

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ МАЛОГЛУБИННОЙ МАГНИТОРАЗВЕДКИ	9
1.1. Основные задачи инженерной геофизики	9
1.2. Методы геофизических исследований для решения задач малоглубинной магниторазведки	11
1.3. Геомагнитное поле Земли и влияние на него структуры приповерхностной естественной природной среды и искусственных техногенных объектов	13
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ДАТЧИКОВ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ.....	19
2.1. Общая классификация датчиков геомагнитного поля.....	19
2.2. Основные типы ферромагнитных элементов.....	27
2.3. Ферроиндукционные преобразователи	30
2.4. Устройство феррозондов	33
2.5. Режимы работы феррозондов.....	39
2.6. Пути улучшения эксплуатационных свойств феррозондов.....	46
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАГНИТОУПОРЯДОЧНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ СТРУКТУР	50
3.1. Анализ основных факторов спин-волновой динамики.....	50
3.2. Особенности реализации магнитоэлектрического эффекта в ферритовых образцах....	58
3.3. Исследование возможных физических эффектов в сердечнике феррозонда	67
ГЛАВА 4. СПОСОБЫ И СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ФЕРРОЗОНДОВ.....	75
4.1. Традиционные способы возбуждения феррозондов	75
4.2. Разработка нового типа элемента накачки феррозонда.....	76
ГЛАВА 5. ФЕРРОЗОНДЫ НА ОСНОВЕ КИРАЛЬНОГО ФАКТОРА.....	82
5.1. Разработка нового способа возбуждения феррозондов.....	82
5.2. Конструкция устройства модулятора феррозонда для реализации предложенного способа.....	90
5.3. Конструктивное исполнение феррозонда с новым способом возбуждения	94
ГЛАВА 6. ФЕРРОЗОНД НА ОСНОВЕ АКУСТИЧЕСКОГО МАГНИТОУПРУГОГО ЭФФЕКТА	97
6.1. Распространение акустических волн в пьезомагнитных материалах	97
6.2. Анализ процесса взаимодействия упругих волн с магнитоупорядоченными средами.....	98
6.3. Устройство модулятора, реализующего акустоэлектромагнитный эффект возбуждения	103
ГЛАВА 7. ФЕРРОЗОНД СО ВСТРОЕННОЙ ЛОКАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ	107
7.1. Прямой и обратный магнитоэлектрический эффект.....	107

7.2. Возбуждение ферромагнитной структуры с локальной неоднородностью	110
7.3. Конструкция модулятора для ферромагнитной системы с локальной неоднородностью	114
ГЛАВА 8. ФЕРРОЗОНД НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНО-АКУСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА	121
8.1. Способ возбуждения феррозондов на основе ЭМА-эффекта	121
8.2. Физические основы нового способа возбуждения феррозондов	123
8.3. Теоретическое обоснование нового способа возбуждения феррозондов	126
8.4. Устройство модулятора для бифакторного возбуждения феррозондов	130
8.5. Работа феррозондов с возбуждением на основе ЭМА-эффекта в различных режимах	134
ГЛАВА 9. ФЕРРОЗОНД С МУЛЬТИФАКТОРНЫМ РЕЖИМОМ ВОЗБУЖДЕНИЯ	138
9.1. Обоснование нового принципа построения феррозондовых магнитометров	138
9.2. Анализ процесса воздействия переменного электрического потенциала пространственного заряда на электропроводящую магнитоупорядоченную структуру ...	140
9.3. Вариант феррозондового магнитометра с мультифакторным возбуждением	147
9.4. Структурная блок-схема магнитометра с мультифакторным возбуждением	149
ГЛАВА 10. ДВУХКОМПОНЕНТНЫЙ ФЕРРОЗОНДОВЫЙ МАГНИТОМЕТР	152
10.1. Феррозондовые магнитометры для измерения отдельных компонентов геомагнитного поля	152
10.2. Разработка двухкомпонентного феррозондового магнитометра с новым принципом возбуждения	154
10.3. Практическая реализация двухкомпонентного феррозондового магнитометра	160
10.4. Структурная блок-схема двухкомпонентного магнитометра	163
ГЛАВА 11. ФЕРРОЗОНД С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ УГЛОВОЙ ПРЕЦЕССИЕЙ	166
11.1. Анализ методов снижения неопределенности измерений	166
11.2. Способ измерения вектора напряженности геомагнитного поля	171
11.3. Магнитометр с тестовым алгоритмом функционирования	179
ГЛАВА 12. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ФЕРРОЗОНДОВ	181
12.1. Методологические и технологические задачи при создании магнитометрического испытательного стенда	181
12.2. Конструкция имитатора магнитного	183
12.3. Вариант лабораторного испытательного стенда для феррозондов с новым принципом построения	188
12.4. Результаты экспериментальных исследований феррозонда с новым мультифакторным режимом возбуждения	191
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	195
ЛИТЕРАТУРА	198

ВВЕДЕНИЕ

Человека постоянно окружают различные магнитные поля, начиная от *естественных полей*, к которым относятся как внутреннее геомагнитное поле планеты Земля, создаваемое за счет взаимодействия разных слоев планеты, так и внешнее поле, генерируемое магнитосферой и имеющее околоземное и космическое происхождение, до *искусственных техногенных магнитных полей*, создаваемых техническими средствами, произведенными человеком [1, 2]. Зачастую эти техногенные поля являются паразитными и нежелательными, но при этом неизбежными по сути протекающих физических процессов. К источникам таких полей относятся линии электропередач и системы электроснабжения, транспорт на электроприводе, радиорелейные и радиолокационные станции, электронная техника и т. п.

Очевидно, что контроль магнитного поля Земли представляет значительный научный и практический интерес. Результаты такого контроля позволяют, например, исследовать магнитные бури и космическую погоду, прогнозировать экстремальные природные события, использовать магнитное поле как природный ориентир, а также решать целый ряд других важных задач. Кроме того, различные виды магнитных полей в зависимости от их интенсивности оказывают влияние на человека и иногда могут наносить ему вред [3, 4]. С этой точки зрения также необходим контроль активности магнитного поля.

Наряду с этим, в настоящее время без магнитного поля невозможно представить нашу современную жизнь, поскольку оно используется во множестве важнейших технологий и устройств в самых различных сферах деятельности человека — в технике, геологии, навигации, медицине, при проведении геофизических и космических исследований и т. д. [5–10]. В этом случае специально созданное магнитное поле самостоятельно или в совокупности с естественным полем выполняет различные функции, в первую очередь, контрольно-регулирующие, управляющие и диагностические.

Таким образом, видно, что контроль магнитных полей и измерение их параметров является чрезвычайно важной и актуальной многоплановой задачей.

Контроль магнитных полей осуществляют с помощью устройств, называемых *магнитометрами* (ММ), которые могут быть разных типов, в зависимости от физического принципа их работы, например, магнитостатические, индукционные, квантовые и т. д. Тип ММ определяется используемыми в них физическими явлениями и эффектами, позволяющими осуществлять контроль параметров магнитного поля, например, явление электромагнитной индукции, эффекты Гаусса, Холла, Зеемана, Оверхаузера и другие [11].

Технические возможности различных типов ММ позволяют их использовать для решения целого ряда различных прикладных и научных задач, имеющих по своим функциональным предназначениям соответствующую классификацию.

1. Измерение параметров магнитных полей:

- измерение магнитного поля Земли, а также индикация постоянно и медленно меняющихся магнитных полей в научных целях;
- мониторинг окружающей среды с целью определения наличия естественных электромагнитных полей и расположения вредных искусственно создаваемых электромагнитных излучений, а также оценки их влияния на живой организм;
- поиск и обнаружение магнитных аномалий в космосе, в воздушной, подводной, надводной и подземной средах.

2. Малоглубинная магниторазведка:

- в сейсморазведке магнитометры используются как часть системы по обнаружению землетрясений, поскольку при движении тектонических плит меняются характеристики магнитного поля Земли, характерные для той или иной местности;
- в геологии магнитометры используются для магнитной разведки для поиска некоторых видов полезных ископаемых;
- в скважинной магнитометрии для измерения магнитной восприимчивости горных пород и контроля направления хода буровых скважин;
- в геохронологии по силе остаточной намагниченности можно сделать первичные выводы о возрасте горных пород;
- в геомагнитной съемке ММ применяются для обнаружения и локализации целей, в том числе в подводной среде;
- обнаружение скрытых металлосодержащих объектов для поиска и идентификации подповерхностных объектов, находящихся в непроводящих или слабопроводящих средах. ММ можно использовать в системах безопасности и охраны различных объектов, для поиска минно-взрывных устройств, а также проводить археологические изыскания и поиск кладов.

3. Магнитная дефектоскопия и неразрушающий контроль:

- контроль состояния технических объектов. Например, феррозондовые датчики используются для контроля функционирования клапанов различных пневмогидравлических систем;
- выявление поверхностных и подповерхностных дефектов типа нарушений сплошности (волосовин, трещин, раковин, закатов, плен, ужимов и т. п.), а также для контроля качества структуры и геометрических размеров изделий.

4. Системы навигации и ориентации в автомобильной, авиационной, судостроительной и космической отраслях:

- автономная навигация через измерения магнитного поля Земли в условиях отсутствия сигналов навигационных систем;
- ориентация искусственных спутников Земли;
- определение направления и скорости движения объекта, в том числе в условиях внешнего магнитного поля Земли;
- точное наведение и выявление опасности сближения с посторонними объектами, например, навигационные системы БПЛА для определения положения и направления его движения.

5. Медицинская диагностика:

- магнитная томография;
- отображений функций головного или спинного мозга;
- диагностика и терапия злокачественных новообразований;
- диагностика заболеваний суставов и мягких тканей, сердечно-сосудистых заболеваний и т. д.;
- поиск инородных металлических предметов в теле человека.

6. Решение особых технических задач:

- использование в системах магнитного вакуума, например, в системах экранирования квантовых компьютеров;
- для бесконтактного измерения больших и сверхбольших переменных и постоянных токов путем преобразования их электромагнитного поля в информационный сигнал.

Очевидно, что для успешного решения такого большого количества различных функциональных задач, зачастую значительно отличающихся друг от друга, требуется большое количество разнообразных типов и модификаций ММ,

которые различаются конструктивным исполнением и схемотехническими решениями, способами возбуждения и режимами работы, принципами действия магниточувствительного элемента, используемыми материалами активных частей, способами обработки сигналов и т. д.

При этом следует отметить, что любой ММ содержит два основных функциональных блока:

1) первичный измерительный преобразователь в виде датчика магнитного поля, который предназначен для регистрации параметров магнитного поля и преобразования их в электрический выходной информационный сигнал;

2) вторичный измерительный преобразователь — электронный блок для обработки информационного сигнала и вывода соответствующей информации по внешнему интерфейсу.

Функциональные возможности и технические характеристики ММ определяется функциональными параметрами обоих указанных блоков. Соответственно, работы по совершенствованию эксплуатационных свойств ММ предполагают проведение соответствующих исследований по улучшению свойств каждого из указанных блоков ММ.

Очевидно, что рассмотреть в полном объеме все существующее многообразие ММ и пути их улучшения в одной ограниченной по объему монографии невозможно. Поэтому авторы сделали основной упор только на группу ММ, объединенных под общим названием «феррозондовые магнитометры (ФМ)», первичным измерительным преобразователем которых является феррозондовый преобразователь (феррозонд). По сравнению с другими типами преобразователей магнитного поля, ФМ обеспечивают одновременное измерение нескольких компонентов магнитного поля в широком рабочем температурном диапазоне, обладают высокой чувствительностью и малым энергопотреблением и имеют при этом высокую надежность и стойкость к внешним воздействиям, а также меньшую стоимость. При этом основное внимание уделено ФМ, предназначенным для малоглубинной магниторазведки и обнаружения скрытых подповерхностных техногенных объектов различного назначения.

Феррозонд представляет собой устройство, которое чувствительно к внешним постоянным и медленно меняющимся магнитным полям. Обычно он содержит ферромагнитный сердечник, систему возбуждения в виде обмотки возбуждения и измерительную обмотку. Его работа основана на нелинейных свойствах материалов сердечника и заключается во взаимодействии в сердечнике внешнего измеряемого поля и вспомогательного переменного поля, создаваемого системой возбуждения. Это взаимодействие приводит к появлению в выходной измерительной обмотке ЭДС, пропорциональной измеряемому магнитному полю. Величина этой ЭДС и является информационным сигналом, по которому судят о параметрах внешнего магнитного поля.

Однако в рамках классического подхода к организации функционирования феррозонда, основанному на магнитомодуляционном преобразовании магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника, возможности улучшения эксплуатационных свойств феррозондов практически исчерпаны и, в сущности, их улучшение может базироваться в основном только в следующих направлениях:

- уменьшения амплитуды тока возбуждения и, соответственно, снижение тепловыделения, что обеспечит феррозонду высокую термическую стабильность;
- поиск новых способов первичного преобразования входного сигнала с целью минимизации габаритов феррозонда;
- улучшение систем обработки выходного сигнала.

В монографии авторами предлагается концепция использования магнитоупорядоченных физических структур в виде ферритомангнитных материалов (ферритов) для сердечника феррозонда. Использование ферритовых материалов в качестве активной физической среды дает возможность преобразовывать внешние воздействующие физические поля (например, переменное электрическое поле) в поля другой физической природы (например, обеспечить взаимную трансформацию механических упругих и электромагнитных полей). Это позволит не просто изменить параметры процессов магнитной модуляции их магнитной проницаемости за счет собственных магнитных свойств феррита, а обеспечить возможность инициировать одновременно дополнительные физические эффекты при резонансном воздействии соответствующими физическими полями. Как будет показано, применение ферритов позволит возбуждать в их структуре, например, акустическое поле в виде радиальных продольных волн, которым осуществляют дополнительное акустомодуляционное преобразование магнитной проницаемости магнитопровода.

Исходя из этого, применение ферритов, в том числе электропроводных, обеспечивает возможность реализации дополнительных новых способов возбуждения феррозондов. Поэтому авторы в монографии рассматривают целый ряд вариантов феррозондовых преобразователей, которые реализуют различные способы мультифакторного возбуждения, основанные на том, что, в сущности, ферриты представляют собой активные магнитоупорядоченные физические структуры, в которых могут возникать сложные формы самоорганизации.

Кроме того, авторами рассмотрены способы и системы возбуждения феррозондов и предложен переход от многovitковых обмоток возбуждения к излучающим малогабаритным резонансным антеннам конденсаторного типа (С-антенны), выполняющим функции электродинамического модулятора. В таких антеннах поле возбуждения заключено в пределах физического объема ферритового сердечника, находящегося внутри антенны, что и обеспечивает ее высокую эффективность воздействия на структурные элементы сердечника. Предложенная конструктивная интерпретация излучающей С-антенны позволяет не только значительно увеличить термостабильность работы феррозонда, но и обеспечивает его минимальные массогабаритные параметры, пространственную компактность и высокую технологичность.

Таким образом, основной целью настоящей монографии является не просто анализ известных ФМ и их феррозондов, а описание разработанных авторами новых способов возбуждения и конструкций ФМ, в которых модуляция магнитной проницаемости магнитопровода и увеличение чувствительности и точности осуществляется одновременно за счет использования различных физических эффектов. Именно поэтому в монографии не только представлено большое количество различных вариантов построения феррозондов, обладающих улучшенными метрологическими свойствами за счет использования принципиально новых подходов к организации их функциональной структуры, но и проанализированы физические процессы, протекающие в этих феррозондах, и теоретически обоснованы их работоспособность и эффективность.

ГЛАВА 1. ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ МАЛОГЛУБИННОЙ МАГНИТОРАЗВЕДКИ

1.1. Основные задачи инженерной геофизики

Интенсивный рост промышленности, значительные масштабы урбанизации, нерациональное использование природных ресурсов, в связи с нестабильной экономической ситуацией в ряде регионов постсоветского пространства, зависящей в основном от добычи, переработки и экспорта сырья, приводят к увеличению техногенной нагрузки на окружающую среду. И как результат, последствия технической деятельности общества отражаются на всех компонентах природной среды. Вследствие этого остро встает вопрос о прогнозировании негативных процессов, которые могут возникнуть в результате хозяйственной деятельности и способствовать снижению устойчивости природной среды к загрязнению [12–14].

Эффективное решение данного вопроса предполагает наличие соответствующего уровня развития, прежде всего, инженерной геофизики, представляющей собой самостоятельный раздел геофизики, посвященный изучению верхней части разреза Земной коры, как сферы строительной и хозяйственной деятельности человека и объединяющий физические методы исследований, объектами которых являются: почвы, грунты (глубины изучения — метры), верхняя часть разреза — ВЧР (десятки метров), геолого-геофизическая среда (сотни метров).

Следует отметить, что предметом исследований являются малоглубинные физические поля естественного и искусственного происхождения с целью «косвенного» решения большого круга задач: гидрогеологических и почвенно-мелиоративных, инженерно-геологических и горных, мерзлотных и экологических, технических и археологических [15]. Особенности исследований инженерной геофизики являются: небольшие глубины и резкая неоднородность изучаемой геологической (или геолого-геофизической) среды; влияние природных экзогенных и антропогенно-техногенных процессов; наличие обширного класса решаемых задач в рамках геологических и технических дисциплин (гидрогеологии, почвоведения, инженерной геологии, горного дела, мерзлотоведения, гляциологии, технических средств изучения погруженных объектов, археологии и др.) с хорошо разработанными прямыми методами исследований.

Взаимодействие человека с окружающей средой и, в частности, исследование земной поверхности на глубину до 10 м (подповерхностного пространства) связано со строительством и эксплуатацией подземных инженерных коммуникаций, изучением условий распространения грунтовых вод и их минерализации, поиском археологических объектов и т. п. Это порождает большое число задач, решение которых необходимо строить на бесконтактном неразрушающем дистанционном методе исследования, создающем легко и однозначно интерпретируемые пользователем изображения однородности грунтов и находящихся в них объектов.

В мировой практике известно много подходов к изучению структуры грунта и объектов, залегающих в верхней части подповерхностного пространства. Они основаны на различных методах: электрического и электромагнитного зондирования, магниторазведки, радиоволнового зондирования (георадарометрия) и др. Каждый из них, наряду с преимуществами, обладает некоторыми недостатками: большие временные затраты, необходимость гальванического контакта с грунтом (методы постоянного тока), недостаточная информативность данных, низкая помехоустойчивость (частотное картирование, магниторазведка), узкая область применения (трассоискатели), сложность интерпретации и высокая стоимость аппаратуры (георадары). Кроме того, они не позволяют получить быстрое двухмерное представление подповерхностных объектов в виде вертикального геоэлектрического разреза.

Таблица 1.1

Основные задачи и методы инженерной геофизики

	Виды и методы геофизики	Грави- мет- рия	Магнитные			Электромагнитные										Сейсмические				Термические			Ядерные				
			АМС	МС	Мк МС	ЕП	ЭП	ВП	ВЭЗ	ВЭЗ- ВП	НЧМ РВМ	А- МТЗ	ЧЗ ЗСБ	РЛЗ	РВП	ЭЭ	СЭ	МПВ	МОВ	САП	ИКС РТС	ШТС	ДТ	ГС	ЭС	ГТМ НГМ	
1	Гидрогеологические		Геологические съемки разных масштабов, в том числе на ключевых участках																								
2			Поиски и разведка, изучение минерализации и температуры пластовых и трещинно-карстовых вод																								
3			Определение динамики подземных вод, фильтрационных и емкостных свойств пород																								
4			Изучение зоны аэрации, поиск и разведка, оценка качества грунтовых вод																								
5	Почвенно-мелиоративные		Почвенно-мелиоративное картирование с оценкой типов, глинистости, влажности, минерализации почв																								
6	Инженерно-геологические		Инженерно-геологические съемки разных масштабов, расчленение разреза, выделение геодинамических зон																								
7			Детальное расчленение ВЧР при проектировании, строительстве, эксплуатации объектов																								
8			Определение физико-механических, деформационно-прочностных свойств массивов пород, сооружений																								
9			Оперативная диагностика напряженно-деформированного состояния массивов в выработках																								
10	Мерзлотно-гляциологические		Картирование мерзлых и талых пород в плане и глубине, динамики мерзлоты																								
11			Расчленение покровных и горных ледников по мощности и строению льда и подстилающей среды																								
12	Технические		Изучение положения, состояния подземных коммуникаций, сооружений, их воздействия на среду																								
13	Археологические		Археологические исследования объектов погребенного историко-культурного наследия																								

В табл. 1.1 приведены основные задачи инженерной геофизики и классификация геофизических методов для их решения [16]. Рабочая совокупность основных () и вспомогательных () методов формируется путем соответствующего выбора 3 ÷ 5 методов из следующего набора известных геофизических методов: АМС, МС, МкМС, ИКС, РТС, ГС, ЭС — съемки (аэромагнитные, магнитные, микромагнитные, инфракрасные, радиотепловые, гамма, эманационные); ЕП, ЭП, ВП, НЧМ, РВМ — электромагнитные профилирования (естественного поля, сопротивлений, вызванной поляризации, низкочастотные, радиоволновые); ВЭЗ, ВЭЗ-ВП, А-МТЗ, ЧЗ, ЗСБ, РЛЗ, РВП — электромагнитные зондирования (вертикальные электрические, вызванной поляризации, магнитотеллурические, частотные, становлением поля, в ближней зоне, радиолокационные, радиоволновые просвечивания); ЭЭ, ЭС — естественной эмиссии (электромагнитной и сейсмоакустической); МПВ, МОВ, САП — сейсмоакустические (преломленных и отраженных волн, сейсмоакустических просвечиваний); ШТС и ДТ — термические (в шпурах, скважинах и в донных осадках); ГГМ и НГМ — ядерно-физические (гамма и нейтронные гамма методы).

Существующая необходимость развития инженерной геофизики объясняется: важностью для человечества обеспечения не только природными ресурсами, но и подземной водой, информацией об условиях строительства и эксплуатации сооружений, особенно крупных и аварийно опасных (атомных и других электростанций, крупных нефтехимических заводов, трубопроводов и др.), организации автоматизированного мониторинга за их деятельностью. Поэтому можно констатировать, что в настоящее время инженерная геофизика выдвигается в число научно-прикладных дисциплин государственного уровня значимости. В данной книге будут рассматриваться только вопросы магниторазведки.

1.2. Методы геофизических исследований для решения задач малоглубинной магниторазведки

Геофизические методы являются важнейшей составляющей сложного процесса геологоразведочных работ, их применение обеспечивает равномерное, глубинное и высокопроизводительное изучение недр Земли. Кроме того, повышая геологическую и экономическую эффективность изучения недр, геофизические методы исследования являются важнейшим фактором ускорения научно-технического прогресса в геологии и горном деле.

Как было показано выше, общее магнитное поле имеет, в общем случае, две составляющие:

- 1) естественные магнитные поля (суммарное геомагнитное поле Земли и поле, имеющее околоземное и космическое происхождение);
- 2) искусственные (техногенные) магнитные поля.

Соответственно, геофизические методы исследования физических полей бывают двух типов:

- активные, которые направлены на изучение искусственных полей;
- пассивные, которые направлены на изучение естественных полей.

Стоит отметить, что оборудование и процедуры пассивных исследований обычно стоят дешевле, чем активные.

Современные технологии позволяют решать большой спектр задач, имеют высокую разрешающую способность. Общее число видов геофизических исследований превышает 100. Различают магниторазведку, электроразведку, сейсморазведку и другие способы.

Рассмотрим основные методы геофизических исследований и их особенности. Их классификация приведена на *рис. 1.1*.

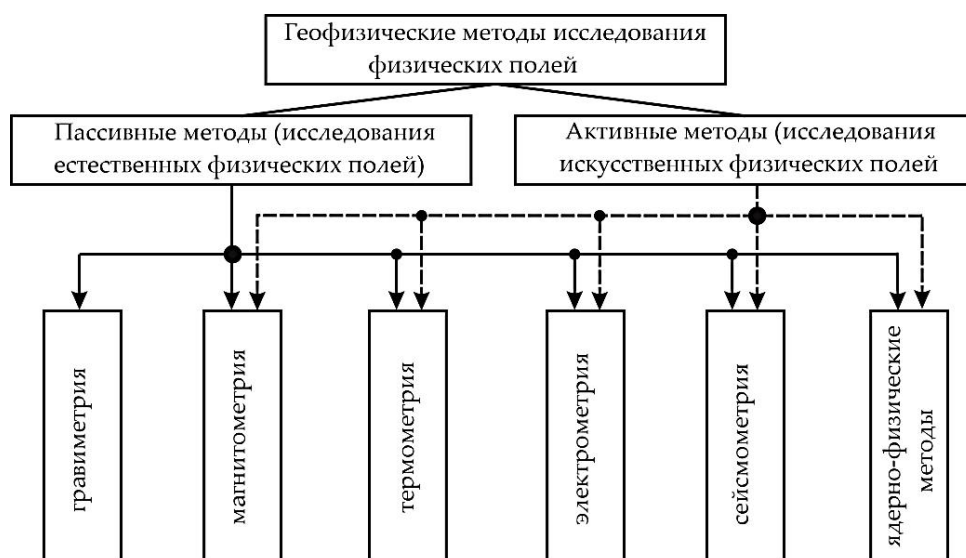


Рис. 1.1. Классификация пассивных и активных методов геофизических исследований

Классификация геофизических методов по природе используемых полей и основные свойства среды, определяемые каждым методом, представлены в *табл. 1.2* [16].

Таблица 1.2

**Классификация геофизических методов
по природе используемых полей**

Название метода	Используемые поля	Основные параметры поля	Основные свойства среды, определяемые при оценке
Гравиразведка	гравитационное поле Земли	Δg	плотность σ
Магниторазведка	постоянное магнитное поле Земли	ΔT	магнитная восприимчивость χ
Электроразведка	естественные и искусственные постоянные электрические и переменные электромагнитные поля	E, H	удельное электрическое сопротивление ρ , диэлектрическая проводимость ϵ , поляризуемость η
Сейсморазведка	естественные и искусственные поля упругих волн	t_p, t_s	скорость продольных и поперечных сейсмических волн V_p, V_s и их поглощение α
Терморазведка	тепловое поле Земли	t^0	качественная интерпретация
Ядерная геофизика	поля вызванной и естественной радиоактивности	I	качественная интерпретация

Геофизические методы имеют следующие преимущества [17]:

- объективность и высокая пространственная плотность информации о физических полях, создаваемых гео- и техногенными объектами, геопроцессами и явлениями;
- возможность изучения объектов, не выходящих на земную поверхность, а также геопроцессов и явлений, не проявляемых визуально;
- относительно низкая стоимость и высокая производительность по сравнению с прямыми методами исследований (скважинами и горными выработками).

За последние годы интенсивно развивались и получили практическое применение методы геофизических исследований, основанные на магнитометрических измерениях, которые используются широким кругом научных и производственных организаций при решении специализированных задач: трассирование трубопроводов, поиски затонувших судов, неразорвавшихся авиабомб и подземных снарядов, изучение поведения оползней, обнаружение и изучение погребенных объектов культурного наследия, остатков строительного и бытового мусора на небольших участках и др. [18].

Все указанные задачи объединяются общей проблемой, которая связана с изучением магнитных аномалий, обусловленных магнитными источниками, лежащими на небольшой глубине, не превышающей 10 м, и создающими аномалии разноамплитудного порядка — от нескольких нТл до тысяч нТл. Такие исследования можно объединить в отдельную отрасль, называемую малоглубинная магниторазведка, представляющую самостоятельное научно-практическое направление разведочной магниторазведки, занимающейся изучением и выделением намагниченных источников приповерхностной части земной коры. Особенно эффективны подобные исследования при поисках магнитных источников, окруженных естественным магнитным полем [15].

1.3. Геомагнитное поле Земли и влияние на него структуры приповерхностной естественной природной среды и искусственных техногенных объектов

В отличие от гравитационного, магнитное поле Земли (геомагнитное поле) в значительно большей степени зависит от строения и свойств литосферы, поскольку многие источники магнитного поля, вносящие свой вклад в общее геомагнитное поле, располагаются именно в литосфере до глубин 100 км. Процесс формирования литосферы самым тесным образом связан с магнитными свойствами пород, с магнитным полем Земли, которое проявляется на ее поверхности и выходит далеко в околоземное пространство, создавая, таким образом, магнитосферу [19]. Геомагнитное поле характеризуется, как величиной его постоянного значения, так и переменными составляющими иррегулярного и квазипериодического характера, связанными с возмущающим влиянием внутренних и внешних источников.

Наряду с глобальными процессами на вариации геомагнитного поля могут оказывать влияние изменения электрокинетических и геомеханических характеристик, динамика блочных структур, изменение их напряженно-деформированного состояния, а также флюидонасыщенность верхних участков земной коры. Поэтому геомагнитное поле не остается постоянным и изменяется как во времени, так и в пространстве, увеличиваясь в одних регионах и уменьшаясь в других.

Наблюдаемое на поверхности Земли магнитное поле отражает суммарный эффект воздействия источников эндогенной активности недр Земли и внешних космических источников, включая мощные потоки солнечной энергии. Напряженность такого магнитного поля Земли составляет в среднем около 0,5 эрстеда или $5 \cdot 10^4$ γ, возрастая до 0,6–0,7 эрстеда на полюсах и снижаясь до 0,4 эрстеда на экваторе. В связи с тем, что относительная магнитная проницаемость воздуха равна единице, напряженность магнитного поля на поверхности Земли выражают часто в единицах магнитной индукции, средняя величина которой на поверхности Земли $5 \cdot 10^{-4}$ Тл (1 Тл = 10^4 эрстед).

Распределение силовых линий магнитного поля Земли близко к распределению силовых линий магнитного диполя, причем северный и южный магнитные полюсы не совпадают с географическими полюсами Земли. Магнитное поле Земли в пределах малых участков считают постоянным и называют нормальным магнитным полем.

В зависимости от используемой при расчетах системы координат для полной характеристики величины и построения в пространстве вектора нормального магнитного поля достаточно трех элементов земного магнетизма: в прямоугольной системе координат — X, Y, Z ; в цилиндрической — H, Z, D ; в сферической — T, D, I .

В прямоугольной системе координат основными параметрами нормального геомагнитного поля являются полный вектор магнитного поля T и его составляющие по соответствующим осям координат: вертикальная (Z) и полная горизонтальная (H).

На рис. 1.2 представлены проекции полного вектора напряженности земного магнитного поля T на оси координат и горизонтальную плоскость, а также углы магнитного склонения D и магнитного наклонения J .

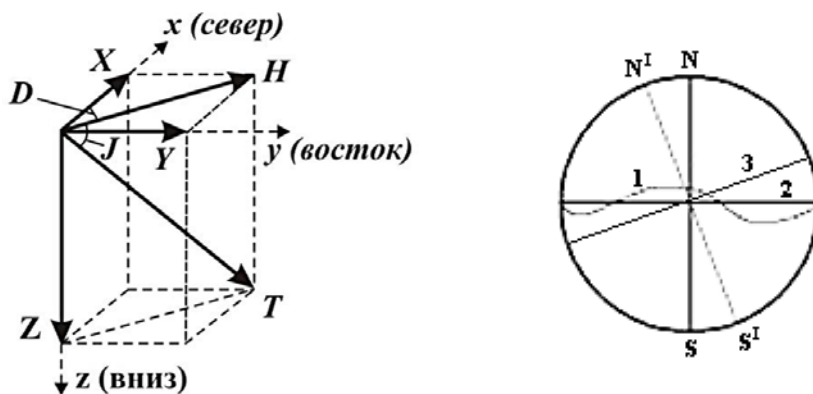


Рис.1.2. Элементы земного магнетизма

Проекция полного вектора T на горизонтальную плоскость является горизонтальной составляющей H , на вертикальную ось z (направление к центру Земли) — вертикальной составляющей Z , на ось x (направленную по географическому меридиану на Север) — северной горизонтальной составляющей X , на ось y (направленную по географической параллели на Восток) — восточной горизонтальной составляющей Y ; N и S — соответственно северный и южный географические полюсы; N^I и S^I — соответственно северный и южный геомагнитные полюсы; 1 — магнитный экватор; 2 — географический экватор; 3 — геомагнитный экватор.

Магнитное поле Земли меняется в довольно широких пределах. Максимальное значение индукции геомагнитного поля составляет около $0,7 \cdot 10^{-4}$ Тл (70 000 нТл) — (в районе южного магнитного полюса). Например, его величина в северных широтах России составляет от 33 000 до 50 000 нТл.

Горизонтальная составляющая вектора магнитной индукции определяется как векторная сумма

$$H = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (1.1)$$

Из *рис. 1.2* следуют следующие соотношения между элементами земного магнетизма:

$$\begin{aligned} H &= T \cdot \cos J; Z = T \cdot \sin J; J = \arctg(Z / H); \\ X &= H \cdot \cos D; Y = H \cdot \sin D; D = \arctg(Y / X); \\ T^2_n &= H^2 + Z^2 = X^2 + Y^2 + Z^2, \end{aligned} \quad (1.2)$$

где H , X , Y и Z — соответственно горизонтальная, северная, восточная и вертикальная составляющие вектора T .

Во многих случаях при решении задач малоглубинной магниторазведки выгоднее регистрировать не напряженность поля, а его градиент. Вычисление или измерение градиента применяют при детальной разведке месторождений с неглубоким залеганием магнитных пород для более точной локализации рудных тел и решения других задач, связанных с разделением по магнитному полю влияния различных объектов. Это особенно важно при сложных аномалиях, когда магнитные поля крупных и мелких тел, распространяющихся на резко разную глубину, накладываются одно на другое.

В магниторазведке под градиентами геомагнитного поля понимают производные скалярной функции по заданным направлениям, т. е. понятие «градиент» отождествляется с понятием «составляющая вектора градиента».

Градиенты могут быть получены путем вычислений по кривым магнитного поля. Однако вычисления зависят от точности исходных данных, особенно определение высших производных.

Градиенты могут быть измерены либо магнитометрами путем установки их на разных высотах и отнесения полученной разности замеров к единице расстояния между уровнями измерений, либо специальными магнитометрами градиентометрами, конструкция которых позволяет сразу получать значения градиентов. Наиболее целесообразными являются измерения вертикальных градиентов, так как их вычисления из ΔT и ΔZ наименее надежны. При этом вертикальный градиент содержит информацию о глубине залегания возмущающего объекта, в то время как горизонтальный градиент выделяет границы объекта в горизонтальной плоскости.

Значения параметров магнитного поля Земли зависят, прежде всего, от намагниченности всей Земли, как космического тела, близкого по форме к намагниченной сфере (нормальное поле). На магнитных полюсах Земли вертикальные составляющие магнитной индукции геомагнитного поля примерно равны ± 60 мкТл (горизонтальная равна нулю), на экваторе горизонтальная составляющая приблизительно равна 30 мкТл (вертикальная равна нулю). На фоне нормального геомагнитного поля выделяются аномалии, обусловленные различными причинами. В одних случаях причиной возникновения аномалий является резкая неоднородность магнитных свойств литосферы или большие скопления в ее верхних частях железных руд. Аномалии подобного рода, являющиеся материковыми и региональными,

могут вдвое превышать нормальное поле. В других случаях аномалии геомагнитного поля возникают как следствие разной интенсивности намагничивания геологических объектов, обусловленной различием магнитных свойств пород и напряженности магнитного поля Земли в настоящее время и в прошедшие геологические эпохи (локальные аномальные поля).

Наряду с глобальными процессами могут оказывать заметное влияние на вариации геомагнитного поля изменения электрокинетических и геомеханических характеристик, динамика блочных структур, изменение их напряженно-деформированного состояния, а также флюидонасыщенность верхних участков земной коры.

Многообразие возможных источников, влияющих на локальное магнитное поле, приводит к тому, что геомагнитные вариации в разных частотных диапазонах могут иметь индивидуальные особенности. По этой причине, а также с целью установления источников возмущений необходимо анализировать изменение во времени отдельных спектральных составляющих геомагнитных вариаций. При этом особый интерес вызывают их периодические вариации. В целом геомагнитные вариации и их отдельные спектральные составляющие сложным образом меняются со временем и имеют спорадический и скейлинговый характер. Отмеченные выше особенности геомагнитных вариаций, связанные с формированием периодичностей, представляют несомненный интерес для дальнейших исследований, и свидетельствуют о сложных процессах формирования и деградации источников геомагнитных вариаций в различных регионах Земли.

Определенное фундаментальное значение имеет изучение локальных длиннопериодных геомагнитных вариаций, поскольку эти геомагнитные вариации, зарегистрированные на земной поверхности, могут содержать информацию о развитии геодинамических процессов как в недрах Земли и на приповерхностных участках земной коры, так и в верхних слоях литосферы. Анализ этой информации предоставляет новые возможности для исследования свойств и геодинамических режимов локальных участков земной коры, что представляет несомненный интерес для разработки новых перспективных методов диагностики среды с целью выбора и обоснования площадок под строительство особо ответственных сооружений и объектов, а также — обеспечении их долговременной безопасной эксплуатации. Любое изменение напряженно-деформированного состояния земной коры сказывается на вариациях геомагнитного поля, так как напряженное состояние пород влияет на колебания величины пьезомагнитного эффекта в магнитных минералах.

Наличие неоднородной намагниченности образований приповерхностного слоя позволяет использовать высокоточную микромагнитную съемку для исследований некоторых типов локальных структур, например, оползней, карстов и депрессий в кровле кристаллического фундамента, тектонических нарушений, зон повышенной трещиноватости пород и других элементов.

Особый интерес для исследований представляют роль и влияние разломной зоны, сложная внутренняя структура которой обусловлена сильной неоднородностью заполняющей их горной массы, на пространственное распределение геомагнитных вариаций в приземном слое атмосферы, вызванных распространением сейсмических волн. Для установления механизма генерации магнитного сигнала и разработки диагностики разломных зон на основе регистрации геофизических полей требуется синхронные инструментальные наблюдения, как за сейсмическими сигналами, так и за вариациями геомагнитного поля.

С каждым годом приповерхностная природная геологическая среда интенсивно изменяется под действием различных промышленных сооружений (трубопроводов, теплотрасс, скрытых выходов шахт и колодцев, сетей кабельных, подземных фундаментов, а также засыпанных рвов, канав и траншей). Глубина их залегания составляет от 1 до 5 м. Поэтому малоглубинная магниторазведка нашла самое широкое применение для решения различных геотехнических задач, например, для определения местоположения различных систем подземных коммуникаций. Это вызывает необходимость совершенствования существующего и создания нового приборно-методического обеспечения, в первую очередь, для работ в «поле», на инженерных сооружениях, в труднодоступных местах и т. п.

Наиболее интенсивные магнитные аномалии создаются электрической кабельной сетью от 100 до нескольких десятков тысяч нТл. Знакопеременные аномалии вдоль линии кабеля имеют характерный вид биений при линейной форме. Если кабельные сети обесточены, то амплитуда линейной аномалии достигает порядка 30 нТл. В этом случае аномалию дает не сам объект, а траншея, в которой находится кабель.

Изменение магнитного поля над подземными инженерными сооружениями отмечается аномалией от 100 до нескольких тысяч нТл. Аномалии имеют положительные и отрицательные части, форма аномалии в плане подчеркивает конфигурацию объекта.

Объекты, к которым относятся трубопроводы, создают интенсивные аномалии от 100 до 1000 нТл, они хорошо проявляются в магнитных полях. Над местами сварки двух сегментов трубопровода амплитуда поля может увеличиваться или уменьшаться с изменением знака.

Определенный интерес представляют вопросы, связанные с изучением отображения в геофизических полях трасс нефтепроводов и разработки методов их обнаружения. В этом случае ширина возможных аномалий от трубопровода может достигать 6 метров, что в свою очередь ограничивает максимально допустимое расстояние между точками наблюдений на профиле двумя метрами.

Если подземные фундаменты кирпичные, то они могут представлять магнитные источники, которые создают аномалии величиной 50–500 нТл. Локальные аномалии имеют положительные и отрицательные части, при малой глубине для них характерен мозаичный вид, форма аномалии обусловлена формой объекта.

К области малоглубинной магниторазведки можно также отнести археологические исследования, которые основаны на изучении остаточного магнетизма изделий, выполненных человеческими руками, например, из обожженной глины, по измерениям геомагнитного поля. Картировать по аномалиям магнитного поля можно захороненные стены и строения, глиняную посуду, кирпичи, кровельную черепицу, ямы для обжига, дороги, могилы, подземные ходы, монументы, жилые места, различные затонувшие предметы, корабли благодаря их значительным магнитным свойствам, отличным от магнитных характеристик окружающей среды.

При археологических исследованиях наблюдается сложная картина магнитного поля, состоящая из сильных и слабых отрицательных и положительных магнитных аномалий от различных археологических структур. Рвы, колодцы, ямы создают локальные магнитные аномалии в диапазоне до 20 нТл, обожженные объекты — от 10 до 1000 нТл. Например, остатки печей, очагов, кострищ создают аномалии до 300 нТл.

Исторические места, где имеется большое скопление железных предметов, имеющих повышенную намагниченность относительно магнитных свойств окружающих пород, можно изучать также с помощью технологий, применяющихся в магниторазведке.

Магнитный контраст, обусловленный различием в магнитных свойствах предметов культуры и окружающей среды, обычно вызван концентрацией, температурой и механической примесью минерала магнетита. Магнитная восприимчивость предметов в основном обеспечивается их индуцированной намагниченностью, остаточная намагниченность появляется только в том случае, если объекты ранее нагревались.

В арсенал малоуглубинной магниторазведки можно включить изучение зарождения и развития оползневых деформаций, а также использование магнитных аномалий для исследования флюидальных структур в эффузивных породах.

Важнейшим вопросом, относящимся также к малоуглубинной магниторазведке, является изучение карстовых пород. При образовании приповерхностных карстовых форм происходит их заполнение глинистым материалом, имеющим повышенную магнитную восприимчивость. Если глинистые вместилища перекрываются рыхлыми отложениями небольшой мощности, то для их обнаружения можно использовать магниторазведочные технологические разработки.

Кроме того, известно, что в настоящее время миллионы гектаров земли в разных странах земного шара в результате проведения военных мероприятий засорены неразорвавшимися боеприпасами, лежащими или на поверхности, или на некоторой глубине. Поэтому очистка земли от снарядов в настоящее время является одной из первоочередных задач малоуглубинной магниторазведки, оперативное решение которых обеспечит качества окружающей среды.

Обобщая вышесказанное, можно констатировать, что круг вопросов, решаемых малоуглубинной магнитной съемкой, весьма широк. Например, к ним относятся картирование контактов пород с различной намагниченностью и изучение трещиноватости массивов горных пород с целью определения господствующего направления зон трещиноватости; выяснение условия седиментации; исследование процессов зарождения и развития оползневых деформаций и т. д.

Данные, полученные при малоуглубинной магнитной съемке, интерпретируют с учетом специфики задач в следующих видах:

- Качественная интерпретация — визуальное выделение аномалий, обращение внимания на форму изолиний, их простираие, ширину, соотношение положительных и отрицательных аномалий.
- Количественная интерпретация — определение глубины, размеров, точного местоположения, углов падения геологических тел, создавших магнитные аномалии.
- Геологическое истолкование — решение геологических задач с помощью качественной и количественной интерпретации результатов магнитной съемки с использованием всего имеющегося материала о геологическом строении изучаемой площади.

Проведенный анализ прикладных аспектов малоуглубинной магниторазведки показал, что универсальной серийной магнитометрической аппаратуры для решения всех перечисленных задач малоуглубинной магниторазведки не существует, но есть реальные физико-технические предпосылки для ее дальнейшего совершенствования.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru