

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ГЕОФИЗИКИ

**Учебная полевая практика
по гравirazведке и магниторазведке
(на полигоне Шира)**

Методическое пособие
для студентов 2 курса ГГФ НГУ

Новосибирск
2000

Пособие предназначено студентам – геофизикам и геологам-нефтяникам 2 курса геолого-геофизического факультета НГУ, проходящим полевую учебную геофизическую практику на полигоне Ши́ра в Хакасии. Практика по гравиразведке и магниторазведке входит в состав учебной “Комплексной геолого-геофизической практики” для геофизиков и “Геофизической практики” для нефтяников.

Полигон Ши́ра предоставляет хорошие возможности для практического применения геофизических методов в задачах геологического картирования и при поисках и разведке полезных ископаемых (на примере железорудного месторождения Самсон).

Цели практики:

- закрепление теоретических знаний студентов, полученных ими в лекционных курсах по структурной геологии и геологическому картированию, геофизическим методам исследований, в частности, гравиразведке, магниторазведке и электроразведке;
- приобретение навыков постановки, организации и проведения геофизических съемок;
- практическое освоение способов обработки полевых данных, ведения документации, составления отчетных материалов,
- приобретение студентами практических навыков совместного анализа геологических и геофизических данных, их обобщения и геологического истолкования в форме содержательных суждений и рекомендаций по дальнейшим исследованиям.

Составители

**к.г.-м.н. А. В. Ладынин,
А. Н. Василевский, А. А. Попова**

© Новосибирский государственный
университет, 2000

Введение

Методическое пособие предназначено студентам – геофизикам и геологам-нефтяникам 2 курса геолого-геофизического факультета НГУ, проходящим полевую учебную геофизическую практику после изучения геофизиками годового курса “Гравиразведка и магниторазведка”, а нефтяниками – семестрового курса “Геофизические методы исследований”.

Практика по гравиразведке и магниторазведке входит в состав учебной “Комплексной геолого-геофизической практики” для геофизиков и “Геофизической практики” для нефтяников. Обе практики проходят на полигоне Шира в Хакасии. Здесь студенты практически познают методы и технологию геологической съемки, поэтому и геофизические методы ориентированы в основном на задачи геологического картирования.

Программы практик геофизиков и нефтяников различны. Главное различие – в сроках: 6 недель у геофизиков и 2 недели у нефтяников. Важным является отличие в последовательности практических занятий. Нефтяники сначала проходят геолого-съемочную практику (без применения геофизических методов), а затем, имея представление о геологии района практики, выявив недостаточность лишь только геологической информации для восстановления структуры некоторых его частей и сформулировав геологические задачи геофизики, практически изучают возможности ее методов в решении задач геологического картирования. Геофизики после общего ознакомления с геологией района и изучения разреза в опорных маршрутах подробно знакомятся с геофизической аппаратурой и методикой геофизических съемок, а затем проводят геолого-съемочные маршруты для геологического картирования района с использованием высокопроизводительных геофизических методов (магниторазведки, электропрофилирования).

В геофизическую практику входит ряд задач, не связанных с геологическим картированием масштаба 1:50000. Среди них есть региональные геологические задачи, какой является определение элементов морфологии Улень-Туимского гранитного массива, детальные поисково-разведочные геологические задачи, например,

разведка железорудного месторождения Самсон, и методические геофизические задачи, например, определение плотности горных пород в пределах рельефа.

На территории полигона Шира имеется много геологических объектов, пригодных для изучения геофизическими методами в задачах поиска и разведки полезных ископаемых. Главные из них:

1) Улень-Туимский гранитный массив, к периферии которого приурочены многочисленные рудопроявления и небольшие месторождения (железо, медь, золото, вольфрам, молибден и др.), в связи с чем большое значение имеет задача изучения морфологии массива: положения его границ в плане и по глубине, выявление останцов вмещающих пород;

2) железорудное месторождение Самсон, на котором по данным магниторазведки эффективно определяются структура рудного тела и его магнитные свойства.

Учебный полигон Шира НГУ в Хакасии отличается большим разнообразием геологических объектов при относительной простоте структуры и хорошей обнаженности. Но здесь есть и сложные участки, структуру которых трудно проследить на глубину по одним только геологическим наблюдениям на поверхности. Они являются объектами для применения дистанционных методов геологического картирования с использованием данных разведочной геофизики. Методами геофизики выявляются тела, не выходящие на земную поверхность, залегающие на значительной глубине или же просто задернованные, закрытые приповерхностными наносами.

Практика по гравиразведке и магниторазведке входит в состав обеих указанных выше учебных практик. Дальнейшее изложение построено применительно к “Комплексной геолого-геофизической практике” геофизиков, но в пособии имеется необходимый материал и для студентов-нефтяников. Из-за меньшего времени практики эта группа студентов не выполняет ряд методических геофизических заданий, в том числе исследование и калибровку геофизической аппаратуры.

Программа практики геофизиков 2 курса ориентирована на следующие учебные цели.

1. Закрепление теоретических знаний, полученных в лекционных курсах “Геологические тела”, “Структурная геология”,

"Петрография и петрофизика", "Гравиразведка и магниторазведка", "Электроразведка".

2. Приобретение навыков полевой работы геологов и геофизиков при самостоятельном выполнении полевых маршрутов, постановке, организации и проведении разнообразных геофизических измерений и съемок; практическое обучение приемам регистрации и обработки полевой информации, ведения документации, составления отчетных материалов - карт, графиков, диаграмм, таблиц, составления текста отчета о полевых геолого-геофизических исследованиях.

3. Получение опыта анализа геологических и комплекса геофизических данных, их обобщения, интерпретации с применением персональных компьютеров, геологического истолкования данных геофизики в форме содержательных суждений и рекомендаций по дальнейшим исследованиям, защиты своих выводов и рекомендаций перед оппонентами (преподавателями).

4. Приобретение опыта организации полевой работы и жизни в полевых условиях, выполнения правил техники безопасности, умения находить общий язык в сотрудничестве с коллегами в маршрутах, при камеральной обработке материалов, а также в хозяйственных работах, культурном досуге и спортивных мероприятиях.

Для расширения научной, учебно-методической и технической базы комплексной геолого-геофизической практики на полигоне Ши́ра регулярно ведутся поиски новых объектов изучения, наиболее информативных в плане достижения учебных целей практики. По наиболее важным объектам формируются базы данных для использования следующими поколениями студентов. По мере улучшения аппаратурной базы возникает возможность постановки новых задач на известных геологических объектах и новых видов геофизических наблюдений и съемок с разработкой отвечающих этим задачам методик полевых измерений, обработки и интерпретации геофизических данных.

В общую программу практики на полигоне Ши́ра входят:

1. геологическая съемка полигона в масштабе 1:50000;
2. комплексные геофизические наблюдения и съемки;

3. геологическое истолкование геофизических данных.

Программу геологической части практики составляют:

а) опорные маршруты для описания разреза; в них проводятся попутные измерения магнитной восприимчивости и естественной радиоактивности пород, отбираются образцы для лабораторных измерений плотности и магнитной восприимчивости пород;

б) картировочные маршруты, в которых студенты выявляют положение в плане геологических границ (свит, подсвит, интрузивных комплексов, разломов); в необходимых случаях помимо геологических наблюдений и отбора образцов в маршрутах выполняются картировочные геофизические измерения, в основном модульная магнитная съемка.

В результате геологической съемки составляются:

- сводная стратиграфическая колонка полигона Шира, на которой дается литологическая и хроностратиграфическая характеристика выделенных подсвит, свит и более крупных породных комплексов, включая магматические комплексы (гранитоиды, тела долеритов), отражается взаимоотношение свит, наличие стратиграфических и тектонических несогласий, показываются значения мощностей выделенных стратиграфических единиц; колонка содержит геофизические характеристики пород: магнитную восприимчивость и естественную радиоактивность по данным измерений в опорных маршрутах, справочные данные о плотности и удельном электрическом сопротивлении, уточненные по результатам геофизических работ;

- схема корреляции геологических комплексов на картируемой территории полигона, степень изменчивости в плане комплексов пород по литологическому составу, мощности, дающая основание судить о фациальных обстановках осадконакопления;

- карта фактического материала, полученного в маршрутах, с указанием положения маршрутов, точек наблюдений, значений азимута простирания и углов падения слоев, выделением участков границ, картированных по аэрофотоснимкам;

- геологическая карта территории полигона масштаба 1:50000, сопровождаемая серией разрезов, дающих представление о взаимоотношении картируемых геологических тел на глубине;

- тектоническая карта района в масштабе 1:50000 с выделением двух структурных этажей: кембрийского и девонского, разделенных значительным несогласием залегания слоев пород, перерывом в осадконакоплении, с резко различными структурными планами и уровнем метаморфизма; девонский этаж подразделяется на два подэтажа, между которыми имеется угловое несогласие и которые отличаются уровнем дифференциации структур и магматизмом (нижний подэтаж содержит долеритовые тела, в верхнем их не обнаружено); выявляется структура границ, разделяющих этажи и подэтажи в форме карт в стратоизогипсах, выделяются разломы с определением их кинематических характеристик.

Геологическая часть отчета включает разделы:

- введение - задачи практики, ее организация, доля участия каждого студента в составлении отчета;
- стратиграфия;
- тектоника;
- полезные ископаемые;
- обоснование к постановке геофизических работ, выбор участков и оптимального набора геофизических методов.

В комплекс геофизических исследований для решения задач геологического картирования на полигоне Шира входят:

- исследования, регулировка и калибровка геофизической аппаратуры;
- профильная гравиметрическая съемка масштаба 1:200000 для картирования гранитного массива и определения элементов его морфологии;
- площадные и профильные магнитные съемки разных масштабов (1:500 – 1:50000) для картирования магматических (долериты, габброиды) и осадочно-вулканогенных комплексов, разломов, поисков рудных залежей (с оценкой параметров тел) на примере магнетитового месторождения Самсон;
- профильные электроразведочные съемки в масштабах 1:1000 или 1:5000 для картирования осадочных и осадочно-вулканогенных комплексов, а также площадная съемка на месторождении Самсон для геологического картирования участка;

- радиометрическая съемка на участках выходов пород с повышенной радиоактивностью и на месторождении Самсон с определением природы радиоактивности комплексом методов полевой радиометрии и радиоспектрометрии;

- векторные магнитные измерения в пункте векового хода (ПВХ) Шира и на месторождении Самсон с помощью комплектов феррозондовых измерителей склонения и наклона и протонных (или квантовых) T -магнитометров.

В рамках практики решаются некоторые специальные и методические геофизические задачи:

1. определение плотности горных пород гидростатическим взвешиванием образцов и оценка средней плотности пород в пределах рельефа гравиметрическим методом;

2. изучение магнитных свойств горных пород района по образцам и в обнажениях с помощью каппаметров КТ-3;

3. изучение тонкой магнитной неоднородности осадочных пород верхнего структурного яруса (в частности, над древними могильниками);

4. выявление разломов по магнитным аномалиям;

5. изучение природы радиоактивности локальных объектов (озеро Белё, озеро Шунет, гора Железный Самсон) и содержания радиоактивных элементов в породах методом радиоспектрометрии;

6. параметрические измерения удельного сопротивления горных пород методом дипольного электропрофилеирования.

При решении каждой задачи студенты узнают:

а) принципы и способы постановки геофизических задач;

б) обоснование методики полевых работ;

в) основы компьютерной обработки геофизических данных;

г) принципы геологического истолкования результатов.

В каждом из перечисленных видов работ выполняются полевые измерения, обработка полученных данных на персональных компьютерах, интерпретация для простых физических моделей среды, дается геологическое истолкование результатов по комплексу геофизических и геологических данных, оценивается эффективность геофизических методов в решении поставленных задач.

Гравиметрическая аппаратура

В практике на полигоне Шира используются:

- кварцевые астазированные гравиметры типа ГАК: ГНУ-К2, а также ГНУ-КВ, ГНУ-КС, ГАК-7Т, ГАК-4В, ГР-К2 «Дельта» выпуска 1962–1982 гг.);
- установка эталонирования гравиметров полевая УЭГП-1 (см. Краткое описание и инструкцию по эксплуатации, 1969).

Гравиметры типа ГАК

Кварцевые астазированные гравиметры являются наиболее распространенными гравиметрами для сухопутных съемок во всем мире. В нашей стране подобные приборы (типа ГАК) были разработаны и внедрены в геофизическую практику в конце 50-х годов К. Е. Веселовым (ВНИИГеофизика, Москва). Первой широко известной моделью этого типа были гравиметры ГАК-3М. Затем выпускались несколько моделей гравиметров (ГАК-4В, ГР-К2, ГАК-7Т, КВГ-1М, ГНУ-КС, ГНУ-КВ, ГНУ-К2 и др.), среди которых были приборы повышенной точности (в аббревиатурах есть буквы «В», «Т») и гравиметры среднего класса.

Устройство, принцип действия

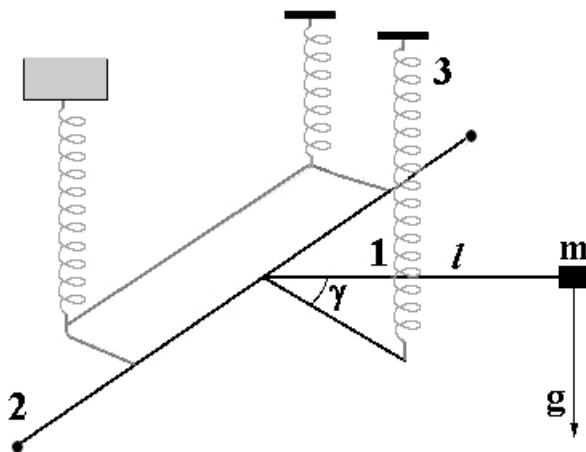
Гравиметры ГАК представляют собой упругие системы типа пружинных весов для взвешивания постоянной массы в переменном гравитационном поле. Это статические гравиметры с вращением рычага с пробной массой вокруг упругой крутильной оси. В их конструкции отражается компромисс противоречивых требований: высокой точности измерений, портативности прибора, простоты измерений, технологичности его изготовления.

Основой чувствительной системы является горизонтальный маятник – рычаг на горизонтальной нити подвеса, крутильный момент которой определяется жесткостью кварца и начальным углом закручивания. Момент силы тяжести mg_l , действующий на рычаг 1 (рис. 1), сравнивается с суммарным моментом упругих сил: горизонтальной нити подвеса 2, главной пружины 3, измерительной

4 и диапазонной 5 пружин, а также системы термокомпенсации (на схеме не показана). *Гравиметр является относительным прибором*, так как измерить суммарный момент перечисленных упругих сил невозможно.

Рис.1. Схема упругой системы гравиметра типа ГАК

Если все параметры системы остаются неизменными, этот момент, то есть наклон α рычага к горизонту, контролируется



микрометром измерительной пружины. Для этого есть *индикатор малых перемещений*.

Используется *компенсационный способ измерения*: изменение силы тяжести компенсируется натяжением измерительной пружины, которое передается рычагу через кручение нити подвеса, а мерой изменения силы тяжести (от точки к точке или в одной точке со временем) являются изменения отсчета по микрометру. Чтобы получить результат в единицах гравитационного ускорения, необходимо *эталонирование гравиметра*.

Реально параметры системы непостоянны: линейные размеры элементов, упругие свойства кварца зависят от температуры, эффективная масса рычага – от давления воздуха. Свойства

системы к тому же нестабильны во времени. *Влияние мешающих факторов* устраняется конструктивно – введением в систему компенсирующих элементов и/или соответствующей методикой измерений.

Точность измерений этими приборами зависит от чувствительности системы, жесткости измерительной пружины, точности фиксирования нулевого положения рычага ($\alpha = 0$) индикатором малых перемещений, а также от качества учета мешающих факторов.

Повышение чувствительности dx/dg достигается путем *астазирования* упругой системы гравиметра. В этих приборах применено упругое астазирование: крепление главной пружины под фиксированным углом к рычагу позволяет моменту главной пружины меняться так, что при изменении силы тяжести рычаг от нулевого положения отклоняется на больший угол, чем без системы астазирования.

Жесткость измерительной пружины определяет *цену деления* микрометра гравиметра. При определенной чувствительности системы, заданной в параметрах конструкции индикатора малых перемещений и микрометра, большая жесткость ведет к снижению точности, а малая – к увеличению длины пружины и габаритов прибора или уменьшению диапазона измеряемых значений силы тяжести. Дилемма разрешается путем присоединения к одной измерительной рамке двух пружин: *измерительной* с малой жесткостью и жесткой *диапазонной пружины*, обычно не имеющей микрометра.

Сила тяжести – вектор, ее величину надо измерять, совмещая ось чувствительности прибора с ее направлением. Если угол между ними β , то вместо g на прибор действует ее проекция на ось чувствительности $g\cos\beta$. Их разность равна $\Delta g = g(\cos\beta - 1) = -g\beta^2/2$. Поэтому перед измерением прибор нивелируют, для чего на верхней плате гравиметра установлены уровни: один в направлении рычага (продольный), другой в направлении оси подвеса (поперечный).

Чувствительный элемент гравиметра иногда называют маятником, так как он имеет период T собственных колебаний,

зависящий от чувствительности (T^2 пропорционально $d\alpha/dg$). Но в процессе измерения отсчет надо производить при отсутствии колебаний рычага. Сами по себе они затухают медленно, приходится прекращать колебания принудительно, смещая микрометром положение равновесия рычага в сторону его отклонения. Чувствительность зависит от наклона рычага к горизонту. Вид зависимости обусловлен способом изготовления главной пружины. Известны два вида: симметричная кривая – для американских гравиметров, имеющих главную пружину с нулевой начальной длиной, несимметричная – гравиметров типа ГАК, имеющих главную пружину с отрицательной начальной длиной. Для гравиметров типа ГАК характерно наличие критического угла β_k , за которым следует область *бесконечной чувствительности*, где движение рычага апериодическое, и измерения невозможны: рычаг, не фиксируясь в положении равновесия, заваливается на ограничитель.

Главным фактором помех является влияние изменений температуры на линейные размеры элементов упругой системы и упругость материала. Плавленный кварц выбран в качестве материала упругой системы ввиду малых значений коэффициента линейного расширения. Но термоупругий коэффициент его довольно велик. Для уменьшения эффектов температуры в гравиметрах имеется *система термокомпенсации*. Ее параметры подбираются так, чтобы свести к минимуму влияние температуры на показания гравиметра. Основой этой системы является медная нить, линейное расширение которой компенсирует действие температуры на кварцевую систему. Но это достигается только в условиях стационарного температурного режима. Зависимость влияния температуры от скорости ее изменения связана с тем, что медная нить термокомпенсатора из-за большей теплопроводности ее материала быстрее приходит в тепловое равновесие со средой, чем кварцевая система. Для стабилизации температурного режима система помещена в сосуд Дюара. Это уменьшает амплитуду суточных колебаний температуры, срезает резкие изменения и позволяет системе термокомпенсации работать эффективнее. Полностью исключить влияние температуры таким способом не удастся, что является главной причиной *смещения нуля-пункта*

гравиметров. Лучшим решением проблемы было бы активное термостатирование прибора (некоторые модели кварцевых гравиметров и все металлические гравиметры имеют электрические термостаты). Но это приводит к увеличению массы прибора и потребности в дополнительном электропитании.

Другое явление – *зависимость цены деления от температуры*. Для ее учета при эталонировании гравиметра определяют *температурный коэффициент цены деления*.

Для исключения влияния давления из корпуса системы откачивают воздух. Но герметизация обычно не идеальная, постепенно давление в корпусе повышается, что приводит к *изменению цены деления гравиметра во времени* (влияние изменения объема корпуса системы, плотности воздуха в ней и эффективной массы рычага при перемещениях сильфона микрометра). Это приводит к необходимости регулярно контролировать цену деления, поэтому обычно эталонирование проводят ежегодно перед полевым сезоном.

Смещение нуль-пункта является наиболее крупным недостатком всех статических гравиметров. У гравиметров типа ГАК оно особенно велико и нерегулярно (нелинейно во времени). Кроме температурных влияний, оно вызвано нестабильностью свойств материала. Термостатирование гравиметров уменьшает его, но полностью не исключает. Борьба с ним приходится методическими средствами – повторными наблюдениями в отдельных пунктах или включением в число точек наблюдений опорных пунктов с известными значениями силы тяжести.

Технические характеристики гравиметров

Характеристики гравиметров существенно влияют на методику и технику полевых измерений. Основными из них являются:

- число оборотов счетчика микрометра;
- цена деления, ее зависимость от температуры;
- чувствительность упругой системы;
- характерная скорость, нелинейность смещения нуль-пункта.

Число оборотов счетчика микрометра и цена деления определяют *диапазон гравиметра* – величину приращения силы

тяжести, которую можно измерить, не меняя натяжение диапазонной пружины. Большинство гравиметров имеют счетчики на 15 оборотов микрометра. Диапазон гравиметра рассчитывают, умножая цену деления на 14 (так как смещение нуль-пункта не позволяет использовать полный диапазон).

Цена деления в конкретном рейсе определяется по средней температуре гравиметра T_{cp} :

$$C(T_{cp}) = C_0 + \alpha C_0. \quad (1)$$

В таблице 1 даны значения цены деления ряда гравиметров.

Таблица 1. Масштабные коэффициенты гравиметров

Гравиметр (марка, номер)	Год выпуска	Цена деления C_0 , мГл/дел.	Температурная поправка αC_0 , мГл/дел·град.
ГНУ-КВ № 006	1977	- 4,980	- 0,0006
ГНУ-КС № 050	1981	- 6,906	- 0,0014
ГНУ-КВ № 073	1982	- 6,880	- 0,0011
ГНУ-К2 № 232	1976	- 6,307	- 0,0016
ГНУ-К2 № 553	1979	- 7,684	- 0,0015
ГНУ-К2 № 568	1979	- 5,994	- 0,0010
ГНУ-К2 № 1050	1987	- 8,147	- 0,0018

Как правило, температура за 4–6 часов рейса изменяется не более чем на 2–3°, среднее ее значение надо знать с такой же погрешностью.

Нелинейность шкалы микрометра $f_g(n)$ определяют таким образом, чтобы учитывать при измерении приращений силы тяжести $\Delta g_{1,2}$ (между пунктами 1 и 2) в виде:

$$\Delta g_{1,2} = C(T) (n_2 - n_1) + f_g(n_2) - f_g(n_1). \quad (2)$$

У наших гравиметров значения $f_g(n)$ в основной части шкалы, как правило, невелики, порядка $(2 - 5) \cdot 10^{-2}$ мГл. Некоторые приборы имеют более значительную нелинейность на краях шкалы, поэтому по одному обороту микрометра на краях обычно не используют.

Так как цена деления со временем изменяется, и скорость этого

изменения у разных гравиметров разная (от 0 до величин dC/C_0dt порядка 10^{-3} в год), используются значения C_0 , полученные по данным последнего эталонирования перед полевым сезоном. Значения αC_0 , как показывает опыт, сохраняются постоянными в пределах погрешности определения.

Чувствительность гравиметра $d\alpha/dg$ (α – угол наклона рычага упругой системы) в практических целях удобнее определять как dn/dg (n – отсчет по окулярной шкале). Обычные значения чувствительности – 4–6 делений шкалы на миллигал обеспечивают отсчетную точность гравиметра порядка 0,01 мГл (2–3 малых деления шкалы микрометра). Поскольку чувствительность зависит от наклона рычага гравиметра, ее можно повышать при выполнении особо точных измерений. Для этого в качестве нулевых на окулярной шкале используют деления (штрихи), соответствующие наклону рычага с пробной массой выше горизонта нити подвеса (аналогично схеме астазирования массой у гравиметров ГАГ).

Скорость смещения нуль-пункта гравиметров зависит от стабильности материала упругой системы, качества температурной изоляции и термокомпенсации, от температурного и механического режима прибора при подготовке к рейсу и во время рейса. В смещении нуля гравиметров можно выделить три составляющие: регулярный тренд из-за медленного изменения упругих свойств системы, суточную периодическую температурную компоненту и нерегулярную составляющую вследствие изменений температуры и режима вибраций, а также условий хранения приборов перед полевыми наблюдениями. Скорость регулярного тренда различна: обычно ее значения (по модулю) составляют 0–1 мГл/сутки, но имеются приборы и с довольно большим регулярным трендом нуль-пункта. Например, у гравиметра ГАК-4В № 28 почти 30 лет его средняя скорость составляет около 0,3 мГл/час. Скорости суточного смещения нуль-пункта варьируют в широких пределах – и у разных гравиметров, и у одного прибора – в зависимости от амплитуды суточных изменений температуры, температурных условий рейса и режима хранения прибора перед рейсом: от 0 до 2 мГл/час. Тренд смещения нуль-пункта в отличие от нерегулярной компоненты смещения практически линеен во времени. Обычно нелинейность смещения нуль-пункта более значительна в начале рейса (рис. 2).

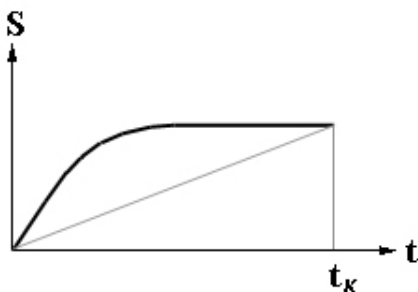


Рис.2. Типичная кривая смещения нуль-пункта гравиметра.

Источники погрешностей измерений

Как и во многих других измерениях, в данных гравиметрии имеются *случайные* и *систематические* погрешности.

Случайные погрешности как следствие большого числа трудно определяемых факторов невозможно выявить или исключить из результатов измерений. Их можно только оценить статистическими методами. При измерениях силы тяжести гравиметрами типа ГАК наибольший вклад в случайные погрешности вносят следующие факторы: нерегулярность смещения нуль-пункта, влияние тряски на неидеально жесткие соединения частей конструкции прибора (оптической системы, измерительного и диапазонного устройств), нелинейность шкалы микрометра, неточная нивелировка гравиметра, ограниченные чувствительность упругой системы и разрешающая способность оптической системы.

Источники систематических погрешностей измерений, напротив, можно и нужно исследовать с целью исключения таких погрешностей. Из них наибольшее значение имеют:

а) *регулярное и суточное смещение нуль-пункта гравиметров.*

Для его исключения в каждом рейсе выполняются повторные измерения или измерения на опорных пунктах с известными значениями силы тяжести. Схема повторных измерений или количество и размещение (по времени) в рейсе опорных пунктов определяются, исходя из требований к точности значений силы тяжести, предъявляемых масштабом съемки. Уменьшение погреш-

ностей, связанных со смещением нуль-пункта, достигается подбором температурного режима хранения приборов перед рейсами;

б) *погрешности определения цены деления гравиметра*. Для их исключения гравиметры эталонируют с определением зависимости цены деления от температуры и оценкой регулярной части нелинейности шкалы, особенно на ее краях;

в) *нарушения установки уровней* относительно основной плоскости упругой системы. Эти погрешности уменьшаются путем регулировки уровней с условием минимальной зависимости отсчетов от наклона.

Достоинства и недостатки гравиметров типа ГАК

Широкое применение гравиметров типа ГАК для наземных съемок в нашей стране (и аналогичных приборов в других странах) связано с тем, что они портативны, не требовательны к внешним условиям (температура, влажность), легки в операционном отношении: измерения не занимают много времени, не требуется высокая квалификация персонала для измерений и первичной обработки данных.

Недостатками этих приборов являются относительный характер данных измерений, необходимость эталонирования, зависимость цены деления от температуры и нестабильность ее во времени, значительное и нелинейное смещение нуль-пункта, малый диапазон микрометра, с чем связана необходимость частой перестройки диапазона при измерениях на больших площадях или с большими различиями высот пунктов.

Регулировка и эталонирование гравиметров

Подготовка гравиметров к полевым измерениям включает:

- осмотр и профилактический ремонт;
- проверку установки и регулировку уровней;
- контроль качества работы;
- эталонирование (определение цены деления).

При осмотре выявляют неисправности установочных винтов, дефекты микрометра, термометра, разрушение сосуда Дюара,

нарушения комплектации. Профилактике подлежат микрометр, установочные винты, регулировочные винты уровней, осветитель и окуляр гравиметра. Термометр выбирают соответственно диапазону температур во время полевых наблюдений.

Регулировка уровней.

Уровни гравиметра расположены на верхней плате, а горизонтальной во время измерения должна быть основная плоскость системы: плоскость «рычаг – нить подвеса». Ее наклон приводит к кажущемуся уменьшению силы тяжести: $\Delta g = -g\beta^2/2$. Это парабола, вершина которой должна соответствовать нулевому (горизонтальному) положению уровней. Если это не так, то малые погрешности установки гравиметра по уровням будут приводить к заметным погрешностям измерений (рис. 3). Смысл регулировки уровней состоит в том, чтобы плоскость уровней была параллельна основной плоскости упругой системы. Тогда после нивелировки гравиметра по уровням ось чувствительности будет вертикальна.

Вначале проверяем установку поперечного уровня, наклон вдоль которого не меняет чувствительности гравиметра. По продольному уровню нивелировка выполняется ближним к нему установочным винтом, а по поперечному – двумя другими, которые надо вращать на равные углы в противоположных направлениях.

Уровни приводим в нулевое положение, берем отсчет S_0 . Затем последовательно наклоняем прибор на все большие углы, но так, чтобы при этом не смещался продольный уровень. Для этого поворачиваем установочные винты уровня на 1 деление (0,1 оборота винта) каждый в противоположные стороны от нулевого положения, берем отсчет S_1 . Увеличиваем наклон на 1 деление, отсчет S_2 , и еще раз, отсчет S_3 . Таким образом, на ветви параболы будет 3 точки. Возвращаем прибор в нулевое положение уровней, повторяем отсчет S_0' . Он немного отличается от S_0 из-за погрешностей измерений, а главное – вследствие смещения нуля-пункта. Это и другие аналогичные повторные измерения нужны именно для устранения эффекта смещения нуля-пункта. Затем наклоняем прибор по этому же уровню в другую сторону, получаем серию отсчетов S_1, S_2, S_3 и снова S_0'' .

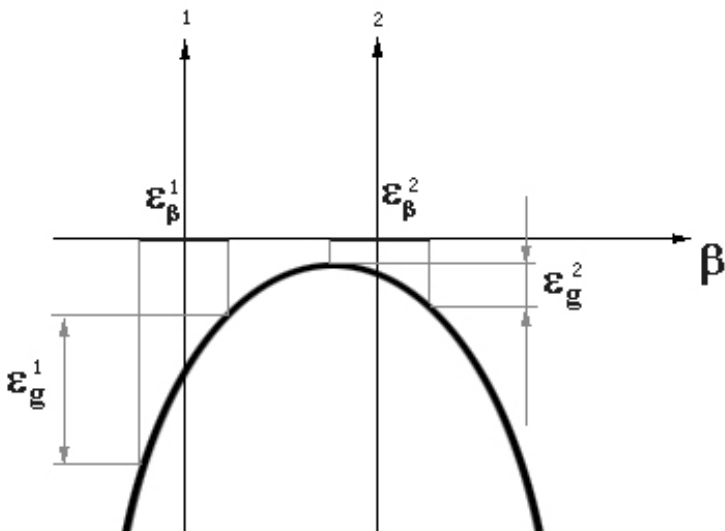


Рис. 3. Ошибки измерений из-за неточной установки уровней.

Если нарушение установки уровней невелико, парабола будет почти симметричной относительно нуля уровня, и для уточнения установки достаточно по три точки на каждой ее ветви. Если же нарушение большое, может понадобиться разное число точек на каждой ветви. Ниже приведен пример записи данных измерений при проверке уровней (таблица 2). Рис. 4 иллюстрирует зависимость отсчетов от наклона по этим данным.

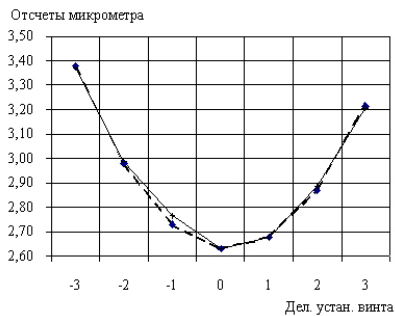
Таблица 2. Пример порядка измерений и результатов проверки уровней гравиметра

Поперечный уровень		Продольный уровень	
Наклон	Отсчеты S_i	Наклон	Отсчеты S_i
0	2,637	0	2,690
- 1	2,726	- 1	2,772
- 2	2,995	- 2	2,906
- 3	3,381	0	2,675

0	2,625	1	2,643
1	2,676	2	2,654
2	2,881	3	2,705
3	3,203	4	2,801
0	2,620	0	2,685



а) продольный уровень



б) поперечный уровень

Рис. 4. Пример результатов проверки уровней гравиметра.

Обработка ведется на РС в электронных таблицах Microsoft Excel или Quattro Pro. Если уровень сбит на величину меньше 0,5 деления установочного винта, как в случае поперечного уровня (0,19 деления), регулировать не требуется. Если отклонение больше, как у продольного уровня (1,37 деления), уровень ставят в положение, соответствующее горизонту системы (вершине параболы), и регулируемыми винтами уровня приводят его пузырек в нулевое положение.

Проверка стабильности измерений.

Нестабильность измерений обычно вызвана смещением нуля. Для ее выявления сначала проводят серию измерений, не сдвигая гравиметр с места. Для гравиметров типа ГАК нормальной считается сходимостью отсчетов в пределах $3-5 \cdot 10^{-3}$ (оборот

микрометра). Если разброс отсчетов больше, но случаен, это следствие неопытности оператора. Регулярное изменение отсчетов в одну сторону говорит о смещении нуль-пункта. Если его скорость более 0,01 дел./мин., гравиметр не пригоден для измерений.

Другая проверка нуль-пункта производится при перемещениях его от точки к точке в температурных и транспортных условиях, близких к условиям обычного полевого рейса. При этом выявляется характер нелинейности смещения нуль-пункта, что необходимо для выбора методики полевых наблюдений. Проверка выполняется путем имитации *опорного рейса*. Между двумя точками (1 и 2) измеряется приращение силы тяжести по схеме повторных измерений типа тройной петли – последовательность наблюдений: 1-2-1-2-1-2-1. Эта схема позволяет оценить смещение нуль-пункта, описываемое кривой 3-го порядка.

Если обнаружена нестабильность отсчетов при слабых постукиваниях установочными винтами прибора о грунт, это чаще всего означает неудовлетворительное крепление частей оптической системы, и в таком случае гравиметр требует ремонта.

Эталонирование гравиметров.

Определение цены деления гравиметров выполняется посредством измерений известных (эталонных) значений приращения силы тяжести. Эталонные приращения могут быть определены разными способами. Рассмотрим два метода эталонирования: на полигонах и наклонном.

Эталонные полигоны созданы везде, где есть организации, ведущие гравиметрические работы. Полигон представляет собой систему из нескольких пунктов, расположенных в плане и по высоте так, чтобы приращения силы тяжести были достаточно велики (порядка 100 мГл), а время проезда между пунктами небольшим.

На участке практики в Шира имеется контрольный гравиметрический базис: два пункта (1 и 2) на расстоянии 7 км по шоссе Шира – Новосёлово с приращением силы тяжести между ними $34,63 \pm 0,02$ мГл. Это позволяет определять цену деления с относительной погрешностью около 10^{-4} . Эталонирование на поли-

гоне дает возможность одновременно исследовать несколько гравиметров. Однако фиксированные значения эталонных приращений не позволяют надежно оценить нелинейность шкалы гравиметра.

Эталонировочный рейс выполняется по схеме тройной петли (1-2-1-2-1-2-1), чтобы надежно исключить влияние смещения нуля-пункта гравиметров. Одновременно в рейсе эталонируются 5–10 гравиметров соответственно числу студентов в группе. В каждом измерении фиксируются время измерения, температура прибора и отсчет по микрометру S_{ji} ; j - номер точки, i – номер измерения на ней. Обработка ведется в электронных таблицах Excel или Quattro по программе, которая восстанавливает смещения нуля-пункта по всем повторным наблюдениям. Цена деления определяется по формуле $C = \Delta g / \Delta S$, где $\Delta g = 34,63$ мГл, ΔS – разность отсчетов на точках 1 и 2 после исключения смещения нуля-пункта. Полученное значение цены деления относится к средней температуре гравиметра во время рейса.

Эталонирование наклоном выполняется в специальных установках с теодолитным устройством, позволяющим с необходимой точностью измерять углы наклона калибруемого гравиметра. В нашем распоряжении имеется установка для эталонирования гравиметров в полевых условиях УЭП-1, имеющая, как и гравиметр ГАГ-2, вертикальный круг высокоточного оптического теодолита ОТ-02 с точностью измерения углов 0,2". Она оборудована двухступенчатым электрическим термостатом для калибруемого гравиметра, что позволяет определять температурную зависимость цены деления и повышает точность измерений за счет стабилизации нуля-пункта гравиметра. Возможность измерения наклоном любого значения приращения позволяет детально калибровать шкалу гравиметра, а не только определять постоянную часть цены деления. У этого метода эталонирования есть недостаток: в установку помещается только один гравиметр. Но время на одно измерение цены деления по простейшей схеме без оценки нелинейности шкалы составляет 5–7 минут, тогда как на полигоне для этого нужно порядка 2 часов.

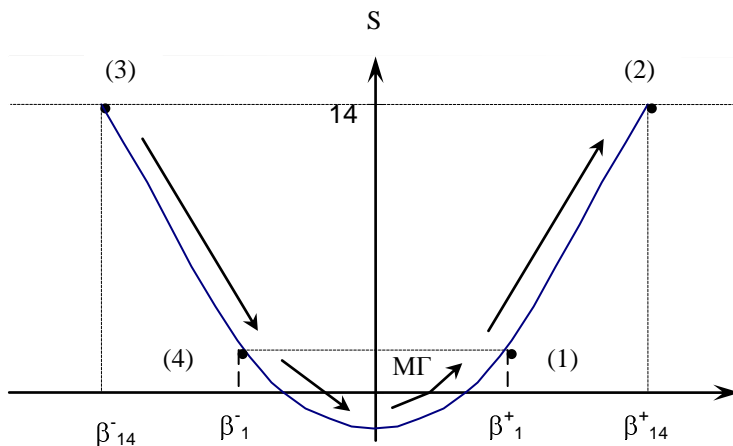


Рис.5. Схема измерений при эталонировании гравиметра наклоном в УЭГП-1.

Схема измерений при определении цены деления в предположении ее линейности по всей шкале иллюстрируется рис. 5 и примером приема эталонирования (табл. 3).

В скобках после значения углов наклона указан порядковый номер отсчета (см. рис. 5). Такая схема измерений позволяет автоматически исключать смещение нуля-пункта, если оно линейно. В нашей установке гравиметр калибруется без вибраций, при почти постоянной температуре, и это условие выполняется.

**Таблица 3. Прием эталонирования гравиметра
ГНУ-К2 №357
в установке УЭГП-1 №6 с термостатом ТЭГ-3**

23 июня 1999 г., $T = 31,5^{\circ}\text{C}$

Оператор А. А. Попова

Место горизонта, МГ	52°46'44,7"	
Отсчеты микрометра	Угол наклона β^+	Угол наклона β^-
1	53°14'37,8" (1)	52°19'27,7" (4)

4	53°38'52,7" (2)	51°54'35,4" (3)
---	-----------------	-----------------

Обработка данных включает:

- вычисление места горизонта по каждому отсчету микрометра ($MГ_0$ и $MГ_{14}$) и сравнение их с $MГ$. $MГ_j = (\beta_j^+ + \beta_j^-)/2$, по данным табл. 3 $MГ_0 = 52^\circ 47' 02,7''$, $MГ_{14} = 52^\circ 46' 44,0''$. Различие может быть и больше при значительном и нелинейном смещении нуль-пункта или при неточной регулировке уровней гравиметра и установки эталонирования. Это критерий качества приема эталонирования;

- вычисление угла наклона для каждого отсчета (β_0 и β_{14}) и значений Δg по формуле $\Delta g = -g\beta^2/2$. $\beta_j = (\beta_j^+ - \beta_j^-)/2$. В нашем случае $\beta_0 = 0^\circ 27' 35,0''$ и $\Delta g_0 = -31,59$ мГл, $\beta_{14} = 0^\circ 52' 08,6''$ и $\Delta g_{14} = -112,87$ мГл;

- вычисление цены деления по формуле $C = \Delta g/\Delta S$, где $\Delta g = (\Delta g_{14} - \Delta g_0)$, а ΔS – разность отсчетов. Имеем $C = -5,806$ мГл/дел. Это значение цены деления соответствует температуре $31,5^\circ\text{C}$.

Магнитная аппаратура

В геофизической практике на полигоне Ши́ра используется различная магнитная аппаратура: измерители магнитной восприимчивости горных пород (каппаметры КТ-3 и КТ-5 чешского производства), оптико-механические (торсионные) магнитометры М-27 и М-27М, протонные магнитометры ММП-203 и квантовые магнитометры М-33 и М-60, феррозондовые теодолиты – измерители склонения и наклона. Многие из этих приборов описаны в учебниках, имеются технические инструкции по эксплуатации, их подробная характеристика в этом пособии не приводится. Основное внимание уделено важным для методики и техники полевых измерений особенностям конструкции и принципа действия приборов, их достоинствам и недостаткам в конкретных видах магнитных съемок, способам необходимых юстировок и калибровок.

Каппаметр

Каппаметром измеряется магнитная восприимчивость горных пород в образцах и обнажениях. Его действие основано на зависимости магнитного потока катушки с переменным током, создающим магнитное поле с амплитудой порядка земного поля, от магнитной восприимчивости среды внутри и в ближайшей окрестности катушки. Каппаметры КТ-3 и КТ-5 различаются органами регистрации данных измерений. У КТ-3 это шкала с визуальным способом отсчета, у КТ-5 – цифровая регистрация. На рис. 6 показано расположение индикаторной (А) и измерительной (В) шкал и ручек управления (1, 2, 3) каппаметром КТ-3.

Ручка 1 служит для включения прибора, проверки пригодности элементов питания и выбора масштаба измерительной шкалы. Поворотом ручки из положения «выключено» (OFF) в положение СЧЕСК включается проверка питания: отклонение стрелки индикаторной шкалы вправо на черную полосу означает пригодность элементов питания.

Поворот дальше по часовой стрелке включает последовательно разные цены деления измерительной шкалы: 0,2 или 1 или 5 (в единицах 10^{-3} СИ).

Обычно пользуются удобной шкалой «1». Без измеряемого образца ручкой 2 устанавливаем стрелку индикаторной шкалы на 0, после того как ручкой 3 на измерительной шкале установлен отсчет 0. Когда к датчику прижат измеряемый образец (или датчик поднесен к обнажению), стрелка индикаторной шкалы отклоняется вправо (для пара- и ферромагнетиков). Ручкой 3 приводим стрелку к нулю и по измерительной шкале считываем значение магнитной восприимчивости образца.

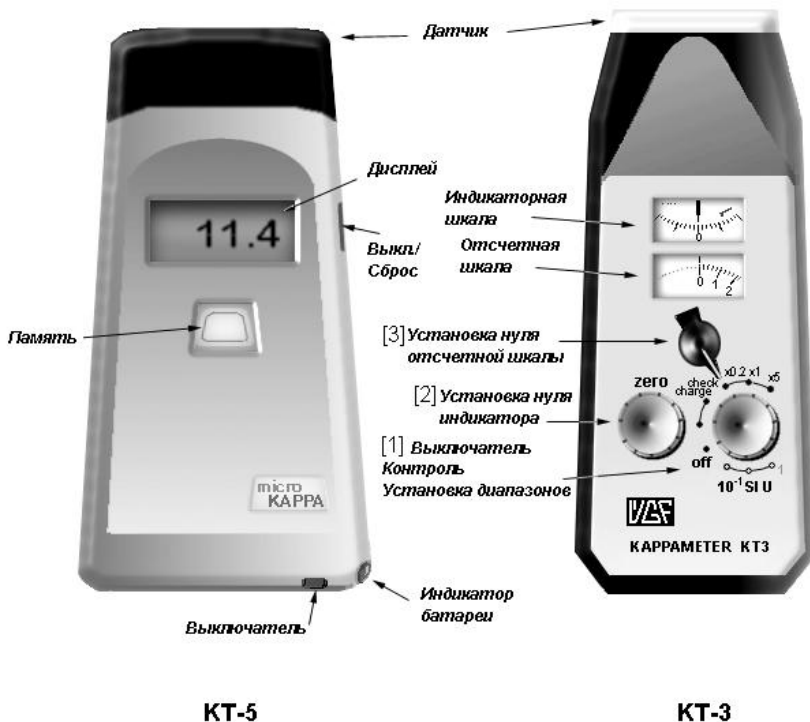


Рис. 6. Вид панелей каппаметров КТ-3 и КТ-5.

Каппаметр удобен в обращении, работа с ним не требует высокой квалификации оператора и не занимает много времени, поэтому он может быть использован в опорных и картировочных геологических маршрутах, а также в геофизических (как правило, параллельно с магнитной съемкой).

Цифровой каппаметр КТ-5 еще проще в работе: не требуется установки нуля шкалы, имеется автоматический выбор диапазона измерений, отсчет (4 знака) выдается на жидкокристаллический дисплей, чувствительность $1 \cdot 10^{-5}$ единиц СИ, есть память на данные 12 измерений.

Протонный магнитометр

Протонный магнитометр МПП-203 работает на основе эффекта Лармора ($\omega = \gamma_p H$): поляризация магнитных моментов протонов по направлению измеряемого поля H (после их отклонения поляризующим полем) происходит посредством прецессии вектора магнитного момента вокруг этого направления с частотой ω , вектор которой направлен по полю и пропорционален его напряженности H . Коэффициент пропорциональности – гиромагнитное отношение γ_p , атомная константа, известная с высокой точностью. Поэтому измерения являются абсолютными. Результат выдается в цифровом виде в единицах магнитной индукции (магнитная проницаемость среды $\mu = 1$), что есть величина модуля вектора полной индукции земного поля T , направление его не фиксируется.

Магнитометр имеет два блока: магниточувствительный (МЧБ) и измерительный (ИБ), соединенные кабелем. В МЧБ размещен датчик – цилиндрический сосуд с протонсодержащей жидкостью и две катушки, поляризующая и измерительная. Цикл измерения включает в себя:

- подачу в поляризующую катушку импульса тока, отклоняющего магнитные моменты протонов от направления измеряемого поля;
- выключение поляризующего поля и формирование сигнала прецессии большим ансамблем частиц в рабочем объеме;
- подсчет числа периодов прецессии электронным частотомером;
- формирование и выдачу результата на цифровое табло в единицах магнитной индукции.

Прецессия заряженной частицы (протона) создает переменное электромагнитное поле. Измеряется его частота. Длина сигнала прецессии около 2 с, со временем ее амплитуда экспоненциально уменьшается. Время подсчета периодов прецессии равно 0,367 с, а всего цикла измерения около 3 с.

Измерительная схема построена так, что она обнуляет табло, если сигнал прецессии недостаточно интенсивен для измерения поля с необходимой точностью (± 2 нТл).

Интенсивность сигнала прецессии понижается, если поляризующее поле близко по направлению измеряемому. В диаграмме направленности МЧБ эти запрещенные зоны довольно узкие. Небольшими поворотами датчика, как правило, удается

добиться результата измерения. Более важна другая причина уменьшения уровня сигнала: неоднородность измеряемого поля. Опыт показывает, что при градиентах поля 500 нТл/м или больше табло дает нулевой результат. Связано это с тем, что в разных частях объема датчика поле и частота прецессии различны, поэтому не создается единого ансамбля прецессирующих протонов.

Существует несколько модификаций магнитометра МПП-203. Первые приборы были основаны на свободной прецессии ядер водорода и использовали в качестве рабочего вещества спирт, керосин и другие водородосодержащие жидкости с относительно небольшим затуханием сигнала прецессии. В последних моделях используется динамическая поляризация ядер (эффект Оверхаузера) в жидкости с парамагнитными центрами, что приводит к увеличению интенсивности ядерного резонанса. Это позволило существенно снизить энергопотребление прибора и повысить надежность его работы в магнитном поле с большими градиентами.

Технические характеристики магнитометра МПП-203

Диапазон измерения абсолютных значений магнитной индукции – от 20000 до 100000 нТл; эта характеристика не критическая, она определяется выбором параметров измерительной схемы.

Отсчетная точность ± 1 нТл.

Систематическая ошибка абсолютных значений $T \pm 2$ нТл.

Длительность одного измерения 3 с.

Диапазон рабочих температур от -30 до $+50^\circ\text{C}$.

Питание от батареи сухих элементов 13 ± 3 В.

Масса 6 кг (первая модель), 4,2 кг (последняя модель).

Достоинства протонных магнитометров – абсолютность результатов измерений, высокая точность, портативность прибора, простота измерений, высокая производительность съемки. Прибору не требуется особая подготовка к съемке, лишь проверка его исправности и контроль источников питания.

Недостатки протонных магнитометров – дискретность измерений, критичность к высоким градиентам поля. Еще один недостаток магнитометров МПП-203 – нестойкость состава рабочего вещества и необходимость его периодической замены.

Квантовые магнитометры

Принцип действия квантовых магнитометров основан на эффекте Зеемана - расщеплении энергетических уровней атомов парамагнитных веществ в магнитном поле. Разность энергии частиц на подуровнях и резонансная частота ω поглощаемого веществом света при переходах между ними пропорциональна магнитной индукции T измеряемого поля. Для рабочего вещества цезия-133 частота резонансного перехода зависит от поля практически линейно с коэффициентом 3,5 Гц/нТл. В земном поле эта частота находится в среднечастотном радиодиапазоне. Низкие частоты измерить с высокой точностью непросто. Для этого в квантовом магнитометре использован радиооптический резонанс и эффект оптической накачки. Пары цезия в рабочей камере освещаются циркулярно поляризованным когерентным светом цезиевой лампы, свет резонансно поглощается парами цезия, образуется избыточная заселенность верхних энергетических уровней, сопровождаемая магнитной поляризацией вещества. Действующее на вещество радиочастотное поле (включенное по принципу отрицательной обратной связи) периодически разрушает эту заселенность, вызывая обратные переходы. Поглощение и освещенность на выходе из камеры оказываются модулированными с частотой резонансного перехода. Фотодетектор регистрирует частоту колебаний освещенности на выходе света из рабочей камеры. Как показано экспериментально, эта частота практически линейно зависит от измеряемого магнитного поля.

Квантовый магнитометр измеряет модуль вектора магнитной индукции T . Прибор не является абсолютным, но его измерительно-регистрирующий блок настроен так, что результаты измерений отличаются от абсолютных значений магнитной индукции не более чем на 20 нТл. Случайные погрешности измерений этими приборами намного меньше: около $\pm 0,2$ нТл.

Квантовые магнитометры М-33 и М-60 состоят из трех основных блоков: магнитоизмерительного преобразователя (МИП), измерительно-регистрирующего блока (БИР) и аккумуляторного блока, соединенных между собой кабелями. Различие двух этих приборов в следующем:

- М-33 имеет одну рабочую камеру датчика, М-60 – три, они расположены под углами 120° и освещаются одной спектральной лампой;

- М-33 имеет цифропечать, а М-60 записывает результаты измерений в память; затем они считываются в персональный компьютер с помощью интерфейсного устройства ИУ-1;

- блоки питания различаются типами аккумуляторов и напряжением (у М-33 щелочные 8 В, у М-60 – кислотные 13 В);

- некоторые отличия имеются в системах управления и визуальной регистрации данных измерений.

С квантовым магнитометром работают два оператора - один с МИП, другой с БИР.

Технические характеристики магнитометра М-60

Диапазон измеряемых значений магнитной индукции от 20 000 до 100 000 нТл.

Погрешность отсчета два регистра: 1 нТл и 0,1 нТл.

Систематическая погрешность не более 20 нТл при измерении абсолютных значений T , и не более $\Delta T \cdot 10^{-3}$ нТл при измерении приращений ΔT .

Нестабильность во времени не более 0,5 нТл/час и не более 1 нТл за 8 часов работы в нормальных условиях.

Температурный коэффициент не более 0,2 нТл/°С.

Оптимальная ориентировка датчика МИП – по направлению вектора магнитной индукции, но рабочая зона в обе стороны превышает 40° , и запрещенная зона диаграммы направленности почти не заметна.

Магнитометр устойчиво функционирует при температуре от -10° до $+50^\circ$ С. При первом включении, особенно в холодную погоду, требуется около 30 мин для вхождения прибора в рабочий режим.

В магнитометре предусмотрены два режима регистрации: ручной для полевых измерений и автоматический – через 10, 30 или 60 с – для наблюдений вариаций магнитного поля.

Достоинствами квантовых магнитометров являются высокая точность относительных измерений, возможность измерения

помимо T градиентов T (dT/dz , dT/dx), высокая производительность съемки, работоспособность в условиях сильной неоднородности поля (с большими градиентами), данные М-60 (с ИУ-1) непосредственно считываются в компьютер для обработки.

Недостатком квантовых магнитометров является некоторая громоздкость комплекта (для обслуживания прибора нужны два оператора), а также необходимость в регулярной подзарядке и контроле состояния аккумуляторов.

Оптико-механические магнитометры

Эти приборы называют *торсионными*, что характеризует принцип их действия: вращение постоянного магнита при изменении элементов магнитного поля. Они применяются для съемок относительных значений (приращений) вертикальной Z или горизонтальной H компонент геомагнитного поля.

Принцип действия торсионных магнитометров – равновесие или движение в измеряемом поле постоянного магнита, подвешенного на вертикальной или горизонтальной крутильной нити, кварцевой или металлической.

Постоянный магнит на вертикальной нити подвеса используется для измерений горизонтальной составляющей (H) и склонения (D) магнитного поля в кварцевых H -магнитометрах (QHM). Магниты на горизонтальной нити используются в относительных измерениях вертикальной ΔZ и горизонтальной ΔH составляющих магнитного поля в большом числе типов магнитометров (М-2, М-27, «Фанзелау» и др.). В настоящее время почти не используется метод измерений по периоду колебаний постоянного магнита на нити подвеса, распространенный раньше. Мы его не рассматриваем.

В методах измерений, использующих равновесие упругих сил нити подвеса и магнитных сил постоянного магнита в измеряемом поле в присутствии компенсирующих магнитов, возможны разные взаимные положения измерительного и компенсирующего магнитов и их ориентировка относительно горизонта и направления поля.

Кварцевый H -магнитометр QHM (заводская марка М-15)

основан на следующем принципе. В свободном состоянии магнит-индикатор, подвешенный на крутильной нити из плавленного кварца в системе с горизонтальным теодолитным кругом, устанавливается по магнитному меридиану. ҚНМ не имеет отклоняющего магнита, отклоняющий момент создается в нем закручиванием упругой нити подвеса на фиксированный угол, обычно кратный 2π . Под действием магнитного поля H и упругих сил нити подвеса магнит с моментом M приходит в равновесие под углом α к магнитному меридиану:

$$MH \cdot \sin\alpha = 2\pi k C(T). \quad (3)$$

Здесь $C(T)$ – крутильная жесткость нити подвеса. Ее значение для плавленного кварца сильно зависит от температуры. При калибровке прибора определяется зависимость масштабного коэффициента C_T от температуры $C_T(T) = 2\pi k C(T)/M$. В результате

$$H = C_T / \sin\alpha. \quad (4)$$

Во избежание погрешностей, обусловленных ненулевым исходным закручиванием нити подвеса, измерения H проводят при углах закручивания $\pm 2\pi k$, им соответствуют углы отклонения магнита от магнитного меридиана α^+ и α^- . Равенство их модулей свидетельствует о надежности определения направления магнитного меридиана. В таком случае угол между направлением магнит-индикатора и направлением на фиксированный ориентир (миру) является магнитным азимутом A_M мира. После определения ее географического азимута A_G , имеем значение склонения $D = A_G - A_M$.

Магнит, подвешенный на горизонтальной крутильной нити, можно использовать для относительных измерений вертикальной (ΔZ) или горизонтальной (ΔH) составляющих магнитного поля. Для измерений ΔZ магнит располагается горизонтально поперек нити подвеса, для измерений ΔH он должен быть вертикальным.

На базе полигона Ши́ра имеются магнитометры М-27 (или М-27М), предназначенные для измерений ΔZ . Основой конструкции прибора является горизонтальный постоянный магнит-индикатор, подвешенный на горизонтальной металлической растяжке.

Движение магнита имеет одну степень свободы: он может

поворачиваться вокруг оси растяжки. Уравнение равновесия такого магнита при условии горизонтальности оси его вращения:

$$MZ\cos i - Mh\cos A\sin i + MZ_{\kappa} = C(\varphi_0 - i) + gdcos(\beta - i), \quad (5)$$

где M – магнитный момент магнита, Z , H – вертикальная и горизонтальная компоненты магнитного поля, A – магнитный азимут магнита, φ_0 – угол начального закручивания растяжки, β – угол между осью магнита и направлением от оси вращения к центру массы магнита, d – расстояние от оси вращения до центра массы, C – жесткость растяжки, i – наклон магнита-индикатора к горизонту, MZ_{κ} – эффект отклоняющих магнитов

В торсионных магнитометрах измерения можно выполнять двумя способами:

1) прямым, измеряя угол i или его тангенс по отклонению магнита от горизонтального положения, соответствующего исходному значению измеряемого поля Z_0 ; так работали магнитные весы М-2, а также H - и Z -магнитометры Фанзелау;

2) компенсационным (магнитометры М-18, М-23, М-27 и М-27М): поворот магнитов – компенсаторов приводит чувствительный элемент в горизонтальное положение, $i=0$, при этом изменяется отсчет окулярной шкалы магнитометра на величину S .

Приборы типа М-27 сконструированы так, чтобы угол β был близок к $\pi/2$, тогда последним слагаемым в (5) можно пренебречь. Уравнение упрощается:

$$\Delta Z = (C\varphi/M) \cdot S + Z_i, \quad (6)$$

где $C\varphi/M = \varepsilon$ – цена деления окулярной шкалы магнитометра. Эффекты компенсационных магнитов Z_i учитываются путем калибровки в единицах магнитной индукции добавочных полей для каждого положения компенсационных магнитов. Эти данные приводятся в паспорте прибора.

В М-27М единственный компенсационный магнит выполняет функции смены диапазона и температурного компенсатора, для этого он укреплен на биметаллической пластинке.

Все торсионные магнитометры являются относительными еще и потому, что, хотя исходное поле Z_0 (где $S=0$) известно, использовать этот факт не удастся из-за смещений нуля-пункта

приборов.

Для измерений магнитометр нивелируется по уровням. Из-за неточности юстировки горизонтальному положению уровней отвечают некоторые остаточные наклоны оси вращения α и магнита-индикатора i . Влияние горизонтальной составляющей H проявляется в азимутальной зависимости отсчетов $Z(A)$. Ее определяют и, если величина значительна, уменьшают путем подстройки уровней.

Технические характеристики магнитометров М-27 и М-27М

Цена деления окулярной шкалы около 10 нТл/дел.

Диапазон окулярной шкалы 600 делений, около 6000 нТл.

Число ступеней компенсации М-27 – 13 (от –6 до 6),

М-27М – 29 (от –14 до 14).

Значения компенсирующего поля (одной ступени) 3000–7000 нТл.

Исходное значение Z_0 (поле настройки $S = 0$) около 48000 нТл.

Диапазон измеряемых значений Z : М-27 – 18–80 тыс. нТл.

М-27М – 30–120 тыс. нТл.

Температурный коэффициент не более 0,5 нТл/°С.

Смещение нуля-пункта не более 1 нТл/час.

Стандартная погрешность измерений $\pm(4-5)$ нТл.

Масса с треногой 6 кг.

Регулировка и калибровка магнитометров типа М-27

1. Для выполнения условий горизонтальности оси подвеса и магнита-индикатора в момент измерения надо отрегулировать уровни прибора так, чтобы в пределах стандартной погрешности измерений отсчет не зависел от ориентировки магнитометра. Для этого значения Z измеряют при противоположных ориентировках прибора вдоль оси подвеса (аналогично вдоль магнита-индикатора), вычисляют среднее из полученных двух значений, а затем, наклоняя магнитометр по соответствующему уровню, добиваются совпадения отсчета с этим средним значением. Полученное положение уровня закрепляют регулировочными винтами уровня в качестве горизонтального. Если не нужна высокая точность измерений, ограничиваются определением зависимости $Z(A)$, а

затем выбирают для измерений участки ее экстремумов, где зависимость отсчета от изменений ориентировки прибора минимальна.

2. Калибровка магнитометра заключается в определении цены деления окулярной шкалы с помощью градуировочного комплекта, в который входят кольца Гельмгольца и миллиамперметр. Два кольца (тора) – это катушки с n витками и радиусом R каждая, расположенные на расстоянии R одна от другой на общей оси. В центре такой системы при прохождении в катушках постоянного тока i возникает близкое к однородному осевое поле $H=0,899i \cdot n/R$.

Принцип калибровки состоит в измерении этого поля, наложенного с разными знаками на земное поле, путем помещения магнитометра в центр системы колец. Цена деления ε определяется по значению силы тока i в кольцах, разности отсчетов S^+ и S^- и геометрическому коэффициенту колец $f, f = 0,899n/R$, по формуле

$$\varepsilon = 2 i f / (S^+ - S^-). \quad (7)$$

Как правило, завод-изготовитель магнитометров М-27М стремится установить цену деления в 10 нТл/дел. (с погрешностью порядка 5 % или меньше).

Феррозондовые магнитометры

Магнитные датчики на основе элементов из магнитомягких сплавов с высокой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой способны намагничиваться до насыщения в земном поле, особенно при наложении на это поле переменного магнитного поля, создаваемого током в соленоиде, сердечником которого является элемент из магнитомягкого сплава. Такие датчики используются при измерениях напряженности ГМП в наземных и аэромагнитометрах, а также в феррозондовых теодолитах при измерениях угловых элементов поля – склонения D и наклона I .

В измерениях используется нелинейная зависимость магнитной индукции в сердечнике и проницаемости магнитомягкого сплава (пермалоя и др.) от напряженности переменного магнитного поля, а также знака и величины постоянного магнитного поля. Индуцированное соленоидом переменное магнитное поле создает в другой – измерительной – катушке ЭДС, которая пропорциональна напряженности измеряемого постоянного поля.

Из разных схем измерений наиболее распространен принцип «второй гармоники». Две одинаковые параллельные катушки с сердечниками соединены в противофазе, их индуцированные поля противоположны по знаку. При отсутствии постоянного поля эти индуцированные поля, суммируясь, гасят друг друга, и в измерительной катушке ЭДС и ток отсутствуют. В присутствии внешнего поля величина магнитной индукции катушки меняется с частотой вдвое больше частоты тока.

В приборах для измерения силовых элементов магнитного поля (наземный магнитометр М-17, аэромагнитометры АММ-13 и др.) мерой измеряемой величины является сила тока в измерительной обмотке, пропорциональная амплитуде второй гармоники. Этих приборов на практике в Шира нет, их мы не рассматриваем. В приборах для измерения угловых элементов – склонения D и наклона I определяются направления датчика, ортогональные вектору магнитной индукции поля, которые отвечают нулевому току в измерительной катушке.

Феррозондовый теодолит для измерения D и I представляет

собой геодезический теодолит, на трубе которого параллельно ее оптической оси укреплен феррозондовый датчик. Чтобы собственное поле теодолита не создавало помех, магнитные детали теодолита заменяют немагнитными. Если это невозможно, то девиационные эффекты теодолита учитывают поправками в данные измерений D и I .

Для определения направлений феррозонда, ортогональных вектору магнитной индукции T , в комплект входит измерительный электронный блок с микроамперметром, который позволяет зафиксировать положения феррозонда, перпендикулярные вектору магнитной индукции T по отсутствию тока в цепи феррозонда.

В общем случае есть 8 таких положений. При измерении склонения (труба теодолита и датчик горизонтальны) это направления объектива теодолита на восток и запад при положении датчика над и под трубой. При измерении наклона (труба и датчик ориентированы в плоскости магнитного меридиана) - направления объектива на север и юг также при двух положениях датчика относительно трубы. Такая схема из 8 измерений позволяет исключить эффекты несовместности осей феррозонда и теодолита и погрешностей юстировки теодолита.

Технические характеристики феррозондов

Чувствительность феррозонда 0,1 нТл.

Диапазон нуль-индикатора 5 нТл (по шкале).

Размеры датчика 160×40×20 мм.

Напряжение питания 5–6 В.

Потребляемый ток 10 мА.

Источник питания 4 элемента типа 316 (AA).

Масса электронного блока 0,5 кг.

Масса феррозонда 0,1 кг.

Точность угловых измерений определяется типом и качеством используемых теодолитов. На базе практики в Шира имеются феррозондовые измерители на основе теодолитов 2Т30 (2Т30П), Т5А. Отсчетная точность: 2Т30 – 1', Т5А – 0,2'. У теодолитов типа 2Т30 магнитные детали заменены немагнитными. У высокоточных и конструктивно более сложных Т5А остались слабомагнитные

детали, с чем связаны особенности их юстировки.

Юстировка феррозондовых теодолитов

Феррозондовый теодолит устанавливают на немагнитной треноге или столбе, так, чтобы в их окрестности не было существенных неоднородностей геомагнитного поля. Выполняется программа *проверки и регулировки уровней* геодезического теодолита. Выбирают удаленный ориентир – мирю. Ее географический азимут понадобится для определения склонения и должен быть заранее измерен путем астрономических наблюдений Солнца.

Для юстировки датчика феррозонда направляют трубу на мирю, устанавливают географический азимут мирю по горизонтальному кругу теодолита ($\pm 180^\circ$). Это значит, что нуль горизонтального круга соответствует географическому северу (югу). Отсчет по вертикальному кругу должен быть равен 0 (180°). Включают измерительный блок. Поворотами горизонтальной трубы находят положения, соответствующие нулевым отсчетам микроамперметра. Таких положений 4: $V^-, 3_-, V_-, 3^-$. Это означает: труба объективом на восток (В) и запад (З) с датчиком сверху ($\bar{\quad}$) или снизу ($\underline{\quad}$) трубы. Среднее значение из 4 отсчетов по горизонтальному кругу теодолита дает азимут плоскости П, перпендикулярной плоскости магнитного меридиана. Склонение $D = \Pi - 90^\circ$. Юстировка заключается в минимизации угла между оптической осью теодолита и осью феррозонда горизонтальной плоскости. Меняя угол ориентировки датчика на трубе, добиваются, чтобы отличие этих 4 отсчетов (за вычетом 90°) от D было минимальным.

Аналогично регулируется установка датчика по вертикали. На горизонтальном круге теодолита устанавливают значение склонения ($\pm 180^\circ$). Поворотом трубы в вертикальной плоскости находят нулевые положения, например, C^- и $Ю_-$, затем, после поворота теодолита на 180° вокруг вертикальной оси, C_- и $Ю^-$ (это значит: труба объективом на север или на юг с датчиком над или под трубой). Среднее из этих 4 отсчетов (минус 90°) дает наклонение I . Критерием правильности установки датчика является минимум различий конкретных отсчетов от их среднего значения.

Следующая процедура – *определение ориентационных поправок* феррозондового теодолита для измерений склонения D и наклона I путем отсчетов в одном положении трубы и датчика для каждого элемента. По результатам предыдущей процедуры выбирают два положения (например, В⁻ и С₂), отсчеты в которых близки к средним значениям. Многократными измерениями определяют поправки к отсчетам в этих положениях для приведения их к истинным значениям склонения или наклона и оценивают среднеквадратические погрешности значений этих поправок.

Для феррозондовых теодолитов Т5А, не стерильных в магнитном отношении, необходимо *определение девиационных поправок*. Это осуществляется путем сравнения данных многократных измерений D и I поля в одной точке феррозондовыми теодолитами 2Т30 и Т5А с учетом вариаций этих элементов поля, измеряемых вблизи этой точки.

Геологические задачи гравиразведки и магниторазведки на полигоне Ши́ра

Эффективность геофизического метода в решении той или другой геологической задачи определяется:

а) дифференциацией среды (разреза) по физическому свойству пород, определяющему этот метод;

б) степенью неоднозначности интерпретации данных этого метода в рамках моделей, геометрия которых соответствует структуре среды;

в) разрешающей способностью метода и его конкретной реализации (по детальности и точности съемки) применительно к данному типу разреза.

В геологической структуре района полигона практики присутствуют комплексы горных пород, массивы, тела с довольно большими отличиями по плотности и магнитным свойствам. Особенно велики эти различия свойств между магматическими и осадочными породами, а также в зонах скарирования – между рудными телами и вмещающими породами.

В комплексах осадочных и осадочно-вулканогенных пород верхнего структурного этажа различия плотности имеются, но геометрия границ раздела слоев и подэтажей не соответствует типам моделей, для которых возможно однозначное решение обратных задач гравиразведки. Это справедливо и для магниторазведки, за исключением тел долеритов, которые, по мнению многих геологов, представляют собой межпластовые интрузии – силлы (по другим предположениям это остатки эффузивных диабазовых покровов). Эти тела распространены в нижнедевонском осадочно-вулканогенном комплексе пород, слагающих нижнюю часть верхнего структурного этажа. Магниторазведка позволяет обнаруживать выходы тел долеритов на земную поверхность, в том числе под наносами, а в благоприятных случаях определять элементы залегания тел на глубине.

Магматические и метаморфические породы нижнего структурного этажа имеют существенные различия по плотности. Среди магматических пород наименьшей плотностью обладают граниты (2,55–2,60 г/см³). Граниты слагают основные части крупных массивов. В районе полигона Шира таким является Улень-Туимский гранитоидный массив.

Плотность пород в эндоконтактовой зоне батолита варьирует в широких пределах: от 2,60 г/см³ (граниты), 2,65–2,80 г/см³ (сиениты, гранодиориты, диориты) до 2,85–2,90 г/см³ (габбродиориты, габбро). Метаморфические кембрийские и более древние породы, вмещающие Улень-Туимский массив, представлены мраморами с плотностью около 2,80 г/см³, разнообразными сланцами и кварцитами с плотностью 2,70–2,80 г/см³, так что гранитный массив отличается от вмещающих пород пониженной плотностью в среднем на величину около 0,1 г/см³. Следует отметить, что такое значение аномальной плотности гранитного массива является довольно устойчивой характеристикой этих тел в разных регионах мира безотносительно к возрасту гранитного массива и вмещающих его складчатых комплексов.

Благодаря большим объемам гранитные массивы создают значительные по размерам в плане и интенсивности гравитационные аномалии (минимумы). По результатам количественной интерпретации этих аномалий удается оценить основные элементы

морфологии массива – положение в плане резких, часто субвертикальных, боковых границ, мощность гранитного пласта, положение в плане и размеры останцов вмещающих пород в пределах массива. Это типичная задача для гравиразведки в складчатых областях. Она может быть поставлена и применительно к Улень-Туимскому батолиту при условии выявления и учета неоднородности состава тела в эндоконтактной зоне.

Другие магматические объекты в пределах полигона практики имеют небольшие размеры. Хотя иногда они имеют значительные отличия по плотности от вмещающих пород (например, тела долеритов, рудные тела в скарновых зонах и др.), они не создают достаточно больших аномалий силы тяжести. Такие объекты могут быть выявлены гравиметрической съемкой крупных масштабов с высокой детальностью сети и высокой точностью измерений, возможна даже оценка некоторых параметров тел. Но в условиях геофизической практики, в основном из-за дефицита времени, на полигоне Ши́ра такие съемки не проводятся.

Отличие тел магматических горных пород от вмещающей среды и между их разностями по магнитным свойствам, особенно значительное для основных пород, позволяет картировать их выходы на земную поверхность по магнитным аномалиям. Но это требует, как правило, площадных крупномасштабных съемок порядка 1:10000 и крупнее. Такие съемки на полигоне Ши́ра не проводились, а силами студентов в ограниченное время практики этого сделать практически невозможно.

Магниторазведка на полигоне Ши́ра наиболее эффективна в решении двух задач: 1) определении параметров и элементов залегания тел долеритов; 2) оценке параметров железорудных залежей месторождения «Самсон». Геологическое значение первой задачи заключается в том, что по магнитным данным возможно разрешение альтернативы относительно формы залегания и генезиса этих тел (долеритовые силлы или диабазовые покровы). Вторая задача является типичной задачей магнитометрии в разведке рудных месторождений. По характеру аномальных магнитных полей изучение долеритов эффективно осуществляется на основе модульной съемки (T) протонными магнитометрами. На участке «Самсон» применяются модульные измерения и векторная

магнитометрия на основе комплекса модульного (протонного или квантового) магнитометра и феррозондового теодолита – измерителя угловых элементов поля (склонения D и наклона I).

Высокая точность и производительность модульных измерений протонными магнитометрами позволяют использовать магнито-разведку для картирования слабо дифференцированных по магнитным свойствам комплексов интрузивных, эффузивных и даже осадочных пород. Такого рода задач на полигоне Шири довольно много. Среди них:

- картирование гранитоидов Улень-Туимского массива в южной части полигона с разделением их на фазы по составу, используя корреляцию магнитных свойств с содержанием темноцветных минералов, среди которых есть ферромагнитные;

- обнаружение разломов, не вскрытых в эрозионном срезе, если они разделяют породы с разными магнитными свойствами: гранитоиды, эффузивные и карбонатные комплексы и др.;

- определение в осадочном комплексе верхнего структурного этажа границ между слабомагнитными красноцветными породами (ойдановской свиты) и практически немагнитными известняками и песчаниками (бейской свиты) и выявление в их толщах более магнитных разностей, в частности, в древних могильниках.

Эти и другие задачи могут решаться по данным модульной магнитной съемки или в комплексе с электропрофилированием.

Элементы морфологии

Улень-Туимского гранитного массива

Изучение морфологии гранитных массивов, необходимое для прогноза приуроченных к ним рудных месторождений, является типичной задачей гравиразведки в горных областях. В крупных массивах гранитами сложены тела в целом или главные, центральные их части. К массивам второго типа относится в районе полигона Шири Улень-Туимский гранитоидный массив. Его форма типична для гранитных массивов: это батолит, пластовое тело, размеры которого в плане на порядок больше вертикальных (~70 км в поперечнике и 5–10 км по глубине). Внутренняя структура

массива характеризуется зональностью состава: от чистых гранитов в центральной части до диоритов и габбро в краевых частях, в эндоконтактовой зоне. Аномальная (избыточная) плотность массива составляет в среднем $-0,1 \text{ г/см}^3$. Благодаря большому объему тело создает значительную гравитационную аномалию (более 30 МГл).

По гравитационным аномалиям можно определить важные элементы морфологии массива: положение в плане его круто наклонных боковых границ, мощность гранитного пласта, положение в плане и размеры останцов вмещающих пород в пределах массива. Качество решения этой задачи зависит от полноты гравиметрических данных в пределах массива и его окрестностях, точности гравиметрической съемки и полноты учета при интерпретации эффектов неоднородности состава тела в эндоконтактовой зоне.

Выполняется оценка элементов морфологии массива по одному профилю Шира – Белый Июс, входящему в центральную часть батолита с северо-востока от его границы с вулканогенными девонскими породами Минусинского прогиба.

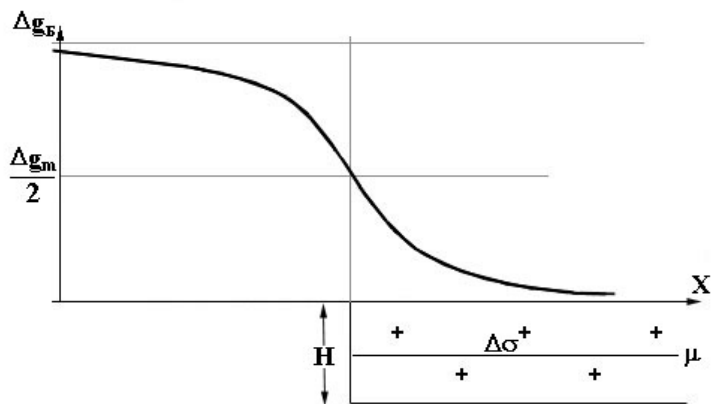


Рис. 7. Модель тела и аномалии для гранитного массива.

Профиль обрабатывается по стандартам съемки масштаба 1:200000 с шагом в среднем 3 км. Для учета эндоконтактовой неоднородности состава пород используется магнитная съемка.

Корреляция плотности и магнитной восприимчивости магматических пород позволяет по магнитным аномалиям обнаружить тело габбро-диоритов и учесть его эффект при интерпретации гравитационных аномалий.

Теоретическая модель тела для интерпретации гравитационных аномалий на профиле – полупласт толщиной H с избыточной плотностью $\sigma = -0,1$ г/см³ в однородной среде. В этой модели неважно, какую плотность имеет среда ниже тела. Вид кривой не меняется, только уровень поля. Полупласт можно заменить материальной полуплоскостью (рис. 7) с поверхностной плотностью $\mu = \sigma H$ на глубине $H/2$. По сечению перпендикулярно краю полуплоскости аномальная кривая Δg имеет вид ступени:

$$\Delta g = 2G\mu [\pi/2 - \arctg(2x/H)], \quad (8)$$

а кривая горизонтального градиента Δg (V_{xz}) имеет экстремум над краем полуплоскости:

$$V_{xz} = G\mu H/[x^2 + (H/2)^2]. \quad (9)$$

Оценку параметров тела можно выполнить по характерным точкам аномальных кривых (8) и (9). Положение края полуплоскости (напомним, соответствующего вертикальной границе гранитного батолита) определим по точке экстремума V_{xz} или по точке перегиба Δg , которые в этой модели имеют координату $x=0$. Значение Δg в этой точке равно половине максимального значения Δg , которое достигается на большом удалении от края полуплоскости (соответствует модели бесконечного горизонтального пласта толщиной H). Это дает возможность оценить μ : $\mu = \Delta g(0)/\pi G = \Delta g(\infty)/2\pi G$ и $H = \mu/\sigma$. При избыточной плотности тела $-0,1$ г/см³

$$H = \Delta g_m / 4,2 \quad (10)$$

(H в км, Δg_m см. на рис. 7).

Реальная ситуация в районе Улень-Туимского массива, естественно, сложнее этой модели. В центральной части массива есть останцы вмещающих пород. Отвечающие им локальные положительные аномалии осложняют гравитационный минимум, обусловленный батолитом, и легко выявляются. По ним можно

определить положение этих останцов в плане. Эндоконтактовая неоднородность состава гранитоидов искажает форму гравитационной ступени, что мешает определению положения границы тела и его мощности. Влияние этой неоднородности на качественном уровне можно учесть по данным модульной магнитной съемки.

На рис. 8 показан схематический разрез батолита с близкими к реальным кривыми гравитационных и магнитных аномалий. В южной части профиля на фоне гравитационного минимума, соответствующего батолиту, проявляется локальный максимум над останцом кембрийских метаморфических пород.

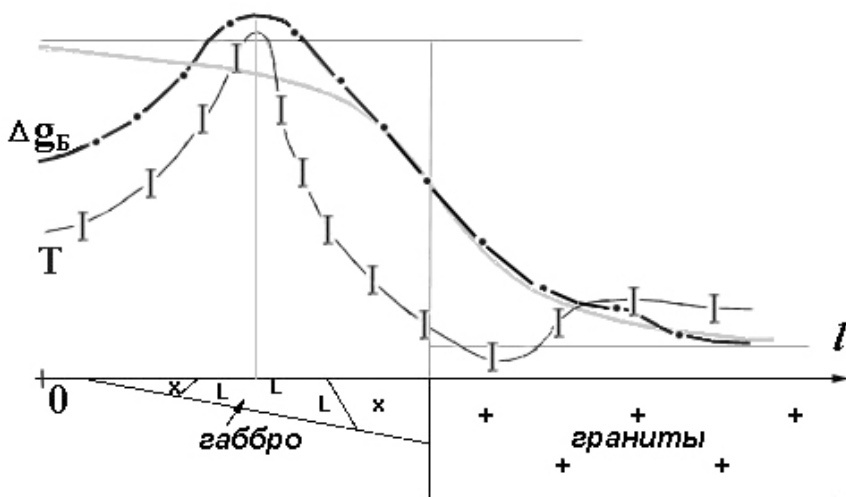


Рис. 8. Схематический геолого-геофизический разрез через северо-восточную часть Улень-Туимского батолита.

Северная часть гравитационной ступени осложнена минимумом, связанным с комплексом девонских осадочных отложений Северо-Минусинской впадины. Непосредственно на

верхнее основание гравитационной ступени наложен локальный максимум, вызванный присутствием в эндоконтактовой зоне батолита тела габбро-диоритов. Оно находит отражение в магнитном поле в виде локального максимума с большой степенью дифференциации поля, тогда как магнитное поле внутренней части батолита понижено и однородно. На рис. 8 пунктиром проведена кривая аномального гравитационного поля без этих помех, которая близка по форме к модельной кривой (рис.7). По ней и оцениваются интересные нас элементы морфологии Улень-Туимского батолита: положение боковой границы и вертикальная мощность тела.

Исходной фактической информацией являются значения аномалий Буге в точках профиля Ши́ра – Белый И́юс. Аномалии вычисляются по формуле

$$\Delta g_B = g - \gamma_0 + 2\gamma_0 h/R - 2\pi G\sigma_0 h + \Delta g_{рф}, \quad (11)$$

где g – абсолютные значения гравитационного ускорения, полученные по результатам измерений в точках профиля с их привязкой к абсолютным значениям g в опорных пунктах, γ_0 – нормальные значения ускорения на поверхности приведения, в качестве которой примем геоид – поверхность отсчета высот h ; $2\gamma_0/R = 0,3086$ мГл/м – нормальный вертикальный градиент силы тяжести, $2\pi G\sigma_0 h = 0,0419\sigma_0 h$ – поправка Буге за притяжение плоского слоя толщиной h , $\Delta g_{рф}$ – поправка за рельеф, дополняющая поправку Буге до реального влияния топографических масс. Поправку за рельеф вводят, когда ее значения превышают нормативную погрешность гравитационных измерений, в случае съемки масштаба 1:200000 превышает 0,4 мГл. Значение плотности промежуточного слоя σ_0 принимаем стандартным для горных районов 2,67 г/см³.

Так как в формулу (10) входит разность $(g - \gamma_0)$, можно из этих двух величин исключить постоянную величину, равную абсолютному значению силы тяжести в исходном опорном пункте профиля ОГП-1. Это удобно по ряду соображений, в частности, в формуле (10) вместо g будем брать $\Delta g_{ср}$, полученное путем осреднения приращений силы тяжести в точках профиля относительно ОГП-1, измеренных всеми гравиметрами, а вместо больших абсолютных значений γ_0 будут использованы относительные, от 80

до 120 мГл в зависимости от широты гравиметрического пункта.

Гравиметрическая съемка по профилю Ши́ра – Белый Июс длиной около 50 км проводится по однократной методике с привязкой к двум опорным пунктам: ОГП-1 на репере 487,2 м в северной и ОГП-15 вблизи репера 608,7 м в южной части профиля. Значения g в этих точках определяются по данным измерений в специальном опорном рейсе. (По условиям практики этот рейс не всегда удается выполнить, тогда принимаются следующие значения g : 0 для ОГП-1 и $-64,1$ для ОГП-15.)

В рядовом рейсе измерения g выполняются несколькими гравиметрами типа ГНУ-К2 – от 3 до 8 в зависимости от состава группы студентов. Учет смещения нуля-пункта гравиметров выполняется по измерениям на опорных пунктах в начале и конце рядового рейса.

Одному студенту поручается выполнение магнитных измерений на каждом гравиметрическом пункте протонным магнитометром ММП-203 по схеме: 10 точек с шагом 20 м в произвольном направлении. Такая система наблюдений необходима, в связи с большими расстояниями между пунктами гравиметрической съемки (3 км), чтобы оценить не только уровень магнитного поля, но и степень его неоднородности вблизи гравиметрического пункта.

Еще один студент выполняет барометрическое нивелирование для определения высот гравиметрических пунктов по измерениям давления двумя микробарометрами М-75 или ОМБ-1 и температуры воздуха минимальным термометром (или аспирационным психрометром). Профиль Ши́ра – Белый Июс проходит по трассе нивелирования 2 класса с расстоянием между реперами около 5 км. Высоты этих реперов используются для привязки данных относительных измерений (Δh) к Балтийской системе высот и для учета неоднородности поля давления в пространстве и во времени (без наблюдений на ВБС – временных барометрических станциях). В этих целях используются не все реперы, а только 4–5. На других наблюдения проводятся для оценки точности нивелирования.

Обработка данных гравиметрии и баронивелирования выполняется на персональных компьютерах по программам (шаблонам) в электронных таблицах Excel или Quattro.

Отчетными материалами по этой теме являются:

- пример обработки данных гравиметрического рейса;
- сводная таблица Δg_{ij} в пунктах (j) сети по всем (i) гравиметрам;
- средние значения Δg_{jcp} и стандартные отклонения ε_g по каждому пункту и профилю в целом;
- таблица обработки данных барометрического нивелирования;
- каталог гравиметрических пунктов, содержащий данные о высотах и плановых координатах пунктов профиля, аномалиях Буге и значениях магнитной индукции T (форма в таблицах Quattro);
- графическое представление профиля с кривыми аномалий Буге и магнитного поля T и результатами интерпретации.

Геологическим результатом этой съемки будет оценка мощности гранитного батолита в его центральной части в горах Кузнецкого Алатау. Эта мощность гранитов много больше, чем непосредственно в пределах полигона практики, где обнажается северо-западная эндоконтактовая часть Улень-Туимского гранитного массива.

Определение плотности пород в пределах рельефа

Эта задача не имеет большого самостоятельного геологического значения. Она важна при выборе значения плотности промежуточного слоя σ_0 в поправке Буге при вычислении аномалий по формуле (11).

Аномалии Буге должны быть функцией только плановых координат и не зависеть от высоты. В региональном плане это не так. Мы знаем, что аномалии Буге тесно коррелируют с региональным рельефом, например, осредненным по площадкам с характерным размером порядка 100 км. Но с локальным рельефом корреляции не будет, если правильно выбрана плотность промежуточного слоя. В этом и состоит принцип определения плотности пород в пределах рельефа: она выбирается под условием минимиза-

ции зависимости аномалий Буге от высоты точки наблюдения.

Простейшая модель отвечает ситуации, когда измерения проведены на верхнем и нижнем краях вертикального уступа рельефа на высотах h_1 и h_2 . В этом случае плановые координаты точек 1 и 2 и нормальное поле в них одинаковы, поэтому выражения для аномалий можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}\Delta g_2 &= g_2 + 2\gamma h_2/R - 2\pi G\sigma h_2, \\ \Delta g_1 &= g_1 + 2\gamma h_1/R - 2\pi G\sigma h_1.\end{aligned}\quad (12)$$

Измеряются значения силы тяжести и высоты двух точек. Поправки за рельеф не учитываем, они в этих точках одинаковы. Разность аномалий в двух точках должна быть равна нулю. Вертикальный градиент $2\gamma/R$ известен, неизвестна только величина σ . Она определяется по формуле:

$$\sigma = [g_2 - g_1 + 0,3086(h_2 - h_1)]/0,0419(h_2 - h_1).\quad (13)$$

В реальном рельефе такие структуры встречаются редко. Из более сложных форм рельефа часто встречаются хребты (горки, холмы) треугольной формы в сечении. Такую модель можно использовать для определения плотности пород в пределах рельефа (σ) на участке, включающем г. Малый Самсон с точками измерений по одной линии на каждом из двух пересекающихся профилей.

Если такая гора сложена однородными породами и ее ширина невелика, можно считать, что аномалии, обусловленные глубинными факторами, линейно зависят от плановых координат. Этот линейный фон исключается во вторых конечных разностях. Исключается и нормальное поле, линейно зависящее от этих координат. В точках измерения вводятся поправки за рельеф со стандартной плотностью промежуточного слоя. Если их значения настолько велики, что необходимо учитывать их с реальной плотностью, возникает необходимость в итерационной процедуре. В точках измерения имеем (без учета поправок за рельеф):

$$\begin{aligned}\Delta g_1 &= g_1 - \gamma_1 + 2\gamma h_1/R - 2\pi G\sigma h_1, \\ \Delta g_2 &= g_2 - \gamma_2 + 2\gamma h_2/R - 2\pi G\sigma h_2, \\ \Delta g_3 &= g_3 - \gamma_3 + 2\gamma h_3/R - 2\pi G\sigma h_3.\end{aligned}\quad (14)$$

Положим для простоты, что расстояния между точками измерений одинаковы, тогда равны первые разности аномалий: $\Delta g_1 - \Delta g_2 = \Delta g_2 - \Delta g_3$, а вторая разность равна нулю: $\delta_2 \Delta g = \Delta g_1 - 2\Delta g_2 + \Delta g_3 = 0$. В результате получаем:

$$\sigma = (\delta_2 g + 0,3086 \delta_2 h) / 0,0419 \delta_2 h, \quad (15)$$

где $\delta_2 g$ – вторая разность измеренных значений g с поправкой за рельеф ($g = g' + \Delta g_{p\phi}$), $\delta_2 h$ – вторая разность высот. Очевидно, что определяемая плотность относится к рельефу за вычетом формы с произвольной линейной зависимостью от координат.

Известны другие способы определения плотности пород в пределах рельефа. Первым был метод Неттлтона: аномалии Буге вычисляются с пробными значениями плотности, из них выбирают одно, при котором аномалии не коррелируют с рельефом. В условиях сложного рельефа и большого числа точек измерений используется способ наименьших квадратов – минимизации суммы квадратов отклонений $\Delta \sigma_B$ от линейной функции координат.

Разведка магнетитового месторождения Самсон

Железорудное месторождение Самсон находится в юго-восточной части полигона на западном склоне горы Малый Самсон южнее озера Матарак. Это месторождение скарнового типа, образованное гидротермально-метасоматическими процессами в зоне контакта кембрийских известняков и мраморов с гранодиоритами и сиенитами Улень-Туимского массива предположительно в связи с очагами базальтовой магмы во время формирования девонских долеритов. Месторождение небольшое, не имеющее промышленного значения, но очень удобное для учебных целей и в методических задачах. Главным рудным компонентом месторождения является магнетит с магнитной восприимчивостью k от 10^{-2} до 1 ед. СИ. Это много больше, чем магнитная восприимчивость вмещающих пород. Кембрийские мраморы практически немагнитны, а k сиенитов и гранодиоритов составляет 10^{-4} – 10^{-5} ед. СИ. Поиски и разведка подобных рудных залежей являются типичными задачами магниторазведки. Плотность

магнетита довольно высока, но объемы тел малы, так что эти рудные тела не могут быть объектами гравиразведки.

Железорудные тела скарного типа во всех районах мира создают очень интенсивные и сильно дифференцированные магнитные аномалии. В Сибири известна уникальная Ангаро-Илимская группа железорудных месторождений, среди которых ряд залежей создает интенсивные отрицательные магнитные аномалии из-за обратной остаточной намагниченности (противоположной направлению вектора напряженности современного поля).

Магниторазведка является основным геофизическим методом поисков железорудных месторождений. Обнаружить залежь можно любым видом магнитной съемки, в том числе наиболее производительной, экономичной модульной съемкой протонными магнитометрами или квантовыми аэромагнитометрами. Однако при разведке выявленного месторождения, когда необходимо оценить параметры рудных тел, использование данных модульной съемки может привести к ошибочным результатам в связи с тем, что магнитные аномалии ΔT (разности модулей реального T и нормального T_0 полей) очень сильно отличается от T_a (модуля разности векторов магнитной индукции реального и нормального полей), которые являются реальными эффектами рудных тел. Дело в том, что в намагниченности железных руд часто преобладает остаточная компонента, направление которой не совпадает с направлением главного современного поля. Индуктивная намагниченность руд обусловлена не только главным геомагнитным полем, но и собственным аномальным полем рудной залежи, т.е. зависит от положения и геометрии тел. Направления векторов магнитной индукции реального и нормального полей могут сильно различаться, поэтому T_a не равно ΔT и аномалии T_a невозможно выявить по результатам модульной съемки.

На участке Самсон с 1997 г. существует сеть из 8–12 параллельных и прямолинейных профилей, ориентированных по азимуту $100^\circ 46'$, длиной 400 м. Каждый год она восстанавливается с небольшими изменениями, но с сохранением азимута, чтобы не повторять астрономические измерения для обеспечения измерений склонения в векторной магнитометрии.

Практическое изучение методов поисковой магнитометрии включает модульную съемку участка протонными ММП-203 и

квантовыми М-60 магнитометрами. (В некоторых пунктах сети из-за больших градиентов аномального магнитного поля невозможны измерения с протонными магнитометрами.) Шаг измерений по профилям в этом случае может быть 5 или 10 м, так как эта съемка весьма производительна, выполняется практически со скоростью передвижения пешехода. Кроме того, на участке или отдельных профилях выполняется компонентная съемка ΔZ торсионными магнитометрами М-27 и М-27М. В этом случае для экономии времени шаг съемки по профилю равен 20 м.

Для надежной оценки параметров рудных тел применяется векторная магнитная съемка аппаратным комплексом модульного *T*-магнитометра с феррозондовым теодолитом для измерения угловых элементов магнитного поля Земли – склонения *D* и наклона *I*. Шаг съемки 20 м.

Склонение *D* - это угол между магнитным и географическим меридианами в точке измерения. Феррозондовым теодолитом фиксируется направление магнитного меридиана. Чтобы измерить склонение, надо знать географический азимут направления из точки измерения на какой-нибудь удаленный объект (миру). Это важно при любых векторных магнитных измерениях. С этой целью проводятся астрономические наблюдения (Солнца).

При изучении вековых вариаций такие измерения выполняются в каждом пункте. Чтобы обеспечить точность порядка $\pm 0,5'$, в зависимости от точности используемого теодолита требуется от 3 до 10 циклов измерений. Длительность цикла составляет 15-20 мин, так как он включает 8 отсчетов времени прохождения левым и правым краем Солнца вертикальной плоскости, проходящей через пункт наблюдений при двух положениях (слева и справа) вертикального круга теодолита относительно луча визирования.

Для разведочной векторной съемки такая технология слишком трудоемка, астрономические измерения требуют много времени и не всегда возможны по погодным условиям. Используется схема одного базового пункта (Пр. 2/97, ПК 0) астрономических наблюдений на участке векторной съемки с визированием по линии профиля. При наличии системы параллельных профилей это сделать нетрудно. В других случаях требуется передать азимут миры на каждый съемочный профиль посредством угловых теодолитных измерений.

Феррозондовые измерения склонения и наклонения

Измерения угловых элементов геомагнитного поля выполняются нулевым методом. Электронный блок фиксирует положения оси феррозонда, перпендикулярные вектору магнитной индукции T : при горизонтальном положении трубы определяется направление магнитного меридиана, затем труба ориентируется по магнитному меридиану и определяется наклонение.

В общем случае имеется 8 нулевых положений: 4 – при фиксировании магнитного меридиана (феррозонд над и под трубой, ориентированной к востоку или западу) и 4 – при измерении склонения (объектив к северу или югу при положениях феррозонда над и под трубой). Полная схема из 8 измерений позволяет устранить влияние несовместности осей феррозонда и теодолита и погрешностей юстировки теодолита.

Для векторной съемки при разведке железорудных залежей эта схема измерений неудобна из-за низкой производительности. Высокой точности измерения элементов магнитного поля в конкретных пунктах в такой съемке не требуется, так как главные ошибки связаны с дискретностью сети наблюдений, точностью плановой привязки пунктов измерений и погрешностями интерполяции значений элементов поля между этими пунктами. Поэтому используется простая технология измерений: по одному отсчету теодолита на каждый измеряемый элемент поля. С этой целью путем измерений угловых элементов в точках с известным геомагнитным полем определяются ориентационные поправки к отсчетам феррозондовых теодолитов при измерениях склонения и наклонения в каждом избранном положении (феррозонда по отношению к трубе и ориентировки трубы). Положения выбираются из условия минимума значений поправок.

Методика векторной магнитной съемки

Основные положения методики векторной магнитной съемки для поисков и разведки железорудных месторождений, использу-

емой на участке Самсон сводятся к следующим:

а) выбор структуры съемочной сети определяется предполагаемым положением и формой рудного тела, рельефом местности. Правильная сеть точек измерений с прямолинейными и параллельными друг другу профилями нужна для минимизации затрат труда на измерение географического меридиана в каждой точке (достаточно одного измерения географического азимута профиля). Прямолинейные профили к тому же удобны при количественной интерпретации магнитных аномалий;

б) на базовом пункте участка выполняются астрономические измерения географического азимута профиля (или мира) по наблюдениям положения Солнца в фиксированные моменты времени;

в) на базовом пункте участка выполняются векторные магнитные измерения по полной схеме 8 положений. По ним контролируется стабильность и точность определения поправок к данным измерений в избранных стандартных положениях трубы и феррозонда;

г) в пунктах съемочной сети выполняются измерения по упрощенной схеме двух отсчетов. После установки теодолита по уровням труба устанавливается горизонтально (на вертикальном круге – нули) и ориентируется вдоль профиля (на миру) с установкой на горизонтальном круге значения азимута профиля (мира). В этом случае нуль отсчета горизонтальных углов соответствует географическому меридиану, что предотвращает промахи, позволяя визуально контролировать измерения, и упрощает обработку данных;

д) после угловых измерений в точку, где находился датчик феррозонда, помещается датчик протонного (или квантового) магнитометра для измерения T . Протонный магнитометр удобнее, но в точках с большими градиентами, где измерения с ним невозможны, приходится использовать квантовый магнитометр;

е) обработка данных выполняется на РС в системе электронных таблиц Excel. Интерпретация результатов съемки в настоящее время выполняется по программе MAGNA для модели двумерных (бесконечных ортогонально профилю) пластов с сечениями в форме параллелепипеда произвольных размеров,

формы, положения в плане и по глубине, ориентировки и намагниченности.

Обработка данных включает:

- вычисление по D , I и T других элементов полного поля:

$$Z = T \sin I, H = T \cos I, X = T \cos I \cos D, Y = T \cos I \sin D;$$

- вычисление элементов аномального поля по известным значениям элементов полного и нормального полей. На участке Самсон в качестве нормальных взяты значения элементов геомагнитного поля 1998 г. на ПВХ-Самсон в 260 м к западу от участка съемки по линии профиля 5/98, в слабо аномальном поле $T_0 = 59800$ нТл, $Z_0 = 57308$ нТл, $H_0 = 17084$ нТл, $X_0 = 16835$ нТл, $Y_0 = 2908$ нТл, $D_0 = 9,8^\circ$, $I_0 = 73,45^\circ$. Сначала вычисляются $X_a = X - X_0$, $Y_a = Y - Y_0$, $Z_a = Z - Z_0$, а затем остальные элементы аномального поля по формулам:

$$\begin{aligned} H_a &= (X_a^2 + Y_a^2)^{1/2}, T_a = (X_a^2 + Y_a^2 + Z_a^2)^{1/2}, \\ D_a &= \arctg(Y_a/X_a), I_a = \arctg(Z_a/H_a). \end{aligned} \quad (16)$$

Результаты съемки представляются в виде карт аномалий T_a , Z_a , H_a с указанием направления вектора H_a горизонтальной составляющей аномального поля (по D_a), карты ΔT (для сравнения с T_a) и профилей с кривыми T_a , Z_a , H_a и ΔT .

Поскольку на участке Самсон рудные тела залегают на небольшой глубине, при количественной интерпретации магнитных аномалий необходимо учитывать положение точек по высоте. Для этого высоты пикетов всех профилей определяются барометрическим нивелированием. Поскольку высокой точности определения высот не требуется, а участок имеет малые размеры, пространственно-временными изменениями атмосферного давления можно пренебречь. Используется упрощенная методика наблюдений: от одного исходного пункта участка (Пр.1, ПК-0) определяются относительные высоты всех остальных пикетов путем измерения давлений на исходном и других пикетах. Обработка данных измерений выполняется по стандартному шаблону в электронных таблицах Quattro или Excel.

На отчетных разрезах по каждому профилю кроме графиков аномалий приводятся модели рудных тел на реальном рельефе, которые получены по результатам интерпретации магнитных

аномалий.

Количественная интерпретация магнитных аномалий

Оценка параметров рудных тел по магнитным аномалиям проводится по каждому профилю отдельно. В программе MAGNA, используемой для интерпретации, определяется полный набор характеристик бесконечных (поперек профиля) пластов, имеющих в сечении форму параллелограмма произвольной формы, размеров, расположения и ориентировки в пространстве, а также намагниченности. Этими характеристиками являются: положение левого ($X1$) и правого ($X2$) ребер тела, их глубина ($H1$, $H2$) и длина между верхней и нижней гранями (LNG) – все величины в метрах, угол наклона тела к оси X (AI) и угол намагничивания (Fi) – в градусах, интенсивность намагниченности – в единицах 10^{-5} СГС.

Условиями надежности оценки параметров рудных тел являются близость модели и реальной структуры рудного тела и выполнение требований единственности решения обратной задачи – соответствие модели пласта классу выпуклых многогранников, малое число тел в одном разрезе и отсутствие пересечений разных тел; первое требование выполняется выбором модели, два других находятся в компетенции интерпретатора.

Контролем результатов интерпретации является сходство параметров на соседних профилях.

Инструкция по использованию программы MAGNA для интерпретации магнитных аномалий

Входная информация для решения прямой задачи:

1. Вид исследуемого поля. Возможны варианты:

а) Z - компонента аномального поля;

б) H - компонента аномального поля;

в) аномалии модуля полного вектора геомагнитного поля (ГМП);

г) вертикальная производная модуля полного вектора ГМП.

2. Высоты точек задания интерпретируемого поля.
3. Значения наблюдаемого поля (для решения прямой задачи можно ввести нули).
4. Число точек наблюдений – определяется автоматически по числу пунктов высот точек наблюдения интерпретируемого поля. Это число должно совпадать с числом введенных значений наблюдаемого поля.
5. Длина профиля. Длина профиля и число точек наблюдений определяют координаты x точек наблюдений поля в предположении равномерного шага по профилю.
6. При расчетах аномалий модуля полного вектора магнитного поля необходимо задать I_0 – угол наклона к горизонту проекции полного вектора нормального ГМП поля на плоскость профиля.
7. Уровень нормального поля (для расчета прямых задач может быть положен равным нулю).
8. Параметры пласта; идентификаторы ($X1$, $H1$, $X2$, $H2$, LN , AL , FI , J) используются в диалоге для коррекции оператором их значений:
 - $X1$ – координата x левой верхней кромки пласта;
 - $H1$ – глубина левой верхней кромки пласта от рельефа;
 - $X2$ – координата x правой верхней кромки пласта;
 - $H2$ – глубина правой верхней кромки пласта от рельефа;
 - LN – длина пласта;
 - AL – угол наклона пласта к положительному направлению оси x ;
 - FI – наклона вектора намагничивания пласта к горизонту;
 - J – величина намагничивания пласта в единицах 10^{-5} СГС.

Вызов программы производится посредством команды
>MAGN.EXE или >MAGN

Если на диске уже есть информация о профиле и магнитных пластах (записанная из программы в специально организованный файл), то использовать эту информацию можно при помощи команды

>MAGN <имя файла данных об интерпретируемом профиле>

После загрузки программы на экране появится главное меню:

ВЫБЕРИТЕ ВАРИАНТ РАБОТЫ:

- 1 ВВЕСТИ ИНФОРМАЦИЮ О ПРОФИЛЕ С ТЕРМИНАЛА
- 2 СЧИТАТЬ ИНФОРМАЦИЮ О ПРОФИЛЕ
- 3 ИСПРАВИТЬ ДАННЫЕ ПРОФИЛЯ
- 4 ВЫВЕСТИ ДАННЫЕ
- 5 ВКЛЮЧИТЬ РЕЖИМ ПОДБОРА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
- 6 СОХРАНИТЬ ДАННЫЕ
- 7 КОНЕЦ РАБОТЫ

Если Вы использовали второй способ вызова программы >MAGN <имя файла данных об интерпретируемом профиле>, то выберите вариант 5 – ВКЛЮЧИТЬ РЕЖИМ ПОДБОРА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ для расчета прямой задачи и интерпретации аномалий.

В противном случае необходимо выбрать вариант 2 – СЧИТАТЬ ИНФОРМАЦИЮ О ПРОФИЛЕ для ввода имени файла, в котором записана информация о профиле и магнитных пластах, - и для чтения этого файла с диска или вариант 1 – ВВЕСТИ ИНФОРМАЦИЮ О ПРОФИЛЕ С ТЕРМИНАЛА для ввода с терминала всей необходимой информации.

Вариант 3 - ИСПРАВИТЬ ДАННЫЕ ПРОФИЛЯ – позволяет изменить всю введенную информацию. Для выбора исправлений следует использовать подменю:

ВЫБЕРИТЕ ВАРИАНТ ИСПРАВЛЕНИЙ

1. ИСПРАВИТЬ ДЛИНУ ПРОФИЛЯ
2. ВИД ИНТЕРПРЕТИРУЕМОГО ПОЛЯ
3. УГОЛ НАКЛОНА ВЕКТОРА ГЛАВНОГО ПОЛЯ
4. НОРМАЛЬНЫЙ УРОВЕНЬ ПОЛЯ
5. ВЫСОТЫ ТОЧЕК НАБЛЮДЕНИЙ
6. НАБЛЮДЕННОЕ ПОЛЕ
7. ПОЛЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ГРАДИЕНТА /Г/
8. ЗАСЫЛКА ВЫЧИСЛЕННОГО ПОЛЯ В НАБЛЮДЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОМЕХИ В НАБЛЮДЕННОМ ПОЛЕ
9. ПАРАМЕТРЫ ПЛАСТОВ
10. ВЫХОД

Вариант 6 – СОХРАНИТЬ ДАННЫЕ – следует использовать

для сохранения на диске введенных данных (информации о профиле и магнитных пластах). При этом запрашивается имя файла, в котором будет записана информация. Если при вводе имени файла будет выдано сообщение о том, что файл с таким именем уже существует, введите другое имя или подтвердите, что хотите записать новую информацию на место старой, при этом старая информация будет затерта. Для отмены введенных команд и возврата на предыдущий шаг диалога используйте клавишу <Esc>.

При выборе варианта 5 из главного меню – **ВКЛЮЧИТЬ РЕЖИМ ПОДБОРА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ** – на экране появится изображение разреза с магнитными пластами в нижней части и рассчитанным магнитным полем в верхней части.

Внизу экрана список параметров текущего тела - идентификаторов ($X1$, $H1$, $X2$, $H2$, LNG , AL , FI , J) и значений параметров. Для изменения параметров нужно:

- 1) набрать идентификатор параметра;
- 2) нажать на клавишу ввода – <Enter>;
- 3) после появления подсказки <идентификатор> ввести новое значение параметра;
- 4) нажать на клавишу ввода – <Enter>.

Для расчета прямой задачи нужно ввести команду **E**. При этом поле предыдущего варианта останется на экране, но станет более бледным, новое поле будет изображено ярким цветом. Для расчета прямой задачи и перемасштабирования верхней половины экрана с изображенными полями следует использовать команду **ER**.

Для изменения масштаба в нижней части экрана существует команда **SC**, по которой задается соотношение вертикального и горизонтального масштабов.

Команда **DX** позволяет целиком переносить пласт по оси X , а команда **DN** переносит пласт по оси глубин. В ответах на подсказку в этих командах нужно вводить величину относительного смещения тела от старого положения.

Команда **B** позволяет прямо изменять полуширину пласта без перемещения его средней линии. Выход из режима подбора параметров пластов осуществляется командой **EE**.

Список команд редактирования выводит на экран команда **H**.

Основные операции в процессе подбора выполняются с помощью «горячих клавиш». Клавиши управления курсором сдвигают все тело соответственно назначению клавиш – влево, вправо, вверх или вниз; цифровые клавиши правой части клавиатуры перемещают: **7** и **1** – левый край тела соответственно вверх и вниз без изменения правого края, **9** и **3** – правый край вверх и вниз, **8** – верхнюю границу вверх, **2** – нижнюю границу вниз, **4** – левый край влево, **6** – левый край вправо. При всех перемещениях предыдущие варианты модельной кривой сохраняются в более темном цвете, пока не нажата клавиша **ВВОД** или **5**, которая сравнением масштабов модельной и реальной кривых подбирает значение намагниченности. Правые – и + уменьшают или увеличивают угол наклона тела к горизонту. Правая клавиша * увеличивает, а клавиша / уменьшает шаг дискретизации при подборе параметров.

При наличии в разрезе нескольких тел после подбора одного из них набирается в командной строке **p12**, **ВВОД** и назначаются исходные параметры второго тела, после их подбора – следующего (**p13**, **ВВОД**). Когда есть несколько тел, как правило, нужна схема последовательных приближений: возврат к уточнению параметров первого тела (**p11**, **ВВОД**) и т.д. до тех пор, пока показатели точности подбора не перестанут уменьшаться.

Примеры данных векторной съемки на участке Самсон

На рис. 9 приведен график (из таблиц Excel) с кривыми элементов аномального поля по данным трехкомпонентных измерений T , D , I по одному из профилей участка Самсон.

Таблица Excel является шаблоном. Новые данные вносятся в соответствующие столбцы и строки этого шаблона вместо записанных, и в таблице автоматически вычисляются элементы магнитного поля по новым данным.

На рис. 9 нужно обратить внимание на то, что ΔT во всех точках меньше T_a , что вполне объяснимо: проекция на любое направление всегда меньше модуля вектора.

В табл. 4 приводятся результаты оценки параметров рудных

тел по аномалиям ΔT , Ta , Za по этому профилю по данным 1998 и 1999 гг. Эти данные в некоторой степени независимы: на профиле 1999 г., почти не отличающемся по положению с профилем 1998 г., не вполне совпадают точки наблюдений.

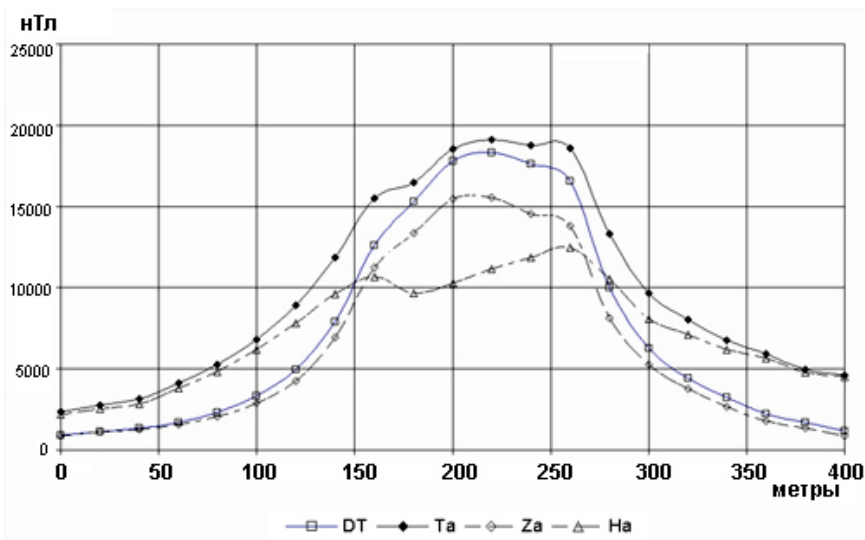


Рис. 9. Элементы аномального магнитного поля по профилю 3 участка Самсон.

Таблица 4. Параметры намагниченных тел по данным количественной интерпретации магнитных аномалий на профиле участка Самсон

Год	Элемент поля	$X1$	$H1$	$X2$	$H2$	LNG	$A1$	Fi	J
1998	ΔT	154	35	276	18	1100	82	90	37892
1999	ΔT	160	55	284	32	1300	84	90	45792
1998	Ta	166	58	298	52	1100	86	90	51008
1999	Ta	166	55	292	35	1200	81	90	41885
1998	Za	148	43	268	17	1200	94	90	36141
1999	Za	170	46	282	21	1200	93	90	39793
1998	T	154	31	224	30	1000	76	90	34808
	$\pm \epsilon$	10	5	10	3	200	5	2	1500

В предпоследней строке таблицы приведены данные интерпретации аномалий полного поля по более плотной сетке измерений, с шагом 5 м (остальные элементы определены, напомним, с шагом 20 м). Последняя строка содержит оценки погрешностей оценки каждого параметра по данным независимого подбора.

По этой схеме предлагается сравнивать параметры тел, полученные при количественной интерпретации разных элементов аномального магнитного поля по всем профилям участка Самсон.

Следует обратить внимание на различие параметров рудных тел, определяющих их магнитный момент (размеры тела в плане и по глубине и интенсивность намагничивания), при их оценках по аномалиям ΔT и T_a . Очевидно, что параметры, определенные по данным модульной съемки, занижены.

Магниторазведка в изучении долеритовых тел

Геологические представления о структурном положении и морфологии долеритовых тел у специалистов различаются. Геологи НГУ, ведущие учебную геолого-съемочную практику на полигоне Шира, рассматривают все эти тела, выходящие среди отложений матаракской и шунетской свит, как межпластовые интрузии – силлы. Основанием к этому является обнаружение в отдельных обнажениях, преимущественно в шунетской свите, горячих верхних и нижних контактов долеритов с вмещающими отложениями. По определению силлы – это относительно тонкие пласты, согласно залегающие между слоями осадочных пород и имеющие большие размеры по простиранию. Геологи томских вузов, напротив, считают эти породы эффузивными покровными, как правило русловыми отложениями, перекрытыми более молодыми осадками. При такой интерпретации размеры тел по простиранию могут быть самыми разными: покровы могут занимать большие площади, как в районе г. Кузьме, или иметь небольшие размеры в случаях их отложения в руслах рек или подводных каньонах. Пока не имеется убедительных данных, что все подобные тела можно относить к одному или другому типу. Не исключено предположение, что одни

из них (шунетские) долеритовые тела являются силлами, а другие – базальтовыми (или диабазовыми) покровами.

Методами магниторазведки в благоприятных случаях можно оценить основные параметры таких пластовых тел, в том числе их размеры по простиранию, что необходимо для решения проблемы.

По магнитной восприимчивости эти породы (долериты или диабазы) значительно отличаются от вмещающих слабо магнитных или практически немагнитных пород, но довольно неоднородны. Неизменные долериты имеют магнитную восприимчивость k от 10^{-4} до 10^{-3} ед. СИ. Наиболее неоднородными являются выветрелые породы вблизи земной поверхности, причем, как правило, k больше 10^{-3} ед. СИ, хотя изредка встречаются и значения $k < 10^{-4}$ ед. СИ.

С помощью магниторазведки при изучении долеритовых тел эффективно картируются их выходы на поверхность, в том числе под наносами или задернованные. В благоприятных случаях (по распределению магнитных свойств пород, размерам и положению тел) удается оценить элементы залегания долеритовых тел. Границы выходов долеритов отмечаются зонами высоких градиентов магнитных аномалий ΔT , но еще более надежно они выделяются в поле вертикального градиента магнитной индукции dT/dz в форме локальных максимумов непосредственно над границами. Для этого при модульной T -съемке в каждой точке профиля измеряют значения T на двух уровнях, различающихся по высоте на 1 м, что соответствует длине магниточувствительных блоков магнитометров ММП-203, М-33 и М-60.

На полигоне Шира находится много объектов для изучения положения долеритовых тел в осадочно-вулканогенных девонских комплексах. Это долеритовые тела в карбонатно-терригенных отложениях шунетской свиты на северном берегу оз. Шунет, на г. Кузьме и долеритовые гривы вдоль бессточной долины к северо-западу от г. Кузьме; тела долеритов в вулканогенно-осадочных отложениях матаракской свиты в окрестностях оз. Матарак и к югу от оз. Иткуль. Кроме того, имеются многочисленные мелкие тела долеритов (диабазов) в кембрийских карбонатных отложениях в юго-восточной части полигона, а также диабазов и диабазовых порфиринов в среднекембрийских эффузивах и гранитах северной части Улень-Туимского массива к югу от оз. Иткуль.

Магнитная съемка на долеритовых объектах может выполняться в площадном варианте или по отдельным профилям. Площадная съемка целесообразна на участках: г. Кузьме и ее окрестности, северный берег оз. Шунет, профильными съемками можно ограничиться на других из перечисленных выше объектов, а также при недостатке времени на проведение площадных съемок.

Поскольку долеритовые тела часто имеют небольшие размеры выходов и малую мощность (первые десятки метров), для их картирования и особенно для оценки параметров тел, в том числе элементов их залегания необходима съемка высокой детальности, с шагом 10, в крайнем случае 20 м. Когда основной является задача определения границ выходов тел на поверхность, проводятся измерения T и dT/dz . Последняя величина измеряется как $T_1 - T_2$ (разность значений T при положениях датчика МЧБ магнитометра соответственно на высотах 1 и 2 метра над землей). Такой вид съемки менее производителен, чем чистая модульная T -съемка, но ее информативность оправдывает дополнительные затраты времени.

Интерпретация полученных данных выполняется в два этапа. На этапе качественной интерпретации:

- выявляются аномалии, связанные с телами долеритов;
- определяются контуры выходов этих тел на земную поверхность;
- оценивается степень изолированности тел, а также неоднородность долеритов по магнитным свойствам;

и на этой основе принимается решение о возможности количественной оценки параметров тел.

На этапе количественной интерпретации осуществляется подбор параметров пластов долеритов по программе MAGNA для моделей пластовых тел. Критерием правильности решения является степень соответствия модельного поля наблюдаемым аномалиям T . Но этот критерий справедлив, когда модель среды соответствует условиям единственности обратной задачи магниторазведки. Модель пласта с однородной намагниченностью таким условиям соответствует. Важно обеспечить соответствие для совокупности пластов: они не должны пересекаться или иметь общие точки. Чем дальше отстоят пласты друг от друга в среде, тем надежней оценки

их параметров.

Технология подбора такая же, как при интерпретации магнитных аномалий на месторождении Самсон.

На рис. 10 приведен пример результатов интерпретации магнитных аномалий T для двух долеритовых тел на северном берегу оз. Шунет.

Он показывает, что магниторазведка вполне согласуется с геологическими данными о размерах выходов тел на поверхность, направлении и угле падения. Но геологические экстраполяции о больших горизонтальных размерах тел в направлении падения не подтверждаются. Верхнее тело простирается примерно на 1 км на северо-запад от северо-восточного угла озера. Оно имеет ширину выхода (30 ± 5) м, а длину по падению не более 120 м. Нижнее тело на порядок меньше по простираению по сравнению с верхним, имеет такую же ширину выхода, но по падению распространяется на (200 ± 40) м.

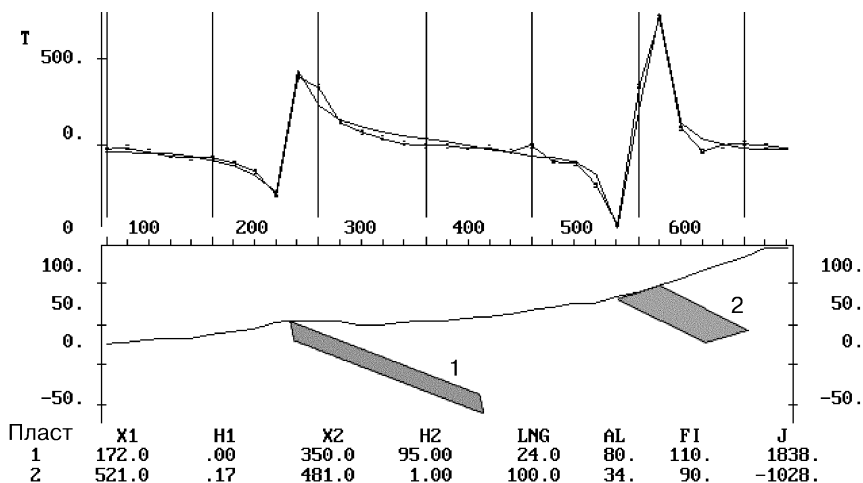


Рис. 10. Результаты интерпретации магнитных аномалий T по профилю около оз. Шунет.

Картирование осадочных отложений

По магнитным аномалиям можно определять границы распространения комплексов осадочно-вулканогенных пород, различающихся по намагниченности. С такими задачами в пределах полигона мы встречаемся в разных его частях. Это может быть задача разделения осадочных и эффузивных пород в матаракской и шунетской свитах южнее и юго-восточнее оз. Иткуль. Магнитные свойства эффузивных пород позволяют различать соответствующие им поля и от осадочных пород (матаракской и шунетской свит), и от гранитоидов Улень-Туимского массива. На основе магниторазведки, а лучше в комплексе с электропро-филированием, можно решать задачи картирования осадочных комплексов верхней части разреза. Осадочные породы легко разрушаются и формируют почвенный слой. В связи с этим границы свит нечетки, закрыты наносами. К таким объектам относятся границы ойдановской и бейской свит в северной части полигона между озерами Шира и Иткуль. Красноцветные породы ойдановской свиты (алевриты, песчаники) имеют невысокую магнитную восприимчивость k порядка 10^{-5} – 10^{-4} ед. СИ, причем песчаники заметно более магнитны, чем алевриты, тогда как известняки и песчаники бейской свиты практически не магнитны, что позволяет разделить их выходы по характеру неоднородности аномального магнитного поля.

Аномалии магнитного поля над ойдановскими породами могут быть вызваны небольшими, порядка первых метров и меньше, локальными неоднородностями – обогащением красноцветных песчаников гидроокислами железа.

В Хакасии, в том числе на территории полигона много древних могильников. Они, как правило, ограничены плитами из красноцветных песчаников ойдановской свиты. Вблизи базы практики эти могильники довольно отчетливо выделяются в магнитном поле практически немагнитных пород бейской свиты. Аномалии могильников связаны с их устройством: внутри они тоже выложены плитами ойдановских песчаников.

Высокая точность и производительность магнитных съемок с использованием протонных и квантовых магнитометров позволяет эффективно выявлять особенности внутренней структуры разных

захоронений по магнитным аномалиям. Эта задача имеет параметрическое значение: она позволяет оценить возможности магниторазведки в изучении тонкой магнитной структуры разреза слабомагнитных осадочных отложений, а также уровень магнитных помех в решении более содержательных разведочных геологических задач, о которых шла речь.

На могильниках имеет смысл выполнять площадную съемку с шагом 1–2 м. Для этого определяются контуры участка съемки с могильником в его средней части. Краевые части участка должны выходить за пределы могильника на 10–12 м. Измерения выполняются по системе профилей, проложенных с мерными лентами. Данные можно вынести на планшет в масштабе 1:200 или строить компьютерный план изолиний (по программе Surfer).

Литература

1. Грушинский Н. П., Сажина Н. Б. Гравитационная разведка. М.: Недра, 1988.
2. Инструкция по гравиразведке. М., 1980.
3. Ладынин А. В. Гравиразведка и магниторазведка. Новосибирск: Изд-во НГУ, 1997.
4. Ладынин А. В. Геологическая интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. Новосибирск: Изд-во НГУ, 1995.
5. Комплексная геолого-геофизическая практика на полигоне Шира (А. В. Ладынин, Г. С. Федосеев, Ю. А. Дашевский, В. М. Куликов, А. Н. Василевский). Новосибирск: Изд-во НГУ, 1992.
6. Гринкевич Г. И. Магниторазведка. М.: Недра, 1987.
7. Гравиразведка. Справочник геофизика. М.: Недра, 1990.
8. Магниторазведка. Справочник геофизика. М.: Недра, 1990.

Содержание

Введение	3
Гравиметрическая аппаратура	9
<i>Гравиметры типа ГАК</i>	9
<i>Устройство, принцип действия</i>	9
<i>Технические характеристики гравиметров</i>	13
<i>Источники погрешностей измерений</i>	16
<i>Достоинства и недостатки гравиметров типа ГАК</i>	17
<i>Регулировка и эталонирование гравиметров</i>	18
Магнитная аппаратура.....	24
<i>Каппаметр</i>	25
<i>Протонный магнитометр</i>	26
<i>Квантовые магнитометры</i>	29
<i>Оптико-механические магнитометры</i>	31
<i>Феррозондовые магнитометры</i> <i>Ошибка! Закладка не определена.</i>	
Геологические задачи гравиразведки и магниторазведки на полигоне Шира.....	39
Элементы морфологии Улень-Туимского гранитного массива.....	42
Определение плотности пород в пределах рельефа	48
Разведка магнетитового месторождения Самсон	50
<i>Феррозондовые измерения</i> <i>склонения и наклонения</i>	53
<i>Методика векторной магнитной съемки</i>	53
<i>Количественная интерпретация магнитных аномалий</i>	56
<i>Инструкция по использованию программы MAGNA для интерпретации магнитных аномалий</i>	56
<i>Примеры данных векторной съемки на участке Самсон</i>	60
Магниторазведка в изучении долеритовых тел.....	62
Картирование осадочных отложений	66
Литература.....	68
Содержание	69