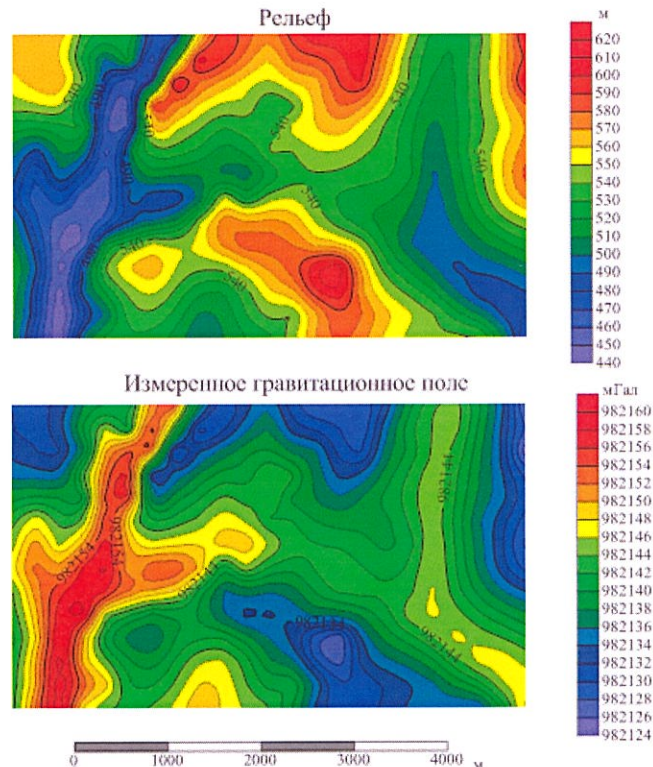


Рис.4. Карты результатов топогеодезии и гравиметрии

На карте измеренных значений гравитационного поля (введена поправка за дрейф нуля и лунно-солнечные вариации), видна яркая обратная корреляция с рельефом. Так как целевым объектом является распределение плотностей пород, а не высот точек съемок, от столь яркого влияния рельефа нужно избавиться. Сделаем это в 2 этапа. Введем поправку за свободный воздух (за высоту, Фая – рис.5, вверху) и добавим поправку за промежуточный слой с плотностью $2,55 \text{ г/см}^3$. Результат введения обеих поправок – гравитационное поле в редукции Буге, или аномалия Буге.

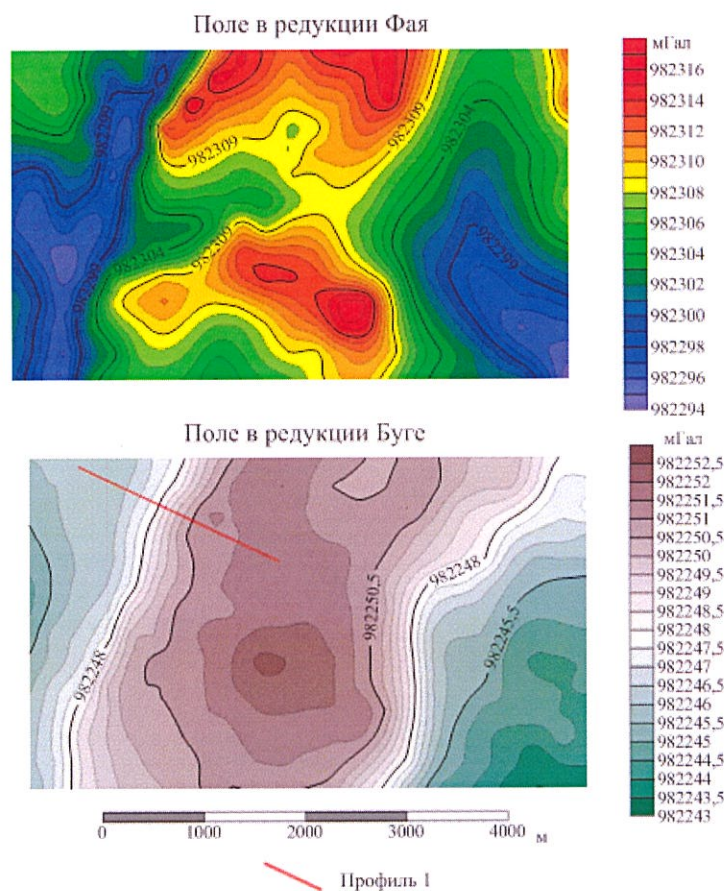


Рис.5. Карты гравитационного поля в редукциях Фая и Буге

Как видно, результирующая карта аномалии Буге не имеет очевидной корреляции с рельефом, а отражает иное - плотность горных пород, что в случае представленного хорошо изученного участка (в т.ч. есть данные бурения и петрофизики), является достоверным. Видно, что перепад значений поля, обусловленный влиянием плотностей, равен примерно 9,5 мГал, тогда как для исходного поля - 36 мГал, то есть основное влияние на поле действительно оказывает рельеф, а эффект от плотностей относительно слаб. На карте аномалии Буге видна положительная аномалия по центру участка и отрицательные на западной и восточной периферии. Границы этих блоков с различной плотностью пород выраженные и линейные, их можно попытаться описать с помощью модели уступа.

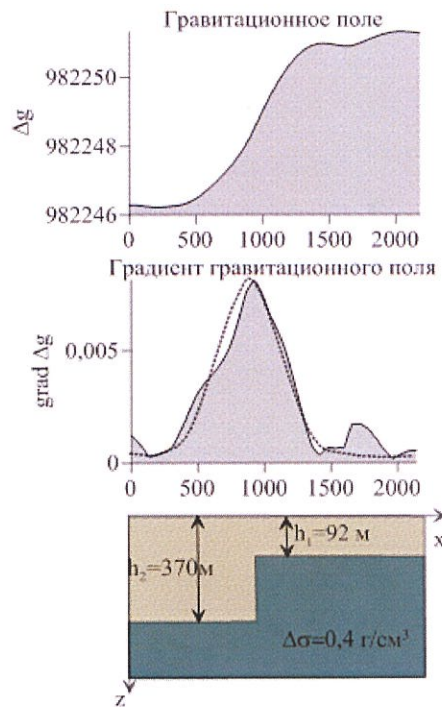


Рис.6. Данные гравитационного поля по профилю 1, график производной (градиента) поля с аппроксимацией и схема разреза по результатам интерпретации

По параметрам графика производной гравитационного поля можно оценить глубину ступени

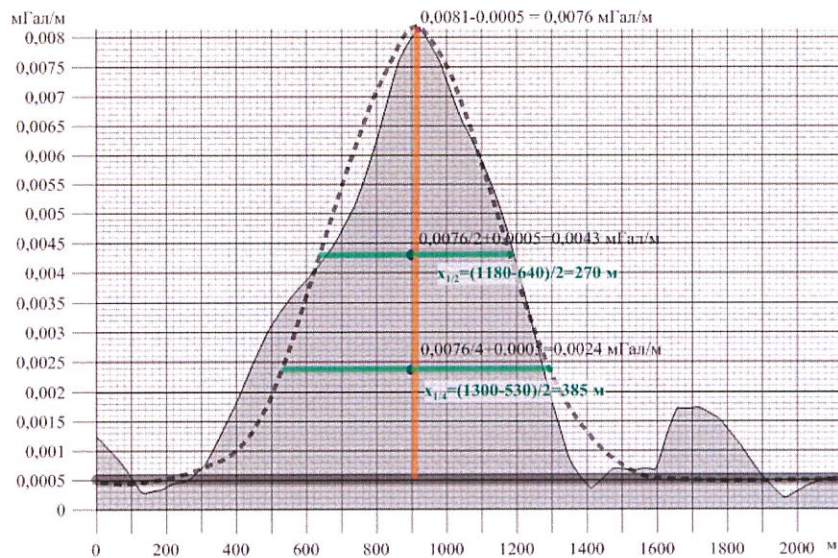


Рис.7. График горизонтального градиента поля уступа

Задача работы

Требуется выполнить расчет аномалии Буге по данным измеренного гравитационного поля и топографии. Требуется выполнить оценку параметров уступа по данным реального поля.

4. Расчет ключевых трансформант гравитационного поля

Под **трансформацией** геофизических полей понимают математическую процедуру, позволяющую вычислять составляющую поля, лучше характеризующую целевые объекты.

Важно помнить, что при любом преобразовании наблюдаемого поля количество информации об источниках поля **не может возрастать** (строго говоря – убывает). Однако контрастное выявление тех или иных «порций» информации, связанных с определенными геологическими объектами, часто настолько важно, что теоретическая потеря информации не имеет значения.

Общепринятой классификации методов трансформации гравитационного и магнитного полей не существует.

Среди большого числа существующих трансформаций часто выделяют две основные группы, различающиеся по своим спектральным характеристикам:

группу **«региональных трансформаций»**, предназначенных для построения регионального фона и сглаживания исходного поля;

группу **«локальных трансформаций»**, предназначенных для выделения локальных аномалий различных порядков, обусловленных сравнительно небольшими по размерам, залегающими на малых глубинах; к таковым относятся различные дифференциальные трансформанты.

К трансформациям можно отнести также и исключение из наблюдаемого поля составляющей, создаваемой известными геологическими структурами, например чехлом осадочных горных пород, перекрывающим кристаллический фундамент.

В основе использования большинства трансформаций геопотенциальных полей лежит «принцип фильтрации», формулируемый следующим образом: трансформация осуществляется с целью подавления аномалий-помех и наиболее четкого выявления части полезной информации.

Рассмотрим в качестве исходной информации гравитационное поле в редукции Буге, представленное на рисунке 5. Как и в других гридах, данные определены в узлах двумерной сетки. Пусть она будет регулярная, с равным шагом Δx и Δy . Поле, соответствующее координатам, обозначим как Z .

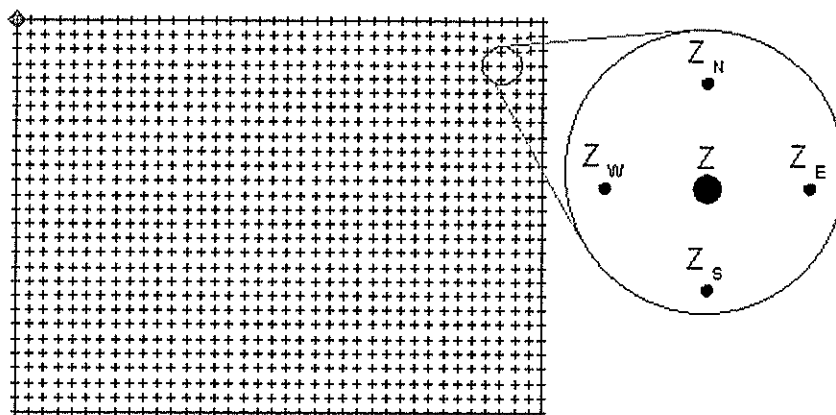


Рис.8. Сетка «грида» с обозначенными узлами и «шаблон» - скользящее окно, позволяющее рассчитывать ряд трансформант

Расчеты горизонтальной производной реальных геофизических данных осуществляются с помощью дискретного приближения функций.

Рассмотрим дифференциальные трансформанты.

Производная – предел приращения функции, отнесенного к приращению расстояния. В дискретном виде – минимально возможные приращения (ячейка грида или 2 ячейки)

$$\lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{\Delta s} = \frac{df}{ds}$$

Приращение в 2 ячейки удобно для расчета, так как результат не смещается на середину между узлами сетки:

$$\frac{dz}{dx} \approx \frac{Z_E - Z_W}{2\Delta x} \qquad \frac{dz}{dy} \approx \frac{Z_N - Z_S}{2\Delta y}$$

Производная по произвольному направлению (0 градусов соответствует направлению З-В):

$$\frac{dZ}{ds} \approx \frac{Z_E - Z_W}{2\Delta x} \cdot \cos(\alpha) + \frac{Z_N - Z_S}{2\Delta y} \cdot \sin(\alpha)$$

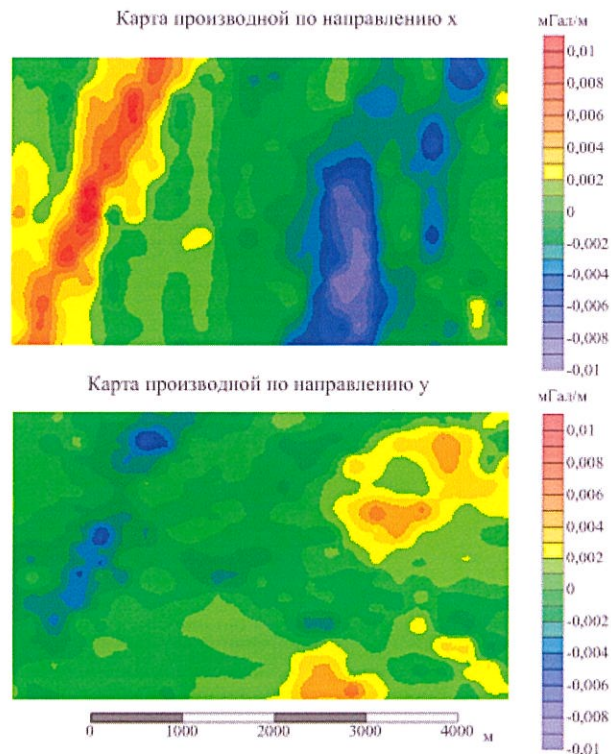


Рис.9. Карты горизонтальных производных гравитационного поля по направлениям x и y для исходного поля, представленного на рис.22 (в редукции Буге)

Модуль горизонтального градиента определяется как

$$\|\vec{g}\| = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}$$

в «непрерывном» варианте, и по формуле

$$\|\vec{g}\| \approx \sqrt{\left(\frac{Z_E - Z_W}{2\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{Z_N - Z_S}{2\Delta y}\right)^2}$$

в «дискретном» приближении – для значений поля в узлах сетки (грида), что реализуется в Surfer с помощью меню Grid – Calculus – Differential and Integral operators - Gradient. Данная трансформация позволяет подчеркнуть границы блоков пород с различной плотностью, что полезно при решении задач геотектоники. По картам модуля горизонтального градиента выделяют «линеаменты» (аналог линеаментов, введенных в геоморфологии- линейных и дугообразных элементов рельефа, термин в применении к потенциальным полям на текущий момент дискуссионный) и трассируют разрывные нарушения.

Карта модуля горизонтального градиента гравитационного поля с элементами интерпретации

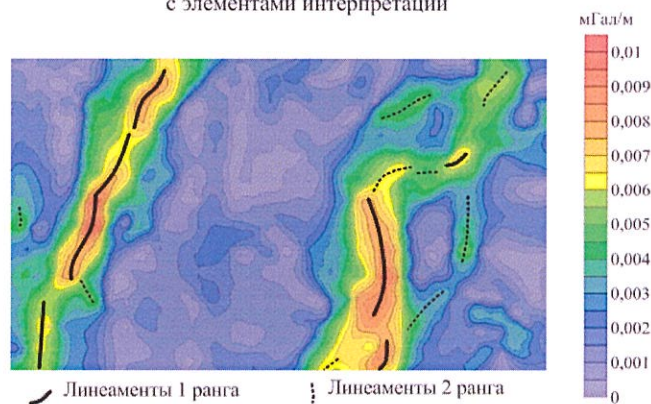


Рис.10. Карта модуля горизонтального градиента гравитационного поля

При решении картировочных и рудопоисковых задач бывает важно разделить составляющие, связанные с источниками регионального масштаба – крупными блоками земной коры – и с локальными источниками – отдельными рудными зонами или комплексами пород. Для этого вычисляют региональную составляющую, а также локальную – разность между исходным полем и региональной компонентой. Региональная составляющая может быть рассчитана разными способами, например, осреднением в скользящем окне с помощью меню Grid - Filter программы Surfer. Разность между исходным полем и региональной составляющей можно получить при помощи меню Grid – Math.

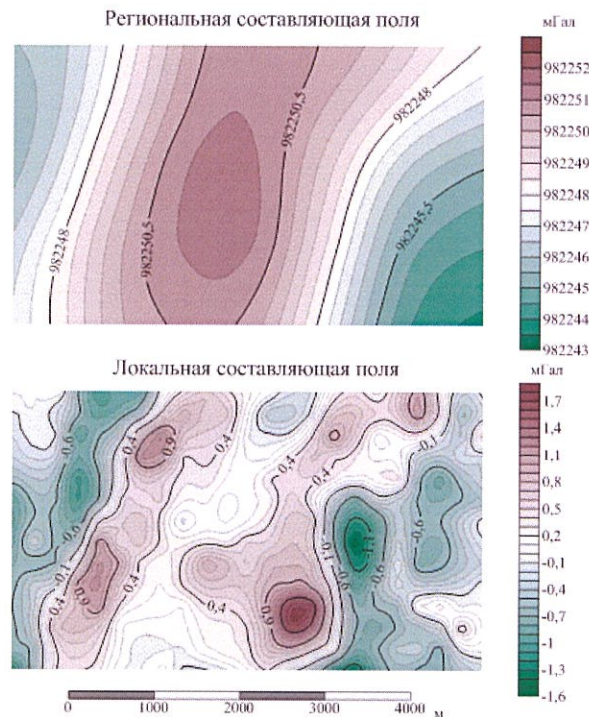


Рис.11. Карты региональной и локальной составляющих гравитационного поля в редукции Буге (по исходному полю с рис. 22)

Дальнейшее геологическое истолкование карт составляющих заключается в качественном анализе, выделении границ блоков и отдельных тел, можно применить к таким картам расчет других трансформаций, например, модуля горизонтального градиента, и выделить «линеаменты» на разных масштабных уровнях – региональном и относительно локальном.

Существует иной способ определения региональной составляющей - с помощью пересчета поля в верхнее полупространство через интеграл Пуассона.

Площадной вариант реализации такого пересчета -

$$U(x_0, y_0, H) = \frac{H}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U(x, y, 0) dx dy}{\sqrt{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + H^2]^{3/2}}}$$

Профильный вариант:

$$U(x, z) = \frac{z}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U(\xi, 0) d\xi}{(\xi - x)^2 + z^2}$$

На практике эти интегралы берутся численно, для чего бесконечная плоскость заменяется конечным скользящим окном, а сами интегралы - суммами произведений значений поля в узлах на соответствующие коэффициенты. Для получения достаточно точных результатов пересчета размеры скользящего окна должны быть примерно в 10 раз больше высоты пересчета, а расстояние между узлами - примерно равным этой высоте. Естественно, если поле между узлами резко меняется, результаты пересчета могут оказаться весьма далекими от реального поля на этой высоте, Тем не менее, аналитическое продолжение вверх является устойчивым к случайным помехам.

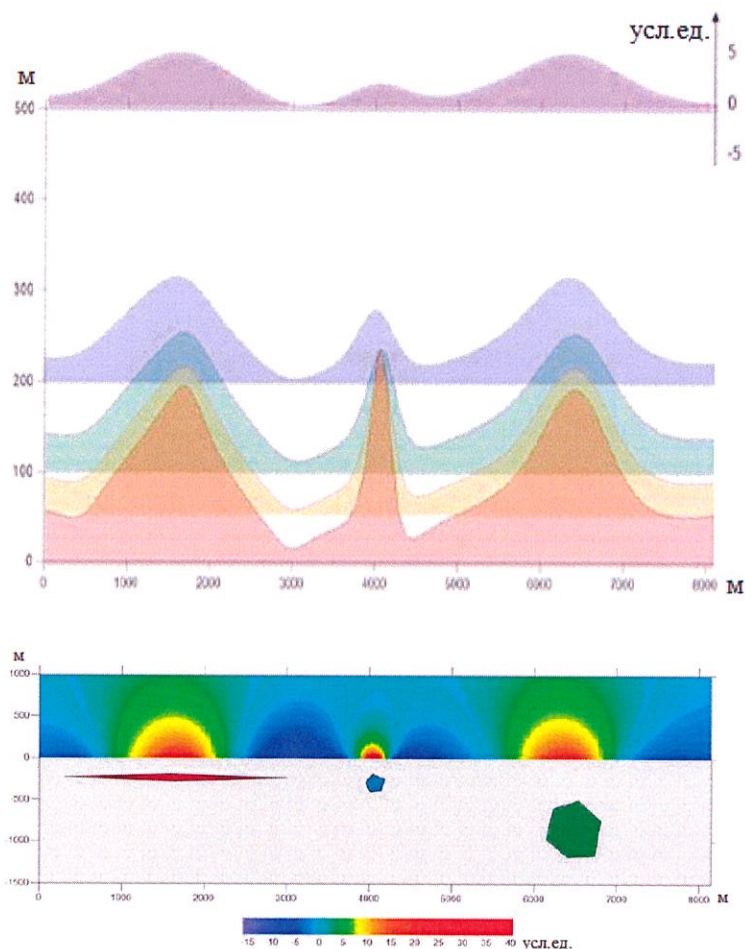


Рис.12. Вертикальный разрез поля в верхнем полупространстве на разных высотах, представленный в виде набора графиков и в виде схемы изолиний над схематичным разрезом, содержащим три источника разной формы

Важным является применение трансформанты «Tilt» или TDR (tilt derivative) – угла наклона градиента поля. Расчет ее аналогичен применению к поле АРУ – автоматической регулировки усиления, когда по амплитуде выравниваются интенсивные и слабые аномалии. Трансформанта определяется как арктангенс отношения вертикальной и горизонтальной производных поля.

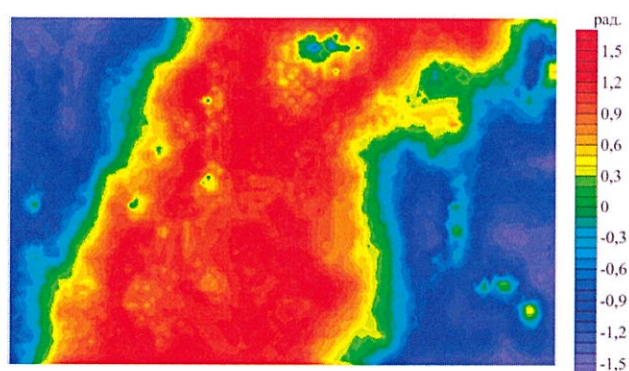


Рис.13. Карта трансформанты Tilt – угла наклона градиента поля

Задача работы: выполнить расчет набора трансформант и произвести качественную геологическую интерпретацию данных площадной гравиметрии.

Следует построить в Surfer карту изолиний гравитационного поля, выполнить ее первичную интерпретацию – выделить блоки пород а различной плотностью, отдельные локальные аномалии. Далее необходимо выполнить осреднение в скользящем окне с помощью меню Grid – Filter – User defined filter – Low-pass – Moving average. Разность между исходным полем и региональной составляющей можно получить при помощи меню Grid – Math, используется простая формула А-В. Полученные карты требуется построить и оценить, какие особенности поля ярче проявляются в полученных трансформациях. Операцию можно выполнить при различных размерах окна осреднения, например, 15x15, 41x41.

Далее следует с использованием меню Grid – Calculus – Differential and Integral operators – Gradient рассчитать модуль горизонтального градиента гравитационного поля, построить карту данной трансформации и выделить основные «линеаменты». Важно оценить, насколько надежнее трассируются контакты пород разной плотности по указанной трансформации по сравнению с исходным полем.

».

5. Автоматизация введения поправки за вариации магнитного поля

Объемы реально получаемых данных в настоящее время выходят за пределы, приемлемые для ручной обработки. Так, за день один оператор-магниторазведчик может получить несколько тысяч измерений. Поэтому необходимо проводить автоматизированный учет поправок за вариации.

Предлагаемый к использованию в практической работе язык программирования Visual Basic (в виде макросов в Excel) содержит множество операторов, которые отвечают за арифметические операции, операции сравнения и присвоения и т.д. Некоторые из управляющих конструкций и операторов перечислены ниже.

Управляющие конструкции:

1) Оператор ветвления с условием: *Если условие n выполняется, то реализуется действие m*

```
If <условие1> Then
    [действие_когда_условие1_истинно]
ElseIf <условие2> Then
    [действие_когда_условие2_истинно]
Else
    [действие_когда_условия_ложны]
End If
```

2) Цикл со счетчиком: *пока переменная - счетчик i находится в заданном диапазоне, цикл выполняется i –й раз*

```
For i = (начальное значение) To (конечное значение)
    [действие]
Next i
```

3) Цикл с условием: *до тех пор, пока условие истинно, цикл выполняется*

```
While <условие>
    [действие]
Wend
```

Оператор присвоения: знак равенства (=) используется для присвоения значения переменной. Примеры: $A = \text{Cells}(1, 2)$ – переменной A присвоено значение ячейки 1 строки 2 столбца таблицы; $\text{Cells}(3, 5) = B$ – в ячейку (3 строка, 5 столбец) записывается значение переменной B.

Арифметические операторы: сложение (+), вычитание (-), умножение (*), деление (/), возведение в степень (^), целочисленное деление (\). Примеры: $2^3 = 8$, $5 \setminus 2 = 2$.

Операторы сравнения: равенство (=), больше, чем и меньше, чем (> и <), не равно (<>). Примеры: `If A = 10 Then...`, `If nVar <> 10 Then...`

Логические операторы: логическое И (And), логическое ИЛИ (Or), логическое отрицание (Not), логическое исключение (Xor). Пример: `If (2 * 2 = 5) Or (2 * 2 = 4) Then...`

Работу необходимо начать со знакомства с макросами в Excel. Нужно осуществить запись набора действий в макрос и запустить его, оценить работу.

Далее открывается текст записанного кода в Visual Basic for Applications и анализируются записанные строки.

Файл с заданием выдает преподаватель, записывая и обосновывая строки кода в Visual Basic for Applications. Пример:

```
Sub Макрос1()
    u = 0
    For i = 2 To 1905
        MVS = 0
        Sheets("TMI").Select
        Time1 = Cells(i, 4)
        Sheets("MVS").Select
            For j = 2 To 8809
                Time2 = Cells(j, 1)
                If (Time2 =
Time1) Then
                    MVS = Cells(j,
2)
                    End If
                Next j
            Sheets("TMI").Select
            Cells(i, 5) = MVS
        Next i
        MsgBox "Для всех значений ровера
записаны измерения вариационной
станции"
    End Sub
```

Макрос выполняет сопоставление времени записи индукции магнитного поля магнитометром - «ровером» и магнитометром - вариационной станцией. При совпадении времени данные с магнитометра-вариационной станции (лист MVS) переписываются в соответствующую строку листа TMI, дополняя данные магнитометра – «ровера» поправкой за вариации. Уровень результирующего поля предполагается условный.

Необходимо запустить макрос, проверить результаты его работы, рассчитав вручную значения для одной произвольной точки. Самостоятельная часть задания заключается в записи кода для расчета разностей значений «ровера» и вариационной станции.

6. Установление параметров наклонного пласта на основе данных магнитометрии

Качественный (без проведения вычислений) анализ карты магнитного поля позволяет установить основные особенности геологического строения участка работ: направление простирания пород; наличие разрывных нарушений. Простые вычисления позволяют оценить глубину залегания магнитных объектов, угол падения и намагниченность.

При анализе карт используют следующие свойства магнитного поля. Направление осей магнитных аномалий отождествляется с направлением простирания пород. Скорость изменения магнитного поля в горизонтальном направлении (горизонтальный градиент) характеризует глубину залегания магнитных объектов. Чем больше горизонтальный градиент, тем меньше глубина залегания магнитных пород. Смещение в плане осей аномалий является признаком разрывного нарушения. Наличие двух минимумов, расположенных по обе стороны от центра аномалии, указывают на ограниченность размеров объекта в глубину. Асимметрия аномалии позволяет судить о направлении и угле падения пород.

Реальные геологические тела могут быть в первом приближении аппроксимированы телами правильной геометрической формы (пласт, вертикальный и горизонтальный цилиндр, уступ). Для простых тел, которые мы будем называть моделями, разработаны количественные способы оценки их геометрических параметров (глубина залегания, угол падения) и намагниченности. Чтобы применить ту или иную модель для вычисления параметров аномалии, необходимо дать предварительное заключение о соответствии магнитной аномалии этой модели.

Если аномалия вытянута в одном направлении, применяют модель пласта или горизонтального кругового цилиндра. Если аномалия включает один минимум и один максимум, то магнитный объект распространяется на глубину, существенно большую, чем глубина залегания его верхней кромки. В этом случае используют модель пласта, не ограниченного в направлении падения. Для модели пласта способы вычисления параметров зависят от соотношения глубины залегания верхней кромки h и видимой мощности пласта b . Если $h > b$, используют формулы для модели пласта малой мощности, в противном случае – для пласта большой мощности. В настоящей работе оправдано применение способов расчета для модели пласта малой мощности. Вычисление угла падения пород возможно только при известном направлении намагничения пород. В работе предполагается, что породы намагничены по современному полю.

Приращение модуля индукции магнитного поля (ΔT) для пласта малой мощности даётся следующим аналитическим выражением:

$$\Delta T = \frac{\mu_0}{4\pi} 2Jb \frac{h \cos \varepsilon - x \sin \varepsilon}{h^2 + x^2} \sin \alpha \left[\frac{\sin I}{\sin \varphi_0} \right]^2$$

где $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная;

J – модуль индуцированной намагниченности, размерность Амперы/метр;
 x – координата, отсчитываемая от проекции центра верхней кромки пласта на дневную поверхность, размерность метры;

φ_0 – угол между направлением профиля и проекцией вектора T_0 на вертикальную плоскость, проходящую через профиль,

$$\varphi_0 = \arctg(\operatorname{tg} I / \cos A);$$

I – магнитное наклонение;

A – магнитный азимут профиля

α – угол падения, отсчитываемый от направления профиля (изменяется от 0 до 180 градусов);

$$\varepsilon = \alpha + 90 - 2\varphi_0.$$

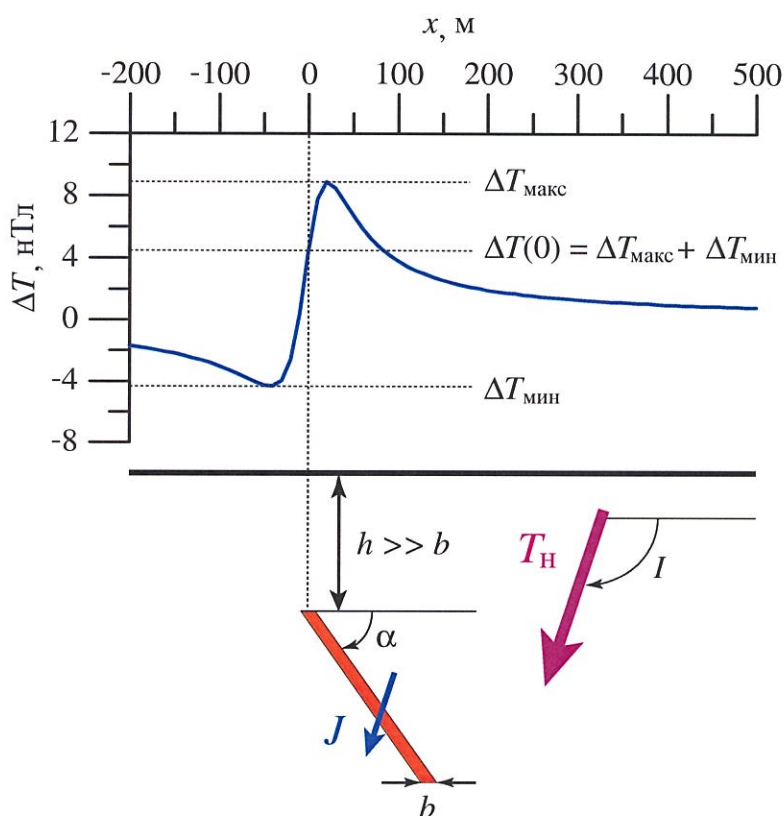


Рис. 14. Аномальное магнитное поле пласта малой мощности, падающего под углом α и однородно намагниченного по современному нормальному магнитному полю T_H

Воспользуемся способом характерных точек. В магнитометрии вывод формул для вычисления параметров объекта более громоздкий, чем в гравиметрии, поэтому ограничимся итоговыми выражениями.

Плановое положение центра верхней кромки пласта x_0 определяется как точка профиля, в которой значение ΔT соответствует следующему значению (рис. 14):

$$\Delta T(0) = \Delta T_{\text{макс}} + \Delta T_{\text{мин}}.$$

Формула позволяет определить начало координат, относительно которых будут вестись дальнейшие вычисления. При вычислении следует иметь в виду, что минимальное значение имеет отрицательный знак. На графике ΔT имеются две точки, удовлетворяющие этому условию. Начало координат отвечает той из них, которая находится между максимумом и минимумом.

Значение угла ε может быть получено, используя асимметрию аномалии ΔT :

$$\cos \varepsilon = \frac{\Delta T_{\max} + \Delta T_{\min}}{\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}}.$$

Знак угла ε определяют по расположению минимума и максимума аномалии. Если минимум находится в области положительных значений x , $\varepsilon > 0$, если в области отрицательных значений – $\varepsilon < 0$.

Для вычисления глубины залегания используют характерные точки аномалии ΔT :

$$h = \frac{1}{2} |x_1 - x_2| \sin \varepsilon,$$

где x_1, x_2 – абсциссы точек, в которых значения ΔT равны соответственно ΔT_{\max} и ΔT_{\min} .

Для пластовых тел малой мощности раздельное определение видимой мощности и намагниченности невозможно (эти два параметра в аналитическом выражении поля пласта находятся в произведении). Произведение Jb определяют по значению $\Delta T(0)$:

$$Jb = \frac{2\pi}{\mu_0} \Delta T(0) h \frac{\sin^2 \varphi_0}{\cos \varepsilon \sin \alpha \sin^2 I}.$$

Установите направление простирания магнитных аномалий. По карте изолиний ΔT проведите оси аномалий, сделайте предположения о причинах смещения осей аномалий.

Выделите на карте участки, где предположительно проходят разрывные нарушения.

Вычислите по двум профилям по обе стороны разрывного нарушения глубину залегания магнитного тела и сделайте предположение о характере разрывного нарушения (сдвиг, сброс и т.д.).

ЛИТЕРАТУРА

Основная литература

1. *Митрофанов, Г. М.* Обработка и интерпретация геофизических данных : учебное пособие / Г. М. Митрофанов. - 2-е изд. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. - 168 с. - ISBN 978-5-7782-3805-3. - Текст : электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/1867825> – Загл. с экрана.
2. *Набатов, В. В.* Обработка и интерпретация результатов геофизических исследований и неразрушающего контроля : учебник / В. В. Набатов, А. С. Вознесенский. - Москва: Изд. Дом НИТУ «МИСиС», 2019. - 278 с. - ISBN 978-5-907061-47-7. - Текст: электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/1222600> – Загл. с экрана.
3. *Андреев Б. А., Клушин И. Г.* Геологические истолкование гравитационных аномалий / Андреев Б.А., Клушин И.Г. Л., Недрa. 1965. 496 с.
4. Гравиразведка. Справочник геофизика – М. Недрa, 1990. 607 с.
5. *Миронов В. С.* Курс гравиразведки / Миронов В.С. Л., «Недрa». 1972. 526 с.
6. *Серкерov С.А.* Гравиразведка и магниторазведка. Основные понятия, термины, определения / Серкерov С.А. М: ООО «Недрa-Бизнесцентр». 2006. 479 с.

Дополнительная литература

1. *Егоров А.С.* Геофизические методы поисков и разведки месторождений [Электронный ресурс]: Учебное пособие/ Егоров А.С., Глазунов В.В., Сысоев А.П.— Электрон. текстовые данные.— СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2016.— 276 с. <http://www.bibliocomplectator.ru/book/?id=71693> – Загл. с экрана.
2. *Персова М.Г.* Современные компьютерные технологии [Электронный ресурс]: Конспект лекций/ Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Домников П.А.— Электрон. текстовые данные.— Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2014.— 80 с.— Режим доступа: <http://www.bibliocomplectator.ru/book/?id=45025> – Загл. с экрана.
3. Инструкция по гравиметрической разведке. – М., Недрa. 1975. 87 с.
4. *Маловичко А. К., Костицын В. И.* Гравиразведка: Учеб. для вузов / Маловичко А. К., Костицын В. И. М.: Недрa, 1992. 357 с.