



Международный университет природы,
общества и человека «Дубна»

Кафедра экологии и наук о Земле

В.К. ХМЕЛЕВСКОЙ

**ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ**

Книга 2

**Региональная, разведочная, инженерная
и экологическая геофизика**

Дубна, 1999

ББК 26.2я73
Х 65-4
УДК 550.83

Рекомендовано Министерством образования Российской Федерации в качестве учебного пособия для студентов геофизических, горно-геологических и геологических специальностей вузов

Хмелевской В. К.

Х 65-4 Геофизические методы исследования земной коры. Кн. 2: Региональная, разведочная, инженерная и экологическая геофизика. Учебное пособие.— Дубна: Международный университет природы, общества и человека «Дубна», 1999. — 184 с.: ил.

ISBN 5–89847–003–4

В книге рассмотрены принципы комплексирования геофизических методов при изучении недр Земли, особенности качественной и количественной интерпретации и системного подхода к геолого-геофизическим исследованиям, основы петрофизики, а также следующие комплексные геофизические исследования: глубинные, региональные (структурные и картировочно-поисковые), разведочные (нефтегазовые, рудные, нерудные и угольные), инженерные (гидрогеологические, инженерно-геологические, мерзлотно-гляциологические, археологические и технические) и экологические (геодинамические, вещественные и энергетические).

Работа является учебным пособием для студентов геофизических, горно-геологических и геологических специальностей вузов. Она может быть кратким справочным руководством для специалистов, работающих в области изучения Земли, поисков и разведки полезных ископаемых, изучающих геологическую среду с инженерно-гидрогеологическими и экологическими целями.

Книга вторая является частью учебника автора с тем же названием, первая книга которого посвящена методам прикладной и скважинной геофизики и издана в 1997 г. Международным университетом природы, общества и человека «Дубна».

Рецензенты: доктор геолого-минералогических наук *Ю.Д.Зыков*,
доктор физико-математических наук *А.А.Никитин*, академик РАЕН

© В.К.Хмелевской, 1999

© Международный университет природы,
общества и человека «Дубна», 1999

ISBN 5–89847–003–4

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ПРИНЦИПЫ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ	15
1.1. Внутриметодные геофизические комплексы	15
1.2. Системный подход к геолого-геофизическим исследованиям	17
1.3. Принципы качественной и количественной интерпретации комплексных геофизических данных	22
1.4. Основы петрофизики	26
ГЛАВА 2. ГЛУБИННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ	41
2.1. Методы глубинной геофизики и строение Земли по геофизическим данным	41
2.2. Строение недр под океанами	46
2.3. Тектоника литосферных плит и дрейф континентов	51
ГЛАВА 3. РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СУШИ И АКВАТОРИЙ	53
3.1. Общая характеристика методов региональной геофизики	53
3.2. Региональные глубинные геофизические исследования	54
3.3. Региональные структурные среднемасштабные геофизические исследования	55
3.4. Картировочно-поисковые крупномасштабные геофизические исследования	60
ГЛАВА 4. ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ	70
4.1. Поисково-разведочные работы на нефть и газ	70
4.2. Поиски и разведка рудных месторождений	79
4.3. Поиски нерудных месторождений полезных ископаемых и угля	84
4.4. Изучение подводных месторождений твердых полезных ископаемых	91
ГЛАВА 5. ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОФИЗИКА	94
5.1. Геологическая среда и геофизические методы для ее исследования	94
5.2. Гидрогеологическая и почвенно-мелиоративная геофизика	95
5.3. Инженерно-геологическая геофизика	108
5.4. Мерзлотно-гляциологическая геофизика	122
5.5. Археологическая и техническая геофизика	128
ГЛАВА 6. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОФИЗИКА	140
6.1. Основные понятия, предмет и методы геолого-геофизических исследований в экологии	140
6.2. Эколого-геофизические исследования и мониторинг геодинамических природных и техногенных процессов	147
6.3. Эколого-геофизические исследования и мониторинг вещественного (геохимического) загрязнения окружающей среды	157
6.4. Изучение техногенного физического загрязнения	165
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	182

ПРЕДИСЛОВИЕ

В книге 2 «Региональная, разведочная, инженерная и экологическая геофизика» учебника «Геофизические методы исследования земной коры» рассмотрены принципы качественного и количественного комплексирования геофизических методов при изучении Земли, земной коры, геологической среды, поисках и разведке полезных ископаемых, даны основы петрофизики и таких разделов геофизики, как глубинная, региональная, разведочная, инженерная и экологическая.

Особое внимание уделено экологической геофизике: рассмотрены предмет, методы и задачи этого относительно нового прикладного направления в геофизике, эколого-геофизические исследования и мониторинг природных и техногенных геодинамических процессов, а также геохимических (вещественных) и физических (энергетических) загрязнений окружающей среды.

Работа является расширенным вариантом лекций, которые автор читал студентам геологических и экологических специальностей геологического факультета Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова и геоэкологам Международного университета природы, общества и человека «Дубна». Соавторы разделов 5.2, 5.3 — В.А.Богословский, а 5.5 — В.А.Шевнин и И.Н.Модин. Автором раздела 6.4 является А.Д.Жигалин.

При редактировании рукописи и подготовке ее к изданию помощь автору оказали В.А.Богословский, А.Д.Жигалин, Е.Б.Ильина, В.В.Кузьмина, З.Л.Сафонова, за что автор им искренне благодарен.

Автор благодарит рецензентов д. г.-м. н. Ю.Д.Зыкова и д. ф.-м. н. А.А.Никитина за труд по изучению рукописи и сделанные замечания.

Автор признателен Международному университету природы, общества и человека «Дубна» за издание этой книги, являющейся учебным пособием для студентов-геоэкологов этого университета.

В.К.Хмелевской

ВВЕДЕНИЕ

Геофизические методы исследования земной коры (их называют также прикладной и промысловой или региональной, разведочной и скважинной геофизикой) — это научно-прикладной раздел геофизики — фундаментальной науки, изучающей Землю и околоземное пространство с помощью естественных и искусственно создаваемых (управляемых) физических полей. Геофизика подразделяется на физику Земли, изучающую Землю как планету и содержащую такие разделы, как гравиметрия, магнитометрия, геоэлектрика, сейсмология, сейсмометрия, термометрия, ядерная геофизика, и геофизику ее оболочек: воздушной (атмосфера), водной (гидросфера) и каменной (литосфера).

Учитывая все возрастающую роль природных эндогенных (внутренних) факторов, таких как землетрясения, медленные подъемы и опускания суши и др., и экзогенных (внешних) факторов, например, выветривания, оползнепроявления и др., а также антропогенно-техногенных сил (взрывов, загрязнений окружающей среды и др.), целесообразно выделить еще одну оболочку — биотехносферу. В нее следует включить части атмосферы, гидросферы, земной коры, являющиеся средой обитания человека и испытывающие антропогенно-техногенную нагрузку. Раздел геофизики, предназначенный для изучения этой оболочки Земли, можно назвать геофизикой биотехносферы или геофизической экологией (Хмелевской В.К., 1997).

Из фундаментальных геофизических наук, предназначенных для исследования Земли и ее оболочек, выделяются научно-прикладные разделы. Так, геофизика воздушной оболочки включает физику космоса и атмосферы, метеорологию, климатологию и др. Геофизика гидросферы состоит из гидрофизики, океанологии, физики моря, лимнологии (изучение озер), гидрологии (изучение рек), гидрогеологии (изучение подземной гидросферы), гляциологии (изучение ледников) и др. Из геофизики литосферы выделились прикладная и промысловая геофизика, содержащие методы: гравиразведку, магниторазведку, электроразведку, сейсморазведку, терморазведку, ядерную геофизику и

геофизические исследования скважин (ГИС). Научно-прикладным разделом геофизики биотехносферы становится экологическая геофизика.

Предметом исследований прикладной и промышленной геофизики является земная кора, т.е. часть литосферы мощностью до 70 км на суше и до 10 км в океанах. Целью этих научно-прикладных дисциплин являются исследования глубинного строения земной коры, кристаллического фундамента, осадочного чехла, поиск и разведка полезных ископаемых, изучение геологической или геофизической среды мощностью в первые сотни метров, верхней части разреза земной коры (ВЧР) мощностью порядка 100 м и окрестностей скважин на основе косвенной информации об интенсивности и структуре различных физических полей.

Основными задачами геофизических исследований земной коры являются следующие: выяснение состава, структуры и состояния горных пород, слагающих земную кору, выявление полезных ископаемых, изучение геологической среды как основы для промышленного, сельскохозяйственного, гражданского, военного освоения и сохранения ее экологических функций, как источника жизни на Земле.

Эти же задачи решаются другими геолого-геохимическими методами. Если геологические и геохимические методы являются прямыми методами «близкого действия», основанными на непосредственном изучении минерального, петрографического или геохимического состава вскрытых выработками горных пород, то геофизические методы являются методами как «ближнего» (до 1 м), так и «дальнего» (до тысяч километров) действия. Они обеспечивают равномерность, объемный, интегральный характер получаемой объективной информации. При этом производительность экспериментальных геофизических работ значительно выше, а стоимость в несколько раз меньше по сравнению с разведкой с помощью неглубоких (до 100 м) и в сотни раз меньше, чем глубоких (свыше 1 км) скважин. Повышая геологическую и экономическую эффективность изучения недр, геофизические методы исследования являются важнейшим фактором ускорения научно-технического прогресса в геологии и горном деле.

В соответствии с решаемыми задачами основными прикладными направлениями геофизических исследований земной коры являются: глубинная; региональная; разведочная, подразделяемая на нефтегазовую, рудную, нерудную, угольную; инженерная, включающая инженерно-геологическую, гидрогеологическую, почвенно-мелиоративную, мерзлотно-гляциологическую, археологическую и техническую; экологическая геофизи-

ка. Формирование последней идет за счет экологических аспектов всех перечисленных прикладных направлений геофизики.

Остановимся на краткой характеристике физических полей Земли, их параметров, физических свойствах среды, обеспечивающих возможность выявления различных объектов в ней, последовательности процесса геофизических исследований. Этим проблемам была посвящена кн. 1 настоящей работы. Однако краткое их повторение в кн. 2 придаст ей определенную самостоятельность.

Каждое физическое поле численно характеризуется своими наблюдаемыми (наблюдаемыми, измеряемыми или регистрируемыми) физическими параметрами поля (P_{ii}). Их получают в результате геофизических работ (Γ_p) с помощью сложной, как правило, компьютеризированной аппаратуры. Так, гравитационное поле определяется ускорением свободного падения или силой тяжести (g) и ее градиентами по осям координат (g_x, g_y, g_z), геомагнитное поле — полным вектором напряженности T и различными его элементами (вертикальной Z , горизонтальной H составляющими и др.), электромагнитное — векторами магнитной (H) и электрической (E) составляющих, упругое — амплитудой (A) и временем (t) распространения упругих волн различного вида, термическое — температурой (T°), ядерно-физическое — интенсивностью естественного (J_γ) и искусственно вызванных ($J_{\gamma\gamma}, J_{nn}$) гамма- и нейтронных излучений.

Принципиальная возможность проведения геологической разведки на основе различных физических полей Земли определяется тем, что распределение параметров полей в воздушной оболочке, на поверхности акваторий или земли, в горных выработках и скважинах зависит не только от происхождения естественных или способа создания искусственных полей, но и распределения в Земле геометрических и литолого-петрографических неоднородностей. Эти неоднородности отличаются по физическим свойствам от вмещающей среды, и в результате создаются аномальные физические поля. Аномалией, или полезным сигналом, в геофизике считается отклонение измеренного параметра поля от нормального, за которое чаще всего принимается поле над однородным полупространством. При этом возникновение аномалий связано с тем, что объект поисков, называемый источником аномалий (возмущений) или аномалосоздающим объектом, либо сам создает поле в силу естественных причин, например, естественное постоянное электрическое поле вокруг рудных залежей, либо искажает искусственно

созданное поле вследствие различия физических свойств, например, за счет отражения сейсмических или электромагнитных волн от контактов разных толщ.

Эффективность выделения аномалий во многом определяется методикой (способом) проведения работ, куда входит система наблюдений, т.е. выбор расстояний между пунктами наблюдений (шаг съемки при профильных наблюдениях) и между профилями (при площадной съемке). Густота сети наблюдений зависит от решаемых задач, масштабов съемок, простираения, размеров и глубины залегания разведываемых объектов, в крест предполагаемого простираения которых профили обычно и ориентируются.

Аномалии приходится выявлять на фоне не всегда однородного и спокойного поля среди разнообразных помех геологического, природного, техногенного характера (неоднородности верхней части геологической среды, неровности рельефа, наличие космических, атмосферных, климатических, промышленных и других помех). В результате наблюдается интерференция полезных сигналов и помех разной природы. При этом наблюдается как простое наложение (суперпозиция) полей, так и сложные, нелинейные их взаимодействия.

Выявление аномальных параметров физических полей (Π_a) — актуальная физико-математическая проблема, которая решается путем применения, как правило, компьютерных способов обработки геофизических данных (ОГД). Она сводится или к аппаратно-калибровочным преобразованиям, или к введению поправок в наблюденное поле с учетом нормального поля, или разного рода трансформаций Π_n в Π_a , или специальных способов компьютерной обработки и перехода от реальных, наблюденных, к информационным параметрам поля в виде цифровых данных, в которых уменьшен уровень тех или иных помех. В результате получают: графики аномалий (по горизонтали откладываются точки записи, т.е. пункты измерений или пикеты (ПК), а по вертикали Π_a), карты графиков (на карте в заданном масштабе наносятся линии профилей, а перпендикулярно линиям профилей откладываются Π_a и строятся графики); карты аномалий (на карте проставляются ПК, рядом записываются Π_a и вычерчиваются изолинии равных значений Π_a); временные разрезы (по горизонтали откладываются ПК, а по вертикали вниз времена прихода (t) сигналов от объектов, расположенных на разных глубинах).

Следующим этапом геофизического процесса является преобразование аномальных (информационных) параметров поля (Π_a) в реальные, непосредственно связанные с

параметрами разведываемых аномалосоздающих объектов (Π_0). К параметрам объектов относятся их физические (геофизические) свойства (ФС) и геометрические (структурные) характеристики (ГФХ), т.е. $\Pi_0 = \text{ФС} + \text{ГФХ}$.

Каждое физическое поле определяется соответствующими физическими свойствами разведываемых объектов и вмещающей среды. Так, гравитационное поле зависит от изменения плотности пород (σ); магнитное поле — от магнитной восприимчивости (χ) и остаточной намагниченности (J_r); электрическое и электромагнитное поля — от удельного электрического сопротивления пород (ρ), диэлектрической (ϵ) и магнитной (μ) проницаемостей, естественной поляризуемости, или электрохимической активности (α), и вызванной поляризуемости (η); упругое поле — от скорости распространения (V) и затухания (β) различных типов волн, а последние, в свою очередь, — от плотности, упругих констант (модуль Юнга (E), коэффициент Пуассона (γ) и др.); термическое поле — от тепловых свойств: теплопроводности (λ_r), теплоемкости (C), температуропроводности (a) и др.; ядерные — от естественной и наведенной радиоактивности, гамма-лучевых и нейтронных свойств. Физические свойства горных пород изменяются иногда в небольших пределах (например, плотность изменяется от 1 до 6 г/см³), а иногда в очень широких пределах (например, удельное электрическое сопротивление изменяется от 0,001 до 10¹⁵ Ом·м). В зависимости от целого ряда физико-геологических факторов одна и та же порода может характеризоваться разными свойствами, и наоборот, разные породы могут иметь одинаковые свойства.

Геометрическими характеристиками аномалосоздающих объектов являются: глубина, размеры, особенности физических границ, на которых физические свойства могут изменяться резко (контрастно) или плавно (градиентно).

Определение геометрических и физических параметров объектов (Π_0) по аномальным параметрам физических полей (Π_a) называется решением обратной задачи (ОЗ) геофизики ($\Pi_a \rightarrow \Pi_0$). Определение аномальных параметров физических полей по известным геофизическим и физическим параметрам объектов составляет суть прямой задачи (ПЗ) геофизики ($\Pi_0 \rightarrow \Pi_a$). Решение прямых и обратных задач в каждом геофизическом методе основано на известных в теории поля интегральных и дифференциальных уравнениях связи Π_a и Π_0 . Такое решение называется математическим моделированием. При этом реальные аномалосоздающие объекты аппроксимируются физико-геологическими моделями (ФГМ), т.е.

телями сравнительно простой геометрической формы с заданными размерами и физическими свойствами или контрастностями свойств.

В прямых задачах геофизики для простых ФГМ (одномерные среды, когда физические свойства меняются в одном направлении, например, горизонтально-слоистая среда, некоторые двумерные или трехмерные, например, длинный цилиндр или шар в однородной среде) имеются аналитические связи между Π_a и Π_o . Для более сложных ФГМ, близких к реальным, определение Π_a по Π_o производится приближенными численными методами. Однако практически все решения настолько сложны, что даже с помощью компьютеров можно получить их далеко не для всех ФГМ.

Решение обратных задач чаще всего проводится методом сравнения. Сущность его заключается в том, что экспериментальные кривые, графики или карты аномальных параметров последовательно сравниваются с соответствующими графическими материалами, рассчитанными в ходе решения прямой задачи на компьютерах для априорных (до опыта) ФГМ. Они выбираются в ходе ОГД и качественной (визуальной) интерпретации, когда на графически представленных аномальных полях выявляются аномалии, коррелируются аномалии и сопоставляются со всей имеющейся геолого-геофизической информацией. Меняя параметры модели (физические свойства и геометрические характеристики) и проводя расчеты прямых задач в автоматическом или диалоговом режиме работы на компьютере, добиваются наилучшего совпадения экспериментальных и теоретических данных. Параметры совпадающей теоретической модели (ФС и ГФХ), называемой апостериорной (после опыта) ФГМ, считаются наиболее вероятными для аппроксимации разведываемого объекта (Π_o).

Математическое решение прямых задач, т.е. определение параметров физического поля по известным физическим свойствам, размерам и форме геологических объектов, хотя и сложно, но однозначно. Вместе с тем одно и то же распределение параметров физического поля может соответствовать различным соотношениям физических свойств и размеров геологических объектов. Иными словами, математическое решение обратной задачи геофизики, т.е. определение размеров геологических объектов и свойств слагающих их пород по наблюдаемому полю, не только значительно сложнее, но и, как правило, неоднозначно. Это объясняется некорректностью обратных задач математической физики, когда малым изменениям Π_a могут соответствовать большие изменения Π_o .

Решение обратных задач (ОЗ) и обработка геофизических данных (ОГД) составляют самый ответственный цикл геофизических исследований — интерпретацию, или истолкование, результатов, т.е. восстановление физико-геометрических параметров объектов (Π_0) по создаваемым ими аномалиям (Π_a). Интерпретация геофизических данных проводится в рамках ФГМ и дает некоторое эквивалентное решение, которое в неблагоприятных геолого-геофизических условиях, например, для объектов малых размеров, расположенных на большой глубине, может резко отличаться от истинного. Для повышения точности геофизической интерпретации необходимо иметь дополнительную информацию: результаты нескольких геофизических методов, опорные скважины, данные ГИС в них и др.

Наконец, заключительным этапом геофизического процесса, конечной целью исследований является геологическая интерпретация (ГИ) или обращение физико-геометрических параметров объекта ($\Pi_0 = \Phi C + \Gamma \Phi X$) в геолого-геометрические ($\Pi_r = \Gamma C + \Gamma \Gamma X$). Если перевод геометрических характеристик, полученных в результате геофизических исследований ($\Gamma \Phi X$), в геологические ($\Gamma \Gamma X$) понятен, хотя и производится с разными погрешностями, то обращение физических свойств (ΦC) выявленных объектов в геологические (ΓC) — проблема очень сложная. Ее решение проводится в рамках петрофизики, т.е. научной дисциплины, находящейся на стыке петрологии и физики горных пород, предназначенной устанавливать теоретические, эвристические и статистические связи между ΦC и ΓC . Трудности здесь прежде всего в том, что если ΦC выражается количественно (хотя и с погрешностями), то ΓC далеко не всегда можно формализовать в виде чисел.

Основными геологическими свойствами являются: литология (L), структурно-текстурное строение ($C-T$), флюидонасыщенность (Φ), характеризующие соответственно минеральный и петрографический состав твердой среды, объем, характер строения пустот, пор, трещин и прочность пород; содержание в них воздуха (газа), нефти, воды.

Литология пластичных и рыхлых осадочных пород численно может быть выражена, например, в виде арифметического ряда чисел: от $L = 1, 2, 3$ для тяжелых, средних, легких глин, далее таких же суглинков (4, 5, 6), супесей (7, 8, 9), песков (10, 11, 12), а также галечников (13) и валунов (14). В этом ряду L пропорциональна среднему диаметру твердых частиц (d_{cp}), который является основным диагностическим признаком пластичных и рыхлых осадочных пород.

Пустотность породы может быть выражена через пористость и трещиноватость, т.е. отношение объема пор и трещин к объему твердой фазы ($n = V_n/V_{тф}$).

К структурно-текстурным особенностям породы относятся деформационно-прочностные свойства: модуль деформации ($E_{\text{деф}}$), предел прочности на сжатие ($\sigma_{\text{сж}}$) и др.

Флюидонасыщенность можно охарактеризовать через коэффициенты газо-, нефте-, водонасыщенности, или отношения объемов этих фаз к объему всей породы ($K_{\text{г}}$, $K_{\text{н}}$, $K_{\text{в}}$), коэффициенты фильтрации ($K_{\text{ф}}$), проницаемости ($K_{\text{п}}$) и др.

Физико-геологические связи многофакторны, поэтому их лучше всего определять с помощью многомерной корреляции. С этой целью для любого геологического свойства изучаемого района надо получать уравнение многомерной связи, называемое уравнением регрессии, с рядом геофизических свойств. Например, коэффициент нефтенасыщенности можно определить по формуле: $K_{\text{н}} = aV_p + b\rho + c\eta$, где a , b , c — коэффициенты, которые находятся в ходе эталонирования (обучения) на участках с известными $K_{\text{н}}$, скоростями продольных волн (V_p), удельными электрическими сопротивлениями (ρ) и поляризуемостями (η) нефтеносных пород изучаемого района. По одному геофизическому свойству можно пытаться определить ряд геологических с помощью одномерных уравнений линейной связи. Однако надежность таких расчетов невысока.

Таким образом, геофизические исследования представляют собой последовательность операций:

$$\text{ПР} \rightarrow \text{ОГД} \rightarrow \text{ОЗ} \rightarrow \text{ГИ},$$

позволяющую получить цепочку соответствующих параметров:

$$\text{П}_{\text{н}} \rightarrow \text{П}_{\text{а}} \rightarrow \text{П}_{\text{о}}(\text{ФС} + \text{ГФХ}) \rightarrow \text{П}_{\text{г}}(\text{ГС} + \text{ГГХ}).$$

Такая последовательность геофизических исследований с набором информативных параметров разной природы называется информационной моделью геофизики.

Каждая из четырех операций геофизического процесса характеризуется своей погрешностью, зависящей от ряда факторов. Общая погрешность наблюдений равна сумме погрешностей, т.е. складывается из погрешностей наблюдений ($\delta_{\text{н}}$), процедур обработки ($\delta_{\text{об}}$), решения обратной задачи ($\delta_{\text{об}}$) и геологической интерпретации ($\delta_{\text{ин}}$). Погрешности наблюдений и обработки наиболее управляемы, взаимопогашаемы. Погрешности $\delta_{\text{об}}$ останутся большими, даже если свести к минимуму погрешности наблюдений и обработки, так как в этом случае перед геофизиками стоит труднопреодолимая некорректность решения обратной задачи. Большие ошибки в $\delta_{\text{ин}}$ будут, если геологическое свойство определяется только по одному геофизическому параметру.

Поэтому комплексирование методов и повышение точности решения ОЗ за счет использования более точных ФГМ, все более мощных компьютеров, использования методов регуляризации некорректных задач (уменьшение неоднозначности) и других приемов является условием повышения точности геофизических исследований. Вместе с тем лишь при полнейшем использовании всей геологической информации, когда геологическое истолкование проводится геофизиками и геологами совместно, можно ожидать наибольшего эффекта в изучении недр Земли.

Существуют различные виды классификации геофизических методов исследования земной коры по:

- 1) используемым полям (грави-, магнито-, электро-, сейсмо-, термогеофизика и ядерная геофизика);
- 2) технологиям и месту проведения работ (аэрокосмические, полевые, акваториальные, подземные методы и геофизические исследования скважин);
- 3) прикладным, целевым направлениям и решаемым задачам (глубинная, региональная, разведочная, инженерная и экологическая геофизика);
- 4) видам деятельности (теоретическая, инструментальная, экспериментальная, вычислительная и интерпретационная геофизика).

Особое место в геофизике занимают геофизические исследования скважин (ГИС), отличающиеся от прочих геофизических методов специальной аппаратурой, техникой проведения наблюдений и имеющие большое прикладное значение при документации разрезов скважин и их эксплуатации при добыче нефти и газа.

Как отмечалось выше, верхние оболочки Земли являются предметом исследования не только геофизики, но и других наук: геологии со всеми разделами, геохимии, географии и др. Геофизические методы исследования, базируясь на этих науках, являются, прежде всего, геологическими. Вместе с тем, давая другим наукам о Земле всевозможную информацию, они изменяют сам характер геолого-разведочных работ. О большой роли геофизики говорит, например, такой факт: треть ассигнований и четверть специалистов в геолого-разведочных организациях связаны с геофизикой. Вместе с тем важнейшим методологическим принципом, под которым понимается теория рациональной деятельности, для геофизической разведки является комплексирование: межметодное геофизическое (применение хотя бы двух-трех из перечисленных методов геофизики), разноуровневое (аэрокосмические, аквально-полевые, подземно-скважинные наблюдения), междисципли-

нарное (использование геологической, гидрогеологической, биологической, экологической, медицинской и другой информации). Методика комплексных исследований характеризуется стадийностью (переходом от простых методов к более трудоемким, от мелких масштабов к крупным), выбором типовых комплексов для определенных условий и решаемых задач, переходом к рациональным, экономически обоснованным методам решения конкретных задач. Теория комплексной интерпретации на базе компьютерных технологий разрабатывается в рамках вычислительной геофизики или геофизической информатики. Цель комплексной интерпретации сводится к достижению однозначности геологических выводов путем выбора, анализа, оптимизации ФГМ.

Возрастание роли геофизики в связи с увеличением глубин и сложности разведки месторождений ведет не к замене геологических методов геофизическими, а к рациональному их сочетанию, широкому использованию всеми геологами данных геофизики. Единство и взаимодействие геологической и геофизической информации — руководящий методологический принцип комплексирования наук о Земле. Объясняется это тем, что возможности каждого частного метода геологоразведки (геологическая съемка, бурение, проходка выработок, геофизика, геохимическая разведка и др.) ограничены. В любом случае геофизика облегчает разведку глубокозалегающих полезных ископаемых, особенно в труднодоступных районах, а также изучение геологической среды с инженерными и экологическими целями. Сближение и совместное использование геологической, геофизической и геохимической информации — единственно разумный и экономически целесообразный путь изучения недр.

В настоящей работе рассмотрены особенности геолого-геофизического комплексирования как в общем случае, так и применительно к таким видам прикладной геофизики, как глубинная, региональная, разведочная, инженерная и экологическая. Первые четыре вида прикладной геофизики существуют давно, достаточно хорошо разработаны и неоднократно рассматривались в учебниках и учебных пособиях. Экологическая же геофизика, предназначенная для изучения структурных нарушений, химического и физического загрязнения природной среды, представляет собой новый научно-прикладной раздел геофизики. Основы экологической геофизики заложены в сформировавшихся методах прикладной геофизики, поскольку экологические аспекты присутствуют в глубинной, региональной, разведочной и особенно инженерной геофизике. В главе 6 настоящей работы они выделены в виде нового геофизического направления — экологической геофизики.

ГЛАВА 1

ПРИНЦИПЫ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

1.1. Внутриметодные геофизические комплексы

Основными тенденциями исследований недр, геокартирования, поисков и разведки полезных ископаемых, изучения геологической среды с геологическими, инженерно-геологическими, гидрогеологическими и геоэкологическими целями являются повышение глубин исследования объектов, точности их выделения и усложнение поставленных задач. Наличие десятков методов геофизики не случайно. Оно свидетельствует об отсутствии универсальных методов. Поэтому только рациональный выбор их комплексов (наряду с совершенствованием каждого метода) может дать высокий эффект при изучении земной коры с различными целями. Особая роль при этом принадлежит петрофизике, научной дисциплине, которая обеспечивает перевод петрофизических параметров в комплексные геолого-гидрогеологические свойства горных пород (*Вахромеев Г.С. и др., 1997*).

1.1.1. Необходимость комплексирования разных методов изучения земных недр и виды геофизических комплексов. Необходимость комплексирования геофизических методов обусловлена тем, что каждый из них, во-первых, теоретически некорректен, т.е. малым изменениям сигналов от изучаемых объектов могут соответствовать большие изменения их физико-геометрических параметров. Закономерность эта известна как принцип эквивалентности. Во-вторых, по мере увеличения глубинности разведки уменьшается отношение величины сигнала к уровню геологических и технических помех. Поэтому, несмотря на совершенствование методов, отношение сигнал/помеха увеличивается слабо. По этим причинам определение геометрических и физических пара-

метров аномалосоздающих объектов оказывается неоднозначным. Для ограничения некорректности необходима дополнительная информация: применение ряда методов с разными физическими основами, уровнем некорректности и точности разведки, использование параметрических скважин, с помощью которых можно определить петрофизические характеристики объектов, уточнить их геометрические размеры. Тем не менее повышение точности съемок, использование накопления сигналов, применение сложных компьютерных способов обработки и комплексирование методов должны обеспечить возрастание роли геофизики (Комплексирование..., 1984).

Для ряда современных геофизических методов погрешности съемок уже практически доведены до минимума. Уверенное выделение полезной информации возможно лишь тогда, когда сигнал превышает уровень помех. С помощью вероятностно-статистических методов удастся выделить полезные сигналы при отношении сигнал/помеха ≤ 1 . Так как ни технические, ни тем более геологические помехи, возникающие, например, за счет неоднородностей поверхностных отложений, существенно уменьшить нельзя, то отношение сигнал/помеха становится основным препятствием для дальнейшего увеличения точности решения обратной задачи геофизики. Определение физических свойств пород (например, по измерениям на образцах или по скважинным геофизическим наблюдениям), хотя и позволяет устранить или уменьшить действие принципа эквивалентности, но стоит очень дорого, снижая экономическую эффективность геофизической разведки (Тархов А.Г. и др., 1982).

Иными словами, в связи с тем, что геологическая эффективность любого отдельно взятого геофизического метода оказывается не очень высокой, важной проблемой становится системный подход к изучению недр. Практически он сводится к внутриметодному геофизическому комплексированию, основанному на использовании различных физических полей, и межметодному комплексированию геофизических исследований совместно с другими геолого-разведочными. Поскольку разведываемые объекты характеризуются многообразием свойств и связей, то геологическая эффективность при их изучении в общем случае станет тем выше, чем более широким будет комплекс. В свою очередь, возрастание количества комплекслируемых методов ведет к удорожанию стоимости исследований и увеличению времени на их выполнение. Проблема поиска компромисса между этими факторами — одна из сложных в теории и практике комплексирования геофизических исследований недр.

1.1.2. Методология и виды геофизических комплексов. Целью геофизического комплексирования является выбор такого комплекса методов, который может обеспечить однозначное решение поставленной геологической задачи, т.е. получение минимальной погрешности в определении местоположения, геометрии разведываемых объектов и достоверной расшифровки их физических свойств. При выборе комплексов следует руководствоваться определенными методологическими приемами, т.е. наиболее рациональной методикой проведения работ и интерпретацией материалов, а именно: проведением работ от общего к частному; от мелких масштабов к более крупным; от изучения больших площадей (попланшетное картирование) к разведке перспективных участков; от сравнительно быстрых (аэрокосмических, морских) к детальным полевым и подземно-скважинным методам; повторением съемок более точной аппаратурой по более густой сети наблюдений; переходом от интерпретации данных каждого отдельного геофизического метода к комплексной компьютерной обработке всех материалов; от качественного геологического истолкования материалов — к количественному, с использованием петрофизической информации.

Существуют различные виды геофизических комплексов:

- типовые комплексы, т.е. такое сочетание избыточного числа методов, которое на данной стадии исследований обеспечивает точное решение поставленных задач;
- рациональный комплекс — это экономически обоснованный ограниченный набор типовых комплексов, обеспечивающих надежное решение поставленных задач;
- технологические комплексы, объединяющие методы по месту и уровню проведения работ: космические, аэрогеофизические, полевые, акваториальные, подземные и скважинные.

Разработка теории и методологии комплексирования (разнометодной, многоуровневой, геолого-геофизической) — проблема сложная и решается на основе разнообразных информационно-компьютерных технологий.

1.2. Системный подход к геолого-геофизическим исследованиям

1.2.1. Общие закономерности системного подхода к изучению недр. Системный подход при изучении недр Земли предполагает: формулировку решаемых геолого-гидрогеологических задач; оценку физико-геологических условий района и установление

связей геолого-геофизических свойств; выбор рациональной методики, техники, систем наблюдения, масштаба, точности всей совокупности геолого-геофизических работ, необходимых для достижения целей и решения поставленных задач; разработку стадийности, последовательности как геофизических, так и проверочно-эталонных геологических работ; построение физико-геологических моделей для изучаемого района, их последовательное уточнение в ходе интерпретации; выдачу конечных материалов с оценкой их точности, геологической и экономической эффективности и т.п.

Теория и практика геофизических исследований позволяет сформулировать основные закономерности (принципы) системного подхода к геофизическому изучению недр. Рассмотрим некоторые из них, взяв за основу методические разработки академика РАН В.Н.Страхова (1995).

1.2.2. Принципы коррелируемости. Между источниками геофизических аномалий (физико-геометрическими параметрами аномалосоздающих объектов) и геологическими неоднородностями земной коры (структурно-геологическими, литолого-петрографическими, водно-механическими и др.) существуют либо детерминистские, закономерно обусловленные, либо вероятностные связи. Иными словами, любой аномалосоздающий геофизический объект в той или иной степени соответствует какой-либо геологической неоднородности Земли. В различных физических полях корреляционные связи могут быть прямыми и обратными, устойчивыми и неустойчивыми, внутренними (логически или теоретически объяснимыми) и внешними (возможно, ложными и необъяснимыми). В каких-то полях они могут быть полностью скрыты «шумами» и помехами за счет различных геолого-геофизических неоднородностей и технических помех.

Принцип корреляции используется, прежде всего, на стадии качественной интерпретации, когда геофизические карты и разрезы сопоставляются с имеющимися геологическими данными. В результате выбирается тот вариант геологического строения, который максимально соответствует всем физическим полям. Если же по геофизическим данным имеются геофизические аномалии, а по геологическим их нет, то можно говорить об обнаружении новых объектов. Принцип корреляции широко применяется и при количественной интерпретации и геолого-геофизическом истолковании данных, когда главным результатом системного подхода является установление многомерных связей между вы-

ражаемыми количественно геолого-геометрическими и физико-геометрическими характеристиками разведываемых объектов.

1.2.3. Принцип суперпозиции. Наблюдаемые геофизические аномалии почти всегда являются результатом наложения физических аномалий от разных геолого-геофизических объектов или от разных структурных этажей Земли. Для потенциальных полей, например гравимагнитных, или волновых полей, например сейсмических, это может быть линейное сложение или суперпозиция. Для некоторых геофизических методов формирование аномалий — процесс нелинейный. Таковы, например, аномалии вызванной поляризации в электроразведке, ядерно-магнитного резонанса при подмагничивании пород и др. В результате наложения полей связи между ними и геологическим строением либо ослабляются, либо усиливаются. Так, например, однократно отраженную волну трудно выделить на фоне многократно отраженных волн, антиклинальные поднятия, прослеживаемые по всем структурным этажам, выявить методами геофизики легче, чем в случае, когда они наблюдаются по какому-нибудь одному горизонту.

Принцип суперпозиции широко используется в однометодной интерпретации. В гравимагниторазведке применяются различные компьютерные приемы разделения полей на региональные и локальные. При цифровой обработке сейсмических данных подавляются кратные волны. При комплексном использовании нескольких методов принцип суперпозиции реализуется как на качественном, так и на количественном уровне. Например, при совместном анализе региональных или локальных аномалий на гравитационных, магнитных, электромагнитных картах и графиках учитываются форма и простираание геофизических аномалий. Они могут совпадать с местонахождением и простираанием геологических структур и объектов или не совпадать. В последнем случае аномалии, фиксируемые разными методами, свидетельствуют об отражении ими геологических неоднородностей разной природы, возраста, состава, глубины залегания.

1.2.4. Физико-геологическое моделирование. Физико-геологическое моделирование используется для оценки возможностей комплексных геофизических исследований (Тархов А.Г. и др., 1982).

1. *Оценка сравнительной эффективности геофизических методов.* Сравнительную эффективность выявления аномалосоздающих объектов теми или иными геофизически-

ми методами можно получить с помощью математического и физического моделирования. Суть его сводится к расчету аномалий над типичными физико-геологическими или физико-геолого-гидрогеологическими моделями (ФГМ или ФГГМ), которыми с той или иной степенью приближения аппроксимируют реальные геологические образования. Под такими моделями понимаются возмущающие тела простой геометрической формы (шар, цилиндр, столб, пласты, контакты и др.) с определенными размерами и глубиной залегания (геометрией) и отличием физических свойств от свойств окружающей среды (физикой). Для них можно рассчитать аномалии (при математическом моделировании) или получить их (при физическом моделировании). Один и тот же геологический объект (например, горизонтально-слоистая среда, антиклинальная складка, сброс, кимберлитовая трубка, изометрическая полиметаллическая рудная залежь и т.д.) может для разных геофизических методов аппроксимироваться сходными или несколько различающимися ФГМ (или ФГГМ).

Проведя расчет аномалий для разных методов, можно получить сравнительные характеристики, например, через показатель контрастности (γ):

$$\gamma = (A_{\max} - A_{\text{ср}}) / \sigma_{\text{фон}}, \quad (1.1)$$

где $A_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n A_i / n$, $\sigma_{\text{фон}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i - A_{\text{ср}})^2 / n}$. Здесь A_i , $A_{\text{ср}}$ и A_{\max} — соответственно аномалия в любой точке, средняя по изучаемому участку с n точками наблюдений и максимальная аномалия над центром объекта, $\sigma_{\text{фон}}$ — фоновое стандартное отклонение, характеризующее уровень помех и точность съемки. При выявлении аномалий руководствуются правилом «трех сигм и трех точек». Согласно этому правилу, аномалии считаются надежными, если они по амплитуде превышают $3\sigma_{\text{фон}}$, а по протяженности прослеживаются более чем на трех точках профиля. Показателем надежности аномалии является γ_m , где m — ширина аномалий на уровне $3\sigma_{\text{фон}}$.

Более универсальной характеристикой эффективности метода является энергетическое отношение аномалия/помеха (γ_s)

$$\gamma_s = \sum A_i^2 / \sigma_{\text{фон}}^2 = A_{\text{ср}}^2 n / \sigma_{\text{фон}}^2, \quad (1.2)$$

где $\sigma_{\text{фон}}^2$ называется общей дисперсией, зависящей от уровня помех и точности съемки.

В целом эффективность того или иного геофизического метода определяется: природой или способом создания поля, контрастностью физических свойств разведываемого

объекта и окружающей среды, соотношением вертикальной мощности (размеров) и глубины залегания, наличием сверху экранирующих горизонтов с резко контрастными свойствами, а также неоднородностью вмещающей среды и поверхностных отложений, создающих геологические помехи, интенсивностью природных и промышленных помех, точностью съемок, влияющих на величину $\sigma_{\text{фон}}$, и другими факторами.

Физико-математическое моделирование и расчет отношений аномалия/помеха (γ или γ_3) можно проводить на разных стадиях геолого-геофизических работ. На стадии проектирования работ, пользуясь априорными данными предыдущих геолого-геофизических работ, можно оценить разрешающую способность, а значит, эффективность обнаружения искомого объекта разными геофизическими методами и выбрать из них для проведения работ 2—3 наиболее подходящих. На стадии поисковых работ, построив графики и карты γ или γ_3 для всех используемых методов, можно более достоверно выявить местоположение разведываемых объектов. На стадии разведки по данным количественной интерпретации ФГМ для разных методов можно уточнить глубину залегания, размеры, физические свойства объекта, по которым оценить его геолого-гидрогеологические параметры и целенаправленно поставить разведочное бурение.

2. Решение прямых и обратных геофизических задач для разных классов ФГМ.

Сущность теории геофизики в общем плане сводится к математическому или физическому моделированию прямых и обратных задач для разных классов ФГМ (или ФГГМ). Наиболее распространенным классом ФГМ являются одномерные модели, в которых физические свойства меняются в одном направлении, например, с глубиной. Это типично для горизонтально-слоистых сред или сред, залегающих с углами наклона меньше 10° . Основными методами изучения таких разрезов является сейсморазведка методами отраженных (МОВ) и преломленных (МПВ) волн и электромагнитные зондирования (ЭМЗ).

Двумерные модели (наклонно-слоистые пласты, среды с вытянутыми структурами, тектонические нарушения, линзообразные залежи твердых ископаемых и др.) изучаются как этими же методами (МОВ, МПВ, ЭМЗ), так и методами гравиразведки, магниторазведки, электромагнитного профилирования (ЭМП), терморазведки, ядерной геофизики.

Трехмерные модели (штокообразные, изометрические залежи полезных ископаемых и др.) изучаются методами гравиразведки, магниторазведки, электромагнитного профилирования, ядерной геофизики.

Основными ФГГМ являются:

1) горизонтально-слоистые толщи, представленные сверху сухими породами зоны аэрации, а ниже обводненными породами либо с резко контрастирующей по физическим свойствам границей — уровнем грунтовых вод (в грубообломочных отложениях и песках), либо с градиентным изменением физических свойств в зоне капиллярной каймы (в мелкозернистых песчано-глинистых отложениях). Снизу обводненные породы подстилаются водоупорными глинистыми или скальными породами. В них может находиться еще несколько горизонтов подземных вод, включая артезианские, с разной минерализацией, обычно повышающейся с глубиной;

2) крутозалегающие слоистые толщи с трещинно-карстовыми подземными водами, приуроченными к тектоническим нарушениям, зонам трещиноватости скальных и закарстованности карбонатных отложений.

Первые изучаются сейсморазведкой методом преломленных волн (МПВ), а также различными модификациями электромагнитных зондирований (ЭМЗ): вертикальными электрическими с измерением кажущихся сопротивлений (ВЭЗ) и вызванных потенциалов (ВЭЗ-ВП), частотными зондированиями (ЧЗ), зондированиями становлением поля (ЗС) и др. Вторые разведываются различными модификациями электромагнитного профилирования (ЭМП), ядерными методами, реже гравиразведкой и магниторазведкой.

ФГМ и ФГГМ бывают априорными и интерпретационными. По мере повышения детальности работ, расширения числа методов и в ходе комплексной интерпретации представления о виде и параметрах ФГМ и ФГГМ меняются, уточняются. Сами модели становятся основой для построения окончательных геолого-геофизических разрезов и карт.

1.3. Принципы качественной и количественной интерпретации комплексных геофизических данных

1.3.1. Качественная интерпретация при комплексировании геофизических методов. Качественная интерпретация сводится к выделению местоположения аномалообразующих объектов, объяснению их природы, выявлению аномалий, созданных одними и теми же источниками (например, рудные) или разными (например, рудные и нерудные). Выделение аномалий может проводиться визуально или статистическим способом с по-

мощью ЭВМ. Сущность его основана на принципе аналогий, который состоит в перенесении на неизвестный участок подходов к анализу аномалий с эталонных, изученных участков сходного геологического строения или из «банка данных» (Тархов А.Г. и др., 1982).

Начинают качественную интерпретацию с выделения: аномалий разного знака (максимумов, минимумов), с разной степенью «изрезанности», где чередуются небольшие знакопеременные аномалии с тем или иным пространственным периодом, нулевых (спокойных) значений и т.п. Закодирав их, например, в виде нормального ряда цифр 1, 2, 3, ... и подсчитав, сколько аномалий того или иного кода приходится на единицу изучаемой площади, можно с помощью ЭВМ провести картирование, сначала по одному (x), а затем по комплексу (x, y, z, \dots) методов.

Для оценки связи между аномалиями того или иного вида (например, максимумов или минимумов) разных методов можно рассчитать по n аномалиям коэффициент линейной корреляции (r_{xy}):

$$r_{xy} = \left[\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})(y_i - y_{cp}) \right] / n\sigma_x\sigma_y, \quad (1.3)$$

где $x_{cp} = \sum_{i=1}^n x_i / n$, $\sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2 / n}$. Аналогичным образом рассчитываются значения y_{cp} и σ_y . При $0,7 < |r_{xy}| < 1$ связи между разными физическими полями устойчивы и обусловлены одним и тем же источником. При $|r_{xy}| < 0,5$ можно говорить о слабых связях или об их отсутствии, что свидетельствует, например, о различной природе аномалий.

Заканчивают качественную интерпретацию анализом количественных признаков аномалий. Обычно это коэффициенты контрастности γ_k и $\gamma_{\%k}$ (1.1), где k — номер метода. Надежное выделение аномалосоздающих объектов по комплексу методов ($k = 1, 2, 3, \dots, M$) можно, например, получить с помощью функции комплексного показателя (ФКП):

$$\text{ФКП} = \sum_{k=1}^M C_k |\gamma_k|, \quad (1.4)$$

где M — число методов в комплексе, $|\gamma_k|$ — абсолютное значение коэффициента контрастности, C_k — логико-эвристический весовой коэффициент, вводимый интерпретатором на основе общих теоретических или практических представлений (например, при изучении массивной сульфидной залежи можно принять $C_{\text{сп}} = 2$, $C_{\text{вп}} = 1,5$, $C_{\text{кс}} = 1$ и т.д.).

На картах и графиках ФПК максимумами выделяются положения эпицентров самых достоверных аномалосоздающих объектов.

Существуют и другие приемы выделения слабых аномалий: приемы распознавания образов, дискриминантный, кластерный, факторный и другие виды анализов. Сущность их сводится к изучению аномалий на этапах обучения и анализа. При обучении используются математические приемы оценки признаков аномалий над заведомо известными объектами, например, промышленными залежами руд. На этапе анализа эти признаки используются для обработки рядовых аномалий и распознавания искомых объектов. Алгоритмы разнообразных методов распознавания образов требуют большого объема вычислений с использованием ЭВМ.

1.3.2. Принципы количественной интерпретации комплексных геофизических данных. Количественная интерпретация геофизических данных бывает пометодной и совместной, с использованием компьютеров или автоматизированных систем (Кузнецов О.Л., Никитин А.А., 1992).

1. *Сущность пометодной и совместной комплексной интерпретации.* Количественная интерпретация комплексных геофизических данных сводится к определению геометрических и геолого-гидрологических характеристик разведываемых объектов по совокупности решений обратных задач для разных методов. Наиболее простым является решение обратных задач для геофизических методов, описываемых сходными законами, например, для потенциальных методов геофизики (гравитационного, магнитного, естественного электрического поля). При решении обратных задач методом сравнения полевых кривых с расчетными постепенно изменяются геометрические и физические параметры разведываемых объектов до получения таких размеров, формы, глубины залегания и физических свойств, которые обеспечивают совпадения полевых и расчетных кривых.

Совместное решение обратных задач для нескольких методов реализуется путем использования способов многомерной статистики. Простейшим из них является получение уравнения многомерной регрессии. Для этого экспериментально, с помощью параметрических наблюдений, например, по скважинам и результатам петрофизических исследований, рассчитываются те или иные геолого-гидрологические и геометрические параметры, выражаемые численно (y_i). Это могут быть литология рыхлых осадочных пород, определяемая через средний диаметр твердых частиц (d_{cp}); коэффициенты содержания

рудных минералов в породе (K_p), пористости (K_n), водонасыщенности (K_v), фильтрации (K_f), водопроницаемости ($T_v = K_{cp} \cdot h$, где h — мощность слоя); глубины залегания опорных горизонтов (H), например, кристаллического фундамента и др.

Для тех же объектов определяются геофизические параметры (x_i), получаемые наиболее точно, т.е. те, на которые принцип эквивалентности действует наименьшим образом. Например, $\Delta g_{\max} \cdot h / \Delta \sigma$ (Δg_{\max} — максимальная гравитационная аномалия от объекта с избыточной плотностью $\Delta \sigma$, расположенного на глубине h); продольная электрическая проводимость слоя, подстилаемого высокоомной толщей ($S_i = h_i / \rho_i$); поперечное электрическое сопротивление слоя постоянному току ($T_i = h_i \cdot \rho_i$) или мощность (h_i) слоя при зондировании переменными полями, если он подстилается низкоомной толщей, и др. В ходе параметрических наблюдений (алгоритм обучения) используется формула многомерной линейной регрессии:

$$y_j = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i, \quad (1.5)$$

где $a_0 = y_{jcp} - \sum a_i x_{icp}$, $a_i = b_i \frac{\sigma_{y_j}}{\sigma_{x_i}}$. Здесь y_j — геологический параметр, определяемый по n геофизическим методам ($x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$), a_0 — свободный член, a_i — коэффициенты регрессии, значения $x_{icp}, y_{jcp}, \sigma_{x_i}, \sigma_{y_j}$ рассчитываются по формуле (1.3), b_i — вспомогательные коэффициенты, получаемые при решении системы линейных уравнений множественной регрессии, $r_{ij} = \sqrt{\sum_{i=1}^n b_i \cdot r_{iy}}$ — множественный коэффициент корреляции, r_{iy} — коэффициент парной корреляции между y_j и x_i (1.3).

В качестве примера можно привести полученное автором уравнение связи между процентным содержанием меди (Cu) на одном из пластовых месторождений медьсодержащих руд и параметрами вызванной (η) и естественной (α) поляризации $Cu = 1,46 + 0,35\eta - 0,04\alpha$ при $r = 0,83$.

2. Автоматизированные системы комплексной интерпретации. Современные методы изучения недр основаны на использовании геологических, геохимических и разнородных (космических, воздушных, наземных, морских и скважинных) геофизических методов. В результате регистрируются огромные массивы информации, из которой реально обрабатывается не более 10%. Повышение эффективности и качества работ требует

создания автоматизированных систем обработки (и интерпретации) данных (АСОД) на ЭВМ. Этим занимается новая отрасль геологии — геоинформатика. Разрабатываются АСОД, ориентированные на отдельные методы (грави-, магнито-, электро-, сейсморазведку, ядерную геофизику, ГИС), технологии (космические, аэрогеофизические, полевые, морские, скважинные), проблемы (поиски нефти и газа, рудных ископаемых, воды, решение задач инженерной геологии, гидрогеологии, геоэкологии и охраны окружающей среды), регионы (Русская платформа, Восточная и Западная Сибирь и др.). Любая из систем состоит из банка (базы) данных, системы управления и библиотеки обрабатывающих (прикладных) программ.

Более сложным этапом является создание интегрированных АСОД для комплексного геолого-геофизического проведения геолого-разведочных работ, совместной обработки и интерпретации материалов. Их основой станет не только база данных, но и база знаний как персональных (ПБЗ), так и обобщенных (ОБЗ). Ядром базы знаний являются данные опросов специалистов-экспертов, проводимых с целью разработки стратегии комплексных исследований недр. В результате будут создаваться автоматизированные и экспертные системы на основе тех или иных компьютерных технологий. Последние должны включать проектирование, проведение работ и комплексную интерпретацию.

1.4. Основы петрофизики

Ответственным, иногда самым трудным и неоднозначным по результатам этапом комплексных геофизических исследований является геолого-тектоническое, петрофизическое, гидрогеологическое, инженерно-геологическое, мерзлотно-гляциологическое и экологическое истолкование результатов. Оно выполняется с помощью петрофизических исследований (*Вахромеев Г.С.* и др., *Петрофизика*, 1997).

1.4.1. Петрофизика и геофизические свойства горных пород. Петрофизика (физика горных пород) — это прикладной раздел наук о Земле, находящийся на стыке геологии (петрологии, литологии, наук о полезных ископаемых, гидрогеологии, инженерной геологии, геокриологии и др.), геофизики (глубинной, региональной, разведочной, инженерной, экологической), а также физических исследований Земли и физики вещества. Петрофизика изучает различные физические свойства горных пород, взаимосвязи

их между собой и с физическими полями Земли. Основными разделами петрофизики являются:

— исследования природы каждого из многочисленных геофизических свойств горных пород, зависимости их от естественных и техногенных факторов;

— построение физической модели среды как непосредственно через измеренные свойства, так и по данным физико-математической интерпретации результатов различных геофизических методов;

— построение физико-геологических моделей среды (ФГМ) в ходе геологического истолкования геофизических материалов.

С точки зрения петрофизики каждая горная порода — это сложное вещество трехфазового состава, т.е. состоящее из твердой (один или несколько минералов), жидкой (вода, нефть, нефтепродукты) и газообразной (воздух, горючие газы) фаз. Физические свойства горных пород определяются прежде всего свойствами самих фаз, их количественным соотношением в породе и взаимодействием. Такие физические свойства твердой фазы, как плотность, магнитные, электрические, упругие, тепловые, ядерные, определяются, в основном, атомным строением химических элементов минералов, из которых состоит порода, соотношением твердой, жидкой и газообразной фаз, температурой и зависят от геологических факторов: термодинамических условий образования магматических пород, степени их метаморфизма, условий накопления осадочных пород, структурно-текстурных особенностей массивов пород. Используемые в геофизике физические поля Земли определяются перечисленными геофизическими свойствами горных пород.

Существующие классификации горных пород, в основу которых положен их минеральный и химический состав, отличаются от петрофизических, основанных на фазовых состояниях горных пород. Одна из таких возможных классификаций дана в табл. 1.1. В ней приведены часто встречающиеся значения некоторых физических свойств горных пород: плотностных (плотности (σ) и пористости (n)), упругих (скорости продольных (V'_p) и поперечных (V'_s) сейсмических волн), магнитных (магнитная восприимчивость (χ) и др.), электрических (удельное электрическое сопротивление (ρ) и др.), изучаемые как в петрофизике, так и в теории соответствующих геофизических методов.

Таблица 1.1

Осредненные, часто встречающиеся значения некоторых физических свойств горных пород

Породы	Плотность σ , г/см ³	Пористость n , %	Скорости упругих волн			Магнитная восприимчивость χ , 10 ⁻⁵ ед. СИ	Удельное электрич. сопр. ρ , Ом·м
			V_p , км/с		V_s , км/с		
			газонас.	водонас.			
МАГМАТИЧЕСКИЕ							
Ультраосновные (пироксенит, перидотит, дунит и др.)	3,2—3,3	0,1—0,5	7,5	8,5	4,5	1000—25000	10 ⁵ —10 ⁸
Основные габбро диорит	2,9—3,0	0,01—1	6,0	6,6	3,8	300—15000	10 ⁴ —10 ⁷
	2,7—2,8	0,01—1	5,6	6,3	3,5	1000—70000	10 ³ —10 ⁷
Кислые гранодиорит гранит	2,7	0,2—5	4,6	6,0	3,3	100—45000	10 ³ —10 ⁶
	2,6	0,1—3	3,0	5,5	2,8	50—40000	10 ³ —10 ⁵
Эффузивные диабаз базальт	2,9	0,1—5	3,5	6,5	3,5	500—150000	10 ⁵ —10 ⁶
	2,5	3—6	3,0	5,5	3,0	100—150000	10 ³ —10 ⁷
МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ							
Гнейсы	2,7	0,01—1	3,8	5,6	3,2	100—20000	10 ³ —10 ⁵
Сланцы	2,6	0,01—1	3,5	4,8	3,0	50—3000	10 ³ —10 ⁵
ОСАДОЧНЫЕ							
Скальные и полускальные известняк доломит мергель песчаники	2,6	2—25	2	6	3	50—2500	100—10 ⁵
	2,7	2—17	1	5,5	2,5	50—800	100—10 ⁴
	2,4	5—35	1,5	4,5	2	10—1000	10—10 ³
	2,5	2—35	1	4,5	1	50—5000	100—10 ⁴
Песчано-обломоч- ные (рыхлые) гравийно-галечные пески	3	2—20	0,8	2,5	0,5	50—5000	100—10 ³
	1,3—2	2—40	0,5	2	0,2	50—2500	10—10 ⁴
Пластичные (глинистые) (глина, аргиллит)	1,2—2,4	2—40	1,5	2,5	0,4	10—3000	1—100

1.4.2. Геолого-гидрогеологические свойства. Горные породы различаются по минеральному составу, размерам твердых частиц, соотношению объемов твердой, жидкой и газообразной фаз, структурно-тектоническим особенностям и другим факторам, определяющим их геолого-гидрогеологические свойства. Некоторые из них, как и геомеханические, физико-механические, деформационно-прочностные и фильтрационно-емкостные (водо-, нефте- и газокolleкторские), могут характеризоваться количественно. К физико-механическим можно отнести следующие основные свойства (см. табл. 1.2):

— средний диаметр твердых частиц (d_{cp} в мм) рыхлых (песчано-обломочных) и пластичных осадочных пород;

— литологию пластичных и рыхлых осадочных пород, которая численно может быть выражена, например, в виде арифметического ряда чисел: от $L = 1, 2, 3$ для тяжелых, средних, легких глин, далее таких же суглинков (4, 5, 6), супесей (7, 8, 9), песков (10, 11, 12), а также галечников (13) и валунов (14). В этом ряду L пропорциональна среднему диаметру твердых частиц (d_{cp}), который является основным диагностическим признаком пластичных и рыхлых осадочных пород;

— глинистость (Γ) и коэффициент глинистости (C_{Γ}) песчано-глинистых пород: $\Gamma = V_{T(<0,01)} / V$ и $C_{\Gamma} = m_{T(<0,01)} / m$, где $V_{T(<0,01)}$ и $m_{T(<0,01)}$ — объем и масса твердых частиц (глинистых минералов) с $d_{cp} < 0,01$ мм = 10 мкм, а V и m — общий объем и масса изучаемых пород. Здесь, как и везде в дальнейшем, отношения каких-либо объемов или масс измеряются в долях единицы или в процентах;

— число пластичности (Π_n), которым определяется способность глинистых пород деформироваться при обводнении;

— пустотность (пористость) $n = V_n / V_T$ и коэффициент пустотности (пористости) $K_n = V_n / V$, где $n = K_n (1 - K_n)$, V_n — объем пустот. Это может быть первичная пористость рыхлых осадочных пород, вторичная трещиноватость скальных магматических, метаморфических и осадочных или то и другое, V_T и V — объемы твердой фазы и всего образца изучаемой породы ($V = V_T + V_n$);

— плотность ($\sigma = m / V$) и минеральная плотность ($\delta = m_T / V_T$), где m_T и m — массы твердой фазы и всей изучаемой породы (σ и δ измеряются в $\text{г/см}^3 = 10^3 \text{ кг/м}^3$).

Таблица 1.2

Приближенные количественные связи некоторых инженерно-геологических и гидрогеологических параметров пород

Инженерно-геологические и гидрогеологические параметры пород	Глина			Суглинок			Супесь			Песок			Галечник	Валуны
	Т	С	Л	Т	С	Л	Т	С	Л	МЗ	СЗ	КЗ		
Л	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$d_{ср}, мм$	$n \cdot 10^{-5}$	$n \cdot 10^{-4}$	10^{-3}	$0,002 - 0,005$	$0,005 - 0,01$	$0,01 - 0,02$	$0,02 - 0,05$	$0,05 - 0,1$	$0,1 - 0,2$	$0,2 - 0,5$	$0,5 - 1$	$1 - 2$	$3 - 10$	$20 - 80$
Г, %	≥ 65	≥ 50	≥ 40	≥ 30	≥ 20	≥ 15	$15 - 20$	$12 - 15$	$10 - 12$	10	5	0	0	0
П	25	20	17	17—13	13—10	10—7	7	4	1	0	0	0	0	0
$k_{гн}, \%$	60	40	20	55	45	25	50	40	30	50	40	30	30	30
$k_{гп}, \%$		5			10		20				30		40	40
$k_{фр}, м/сут$				0,001		0,01		0,1				10		100

Примечание. Т, С, Л — тяжелые, средние, легкие породы соответственно; МЗ, СЗ, КЗ — мелко-, средне-, крупнозернистые пески соответственно.

К деформационно-прочностным свойствам можно отнести такие упругие свойства, как:

— модуль упругости или модуль Юнга (E), являющийся коэффициентом пропорциональности между растягивающе-сжимающими напряжениями, действующими на упругое тело, и относительными линейными его деформациями того же направления;

— коэффициент Пуассона ν — отношение поперечного сжатия к продольному удлинению при одноосном растяжении;

— скорости продольных (V_p) и поперечных (V_s) упругих (сейсмических) волн, аналитически связанных с E и σ при малых напряжениях и деформациях пород, наблюдаемых при сейсмоакустических исследованиях, следующими уравнениями:

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\sigma(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad V_s = \sqrt{\frac{E}{2\sigma(1+\nu)}}; \quad (1.6)$$

— модули общей деформации ($E_{\text{деф}}$) и пределы прочности образцов горных пород при сжатии ($\sigma_{\text{сж}}$), характеризующие прочностные свойства образцов при значительных длительных нагрузках и др.

Модули E , $E_{\text{деф}}$, $\sigma_{\text{сж}}$ измеряются в паскалях (Па), ν — в относительных единицах, а скорости — в км/с.

К фильтрационно-емкостным относятся следующие основные свойства, характеризующие флюидонасыщенность, т.е. способность пористых пород удерживать, пропускать и отдавать жидкости и газы:

— коэффициент водонасыщенности (общей влажности) $K_v = (V_{\text{связ}} + V_{\text{своб}}) / V_n$, где $V_{\text{связ}}$ — капиллярно и физически связанная вода, адсорбированная глинистыми частицами, $V_{\text{своб}}$ — свободная вода, отдаваемая породой, например, при откачках из скважин, V_n — объем пор. Для полностью водонасыщенной породы $K_v = 1$;

— активная пористость или водоотдача $K_m = V_{\text{своб}} / V_n$ и коэффициент остаточного водонасыщения $K_{во} = V_{\text{связ}} / V_n$, указывающие на доли воды, извлекаемой и не извлекаемой из породы ($K_v = K_m + K_{во}$);

— коэффициент фильтрации (K_f), которым определяется скорость (в м/сут) фильтрации свободных подземных вод, и коэффициент водопроницаемости ($T = K_f h$, где h — мощность водоносного пласта, в м²/сут), которым характеризуется погонная мощность фильтрационного потока;

— коэффициенты нефте-, газо-, водонасыщенности пор ($K_n = V_n / V_p$, $K_g = V_g / V_p$, $K_w = V_w / V_p$, где V_n , V_g , V_w и V_p — объемы соответствующих фаз и общий объем пор);

— коэффициент проницаемости ($K_{пр}$) — один из обобщенных параметров, характеризующий водоупорные и коллекторские свойства горных пород, т.е. способность их давать промышленные притоки нефти, газа, воды. Он сложным образом зависит от коэффициента пустотности, удельной поверхности и строения поровых каналов, пропорционален коэффициенту фильтрации и измеряется в (мкм)². К проницаемым коллекторам относят породы с $K_{пр} > 10^{-2}$ (мкм)², к полупроницаемым с $K_{пр} = 10^{-4} — 10^{-2}$ (мкм)². Водоупорными считаются породы с $K_{пр} < 10^{-4}$ (мкм)².

1.4.3. Методика измерений физических свойств горных пород. Физические свойства горных пород определяются путем прямых лабораторных измерений на образцах и испытаний пород на опытных площадках, а также косвенным путем в результате интерпретации скважинных и полевых, акваториальных и воздушных геофизических наблюдений.

Большинство геолого-гидрогеологических (литология, механический состав, глинистость, пористость, статические деформационно-прочностные, некоторые водные свойства), а также физических (плотность, магнитные, электрические, упругие, тепловые, ядерные) свойств горных пород определяются в лабораторных условиях на образцах, взятых из обнажений, горных выработок и скважин (керна). Физические свойства, измеренные на образцах и в естественном залегании, отличаются. Это принято объяснять масштабным коэффициентом, т.е. несовпадением малых объемов изучаемых образцов (истинные свойства) и больших объемов массивов (пластовые и осредненные свойства толщ горных пород). Методика и техника измерений физических свойств хорошо разработаны и изложены в учебниках и руководствах (Вахромеев Г.С. и др., Петрофизика, 1997; Комплексные инженерно-геофизические исследования..., 1990). Некоторые свойства, например, деформационно-прочностные (применения штампов и прессов), магнитные (каппа-метрия), упругие (ультразвуковые) и др., определяются на опытных площадках, где коренные породы выходят на поверхность. Водные свойства изучаются с помощью специальных гидрогеологических исследований (наливы воды в шурфы, откачки ее из скважины). Скважинные наблюдения (геофизические исследования скважин — ГИС) — основной источник информации о линейном распределении геофизических свойств горных пород в естественном залегании по глубине в цилиндрическом объеме радиусом по

рядка метра вокруг скважины (Горбачев Ю.И., 1990). Аэро-, наземные, акваториальные геофизические съемки позволяют получать информацию об осредненных физических свойствах отдельных пластов, толщ, объектов в естественном залегании. Для объективности определения физических свойств необходимы массовые (свыше 20) измерения.

Полученные физические свойства должны быть подвергнуты статистической обработке. Сначала выявляется закон распределения, рассчитываются средние значения, среднеквадратические отклонения (дисперсии). Далее устанавливаются корреляционные связи между некоторыми свойствами с определением коэффициентов корреляции и получением уравнений регрессии. Существует множество способов и программ статистической обработки данных на ЭВМ (Кузнецов О.Л., Никитин А.А., 1992).

1.4.4. Характеристика геофизических свойств горных пород. Свойства горных пород, получаемые в результате интерпретации данных геофизических методов исследования, необходимы как для петрофизического и геологического истолкования результатов, так и для косвенного определения геолого-гидрогеологических свойств, обычно сложно поддающихся измерениям прямыми методами. Остановимся на краткой характеристике основных из этих свойств (Горбачев Ю.И., 1990).

Латеральные (плановые) изменения плотности горных пород приводят к появлению гравитационных аномалий, или аномалий приращения силы тяжести Δg_a . Плотность разных пород меняется от 1 до $3,5 \text{ г/см}^3$ в зависимости от плотности минерального скелета (σ), которая изменяется от 2,1 до $3,5 \text{ г/см}^3$, а также от пустотности (пористости и трещиноватости) и водогазонасыщенности (см. рис. 1.1).

У магматических и метаморфических горных пород плотность определяется в основном их минеральным составом и увеличивается при переходе от пород кислых к основным и ультраосновным в соответствии с увеличением количества плотных железосодержащих минералов. Для осадочных пород она зависит в основном от пористости и водонасыщенности (см. табл. 1.1).

Основным магнитным параметром горных пород является магнитная восприимчивость χ (каппа), представляющая собой коэффициент пропорциональности между интенсивностью намагничивания (J_i) и напряженностью намагничивающего геомагнитного поля (T), т.е. $J_i = \chi T$. За единицу χ принимается 10^{-5} ед. СИ. В практике магниторазведки измеряется не только T (в эрстедах), но и магнитная индукция $B = mT$ (в теслах), где

$\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ — магнитная проницаемость воздуха и большинства немагнитных пород. По сравнению с абсолютными значениями (T или Z) точнее определяются их относительные величины (ΔT или ΔZ), т.е. приращения поля по отношению к какому-то опорному (исходному) пункту. Большинство горных пород относятся к парамагнетикам: намагниченность этих пород направлена по вектору напряженности геомагнитного поля в месте, где порода залегает, а χ меняется от единицы до 100000 единиц 10^{-5} СИ (см. табл. 1.1). У ферромагнитных пород и руд намагниченность зависит от наличия и количества железосодержащих и некоторых других минералов — ферромагнетиков при значениях χ до единицы СИ. В целом интервал изменения χ у горных пород достаточно велик и зависит от их минерального состава, условий залегания и множества других факторов. Среди магматических пород наиболее высокие и устойчивые значения χ у ультраосновных и основных пород, несколько меньшие у кислых, эффузивных и метаморфических. Осадочные породы за исключением некоторых разновидностей песчаников и глин практически не магнитные.

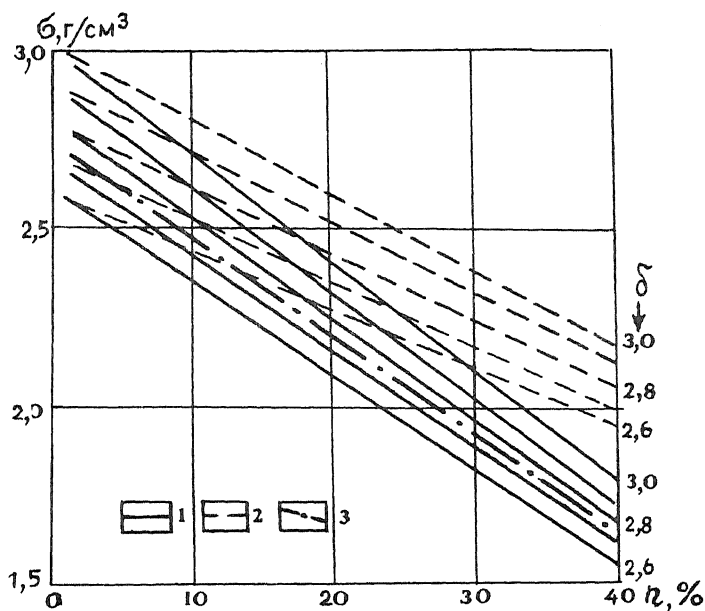


Рис. 1.1. Графики зависимости плотности (σ) от пористости (n) газонасыщенных (1) и водонасыщенных (2 и 3) осадочных горных пород при разной минеральной плотности скелета (δ): 1 и 2 — расчетные данные М.Л.Озерской, 3 — экспериментальные данные И.Х.Юдборовского для песчано-глинистых пород

Большинство методов электроразведки основаны на определении удельного электрического сопротивления (УЭС или ρ), измеряемого в Ом·м, или обратного ему параметра ($\gamma = 1/\rho$) — электропроводности, измеряемой в сименсах (См). В практике электроразведки ρ часто определяют по кажущемуся сопротивлению (КС или ρ_k), являющемуся сложной функцией параметров геологического разреза. По электрическому сопротивлению все горные породы и руды делятся на породы-проводники I рода с высокой электронной проводимостью за счет электропроводящих минералов (самородные металлы, многие окислы, сульфиды, графит) и породы-проводники II рода с ионной проводимостью, в которых породообразующие минералы (полевые шпаты, алюмосиликаты, слюды и многие другие) являются практически изоляторами, а ток проводится ионами заполняющего поры флюида. Проводниками II рода являются все породы: магматические, метаморфические (УЭС 10^3 — 10^7 Ом·м), скальные, осадочные (10 — 10^5 Ом·м), песчано-обломочные (10 — 10^4), глинистые (1 — 100 Ом·м). Большие интервалы изменения УЭС горных пород обусловлены литологией, разными величинами пустотности, водонасыщенности, минерализации подземных вод, температуры и других факторов (см. табл. 1.1).

Кроме УЭС в электроразведке используется электрохимическая активность (α в мВ), которой обусловлены естественные электрические потенциалы (ЕП), поляризуемость (η в %), приводящая к появлению вызванных потенциалов (ВП). ЕП связаны с существованием естественных зарядов на контакте твердой и жидкой фаз горной породы, а ВП — с появлением их при пропускании через породу электрического тока.

Физическим свойством, на котором основываются сейсмоакустические методы, является упругость горных пород, выражающаяся через скорости распространения продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн, аналитически связанные с модулем Юнга, коэффициентом Пуассона и плотностью горных пород (см. (1.6)). V_p и V_s определяются путем измерения времени (t) прихода упругих волн к сейсмоприемникам при известных расстояниях от них до пунктов возбуждения (x).

Главными факторами, влияющими на величины V_p и V_s , являются: наличие структурных связей в породах (жестких — в скальных и полускальных, водно-коллоидных в глинистых) и отсутствие связей в рыхлых песчано-гравийных породах (см. табл. 1.1). Скорости упругих волн магматических пород возрастают с увеличением в них содержания минералов основного состава, т.е. при переходе от кислых (граниты) к основным (габбро) и особенно ультраосновным (дунит, перидотит) породам (V_p возрастает с 3 до 8,5 км/с, V_s — с 2,8 до

4,5 км/с). Скорости увеличиваются также с уменьшением пустотности (первичной пористости и вторичной трещиноватости), а для продольных волн — и водонасыщенности. Скорости поперечных волн не зависят от того, чем заполнены пустоты: воздухом или водой, а в жидкостях они не распространяются.

У метаморфических пород скорости упругих волн определяются минеральным составом и возрастают при переходе к более высоким степеням метаморфизма. Отношение V_s / V_p для скальных магматических и метаморфических пород меняется от 0,5 до 0,6, а для полускальных — от 0,2 до 0,5. Для осадочных пород определяющими факторами, изменяющими скорости упругих волн в широких пределах, являются соотношения твердой, жидкой и газообразной фаз, что зависит от их пустотности и водонасыщенности. Связь скоростей упругих волн с литологией более сложная и часто неоднозначная. В целом для осадочных пород V_p меняется от 0,5 до 6 км/с, а V_s — от 0,2 до 3 км/с. Отношение V_s / V_p меняется от 0,1 у песков до 0,6 у глин и известняков. При замерзании любых пород скорости резко возрастают.

В терморазведке измеряемыми параметрами являются температура горных пород (T) в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$) или кельвинах (K), градиенты температуры (ΔT) и величины теплового потока из земных недр (q) в $\text{Вт}/\text{м}^2$. По ним рассчитываются основные тепловые (теплофизические) свойства: теплопроводность $\lambda_r = q / \text{grad } T^{\circ}$ (в $\text{Вт}/\text{К}\cdot\text{м}$), теплоемкость $C = Q / (m \cdot \text{grad } T^{\circ})$, где Q — количество теплоты, подводимой к массе тела m (в $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$), температуропроводность $a = \lambda_r / Cs$, где σ — плотность (в $\text{м}^2/\text{с}$). Тепловые свойства пород определяются тепловыми свойствами и соотношениями составляющих их фаз. Основной тепловой параметр (теплопроводность) изменяется у магматических и метаморфических пород от 0,5 до 5 $\text{Вт}/\text{К}\cdot\text{м}$, а у осадочных — от 0,1 до 5 $\text{Вт}/\text{К}\cdot\text{м}$, возрастая в ряду пород: горф — глина — пески — конгломераты — известняки — каменная соль. Самая высокая — в полиметаллических рудах ($\sim 10 \text{ Вт}/\text{К}\cdot\text{м}$) и особенно у самородных минералов (до 500 $\text{Вт}/\text{К}\cdot\text{м}$), а самая низкая — у воздуха, нефти и воды, соответственно равная 0,01—0,04, 0,14, 0,6—0,7 $\text{Вт}/\text{К}\cdot\text{м}$. Остальные теплофизические свойства горных пород меняются в 2—10 раз и практически используются редко.

Ядерно-физические свойства горных пород разделяются на естественные (радиоактивность) и искусственные (гамма-лучевые и нейтронные). Среди более 200 радиоактивных элементов наиболее распространены в земной коре: уран (U) — $\sim 2 \cdot 10^{-4} \%$, торий (Th) — $\sim 7 \cdot 10^{-4} \%$ и калий-40 (K) — $\sim 1,8 \%$, дающие вместе около 99 % радиоген-

ного тепла. Количественную оценку радиоактивности в радиометрии чаще всего рассчитывают в единицах уранового эквивалента: $1 \text{ eU} = 1 \text{ Uг} = 10^{-4} \% \text{ U}$. Урановый эквивалент — это такая концентрация (масса) естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ), которая эквивалентна излучению урановой руды с концентрацией урана $10^{-4} \%$. Радиоактивность горных пород определяется радиоактивностью минералов, содержащих ЕРЭ. Максимальные значения радиоактивности (свыше 1000 eU) у радиоактивных минералов и руд. В магматических породах при переходе от кислых к основным и ультраосновным радиоактивность уменьшается от 30 до 0,3 eU, у метаморфических меняется в пределах 1—15 eU. У осадочных пород она максимальна в россыпях с радиоактивными элементами (свыше 1000 eU), калийных солях, илах, горючих сланцах (около 100 eU) и глинах, песчаниках, мергелях (около 10 eU), минимальна у карбонатов, кварцевых песков, гипсов, поваренной соли (единицы eU).

Гамма-лучевыми и нейтронными свойствами горных пород определяется их реакция при облучении их гамма-лучами или нейтронами разных энергий и длительности. По эффектам взаимодействия с ядрами и электронами атомов минералов, приводящим к замедлению, рассеянию и поглощению нейтронов, можно судить о химическом составе элементов, а также о плотности, пористости, водородосодержании горных пород. Основным гамма-лучевым свойством, которое определяется химическим составом и плотностью, является коэффициент поглощения гамма-лучей (μ_γ), рассчитываемый по вторичному гамма-излучению ($J_{\gamma\gamma}$). В магматических, эффузивных, метаморфических и скальных осадочных породах коэффициенты поглощения высокие, а в пористых водо-, нефте- и газонасыщенных — низкие.

Основными нейтронными свойствами горных пород, характеризующими их химический состав, водородосодержание (наличие воды, нефти, газа), коллекторские свойства, являются: длина замедления (l_s в см), время замедления (t в мкс), поглощение (μ_n) нейтронов, определяемые по интенсивности тепловых нейтронов (J_{nn}) или вторичному гамма-излучению ($J_{\gamma\gamma}$). Хлор и водородосодержащие породы отличаются наиболее заметными аномалиями нейтронных свойств.

1.4.5. Взаимосвязи петрофизических свойств горных пород. Связи родственных геолого-гидрогеологических свойств горных пород (физико-механических, деформационно-прочностных, фильтрационно-емкостных) иногда можно выразить в аналитическом

виде. Однако чаще они являются корреляционно-статистическими. Иногда они обобщены в виде достаточно стабильных эмпирических формул. Самый надежный способ установления межпараметрических связей — постановка геолого-геофизических работ на ключевых участках изучаемого района. В этом случае в результате статистической обработки материалов можно получить уравнения регрессии для парной или множественной корреляции между разными геолого-гидрогеологическими и геофизическими параметрами.

Особый практический интерес представляют определения геолого-гидрогеологических свойств полевыми геофизическими методами. Например, с помощью гравитационных и магнитных или электрических и ядерных методов можно вести петрофизическое (литологическое) картирование. Применение комплекса методов ГИС позволяет изучать коллекторские свойства пород и выявлять заполнитель пустот (вода, нефть, газ). Основными прикладными задачами петрофизики и является установление подобных связей. Поскольку физико-геологические связи многофакторны, их лучше всего определять с помощью многомерной корреляции. С этой целью для любого геологического свойства в пределах изучаемого района надо получить уравнение многомерной связи этого свойства с рядом геофизических, называемое уравнением регрессии. Например, коэффициент нефтенасыщенности можно определить по формуле $K_n = aV_p + b\rho + c\eta$, где a, b, c — коэффициенты, которые находятся в ходе эталонирования (обучения) на участках с известными K_n , скоростями продольных волн (V_p), удельными электрическими сопротивлениями (ρ) и поляризуемостями (η) нефтеносных пород. Можно попытаться определить ряд геологических свойств по одному геофизическому параметру с помощью одномерных линейных уравнений связи. Однако надежность таких определений невысока.

1.4.6. Построение петрофизических карт. Петрофизические карты или карты физических свойств пород (петроплотностная, петромагнитная, петроэлектрическая, петроскоростная и др.), полученные по данным лабораторных измерений на образцах, являются фактической основой для петрографического (литологического) картирования изучаемой площади. Масштабы карт определяются густотой точек наблюдения (средние расстояния между точками должны быть не больше 1 см в масштабе карты). Сечение изолиний на картах зависит от точности съемки и должно быть в 3 раза больше среднеквадратических или арифметических ошибок наблюдений. Рекомендуется группировать физические свойства по интервалам их изменения буквенными индексами в алфавитном

порядке. Так, для плотности при $\sigma \leq 2 \text{ г/см}^3$ вводится индекс а, далее с ростом σ на $0,05 \text{ г/см}^3$ группам придаются индексы в виде букв русского алфавита: при $\sigma = 2—2,05$ (б), $2,05—2,10$ (в), $2,10—2,15$ (г), ..., $> 3,2$ (я). Магнитная восприимчивость большинства ферро- и парамагнитных пород с $\chi < 100 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ обозначается заглавной буквой А, а далее обозначают: при $\chi = 100—300$ (Б), $300—700$ (В), $700—1500$ (Г) и т.д. (с увеличением интервала группирования вдвое при $\chi > 40000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ (К)). Для скоростей продольных волн вводится латинский алфавит: при $V_p = 2,0—2,3 \text{ км/с}$ (а) и далее скорости с интервалом $0,3 \text{ км/с}$ обозначаются $2,4—2,7$ (в), $2,8—3,1$ (с), $3,2—3,5$ (d), ..., $7,6—7,9$ (v). При необходимости дается более дробная индексация: $a_1, a_2, \dots, A_1, A_2, \dots, d_1, d_2$ и т.п. Один или несколько интервалов группирования физических свойств, соответствующие определенным литологическим или стратиграфическим образованиям на геологической карте, заштриховываются или закрашиваются в соответствии с правилами оформления геологических карт. При достаточном количестве и качестве геологических данных, в том числе петрографических определений образцов, ведется петрографическое (литологическое) группирование пород по физическим свойствам. Сначала выделяются основные генетические типы пород: магматические (интрузивные и эффузивные), метаморфические и осадочные, затем их подразделения (ультраосновные, основные, кислые, карбонатные, песчано-обломочные, глинистые) и, наконец, при достаточной информации дается более точный петрографический (литологический) состав (см. табл. 1.1).

Наиболее важно на картах выделить полезные ископаемые, характеризующиеся экстремальными значениями физических свойств: рудные, отличающиеся очень низкими значениями УЭС ($\rho \ll 1 \text{ Ом}\cdot\text{м}$), высокими плотностями ($\sigma > 4 \text{ г/см}^3$); радиоактивные — высокими концентрациями урана ($eU > 0,1$); железорудные — высокими плотностями ($\sigma > 4 \text{ г/см}^3$) и магнитными восприимчивостями ($\chi > 0,01$ ед. СИ); нерудные — высокими плотностями ($\sigma > 4 \text{ г/см}^3$) и высокими скоростями продольных упругих волн ($V_p > 6 \text{ км/с}$) и т.д.

1.4.7. Выявление аномалосоздающих объектов по геофизическим исследованиям скважин и полевым геофизическим съемкам. В результате геофизических исследований в скважинах (ГИС) и полевых геофизических съемок получают графики измеренных параметров (ИП): по одной оси откладываются величины ИП (в скважинах по горизонтали, на графиках полевого профилирования — по вертикали), на другой

оси — точки записи (ТЗ), за которые в скважинах принимаются глубины расположения измерительного прибора, а на графиках полевого профилирования — пикеты профиля. В качестве ИП могут быть: гравитационные (Δg_a), магнитные (ΔT_a , ΔZ_a), электрические (ρ_k), упругие (V_p , V_s), термические (T° , ΔT°), ядерные (J_γ , $J_{\gamma\gamma}$, $J_{n\gamma}$) и другие аномалии.

Аномалосоздающие объекты с отличающимися физическими свойствами располагаются, как правило, под экстремумами аномалий. Разрезы с горизонтальной слоистостью лучше изучать в вертикальных скважинах, а среды с вертикальной или наклонной слоистостью, даже перекрытые наносами, — с помощью наземного профилирования.

Интерпретация графиков изменения ИП в зависимости от положения ТЗ может быть качественной, т.е. сводиться к визуальному выделению аномалий в виде максимумов, положительных, очень высоких, высоких, повышенных, или минимумов, отрицательных, очень низких, низких, пониженных значений, или участков средних, нулевых значений. По резким градиентам на графиках ИП определяются контакты толщ, отдельных слоев, других геологических тел, а по экстремумам — чаще всего положения центра аномалосоздающих объектов.

Величина аномалий ИП пропорциональна относительным изменениям следующих геофизических свойств горных пород (см. 1.4.1): избыточной плотности ($\Delta\sigma$) в гравиразведке; интенсивности намагничивания ($J = \chi T_{cp}$) в магниторазведке; УЭС (ρ), величины естественных (ЕП) и вызванных (ВП) потенциалов и других параметров поля в электро-разведке; упругих параметров (V_p , V_s , E , δ) в сейсморазведке; теплопроводности (λ_T) в терморазведке, концентрации урана (eU) в радиометрии; длины пути (l_s) и времени (τ_s) замедления нейтронов и их поглощений (μ_n), а также коэффициентам поглощений гамма-лучей (μ_γ) в ядерной геофизике. Поэтому по соотношениям аномалий на графиках можно судить о соотношениях соответствующих свойств, что при комплексировании нескольких методов дает возможность выяснить литологию и оценить геолого-гидрогеологические свойства пород даже без количественных определений самих свойств (см. табл. 1.1, 1.2). В практике геофизических исследований используются методы количественной интерпретации, позволяющие с помощью ЭВМ по величинам ИП определить физические свойства и геометрические параметры объектов.

ГЛАВА 2

ГЛУБИННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМЛИ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

2.1. Методы глубинной геофизики и строение Земли по геофизическим данным

Глубинное строение Земли недоступно для непосредственных исследований и может быть изучено только геофизическими методами. Глубинная геофизика объединяет физические методы исследования Земли и ее геосфер, основанные на изучении различных физических полей на поверхности суши или океанов и морей и предназначенные для выявления в Земле физических неоднородностей. Вместе с физикой вещества при высоких давлениях и температурах она составляет физику Земли, т.е. науку, изучающую физические поля Земли, ее строение и свойства вещества недр.

Физика Земли как наука включает: сейсмологию, глубинную сейсморазведку, гравиметрию, магнитометрию, глубинную геоэлектрику, термометрию, радиометрию. Теоретической основой для изучения строения Земли служат механика и физика сплошных сред в приложении к горным породам и минеральным ассоциациям в условиях больших давлений и высоких температур. Интерпретируя материалы глубинной геофизики, удалось расчленить Землю на сферические оболочки, определить скачки физических свойств на них и изменения свойств по латерали, строить физические модели недр Земли, а по ним судить о химическом составе. Глубинная геофизика как раздел физики Земли является источником информации для глубинной геологии и геодинамики, а также геоэкологии (Геофизические методы исследования..., 1988).

2.1.1. Сейсмология, глубинная сейсморазведка и гравиметрия. Основным источником информации о строении Земли является сейсмология — наука о землетрясениях и глубинная сейсморазведка, основанная на изучении упругих волн от больших взрывов.

1. *Сейсмичность Земли.* Землетрясения связывают с деформациями вещества мантии, проявляющимися в виде быстрых его смещений по разрывам. Выделяющаяся при этом энергия проявляется в виде деформации вблизи очага, а также передается по всем направлениям в виде упругих волн. Землетрясение, возникающее в очаге (гипоцентре), располагающемся на глубинах 10—700 км, принято характеризовать следующими параметрами: сейсмическим моментом (M_0); смещением в гипоцентре (u) среды, обладающей упругим модулем сдвига (μ_c); площадью смещения (s) за время (τ); скачком сдвигового напряжения ($\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma_1$), где σ_0 и σ_1 — напряжения до и после сдвига; энергией, затрачиваемой на деформацию среды (V) и создание упругих колебаний (E). Все эти параметры связаны между собой следующими соотношениями, известными в теории сейсмичности Земли:

$$M_0 = \mu_c us, \quad V = \sigma_1 us, \quad E = \Delta\sigma M_0 / (2\mu_c). \quad (2.1)$$

Оценку мощности землетрясений принято проводить по относительным магнитудам (M). Они рассчитываются через амплитуды сейсмических волн ($a(\Delta)$), зарегистрированных сейсмографами на разных расстояниях (Δ) от эпицентра (проекция гипоцентра на земную поверхность) до сейсмоприемников, по формуле

$$M = \log [a(\Delta)/a_0(\Delta)]. \quad (2.2)$$

Здесь a_0 — стандартная амплитуда, соответствующая землетрясению, при котором на расстоянии $\Delta = 100$ км амплитуда сейсмической волны равна 1 мкм. Установлена эмпирическая связь между M и E : $\log E = 11,8 + 1,5M$. Например, магнитуды в 8, 7, 6 и 5 единиц соответствуют энергии упругих волн $6,3 \cdot 10^{16}$, $2,0 \cdot 10^{15}$, $6,3 \cdot 10^{13}$ и $2 \cdot 10^{12}$ Дж. Известная оценка балльности (B) землетрясений по 12-балльной шкале Рихтера связана с M следующим образом. Для самых слабых толчков, ощущаемых людьми, $M \approx 2$ (B около 3 баллов), повреждения зданий наблюдаются при $M \approx 5$ ($B \sim 6$), а разрушительные землетрясения характеризуются от $M > 6$ ($B > 7$) до $M = 8—10$ ($B = 10—12$).

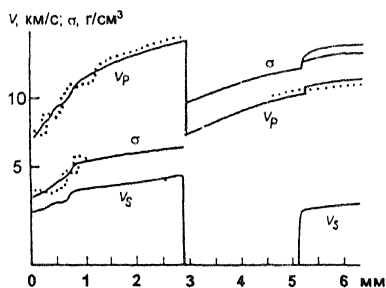
Сейсмическая активность на Земле различна и приурочена к зонам наиболее активных современных тектонических движений, областям альпийского орогенеза, расположенным вдоль средиземноморского и трансатлантического поясов, активным региональным разломам и др. Если места возможных землетрясений достаточно хорошо известны, то предсказание времени землетрясений остается нерешенной проблемой.

2. *Строение Земли по сейсмическим данным.* В результате анализа времен прихода, амплитуд и затуханий различных упругих волн (продольных и поперечных, объемных и поверхностных, отраженных, преломленных и рефрагированных), а также характеристик собственных колебаний Земли, созданных землетрясениями или большими взрывами, было установлено слоисто-концентрическое строение Земли.

Первая существенная граница в Земле, выделяемая по скачкообразному изменению скоростей продольных волн (V_p) от 7 км/с в кристаллическом фундаменте до 7,7—8,4 км/с в мантии, названа поверхностью Мохоровичича или границей Мохо. Эта поверхность принята за подошву земной коры, которая залегает на глубинах в среднем 35 км, приближаясь к поверхности до 6 км в океанах и опускаясь до 70 км в некоторых горных областях.

Второй резкий скачок скоростей V_p (от 15,7 км/с до 8 км/с), V_s (с 7,2 км/с почти до нуля) соответствует границе между мантией и ядром Земли на глубине 2900 км (см. рис. 2.1). Третий резкий скачок V_p (от 10 до 11 км/с), V_s (от нуля до 3,5 км/с) наблюдается на глубине 5100 км на поверхности твердого внутреннего ядра Земли. Ряд поверхностей раздела выделяют по зонам градиентов скоростей. В Земле по данным сейсмологии и глубинной сейсмо-разведки выделяется до семи концентрических оболочек. Твердая оболочка Земли, состоящая из земной коры и верхней мантии, залегающая до глубин 100—400 км, называется литосферой. Ниже (до глубин 1000 км) располагается мягкая полупластичная оболочка, называемая астеносферой. Литосферу и астеносферу иногда объединяют в периферическую оболочку Земли, называемую верхней мантией. В интервале 1000—2900 км располагается нижняя мантия, от 2900 до 5100 км — внешнее «жидкое», а глубже — внутреннее «твердое» ядро Земли.

Рис. 2.1. Графики изменения скоростей продольных (V_p), поперечных (V_s) упругих волн и плотности (σ) с глубиной (по В.А.Магницкому и М.С.Молоденскому)



Мощность земной коры, литосферы и скорости упругих волн в них изменяются по латерали, образуя зоны повышенных и пониженных скоростей. Мантия Земли (до 2900 км) также характеризуется латеральной неоднородностью: повышенными скоростями упругих волн под океаническими областями и пониженными под континентами.

3. *Плотностная неоднородность недр Земли по гравиметрическим и сейсмическим данным.* По данным спутниковой альтиметрии и полевой гравиметрии выявлена латеральная плотностная неоднородность литосферы до глубин около 100 км. Плотностная неоднородность Земли на больших глубинах определяется по сейсмическим данным. Для этого используются эмпирически установленные связи между V_p , V_s , с одной стороны, и плотностью, упругими модулями — с другой. За основу берется очевидное предположение о возрастании плотности с глубиной под действием гидростатического давления.

На рис. 2.1 представлена наиболее вероятная модель распределения плотности по радиусу Земли.

2.1.2. Геомагнетизм и геоэлектрика. Геомагнитные исследования служат для выделения неоднородностей по магнитным свойствам до глубин 50—100 км. Электропроводность Земли до глубин 500 км изучается глубинными магнитовариационными (ГМВЗ) и магнитотеллурическими (ГМТЗ) зондированиями. На рис. 2.2 приведены кривые изменения кажущихся сопротивлений с глубиной по данным интерпретации этих методов.

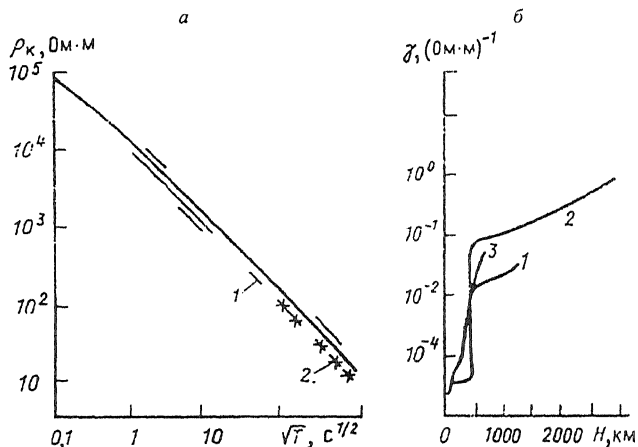


Рис. 2.2. Кривые изменения кажущегося сопротивления с глубиной (а) по данным интерпретации ГМВЗ (1), ГМТЗ (2) и изменение электропроводности Земли с глубиной (б) по данным геомагнитных вариаций (1), вековых вариаций (2) и ГМТЗ (3)

Региональные исследования методом ГМТЗ обнаруживают отклонения от приведенной кривой, характерной для платформенных областей. Их объясняют существованием слоя повышенной электропроводности в мантии на глубине 100—200 км. В целом с глубиной возрастает как электропроводность пород, так и температура недр. На глубинах

100—200 км градиент температуры уменьшается. Это можно объяснить минимумом теплопроводности и существованием здесь «тепло запирающего» слоя, препятствующего выходу тепла земных недр наружу. Наличие хорошо проводящих астеносферных (перегретых) слоев обнаружено в ряде районов Земли (в частности, в Байкальском регионе, на Сахалине и в Прикарпатье). Иногда они коррелируются с зонами понижения сейсмических скоростей, но смещены по глубине.

2.1.3. Структура и физическое состояние недр Земли. Исследование больших глубин Земли геофизическими методами дает возможность оценить изменения физических параметров температуры и химического состава с глубиной, а также изучать происходящие в недрах процессы.

Наибольшие изменения с глубиной скоростей сейсмических волн, упругих модулей, плотности и поля силы тяжести происходят вдоль радиуса Земли. Особенно они велики на границах мантии и внешнего ядра, внешнего и внутреннего ядра (рис. 2.1—2.3). Отклонения физических параметров по латерали, наблюдаемые в мантии, невелики (до 20%) по сравнению с их средними значениями, но они сложным образом распределены в объеме Земли. По сейсмологическим данным, внешнее ядро не пропускает поперечные волны, что говорит о его жидком фазовом состоянии. Кроме того, существование у Земли геомагнитного поля и его вековых вариаций указывает на возможность движения электропроводящего вещества в ядре, что также связано с его жидким состоянием и металлическими свойствами. Высокая плотность в дополнение к указанным фактам позволяет предположить, что основная масса вещества ядра Земли представлена железом, а верхняя часть является силикатной. Подобным же образом на два класса разделяются метеориты. Это служит основой при выборе модели изменения химического состава Земли с глубиной в предположении, что она образована из метеоритного вещества.

Силикатная часть Земли, слагающая мантию, предположительно представлена минералами, образующими породы типа перидотитов, состав которых близок к составу хондритов. Наличие в мантии Земли «границ» с резким возрастанием

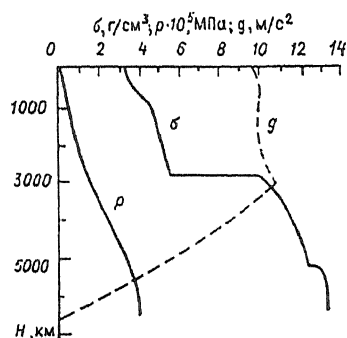


Рис. 2.3. Графики изменения давления p , плотности σ и ускорения свободного падения g в Земле с глубиной

скоростей упругих волн связывают с фазовыми переходами. Такие фазовые переходы с изменением плотности до 10% могут быть на глубинах 450 км (переход оливин — шпинель), 700 км (переход шпинель — перовскит). Наблюдается и ряд других переходов. Указанные глубины соответствуют адиабатическому распределению температур. Однако латеральная неоднородность Земли, выявляемая по сейсмическим данным, позволяет сделать вывод о механической неустойчивости такого распределения, что приводит к глубинным движениям вещества или конвекции. Из-за конвекции в Земле распределение температур имеет сложный характер, и поэтому границы фазовых переходов, или сейсмические границы, находятся на различных глубинах в разных регионах. Среднее распределение температур близко к адиабатическому, и только вблизи границ наблюдаются резкие градиенты. Области градиентов называются пограничными слоями.

На основании изложенных представлений в настоящее время делаются попытки обосновать движения вещества мантии Земли и выявить основные тектонические структуры, которые ими порождаются.

Разработка моделей конвекции в Земле и их согласование с наблюдаемыми геофизическими полями и тектоническими структурами находятся в самом начале. Сам эволюционный характер геологических процессов связан с деформациями периферической оболочки под воздействием движения вещества Земли на больших глубинах.

2.2. Строение недр под океанами

Предметом глубинных исследований в океанах являются литосфера и астеносфера, т.е. верхняя часть Земли мощностью в несколько сотен километров. Задачами этих исследований являются определение мощности и строения земной коры, литосферы (относительно жесткой и холодной оболочки Земли, в которой вещество полностью раскристаллизовано), а также астеносферы или части оболочки Земли (мантии), содержащей заметную долю расплавов.

Основную информацию о мощности земной коры и литосферы как на суше, так и в океанах дает сейсморазведка методами отраженных и преломленных волн (МОВ и МПВ), а также общей глубинной точки (МОГТ). Мощность земной коры в океанах значительно меньше, чем на суше, и изменяется от 5 до 10 км, а литосферы — от 10 км (в рифтовых зонах) до 120 км (в глубоководных впадинах). Поверхность Мохоровичича, или подошва земной коры, выделяется увеличением (скачком) скоростей упругих волн, а

поверхность астеносферы — уменьшением скоростей. Это объясняется сменой в литосфере литологии преимущественно кислых изверженных пород (гранитов) земной коры на преимущественно основные породы (базальты). Вещество в этих оболочках, т.е. на сравнительно небольших глубинах (до 120 км), находится в твердом, полностью раскристаллизованном состоянии. Астеносфера же содержит как расплавленную часть, сложенную легкоплавкими базальтами, так и кристаллическую часть, представленную ультраосновными породами.

В астеносфере, по данным терморазведки, наблюдаются повышенные градиенты температуры, а по данным электромагнитных зондирований, встречаются электропроводящие зоны. Эти материалы, наряду с другими геофизическими, геологическими и расчетными результатами, подтверждают наличие в астеносфере расплавов. Их присутствие и объемы отображаются изменением состава, температуры, возраста вещества в разных частях недр под океанами. На основании этого было установлено, что мощность литосферы океанов уменьшается более чем на порядок по сравнению с материками.

Наиболее полно геолого-геофизическое строение океанов представлено в работе Э.М.Литвинова «Введение в морскую геофизику» (1993), в соответствии с которой и дано описание строения дна океанов.

2.2.1. Структура дна Мирового океана. Батиметрическими (измерения глубин дна), геофизическими и геологическими методами в Мировом океане выделены три типа основных геоморфологических провинций (структур): срединно-океанические хребты, глубоководные океанические котловины и переходные зоны от океанов к материкам. В них меняются мощность и строение донных осадков, земной коры и литосферы.

Срединно-океанические хребты, расположенные в центре всех океанов и имеющие общую протяженность около 100 тыс. км (17% площади океанов), представляют собой подводные горы (валы) с пологими склонами. Они в каждом океане вытянуты на тысячи километров, имеют ширину десятки—первые сотни километров. В центре каждого хребта располагаются узкие ущелья (рифтовые долины), ограниченные по бокам гребневыми горами. Все подводные хребты разбиты поперечными трансформными разломами, расстояния между которыми составляют десятки километров.

Глубоководные океанические котловины, занимая более половины площади Мирового океана, отличаются выровненным горизонтальным рельефом и наличием локальных подводных гор.

Переходные зоны от океанов к материкам в тектонически активных зонах характеризуются вытянутыми параллельно материкам валами, котловинами, островными горными сооружениями, а рельеф дна отличается наибольшей для Земли контрастностью (до 15 км). В относительно тектонически пассивных переходных зонах наблюдается спокойный рельеф.

В целом рельеф дна океанов отражает глубинные процессы Земли, ее активную жизнь, проявляющуюся в структуре физических полей и их эволюции в истории Земли.

2.2.2. Аномальные геофизические поля в срединно-океанических хребтах. Срединно-океанические хребты характеризуются резкими аномалиями физических полей. Наиболее интенсивны и закономерно проявляются здесь аномалии полного геомагнитного поля Земли, которые характеризуются следующими особенностями:

— Вдоль хребтов располагается система параллельных знакопеременных магнитных аномалий, хорошо коррелирующихся по простиранию на тысячи километров и имеющих ширину в первые сотни километров.

— На оси всех рифтов наблюдаются максимальные положительные аномалии, соответствующие намагниченности пород современным магнитным полем. Симметрично по обе стороны идет чередование отрицательных и положительных аномалий, что объясняется разным направлением намагничивающих полей. Подобная структура аномалий связана с имевшими место в истории Земли регулярными (более 30 раз) инверсиями (сменой знака) главного магнитного поля. Продолжительность прямой и обратной намагниченности в разные периоды истории Земли менялась от 1 до 40 млн. лет с преобладанием полей современного знака. Инверсия полей всегда проходила быстро ($< 10^4$ лет).

— Пространственный период колебаний геомагнитных аномалий увеличивается от центрального максимума над гребнем массива к склонам срединно-океанических хребтов и по мере удаления от них.

— Одинаковая структура аномалий геомагнитного поля во всех океанах свидетельствует о единой инверсионно-спрединговой природе формирования магнитоактивного слоя. Объяснить этот факт можно раздвижением (спредингом) литосферных плит в разные стороны от рифтовой зоны и привнесом в образовавшиеся трещины расплавленного мантийного вещества. По мере остывания вещества ниже точки Кюри оно намагничивалось существовавшим геомагнитным полем, приобретая остаточную намагниченность. Новые более молодые порции мантийного вещества остывали при другом направлении

геомагнитного поля вследствие его инверсии, поэтому рядом расположенные толщи приобретают намагниченность противоположного знака. В результате дальнейшего раздвижения плит магнитоактивный слой земной коры будет проявляться чередованием геологических структур, намагниченных отрицательно и положительно.

Гравитационные аномалии над срединно-океаническими хребтами характеризуются положительными (+130 — +150 мГал) аномалиями силы тяжести в редукции Буге, увеличивающимися к периферии хребтов до +200 мГал. Трансформные разломы четко проявляются в виде гравитационных аномалий типа ступени.

Региональные максимумы температурных полей в донных отложениях океанов также приурочены к рифтовым зонам. Чем моложе возраст дна океана, тем выше тепловые потоки.

К трансформным разломам срединно-океанических хребтов приурочены малоглубинные землетрясения с гипоцентрами на глубинах до 10 км. Однако интенсивность этих землетрясений невелика (магнитуды не превышают 5,5).

По данным сейсморазведки, срединно-океанические хребты характеризуются небольшой мощностью земной коры (до 5 км) и ее вертикально-субвертикальной раздробленностью на блоки, поперечные размеры которых составляют 8—10 км.

2.2.3. Аномалии геофизических полей в глубоководных котловинах и переходных зонах от океана к континенту. Геофизические аномалии глубоководных котловин и переходных зон резко неоднородны по площади. Они лучше всего изучены гидромагнитными съемками.

Глубоководные впадины океанов характеризуются преимущественно линейными геомагнитными аномалиями, отражающими регулярное, т.е. закономерное, последовательное чередование положительных и отрицательных аномалий, параллельных рифтовым зонам. Это подтверждает инверсионно-спредингтовую природу аномальных геомагнитных полей. Чем дальше от оси рифта, тем глубже под осадками располагаются образовавшиеся в рифтах магнитоактивные слои, т.е. на периферии располагаются породы, образовавшиеся в стадии активного рифтогенеза, но сейчас находящиеся в стабилизированном платформенном режиме. По мере удаления от осей рифтов на расстояния до 3000 км регулярность геомагнитных аномалий начинает нарушаться за счет зон разломов, перпендикулярных простиранию аномалий, появляются зонально-полосовые, скрыто-полосовые, а еще дальше располагаются мозаичные магнитные аномалии.

В переходных зонах от океана к континенту структура аномального геомагнитного поля перестает быть закономерной (нелинейной или линейной) и характеризует природу контакта между океанической и континентальной земной корой: пассивное соприкосновение или активное пододвигание океанической коры под континентальную.

Гравитационные аномалии глубоководных котловин характеризуются плавными структурами полей и максимальными положительными (до +400 мГал) аномалиями силы тяжести в редукции Буге. Переходные зоны от океана к континентам выделяются неоднородными гравитационными полями, в виде полосовых аномалий больших градиентов, а также высокими положительными значениями аномалий Буге вдоль глубоководных желобов.

Геотермическое поле на огромных пространствах океана, вдалеке от срединно-океанических хребтов достаточно однородно и спокойно. Повышенные тепловые потоки наблюдаются лишь вблизи подводных вулканов, а пониженные — в глубоководных впадинах. Активные окраины океанов отличаются контрастными тепловыми полями.

Глубоководные котловины и внутренние части океанов, удаленные от океанических хребтов и берегов на сотни километров, являются асейсмичными, в их пределах землетрясения не наблюдались. Переходные зоны от океана к материкам, наоборот, характеризуются самой высокой сейсмичностью. При этом свыше 80% всех землетрясений сосредоточены в пределах так называемого Тихоокеанского кольцевого пояса, включающего островные дуги и глубоководные желоба в океане и горные хребты на суше. Здесь находится стык океанических и платформенных литосферных плит и наблюдаются большие упругие деформации среды. Когда предел прочности литосферы становится меньше накопившихся напряжений, происходят землетрясения с глубиной эпицентров от 30 до 700 км. Бальность землетрясений переходных зон выше, чем в рифтовых областях.

По данным сейсмических исследований (МПВ, МОВ), в глубоководных котловинах земная кора имеет мощность около 10 км. Кора состоит из трех толщ линзо-блокового и блоково-слоистого строения и характеризуется отсутствием непрерывных отражающих границ длиной более 10 км, т.е. для нее типична вертикальная и горизонтальная раздробленность на блоки, размеры которых меняются от 1 до 10 км. Верхняя из этих толщ мощностью в несколько километров сложена осадочно-вулканогенными породами. Вторая и третья толщи примерно одинаковой мощности представлены соответственно породами преимущественно базальтового и габбрового типа. Подстилающий их слой Мохоровичи-

ча (слой М) сложен субгоризонтальными и наклонными породами, разбитыми на субвертикальные блоки размером порядка 10 км.

Высокая степень геолого-геофизической изученности Мирового океана и выявленные структуроопределяющей роли срединно-океанических хребтов послужили основой для создания современной теории тектогенеза, сердцевинной которой является гипотеза тектоники литосферных плит.

2.3. Тектоника литосферных плит и дрейф континентов

2.3.1. Концепция тектоники литосферных плит. Согласно концепции тектоники литосферных плит на Земле выделяют 6 крупных и 6 мелких плит (Евразийская, Африканская, Индо-Австралийская, Американская и др.). Их структура отличается наличием в центре каждой континентальной плиты ядра жесткой литосферы с большой общей мощностью (до 120 км), в том числе мощной (35—75 км) земной корой. На границах плит развиваются конвекционные потоки вещества из мантии: в восходящих потоках формируются зоны растяжения (их называют дивергентными межплитовыми границами), а в нисходящих потоках образуются зоны сжатия (их называют конвергентными межплитовыми границами).

Дивергентные (конструктивные) границы совпадают с рифтами на континентах (например, Байкальский рифт) и срединно-океаническими хребтами Мирового океана. Здесь происходит раздвижение плит с формированием молодой земной коры. Через тонкую океаническую литосферу в срединно-океанических хребтах расплавы магмы из астеносферы поднимаются в океан. В результате океаническая литосфера раздвигается в крест простиранию хребтов и продвигается к литосферным плитам материков, т.е. происходит спрединг морского дна.

В переходных зонах от океана к материкам наблюдаются сложные геодинамические процессы, изменения структуры земной коры и поверхностных образований. Если такая зона совпадает с конвергентной (деструктивной) межплитовой границей, то она называется активной. В ней геодинамические процессы оказываются максимальными. Океаническая литосфера может пододвигаться под континентальную (зона субдукции). Здесь наблюдаются интенсивные полосовые гравимагнитные и тепловые аномалии разного знака и располагаются районы максимальной сейсмичности. Характерно наличие единой фокальной плоскости землетрясений (поверхности Заварицкого—Беньоффа), ко-

торая начинается в глубоководном желобе океана и уходит под континент под углом 60—70°. Малоглубинные землетрясения (гипоцентры до 10 км) зарождаются в этом желобе, а самые глубокие очаги (600—700 км) уходят под континенты.

В ряде переходных зон геодинамические процессы менее активны или даже пассивны. Пассивные переходные зоны характеризуются наличием сбросов, обрушивающих или опускающих континентальные блоки, что приводит к разрастанию океана. Физические поля здесь спокойные, наблюдается несколько полосовых аномалий, окаймляющих континент, сейсмичность более низкая.

В целом срединно-океанические хребты и зоны перехода от океана к материкам являются областями интенсивного тектогенеза. Их развитие во времени и пространстве (спрединг океанического дна) под действием глубинных конвекционных потоков меняет облик суши и океанов. Особенностью тектоники литосферных плит является то, что она объясняет историю развития океанов и материков в прошлом и позволяет делать прогноз развития на будущее.

2.3.2. Теория дрейфа континентов. Спрединговый механизм развития океанов явился убедительным подтверждением давно существовавшей красивой гипотезы о дрейфе континентов Земли. Сущность ее в том, что некогда существовавший единый материк с мощной земной корой раскололся на части. Эти части (будущие континенты) со скоростью 1—10 см/год дрейфовали в горизонтальном направлении, по-разному удаляясь друг от друга и поворачиваясь. В результате и получился современный облик суши и океанов Земли.

В течение сотен миллионов лет, наряду с горизонтальным движением, материки периодически претерпевали вертикальные колебательные движения: на месте геосинклинальных прогибов, заполнявшихся мощными толщами морских осадков, возникла суша, где накапливались континентальные отложения. Затем происходили мощные антиклинальные поднятия с процессами горообразования.

Гипотеза дрейфа континентов, благодаря концепции тектоники литосферных плит, а также палеонтологическим, палеоботаническим, палеогеографическим, палеомагнитным данным, находит подтверждение, становится одной из фундаментальных теорий наук о Земле, сочетающей гипотезы о горизонтальных и вертикальных движениях земной коры.

Г Л А В А 3

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СУШИ И АКВАТОРИЙ

3.1. Общая характеристика методов региональной геофизики

Целью региональной геофизики является решение задач структурно-геологического картирования, которое выполняется в виде сплошных (попланшетных) немасштабных и мелко- (масштаб меньше 1:500000), средне- (масштаб 1:100000 — 1:200000) и крупномасштабных (масштаб 1:50000 и крупнее) съемок суши и акваторий. В результате в комплексе с геологическим картированием определяются: литолого-петрографический состав и структурно-тектоническое строение осадочных горных пород, подстилающего их кристаллического фундамента и земной коры, т.е. осуществляется изучение объемного строения недр до глубин в несколько первых десятков километров с построением глубинных разрезов и карт-срезов по опорным геолого-геофизическим горизонтам на разной глубине. Данные геофизики используются для составления геологических, тектонических карт, которые необходимы для выявления месторождений нефти, газа, твердых полезных ископаемых, участков, благоприятных для промышленного, энергетического, сельскохозяйственного освоения и строительства. По мере накопления геолого-геофизической информации и уточнения геологического строения масштабы съемок укрупняются, осуществляется переход от профильных работ к площадным с более густой сетью геофизических наблюдений, привлечением геофизических методов повышенной точности и стоимости. Выполнение сплошного (попланшетного) структурно-геологического объемного картирования суши и акваторий, во-первых, без геофизики не проводится из-за высокой стоимости глубокого бурения и, во-вторых, является идеальной методологией и основой для эффективного ком-

плексного изучения недр. Однако из-за высокой стоимости сплошное картирование в настоящее время проводится лишь для перспективных на полезные ископаемые территорий. Поэтому геологическая изученность разных регионов отличается детальностью (масштабом) съемок.

Методы региональной геофизики подразделяются на глубинные исследования, региональные структурные (среднемасштабные) и картировочно-поисковые (крупномасштабные). Приведенные ниже геофизические комплексы исследований являются оптимальными для достаточно точного решения поставленных задач, а их выбор определяется природными условиями (Геофизические методы исследований, 1988; *Тархов А.Г. и др., 1982*).

3.2. Региональные глубинные геофизические исследования

На стыке между глубинной и региональной геофизикой иногда выделяют внесматштабные или мелкомасштабные региональные глубинные исследования. Они начинаются с изучения опорной сети геотраверсов протяженностью в тысячи километров, пересекающих ряд крупных геотектонических провинций. На геотраверсах выполняются комплексные геофизические исследования, включающие сейсморазведку, магнитотеллурические, реже другие электромагнитные зондирования, гравимагниторазведку, а также проводится опорное бурение глубоких скважин. В результате выясняется гипсометрическое положение и рельеф поверхности Мохоровичича (кровля мантии), выявляются границы раздела в земной коре, изучается положение кристаллического складчатого фундамента, картируются структуры в осадочном чехле, особенно благоприятные для нефтегазонакопления. Много новой информации дало бурение сверхглубоких скважин (Кольской, Уральской и др.) и комплексные геофизические исследования в них. Так, Кольская сверхглубокая скважина (глубина 12,5 км) и геофизические исследования в ней с помощью уникальной отечественной аппаратуры существенно изменили представление о строении района, предсказываемого ранее по данным полевых геофизических работ. Обнаружены крутая слоистость земной коры, наклонное залегание границ с разными степенями метаморфизма, уплотненная низкоскоростная зона в интервале глубин 4,5—9,5 км, не выявляемая полевой сейсморазведкой, дана новая трактовка сейсмических границ, которые связаны в большей степени с деформационно-метаморфическими процессами и меньше зависят от литологии.

Если глубинные геофизические исследования океанов решают фундаментальные проблемы геофизики и геологии, направленные на изучение Мирового океана и Земли, то региональные исследования, преимущественно шельфа океанов и морей, предназначены для изучения осадков и земной коры с целью структурно-геологического картирования и расчленения донных осадков с выходом на поиски подводных месторождений полезных ископаемых, в основном нефти и газа.

Основным методом решения этих задач является сейсморазведка. Она предназначена для изучения донных осадков, т.е. определения литологии, мощности отдельных толщ, слоев, их возраста (сейсмостратиграфические исследования), выявления структур как в осадках, так и в подстилающей земной коре. Особое внимание уделяют поиску тех структур, которые могут быть залежами нефти, газа или газогидратов (растворенных в воде современных осадков скоплений газа и органического вещества).

Оценка изменения мощностей и возраста толщ пород по профилям, перпендикулярным срединно-океаническим хребтам, проводится с помощью гидромагнитной съемки в комплексе с гравиметровыми, термическими наблюдениями, непрерывным сейсмоакустическим профилированием (НСП).

Достаточно перспективны для расчленения осадочных пород, хотя и мало практически используются электромагнитные зондирования на акваториях (ЭМЗ), такие как дипольные, осевые (ДОЗ), частотные (ЧЗ), становлением поля (ЗС), магнитотеллурические (МТЗ). Используя переменные электромагнитные поля разной частоты (от долей до десятков герц), можно расчленять породы по их электрическому сопротивлению и поляризуемости.

3.3. Региональные структурные среднемасштабные геофизические исследования

Региональные структурные среднемасштабные (1:200000 — 1:100000) исследования, включающие геологическое картирование, геофизические исследования и бурение, предназначены для тектонического районирования суши, выявления основных структур земной коры, разделения чехла и фундамента, изучения особенностей их строения, поисков структур в осадочных породах, особенно благоприятных для нефтегазонакопления.

Для изучения строения верхней десятикилометровой оболочки Земли обычно применяют комплекс геофизических методов: сначала ускоренных портативных, по менее информативных, а затем более трудоемких, но точных. Методы, относящиеся к первой группе, являются достаточно производительными и сравнительно дешевыми (аэрокосмические и полевые гравимагнитные). Их выполняют по сети наблюдений с расстояниями между профилями исследований, не превышающими 1 см в масштабе выдаваемой в результате съемки карты. Например, при масштабе съемки 1:100000 эти расстояния равны 1 км. Методы второй группы могут быть более сложными и дорогими (например, электромагнитные зондирования) с более редкой сетью (расстояния между центрами зондирований составляют несколько сантиметров в масштабе получаемых карт и разрезов). Однако опорную, но дорогую, информацию дает лишь сейсмо-разведка МОВ и МПВ.

3.3.1. Основные геоструктуры земной коры и выявление их региональными структурными геофизическими исследованиями. Основными геоструктурами земной коры, выявляемыми геофизическими методами, являются: глубинные разломы, структуры геосинклинальных и складчатых областей (геосинклинальные прогибы, антиклинальные поднятия, срединные массивы, межгорные впадины и др.), платформенные структуры (прогибы, впадины и поднятия и др.).

Глубинные разломы являются одним из основных элементов земной коры, определяющим иногда общий структурно-тектонический план крупных территорий. Разломы имеют ширину от 2—3 до 15—20 км, глубину заложения до ста километров, протяженность в сотни и тысячи километров. К ним приурочены очаги землетрясений, повышенные тепловые потоки, аномалии электропроводности, намагниченности, плотности, радиоактивности. В зоне разломов отмечаются: изменения положения границ осадочных пород и кристаллического фундамента; различия фациального, литологического состава пород; наличие магматических излияний; увеличение числа сбросов, надвигов, сдвигов; характерные геоморфологические признаки (линейные формы рельефа, впадины, изгибы русел рек и т.п.).

Зоны глубинных разломов картируются с использованием следующих геофизических методов:

— гравиразведки — по высоким градиентам силы тяжести, вытянутости аномалий, перепадам глубин до верхних кромок возмущающих масс в окружающих породах;

— магниторазведки — по высоким градиентам геомагнитного поля, линейной вытянутости аномалий разного знака, наличию цепочек аномалий, смене характера поля в крест зон разломов;

— сейсморазведки (методами преломленных, дифрагированных, рефрагированных и отраженных волн) — по уменьшению скоростей упругих волн, увеличению их поглощения, потере корреляции волн непосредственно в зоне разломов и по ступеням в положениях опорных сейсмических горизонтов в прилегающих блоках;

— электрических и электромагнитных зондирований — по искажению и смене типов кривых, наличию уступов в опорных горизонтах по сторонам от разломов;

— терморазведки — по повышенным тепловым потокам в зонах разломов;

— аэрокосмической инфракрасной и радиометрической съемок — по наличию линейно вытянутых систем (линеаментов).

Геосинклинальные области представляют собой сложные по строению, неоднородные по свойствам и мощностям блоки земной коры и мантии, разграниченные, как правило, глубинными разломами. Если в целом в геосинклинальных, горных областях глубины залегания мантии максимальны (до 70 км), а земная кора состоит из мощного осадочного чехла, «гранитного» и «базальтового» слоев, то в отдельных блоках состав и суммарная мощность земной коры могут резко меняться.

Выяснение общего структурного плана геосинклинальных областей, картирование их границ и основных структурных элементов (синклинальных прогибов, межгорных впадин, антиклинальных поднятий, срединных массивов и др.) проводятся следующими геофизическими методами:

— гравиразведкой — по отрицательным, реже положительным аномалиям Буге;

— магниторазведкой — по наличию намагнитченных вулканогенных пород, включенных в немагнитные осадочные;

— электромагнитными профилированиями — по аномалиям от круто залегающих пластов;

— электроразведками и сейсморазведкой — по изменениям геоэлектрических и сейсмогеологических разрезов.

Платформенные области приурочены к регионам, в пределах которых отсутствуют интенсивные проявления послепалеозойских этапов складчатости. Для них характерны достаточно выдержанная мощность земной коры (около 35 км), различная мощность оса-

дочного чехла, пологие формы складчатости, образующие своды, впадины, поднятия, прогибы и др. Изучение платформенных областей начинают с проведения аэромагнитной съемки и гравиразведки. Чем меньше мощность осадочного чехла, тем большее влияние на характер магнитных и гравитационных аномалий оказывают состав и строение кристаллического фундамента. Для картирования структур, определения глубины фундамента и мощности чехла осадочных пород основным методом является сейсморазведка (МПВ и МОВ). Сеть дорогостоящих сейсморазведочных работ можно сделать реже, если использовать электромагнитные зондирования: магнитотеллурические (МТЗ и МТП) при больших глубинах (> 1 км), вертикальные электрические (ВЭЗ) при малых глубинах (< 500 м), частотные (ЧЗ) или становлением поля (ЗС) (при глубинах 0,5—3 км).

3.3.2. Изучение строения и состава кристаллического фундамента и осадочного чехла. Кристаллический фундамент, располагающийся на глубинах от 0 до 15 км, а также перекрывающие его осадочные породы являются главным объектом изучения среднемасштабной региональной структурной геофизики, которая решает следующие задачи:

- изучение глубины залегания поверхности кристаллического фундамента;
- выяснение состава пород и строения фундамента;
- расчленение осадочного чехла и выявление структур в нем, особенно благоприятных для нефтегазоаккумуляции.

Изучение глубины залегания поверхности фундамента — одна из хорошо решаемых задач региональной структурной геофизики. Поверхность фундамента является сложной эрозионной границей различных по составу вулканогенных и метаморфических пород, часто разбитых на отдельные блоки. Она служит опорным геофизическим горизонтом, так как основные физические свойства (плотность, намагничённость, удельное электрическое сопротивление, скорости распространения упругих волн и др.) кристаллических пород фундамента существенно отличаются от свойств перекрывающих их рыхлых осадочных пород. Наименьшую погрешность в определении глубины залегания фундамента ($\pm 1\%$) даёт сейсморазведка, более высокую (до ± 10 — 20%) — электрические и электромагнитные зондирования и ещё большую (до $\pm 30\%$) — гравиметрические методы.

По региональным профилям, отстоящим друг от друга на расстоянии до 10 км, с использованием сейсморазведки (МПВ, МОВ, МОГТ) создают опорную сеть наблюдений с определением глубины залегания фундамента. Данные сейсморазведки, в свою очередь, опираются на ряд скважин, которые бурят в различных структурно-фациальных условиях. При глубине залегания фундамента до 2—3 км между профилями сейсмических работ целесообразно располагать профили электрических (ВЭЗ, ДЗ), а при большей глубине залегания — электромагнитных (МТЗ, ЗС) зондирований. Комплексирование сейсмо- и электроразведки снижает стоимость региональных исследований в 2—5 раз по сравнению со стоимостью непрерывного сейсмического профилирования в том же масштабе. Наименьшая стоимость работ по изучению глубины залегания фундамента достигается при аэромагнитной и гравиметрической съемках, опирающихся на опорные сейсмические профили и бурение.

Изучение состава пород и строения фундамента в геосинклинальных областях проводят преимущественно по данным гравитационных и магнитных съемок, а в платформенных — с помощью сейсморазведки МПВ. Объясняется это тем, что гравимагнитные аномалии связаны со значительными плотностными и магнитными неоднородностями пород фундамента, а с помощью МПВ определяют граничные скорости в нем. Однако основное назначение сейсморазведки — определение геометрии, а не свойств поверхности фундамента. Еще меньше информации о составе пород фундамента дает электроразведка.

Расчленение осадочного чехла, а также выявление структур в нем проводят методами электро-, грави- и, главным образом, сейсморазведки. Если рыхлые осадочные породы по физическим свойствам резко отличаются от пород фундамента, то у скальных (карбонатных и хемогенных) пород электрические сопротивления и скорости распространения упругих волн практически такие же, как у пород фундамента. Поэтому электрическими зондированиями (ВЭЗ, ДЗ) выявляют, как правило, только поверхность верхнего горизонта высокого сопротивления, приуроченного чаще всего к поверхности соленосных или карбонатных пород в осадочном чехле. С помощью электромагнитных зондирований (МТЗ, ЗС) удается проводить расчленение разреза и под высокоомными экранами. В ряде случаев, особенно при унаследованности структур фундамента структурами в осадочном чехле, последние четко выделяются гравиразведкой. Однако основным методом выявления и подготовки структур к поисковому бурению является

сейсморазведка методом общей глубинной точки (МОГТ), проводимая на заключительных этапах региональных исследований и на перспективных на нефть и газ площадях. Сеть наблюдений МОГТ сгущают до 1 км профиля на 1 км² изучаемой площади. Работы проводят с помощью современных цифровых сейсмических станций и систем наблюдений, обеспечивающих трехмерное изучение осадочного чехла, а также сложных приемов обработки материалов на ЭВМ, позволяющих увеличить глубину, разрешающую способность, а в целом точность разведки.

В результате комплексной интерпретации устанавливают корреляционные или даже аналитические связи между наблюдаемыми или расчетными параметрами для разных геолого-геофизических методов, что позволяет разредить сеть дорогой сейсморазведки. Далее строят региональные карты поверхности фундамента и основных (опорных) горизонтов осадочного чехла (глубинное, объемное картирование). На них выявляют и оконтуривают такие перспективные на нефть и газ структуры, как антиклинальные поднятия, брахиантиклинальные складки, валы, протяженные флексуры, локальные поднятия, рифогенные массивы, соляные купола и др. Важным результирующим материалом комплексных региональных геолого-разведочных работ являются сводные (нормальные), опорные, проходящие через опорные и параметрические скважины, и рядовые геолого-геофизические разрезы.

3.4. Картировочно-поисковые крупномасштабные геофизические исследования

3.4.1. Общая характеристика картировочно-поисковой геофизики. Особым разделом региональной геофизики являются крупномасштабные картировочно-поисковые геофизические исследования, направленные на поиски, в основном, твердых полезных ископаемых и изучение территорий, предназначенных под промышленное и гражданское строительство. Комплексное крупномасштабное геологическое картирование (масштабы 1:50000 — 1:25000) предназначено для изучения геологического строения верхних частей земной коры до 2 км и выяснения перспектив в отношении минерально-сырьевых ресурсов с помощью геологических съемок, аэрокосмических, геофизических, геохимических исследований, проходки горных выработок, скважин и геофизических исследований в них.

Если в горных районах с хорошей обнаженностью коренных пород визуальную геологическую съемку можно проводить без геофизических методов, то в районах, за-

крытых четвертичными и покровными отложениями, роль геофизических методов становится ведущей. Обычно в результате геологической съемки составляют карту поверхности коренных (дочетвертичных) отложений. Однако одной такой карты недостаточно для оценки перспективности района на те или иные полезные ископаемые и тем более для их поисков. Поэтому геологические съемки являются лишь частью глубинного, или объемного, картирования, обеспечивающего изучение района на разных глубинах и построение структурно-геологических карт по разным структурным этажам. Без данных геофизики такое картирование проводить практически невозможно.

Большинство твердых (рудных и нерудных) полезных ископаемых, представляющих интерес для промышленности, залегает на глубинах до 2 км. Такие глубины изучают определенным комплексом геофизических методов, опережающих или сопровождающих геологическую съемку и объединяемых в картировочно-поисковую геофизику. Подход к проведению картировочно-поисковых геофизических работ с целевым назначением — выявление месторождений твердых полезных ископаемых — должен быть системным. Он наиболее четко сформулирован В.В.Бродовым (1979) и включает следующие принципы, имеющие методологическое значение для любых площадных поисково-разведочных работ:

— последовательность укрупнения масштабов съемок от рекогносцировочных и региональных мелко- и среднемасштабных на больших территориях к сплошному планшетному крупномасштабному картированию, а затем к поискам и разведке полезных ископаемых на перспективных участках;

— постепенная смена менее точных высокопроизводительных (аэрокосмических) менее мобильными, но более детальными (полевыми), а затем «громоздкими» (скважинными и подземными) геофизическими методами;

— переход от глубинного исследования земной коры к изучению глубин до 5—10 км, от поисков к разведке на глубинах до 2 км;

— чередование геолого-геофизических методов, нацеленных на последовательное уточнение геофизической информации и углубление ее геологического истолкования;

— цикличность и повторяемость исследований одними и теми же методами, но с более точной аппаратурой и по сгущенной сети наблюдений, с переинтерпретацией материалов по более совершенным программам.

3.4.2. Природные условия проведения картировочно-поисковых работ. Набор и эффективность геофизических методов при картировочно-поисковых работах определяются природными геолого-геофизическими условиями, физическими свойствами пород, геологическим строением, характером и ценностью имеющихся полезных ископаемых и другими факторами. Удобную классификацию проведения геолого-геофизических картировочно-поисковых работ на суше по природным (геологическим и геофизическим) условиям предложил В.И.Красников. Он выделил три типа региональных геологических структур (Геофизические методы..., 1988).

Первый тип — открытые районы, поднятые и в разной степени эродированные древние щиты, древние и молодые складчатые области, характеризующиеся интенсивным проявлением магматизма и метаморфизма, крутым залеганием пород и рудных комплексов, отсутствием или наличием четвертичных отложений малой мощности. К ним можно отнести, например, Балтийский, Алданский, Анабарский и другие древние щиты, регионы палеозойской, мезозойской, кайнозойской складчатости (Урал, Казахстан, горные районы Средней Азии и Кавказа, Енисейскую, Байкальскую и другие складчатые области).

Второй тип — полузакрытые районы платформ, характеризующиеся отсутствием или слабым проявлением магматизма, наличием над складчатым основанием (фундаментом) полого залегающего чехла осадочных пород мощностью до 500 м. В районах этого типа породы залегают слабо наклонно и почти горизонтально, а месторождения твердых полезных ископаемых имеют пластовую или линзовидную форму и субгоризонтальную ориентировку. Примером таких районов служат окраины Русской и Сибирской платформ, Западно-Сибирской и Туранской плит и др.

К третьему типу относят закрытые районы платформ и геосинклинальных областей с мощностью осадочного чехла более 500 м. В районах этого типа породы чехла залегают практически горизонтально, фундамент дислоцирован. Развиты пластовые залежи полезных ископаемых, а также месторождения нефти и газа. Такими районами являются Русская платформа, Западно-Сибирская плита, предгорные котловины горных систем Кавказа, Средней Азии, Восточной Сибири и т.д.

3.4.3. Геофизические методы картирования разных региональных типов суши. Открытые районы изучают следующими методами: аэрокосмическими; аэрогеофизическими (одним методом, например, магниторазведкой, двумя — к магниторазведке

добавляют гамма-спектрометрию, тремя — к указанным двум добавляют электроразведку с измерением низкочастотных естественных полей или высокочастотных полей, четыремя — добавляют еще инфракрасную съемку); полевыми геофизическими (гамма-, эманионной и гравимагнитной съемками, электрическим и электромагнитным профилированием); геохимическими (металлометрической, литохимической, гидрохимической и биохимической съемками). Кроме того, выборочно на опорных профилях можно проводить электрические (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП), электромагнитные (МТЗ, ЧЗ, ЗС) и сейсмические (МПВ, МОВ) зондирования. Рациональный комплекс из 2—4 названных методов определяется физико-геологическими условиями.

В полузакрытых районах с мощностью четвертичных и покровных отложений до 500 м применяют аэрокосмические и полевые гравимагнитные съемки, а также проводят электрические, электромагнитные и сейсмические зондирования.

В районах закрытого типа с мощным чехлом осадочных пород используют полевые методы: грави-, магниторазведку, электромагнитные зондирования и сейсморазведку.

3.4.4. Особенности методики и интерпретации крупномасштабных картировочно-поисковых геофизических исследований. Крупномасштабные картировочно-поисковые геофизические исследования бывают, как правило, площадными с расстояниями между профилями, составляющими 1 см в масштабе результативных карт, например, в масштабах 1:50000 — 1:25000 в среднем они составляют 500—250 м. Как отмечалось выше, с точки зрения картировочных работ геофизические методы можно условно разделить на легкие (портативные) и громоздкие (сложные). При переходе от первых ко вторым уменьшается производительность, увеличиваются габариты и масса аппаратуры, возрастает информативность и точность количественной интерпретации. Кроме того, легкие геофизические методы чаще бывают опережающими, а громоздкие — сопровождающими геолого-разведочные работы.

Для портативных (легких) методов (аэрогеофизические, полевые гравимагнитные, радиометрические и электромагнитные профилирования) межпрофильные расстояния можно уменьшать, а для громоздких (электрические и электромагнитные зондирования, сейсморазведка) — увеличивать, а иногда проводить работы лишь на опорных (интерпретационных) профилях. Направления профилей выбирают в крест простиранию геологических структур и геофизических аномалий, выявленных предыдущими геолого-

геофизическими работами. Шаг наблюдений на профилях обычно близок к межпрофильному расстоянию (при электрических и сейсмических зондированиях) или в 2—10 раз меньше (для портативных методов и работ в движении, например, при аэро-, авто- и авиаториальных съемках).

В результате интерпретации карт графиков и карт тех или иных геофизических параметров строят разного рода геолого-геофизические разрезы, карты изогипс опорных геофизических горизонтов и фундамента, изоглубин перспективных или опорных толщ, петрофизических характеристик и др. При использовании данных геохимических и геологических съемок, картировочных скважин и каротажа в них строят геологические карты по кровле коренных пород и опорным литостратиграфическим горизонтам, уточненные геолого-геофизические разрезы с локальным прогнозом полезных ископаемых. Кроме того, дается «командная» информация на прекращение или продолжение исследований с указанием, где и какими методами вести специальные поиски.

Следует подчеркнуть целесообразность опережающего проведения геофизических работ с тем, чтобы геофизические аномалии можно было проверить геохимической и геологической съемкой, горными выработками и скважинами. Так как целью поисково-картировочных геофизических работ является оценка перспективности района на полезные ископаемые, особое внимание следует уделить геофизическим аномалиям «рудного типа» (экстремумам на гравимагнитных и гамма-эманационных картах, зонам минимумов сопротивлений, участкам «рудных пересечений» на графиках несимметричных электропрофилеирований, проводящим аномалиям индуктивных методов). Участки таких аномалий уже в ходе картировочно-поисковых работ необходимо, по возможности, обследовать основными методами рудной электроразведки: естественного поля (ЕП), вызванной поляризации (ВП), переходных процессов (МПП).

3.4.5. Изучение четвертичных и покровных образований геофизическими методами. Открытые, полузакрытые и закрытые районы могут иметь одно-, двух- и трехъярусное строение в зависимости от наличия четвертичного, покровного и вулканогенного комплекса пород. Каждый из этих комплексов, с одной стороны, представляет самостоятельный интерес и исследуется определенным набором геофизических методов, а с другой — имеет большое значение для изучения соседних, в основном подстилающих, комплексов и выбора для этого соответствующих геофизических методов.

Четвертичные (как правило, глинистые и песчано-обломочные) отложения характеризуются пониженными значениями плотности ($1,2—2,5 \text{ г/см}^3$) и скоростей распространения упругих волн (от 300 до 2000 м/с), изменчивой (более чем в 100 раз) и невысокой намагниченностью, широким интервалом изменения удельных электрических сопротивлений (от единиц омметров для глин до десятков — для песков и сотен — для гравийных отложений), различными значениями электрохимической активности, поляризуемости, диэлектрической проницаемости, слабой для песчаных и повышенной для глинистых пород радиоактивностью.

Литологические разности четвертичных отложений выделяют, в основном, методами электроразведки (электрическое и электромагнитное профилирование), магниторазведки, радиометрии, реже сейсморазведки. Для расчленения разреза по вертикали и определения мощности четвертичных отложений используют вертикальные электрические зондирования и опорную сейсморазведку МПВ, реже МОВ.

На графиках, картах, кривых зондирований глинистые и суглинистые породы выделяются минимумами кажущихся и эффективных сопротивлений, положительными естественными электрическими потенциалами, иногда локальными аномалиями повышенного магнитного поля, повышенными радиоактивностью и скоростями распространения упругих волн. Песчано-галечниковые породы отличаются повышенными и высокими сопротивлениями, отрицательными естественными потенциалами, отсутствием аномалий магнитного поля (за исключением железистых песков) и гамма-активности, пониженными скоростями упругих волн.

Покровные (т.е. коренные осадочные) отложения, особенно глинистые и песчано-гравийные, характеризуются теми же физическими свойствами и выделяются такими же аномалиями, как четвертичные. У скальных осадочных пород, по сравнению с рыхлыми, выше плотность, скорость распространения упругих волн, удельное электрическое сопротивление, ниже электрохимическая активность, намагниченность, радиоактивность.

Геофизические методы при изучении покровных осадочных отложений служат для решения следующих задач:

- определения общей мощности покровных отложений и глубины залегания коренных складчатых пород (кристаллического фундамента);
- литологического расчленения покровных образований по вертикали;

— выделения литологических разностей пород в плане, а также круто слоистых толщ;

— решения структурно-тектонических задач (определения падения, простираания пород, выделения складчатых структур и разрывных нарушений).

Решение первых двух задач осуществляется сейсморазведкой (МОВ, МПВ) и зондированиями: электрическими (ВЭЗ, ДЗ) при мощности покровных отложений до 500 м или электромагнитными (МТЗ, ЗС, реже ЧЗ) при больших мощностях, а также гравиразведкой. Для решения третьей и четвертой задач наибольшее применение находит электрическое профилирование на постоянном (при глубинности до 500 м) и на переменном (при глубинности до 200—300 м) токе. При больших глубинах используют гравитационную, магнитную, электро- и сейсморазведку.

3.4.6. Детальное изучение фундамента геофизическими методами. Вулканогенные породы, которые слагают фундамент, отличаются повышенными значениями плотности ($2,6—3,3 \text{ г/см}^3$) и намагниченности ($(10^2—10^5) \cdot 10^{-5}$ ед. СИ), увеличивающимися по мере того, как становится более основным состав пород; разной остаточной намагниченностью; высокими скоростями распространения упругих волн ($3—7 \text{ км/с}$); высокими значениями электрических сопротивлений ($10^3—10^5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$); слабой естественной и вызванной поляризуемостью; различной радиоактивностью (повышенной у кислых и пониженной у основных пород).

При крупномасштабном, т.е. детальном, изучении вулканогенных пород перед геофизическими методами ставят следующие задачи:

- выделение площадей распространения вулканогенных образований;
- расчленение вулканогенных толщ по составу и морфологии;
- определение границ, формы, строения отдельных вулканогенных тел.

Вулканогенные породы складчатого основания, как в условиях одно-, так и двух-, и трехъярусного строения изучают методами магнитной, гравиразведки, радиометрии, меньшее значение при этом имеют электропрофилирование и сейсморазведка. Работы по картированию вулканогенных пород начинают с комплексных двух- и трехметодных аэрогеофизических съемок с дальнейшим уточнением геологического строения с помощью полевых гравимагнитных и гамма-эманационных съемок. При малой мощности покровных отложений (единицы — первые десятки метров) можно использовать

высокочастотные методы электромагнитного профилирования: сверхдлинноволновое радиокомпарационное (СДВР) и дипольное электромагнитное (ДЭМП), а при повышенной мощности (десятки — первые сотни метров) — методы профилирования: низкочастотные: переменного естественного электрического или магнитного (ПЕЭП или ПЭМП) или на постоянном токе естественными (ЕП) или искусственными полями (ЭП). Выбор одного, а лучше двух-трех полевых методов определяется физическими свойствами пород и геолого-геофизическим строением района работ.

Для различных вулканогенных пород характерны следующие аномалии. Гранитоидные интрузии отличаются от основных и ультраосновных по составу минимумами аномалий гравитационного поля, кажущихся сопротивлений и скоростей распространения упругих волн, повышенными магнитными и радиоактивными аномалиями. Аномалии типа ступени наблюдаются над вытянутыми контактами разных пород, а кольцевые аномалии — над куполами и горстами, субвулканами, вулканическими аппаратами, трубками взрыва. Эффузивные породы в геофизических полях отображаются менее четко, чем интрузивные.

Метаморфические породы фундамента характеризуются большими интервалами изменения физических параметров. Например, плотность у них изменяется от 2,4 до 3,4 г/см³, возрастая с увеличением степени метаморфизма. Метаморфические породы могут быть как немагнитными, так и сильно магнитными, что определяется содержанием ферромагнитных минералов. Они различаются высокими значениями скоростей распространения упругих волн (4—7 км/с) и электрических сопротивлений (10^3 — 10^6 Ом·м), низкой естественной и вызванной поляризуемостью, слабой радиоактивностью.

При исследовании метаморфических толщ применяют практически те же геофизические методы, что и при изучении вулканогенных.

Характер геофизических аномалий над различными метаморфическими образованиями зависит от того, какие породы, как и в какой степени подвергались метаморфизму. Наиболее уверенно картируются границы между осадочными и метаморфическими породами. Границы вулканогенных и метаморфических пород выделяются хуже, так как физические свойства тех и других различаются мало. Окварцевание и серицитизация приводят к уменьшению значений гравитационного, магнитного, естественных электрического и радиоактивного полей, увеличению кажущихся электрических сопротивлений и скоростей распространения упругих волн. Пиритизация и графитизация ве-

дут к увеличению значения параметров гравитационного, магнитного полей и радиоактивности, к появлению интенсивных аномалий естественных и вызванных потенциалов, проводимости по данным электрического и электромагнитного профилирования.

3.4.7. Изучение разрывных нарушений. Особым объектом детальны́х картировочных геофизических исследований являются зоны разрывных нарушений. Они представляют собой сравнительно узкие и вытянутые участки с нарушенной сплошностью осадочных, изверженных и метаморфических пород. По зонам разрывных нарушений может происходить смещение контактирующих пород, а сами они характеризуются дроблением, разрушенностью, трещиноватостью. Благодаря этому по ослабленным участкам может происходить внедрение магматических расплавов и минерализованных растворов. В самой зоне дробления изменяются физические свойства пород: уменьшается плотность за счет повышения пористости; возрастает магнитная восприимчивость вследствие привноса ферромагнитных минералов (иногда, наоборот, она уменьшается); уменьшается скорость, увеличиваются затухание и дифракция упругих волн из-за раздробленности пород; уменьшается электрическое сопротивление либо из-за наличия рудных минералов, либо за счет присутствия глинистого материала и увлаженности пород; повышается содержание радона и других радиоактивных газов и т.п.

Таким образом, зоны разрывных нарушений характеризуются четкими структурными и физическими признаками. С помощью геофизических методов их детально изучают как при площадном картировании окружающей территории, так и самостоятельно. В обоих случаях вдоль профилей, перпендикулярных к предполагаемым направлениям разрывных нарушений, проводят сначала аэрогеофизическую, а затем с учетом геологического строения и физических свойств пород — наземную геофизическую съемку.

Разрывные нарушения выделяются вытянутыми линеаменами на аэрокосмических снимках или полосовыми, линейно вытянутыми, ступенчатообразными хорошо коррелирующимися по профилям аномалиями по данным ряда геофизических методов. Над ними наблюдаются слабые гравитационные и интенсивные магнитные аномалии или градиентные зоны для этих методов; зоны повышенной проводимости (при наличии раздробленных обводненных пород или рудной минерализации) и повышенного сопротивления (при окварцевании, ороговиковании пород) по данным электрического

и электромагнитного профилирования; резкая смена геоэлектрических и геосейсмических условий. В блоках пород, контактирующих по сбросам, по данным электрических, электромагнитных зондирований и сейсморазведки наблюдаются смещения по вертикали опорных горизонтов.

Для изучения динамики процессов в зонах нарушений, т.е. с целью мониторинга геодинамических процессов, напряженного состояния пород, техногенных воздействий, особенно в пределах городских агломераций и крупных промышленных или энергетических объектов, необходимы регулярные повторные измерения физических полей, желательно с помощью телеметрических систем наблюдений.

ГЛАВА 4

ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Поиски и разведка полезных ископаемых — важнейший прикладной раздел геофизики, называемый разведочной геофизикой. Основные ассигнования на геофизические исследования идут от нефтяных корпораций, для которых нефтяная геофизика дает большой экономический эффект. Меньше применяется геофизика при поисках и разведке рудных, нерудных и угольных месторождений. С каждым годом возрастают поиски и разведка полезных ископаемых (особенно нефти и газа) на акваториях.

4.1. Поисково-разведочные геофизические работы на нефть и газ

Месторождения нефти и газа располагаются среди осадочных пород на глубинах 1—6 км. Поиски и разведка их с помощью бурения скважин на таких глубинах стоят очень дорого, поэтому нефтяная геофизика, в которой основным методом является сейсморазведка МОВ, становится обязательной в этой отрасли энергетики. Сейсморазведка для разведки на таких сравнительно больших глубинах также стоит дорого. Однако это обходится в 3—10 раз дешевле и осуществляется во столько же раз быстрее, чем разведка месторождений бурением. Комплексирование сейсморазведки с другими геофизическими методами может дать еще больший геологический и экономический эффект. Следует отметить необходимость использования аэрокосмической информации и прежде всего данных инфракрасной и спектрометрической съемок. Кольцевые структуры, выделяемые с их помощью, иногда бывают приурочены к нефтегазоносным структурам.

При разведке месторождений нефти и газа широко применяют геофизические исследования в скважинах (ГИС). Они допускают проходку скважин с минимальным отбором керна, что сокращает время, стоимость и повышает информативность бурения.

Основными направлениями нефтегазовой геофизики являются поисковые работы, с помощью которых выявляются структурно-литологические ловушки, где могут находиться нефть и газ (а может быть и нет!), а также разведочные работы на выявленных ловушках, предназначенные для оценки параметров месторождений (залежей) и подготовки их к разведочному или промышленному бурению. Выявление местоположения структур-ловушек и определение их геометрии успешно осуществляются сейсморазведкой. Однако, как отмечалось выше, лишь около трети таких структур могут, как показывает практика, содержать нефть и газ. Поэтому прямые поиски нефти и газа — проблема более сложная, требующая привлечения высокоточной сейсморазведки и других геолого-геофизических методов. Большая роль в нефтяной геофизике принадлежит геофизическим исследованиям как разведочных скважин, так и скважин промышленных, когда эти исследования направлены на увеличение степени извлекаемости нефти и газа.

4.1.1. Поисковые геофизические работы на нефть и газ. Месторождение нефти и газа — это структурно-тектонический и литологический комплекс, в котором располагаются залежи, т.е. скопления нефти и газа. Залежи приурочены к ловушкам, сложенным пористыми, трещиноватыми породами (коллекторами) и ограниченными, по крайней мере, в кровле слабопроницаемыми породами-покрышками (экранами). Основными структурными ловушками являются:

— крупные (размером с десятки и сотни километров и амплитудой свыше 1% от глубины залегания) антиклинальные и сводовые поднятия;

— локальные поднятия небольших размеров (единицы и первые десятки километров в поперечнике и амплитудой менее 0,1% от глубины залегания);

— структурно-литологические (комбинированные) ловушки, связанные с погребенными рифами, соляными куполами и тектоническими нарушениями;

— неантиклинальные ловушки в терригенных отложениях (зоны выклинивания слоев, фациальных замещений, стратиграфических несогласий, эрозионно-аккумулятивных древних долин, дельт и т.п.).

В зависимости от природной обстановки эти структуры в разной степени отличаются по физическим свойствам от окружающих пород. Поэтому они могут выделяться по аномалиям тех или иных геофизических методов. Такие аномалии называют аномалиями типа залежей (АТЗ). Подтвержденная и оконтуренная по данным нескольких методов, в том числе обязательно сейсморазведкой и желательнo поисковым бурением, АТЗ становится нефтегазоперспективной структурой (НГПС). Если она расположена в нефтегазовой провинции, то на ней закладываются поисковые скважины. Однако, как отмечалось выше, лишь до трети подобных структур, выделенных геофизиками, содержат промышленные запасы нефти и газа. В связи с этим геофизические методы все еще остаются косвенными методами поисков и разведки нефти и газа.

Поиски НГПС проводятся в основном сейсморазведкой, подчиненное значение имеют электрические и электромагнитные зондирования, грави- и магниторазведка. Площадная, трехмерная (3-D) и объемная сейсморазведка МОВ обладает наибольшей разрешающей способностью, так как позволяет выделять поднятия по нескольким структурным горизонтам с амплитудой свыше 30—100 м, или с погрешностью менее 1% от глубины залегания. Электрические и электромагнитные зондирования применяют лишь при разведке крупных структур (с поперечным размером больше их глубины залегания и амплитудой не менее 10% от этой глубины). С помощью высокоточной гравиметрической съемки в случае унаследованных по всем структурным этажам структур положительными аномалиями могут выделяться антиклинали, имеющие амплитуду до 10—30% от глубины залегания. Однако при несовпадении структурных планов, сложном региональном фоне, плотностной неоднородности разреза в горизонтальном направлении результаты гравиразведки оказываются недостаточно определенными. Магниторазведка при поисках нефти и газа имеет вспомогательное значение.

Обычно поисковые работы на нефть и газ начинают с аэромагнитной и гравитационной съемок перспективных площадей в масштабе 1:50000 и крупнее. Над нефтегазоперспективными структурами в зависимости от их размеров, глубины залегания, знака и величины избыточной плотности аномалии Δg могут составлять от долей до первых десятков миллигал. Положительные и отрицательные аномалии на гравимагнитных картах, как и вообще перспективные участки с пологими формами складчатости, целесообразно проверять площадными электромагнитными зондированиями с расстояниями между точками наблюдения 0,5—1 км.

Сейсморазведка методом отраженных волн (МОВ) являлась ведущим методом поисков таких нефтегазоперспективных структур, как антиклинальные ловушки. Однако в настоящее время чаще приходится иметь дело с малоамплитудными (амплитуды поднятий меньше 0,01 от глубины залегания), комбинированными и неантиклинальными ловушками, встречающимися в районах развития промежуточного структурного этажа, солянокупольной тектоники, траппового магматизма, погребенных рифов, в зонах литологических и тектонических экранирований и т.п. В подобных условиях проводят сейсмопрофилирование методом общей глубинной точки (МОГТ). Поисковые сети наблюдений при работах МОГТ в масштабе 1:50000 и крупнее изменяются от 2 (4—6) км при выявлении структур до 0,2 (0,5—1) км при разведке наиболее перспективных участков с целью оконтуривания структур и подготовки к поисковому бурению.

Как известно, в МОГТ применяются системы наблюдений с многократным (до 20 раз и более) прослеживанием отраженных и других волн по одним и тем же профилям и всей изучаемой площади (трехмерная и объемная сейсморазведка). Это обеспечивает накопление информации, а в результате — повышение отношения сигнал/помеха, что способствует более четкому выделению полезных волн и построению временных разрезов. Для превращения временных разрезов в глубинные необходимо определение скоростей упругих волн с малой погрешностью (до 1). С этой целью желательно иметь структурные скважины и данные сейсмических наблюдений в них.

Автоматизированную обработку материалов проводят с помощью ЭВМ по программам с введением различных кинематических и динамических поправок. В результате строят временные или глубинные разрезы, структурные карты. На рис. 4.1 приведены результаты сейсморазведки МОГТ на одном из нефтяных месторождений Западной Сибири.

4.1.2. Разведка нефтяных и газовых месторождений. Нефтегазонасыщенные структуры, выявленные в ходе поисковых геолого-геофизических работ, становятся объектом детальной разведки. Целью ее является уточнение геометрии нефтегазоперспективных структур (положение кровли и подошвы продуктивных пластов); определение коллекторских свойств пород; выявление положения в залежах нефти и газа водонефтяного, газонептяного и газовойдяного контактов; подсчет запасов нефти и газа.

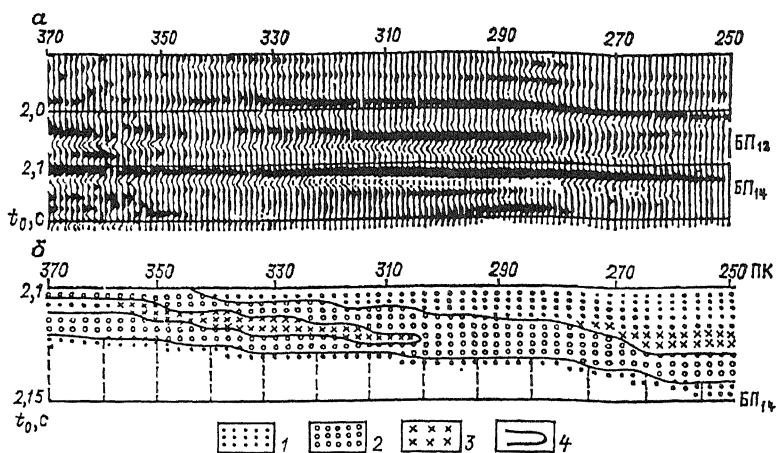


Рис. 4.1. Временной разрез МОГТ и результаты его обработки (Восточно-Тарасовское месторождение нефти — по Е.А.Галаган): *а* — участок временного разреза МОГТ, *б* — результат динамической обработки материала; 1 — глина, 2 — песчаник, 3 — песчано-глинистые отложения, 4 — границы песчаников продуктивного пласта

На стадии разведки нефти и газа применяют следующие геофизические методы: сейсморазведку (МОГТ) в трехмерном (3-D) площадном варианте (сейсмическая томография), когда по сотням расставленных на изучаемой площади сейсмоприемников улавливаются упругие волны, приходящие от расположенных в разных частях этой площади пунктов возбуждения. Проверка выявленных структур-ловушек осуществляется бурением параметрических и поисково-разведочных скважин и проведением в них геофизических исследований. Окончательные выводы по разведанным месторождениям делают на основе результатов комплексных геолого-геофизических исследований, выполненных как при разведке, так и в ходе предшествующих поисковых работ и обычно заканчивающихся построением сеймостратиграфических карт и разрезов.

Особенностями полевых и скважинных разведочных работ на нефть и газ являются:

— повышенная детальность сейсмических работ и плотность сети наблюдений на изучаемых площадях;

— применение сложных приемов обработки информации с помощью ЭВМ для изучения кинематических (времен прихода) и динамических (амплитуд и их затуханий) характеристик волн;

— тесная связь данных полевых сейсмических работ и геофизических исследований скважин (электрическими, сейсмоакустическими, ядерными);

— геохимические, гидрогеологические, гидродинамические, технологические опробования и испытания скважин, позволяющие совместно с ГИС и петрофизическим изучением ядра определять пространственные положения контактов газ — нефть — вода в разрезе скважин;

— тщательное использование всей геолого-геофизической информации для прогнозирования геологического разреза, четкого определения геометрии и контуров залежей, сейсмостратификации разрезов, изучения коллекторских свойств и нефтегазонасыщенности слоев для подсчета запасов и составления схемы разработки месторождения нефти и газа.

Большие перспективы открываются при внедрении автоматизированных систем управления процессом разведки, что возможно при тесной совместной работе геологов-нефтяников и геофизиков.

4.1.3. Прямые геофизические поиски нефти и газа. Косвенные геофизические поиски нефти и газа и, прежде всего, выявление ловушек являются необходимым, но недостаточным этапом разведки, поскольку только треть структур, выявленных геофизическими методами и проверенных поисково-разведочным бурением, оказываются промышленно нефтегазоносными. Поэтому важное значение имеет разработка способов прямых поисков (ПП) или оценка нефтегазоносности выявленных структур до вскрытия их скважинами. На разных этапах поисково-разведочных работ на нефть и газ с использованием самых совершенных техники, методики проведения и интерпретации результатов геофизических исследований при обязательном комплексировании сейсмо-, грави-, электро-, терморазведки, радиометрии и геохимических методов проблема прямых поисков, в принципе, может быть решена.

Основанием для возможности и осуществления прямых поисков является то, что физические свойства нефтегазонасыщенных залежей, а также подстилающих и перекрывающих их пород различаются между собой и отличаются от свойств пород аналогичных структурно-литологических этажей тех районов, где нефти и газа нет. Это объясняется тем, что присутствие углеводородов формирует следующие дополнительные физико-геологические неоднородности как в самой залежи, так и вокруг нее и особенно

над ней (вплоть до земной поверхности): разуплотнение пород; растворение некоторых минералов и окисление углеводородов, приводящее к возникновению вторичных минеральных образований в порах и трещинах, например, пирита и др.; изменение минерализации подземных вод; образование вокруг залежи субвертикальных зонально-кольцевых физико-химических и деформационных полей, а над залежью — «столбов» пород с измененными физико-химическими свойствами.

Установлено, что в нефтегазонасыщенных коллекторах, а иногда и в перекрывающих породах, уменьшается акустическая жесткость (σv) за счет снижения скорости (v) распространения продольных волн и уменьшения плотности (σ). В результате происходят отражения упругих волн от водонефтяного и газовойдяного контактов. Кроме того, наблюдается аномальное затухание (поглощение) упругих волн как в нефтеносных, так и в большей степени в газоносных породах, что ведет к появлению аномалий в волновом поле.

Над нефтегазовой залежью на фоне обычно наблюдаемого гравитационного максимума за счет антиклинальных структур и более высокой плотности подстилающих водоносных пород могут быть получены локальные минимумы поля силы тяжести малой амплитуды (0,05—1 мГал). Они обусловлены разуплотнением пород, вмещающих нефть и газ и перекрывающих их, из-за наличия углеводородов и повышения пористости, разрушенности пород в сводах антиклиналей. Вследствие немагнитности нефтегазонасыщенных пород они иногда выделяются отрицательными локальными магнитными аномалиями с амплитудой от единиц до сотен нанотесла.

Достаточно эффективными методами для прямых поисков нефти и газа иногда оказываются электрические и электромагнитные зондирования (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП, ЗСБ) в комплексе с сейсморазведкой. Обусловлено это тем, что нефтегазонасыщенные коллекторы выделяются повышенными по сравнению с окружающими породами удельными электрическими сопротивлениями. Это объясняется рядом факторов. Во-первых, более высоким сопротивлением самих нефтегазоносных пластов за счет наличия непроводящих ток нефти и газа в породах высокой пористости. Во-вторых, более низкой минерализацией подземных вод (в контуре нефтеносности) и их специфическим химическим составом. В-третьих, уплотнением пород за счет высокого пластового давления, а также карбонатизации пород. Возможны и другие причины, увеличивающие, а иногда уменьшающие удельное электрическое сопротивление продуктивной толщи.

При комплексировании электромагнитных зондирований с сейсморазведкой и бурением совместную интерпретацию проводят следующим образом. В результате интерпретации кривых зондирований с высокой точностью получают лишь параметры эквивалентности нефтегазоносной толщи. В зависимости от типа разреза это могут быть продольная проводимость (S), поперечное сопротивление (T) или мощность толщи (h). По данным сейсморазведки или бурения определяется более точно h , поэтому для той же толщи можно получить величину ее сопротивления ($\rho = h / S$, или $\rho = T / h$), которая является диагностическим признаком нефтегазоносности.

На некоторых нефтяных и газовых месторождениях в контуре нефтеносности и над залежью параметры поляризуемости становятся несколько выше, чем вокруг залежи. Это обусловлено наличием вкрапленности мелкокристаллического пирита и других продуктов окисления, образующихся за счет миграции и окисления углеводородов залежи. Поэтому при площадных наблюдениях методом вызванных потенциалов на постоянном токе (ВЭЗ-ВП) и частотно меняющемся поле (ЧЗ-ВП) по аномально высоким значениям параметров ВП можно оконтурить залежь. К сожалению, небольшие аномалии ВП могут получаться над бывшим месторождением, из которого нефть и газ мигрировали или выработаны.

Над многими нефтяными и газовыми месторождениями наблюдаются радиометрические и геохимические аномалии: минимумы гамма- и бета-активности, уменьшение содержания сорбированного урана, хрома, никеля и других тяжелых элементов. Причиной этого является поглощение их потоком углеводородов, распространяющихся от залежи. На некоторых месторождениях нефти и газа за счет конвекционного перемещения флюидов и газов наблюдаются положительные аномалии температуры (1—2 °С) при измерении в неглубоких (1—2 м) шпурах на земной поверхности.

В целом поиски и разведка нефти и газа методами нефтяной геофизики являются сложным, перспективным, дорогим направлением геофизики, требующим выбора для каждого района своих комплексов геолого-геофизических методов и совместной интерпретации данных с помощью ЭВМ.

Даже на эксплуатируемых месторождениях нефти и газа, например, с помощью так называемой четырехмерной (4-D) сейсморазведки, когда площадные наблюдения по осям x , y , z проводятся периодически через разное число месяцев (t), можно осуществлять мониторинг, т.е. изучать изменения физических условий месторождения, происходящие в ходе отработки нефти и газа.

4.1.4. Сейсмические методы поисков и разведки нефти и газа под дном акваторий. Поиски и разведка подводных месторождений нефти и газа на акваториях океанов и морей являются крайне важными, так как почти треть нефти и газа добывается на акваториях. Они сводятся прежде всего к выявлению литолого-стратиграфических и структурных ловушек, где могут быть залежи нефти, газа или современных газогидратов.

Основным методом изучения донных осадков как на поисковом этапе, так и в ходе разведки и обустройства скважин на акваториях является непрерывное сейсмическое профилирование (НСП), представляющее собой одноканальный вариант метода отраженных волн (МОВ). Метод НСП по технике проведения наблюдений близок к эхолотированию или ультразвуковой локации, но благодаря использованию более низких частот позволяет получать отраженные сигналы от многих контактов поддонных слоев с контрастными акустическими жесткостями. На автоматически получаемых временных разрезах для каждой точки определяется нулевое время: $t_0 = 2H / v_{cp}$, где H — эхолубина залегания отражающего контакта, а v_{cp} — средняя скорость в толще горных пород мощностью H . Чтобы определить глубину отражающей границы, необходимо получить v_{cp} . Для этого используется многоканальная сейсморазведка МОВ или МОГТ. Последний метод оказывается крайне необходимым для выявления полезных отраженных волн на фоне многократно отраженных, которые особенно интенсивны при работах на акваториях.

Методика и глубинность исследований этими методами различаются. Так, НСП служит для изучения верхней части осадочного чехла глубиной до 1,5 км при больших скоростях движения судна по одному проходу галса (профиля). МОГТ позволяет детально изучать разрез глубиной в несколько километров, но при многократных проходах судна по одному галсу. Получаемые в результате НСП и МОГТ временные и глубинные сейсмогеологические разрезы позволяют выявлять отражающие контакты, картировать структуры и сеймостратиграфические комплексы, которые могут быть потенциально нефтегазоносными. Разведка перспективных участков проводится детальными площадными работами МОГТ (трехмерной сейсморазведкой (3-D) или томографической сейсморазведкой). При ее выполнении сотни донных сейсмоприемников устанавливаются на изучаемой площади и подключаются либо проводами, либо с помощью радиобуев к многоканальной цифровой сейсмической станции на измерительном корабле. С помощью второго корабля, несущего невзрывные источники упру-

гих волн, производится их возбуждение во множестве точек. В результате недра как бы «подсвечиваются» со всех сторон и получается их объемная «голографическая картина» в поле упругих волн. Обработка информации производится на измерительном корабле с помощью мощных ЭВМ. Такая морская сейсморазведка оказывается высокоточной и экономически выгодной, несмотря на высокую стоимость техники и проведения работ на акваториях. Окончательная разведка месторождений, за которой часто следует добыча нефти и газа, ведется с помощью морских (океанических) скважин и комплексных геофизических исследований в них.

4.2. Поиски и разведка рудных месторождений

К рудным полезным ископаемым относят различные типы минерального сырья, из которого технологически возможно и экономически целесообразно извлекать в промышленных масштабах металлы или получать на их основе другие материалы, используемые в народном хозяйстве. Геофизические методы при поисках и разведке месторождений рудных полезных ископаемых (рудная геофизика) применяются на всех стадиях геологоразведочных работ — от региональных исследований до обслуживания рудничной геологии во время эксплуатации месторождений.

4.2.1. Региональные и геолого-съёмочные работы на рудные полезные ископаемые. Поиски рудных ископаемых начинаются с постановки или анализа данных уже имеющихся среднемасштабных (1:200000) геофизических съёмок (см. 3.3), а иногда с их целевой переинтерпретации. В результате аэрокосмических съёмок в видимом и инфракрасном диапазонах частот, аэромагнитных и аэрогамма-спектрометрических, полевых гравимагнитных, электромагнитных или сейсмических исследований устанавливают основные закономерности в распределении месторождений полезных ископаемых, связи между положением рудных поясов, полей и месторождений, рудовмещающих и рудоконтролирующих структур с глубинным строением земной коры.

Картировочно-поисковые крупномасштабные (1:50000) геофизические исследования перечисленными выше методами обеспечивают уточнение и выделение перспективных на поиск полезных ископаемых площадей (см. 3.4).

4.2.2. Поисково-разведочные геофизические работы на рудные полезные ископаемые (рудная геофизика). Поисково-разведочные работы на рудных месторождениях начинаются с поисков в первую очередь крупных или средних рудопроявлений, приуроченных к рудоконтролирующим структурам. Из числа наземных геофизических методов для решения поисковых и особенно разведочных задач выбирают наиболее эффективные, но, как правило, трудоемкие методы: профилирование и зондирование ВП или детализированные работы индуктивными методами с использованием широкого спектра частот: низкочастотными (НЧМ) или переходных процессов (МПП); высокоточную гравиразведку; иногда сейсморазведку методом преломленных волн (МПВ).

В результате количественной интерпретации геофизических данных оценивают геометрические и физические параметры разведываемых объектов. Далее строят физико-геологические модели (ФГМ) исследуемого объекта, которые используются для интерпретации наблюдаемых аномалий в рамках этих ФГМ. Затем выявленные аномалии разбуривают контрольными разведочными скважинами, что необходимо не только для проверки достоверности полученной геофизической информации и уточнения методики дальнейших наземных работ, но и для проведения исследований методами скважинной геофизики, оценки запасов полезных ископаемых.

Геофизические исследования в этих скважинах, позволяющие с достаточной степенью детальности расчленить геологический разрез и выявить рудные интервалы, проводят с использованием электрических, ядерных, магнитных, реже сейсмоакустических методов.

4.2.3. Детальная геофизическая разведка рудных месторождений. Если по данным поисково-оценочных работ и предварительной разведки прогнозные запасы полезного ископаемого на выявленном месторождении достаточны, а предполагаемые горнотехнические условия его добычи благоприятны, то разрабатывают технико-экономическое обоснование (ТЭО) на детальную разведку месторождений.

Целью детальной разведки является изучение особенностей морфологии и внутреннего строения отдельных рудных тел, что необходимо для подсчета запасов, оценки горнотехнических и гидрогеологических условий проведения эксплуатационных работ. Детальную разведку осуществляют главным образом с помощью скважин и горных выработок. Из геофизических методов на этом этапе применяют исследования

скважин и геоэлектрохимические и подземные методы. В результате геологи и геофизики составляют геолого-геофизическую документацию в масштабе 1:5000, 1:2000, 1:1000 для подсчета запасов и представления материалов в Государственную комиссию по запасам полезных ископаемых.

При доразведке и эксплуатационной разведке месторождений, сопровождающейся проходкой вертикальных и горизонтальных подземных горных выработок, а также в ходе непосредственной эксплуатации месторождений иногда применяют комплекс методов шахтно-рудничной геофизики (методы радиоволнового и сейсмоакустического просвечивания или ядерно-физические методы).

4.2.4. Поиски и разведка черных металлов. При поисках и разведке черных металлов используют комплекс геофизических методов, среди которых основными являются методы магнито- и гравиразведки, а методы электро- и сейсморазведки носят вспомогательный характер. Месторождения черных металлов по условиям образования весьма разнообразны, а слагающие их руды обладают различными физическими свойствами. Например, магнетитовые рудные тела характеризуются высокими значениями магнитной восприимчивости, плотности и электропроводности. Поэтому прежде всего для их поисков и разведки следует применять магниторазведку. Эффективному применению гравиразведки способствует большая плотность железных руд ($3,2—4,7 \text{ г/см}^3$) по сравнению с рудовмещающими породами ($2,6—3 \text{ г/см}^3$). Значение методов электроразведки существенно повышается при поисках слабомагнитных буро-железистых месторождений в осадочных породах и коре выветривания. Сейсморазведку при поисках и разведке черных металлов применяют, в основном, для изучения рельефа поверхности кристаллического фундамента и определения мощности покровных отложений над рудными залежами.

В качестве примера рассмотрим результаты применения магнито- и электроразведки на контактно-метасоматическом месторождении в Горной Шории (рис. 4.2). Рудные тела столбообразной формы, содержащие магнетит, приурочены здесь к сланцевой толще, прорванной мелкими штоками порфиринов и сиенитов. На одном из профилей наблюдений рудное тело уверенно фиксируется повышенными значениями вертикальной составляющей аномального магнитного поля, кажущейся поляризуемости (ВП) и пониженными значениями кажущегося сопротивления (КС).

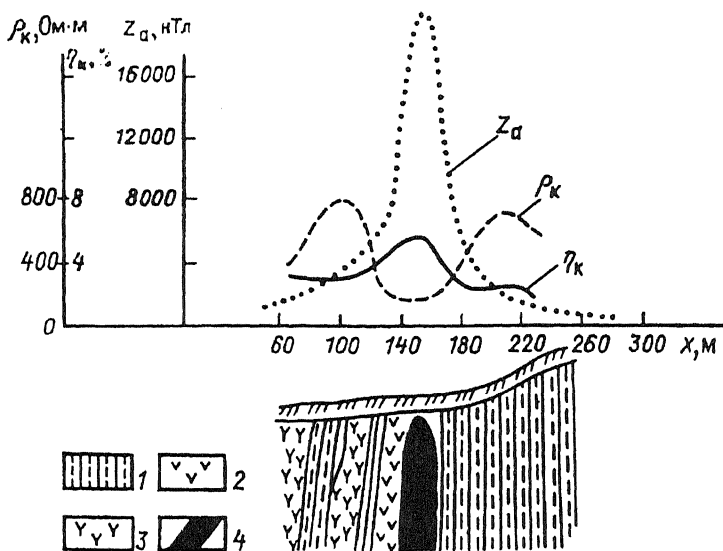


Рис. 4.2. Графики Z_{α} , η_{κ} и ρ_{κ} на железорудном месторождении (по А.З.Горину): 1 — сланцевая толща, 2 — порфириты, 3 — сиениты, 4 — магнетитовая руда

4.2.5. Поиски и разведка цветных и редких металлов. Поиски месторождений цветных и особенно редких металлов затруднены тем, что объекты исследований содержат малые концентрации полезных элементов с очень неравномерным их распределением в горных породах, отличаются небольшими по сравнению с глубиной залегания размерами рудных тел. Поэтому они слабо проявляются в физических полях на дневной поверхности. Однако применение геофизических методов значительно повышает эффективность поисково-разведочных работ на цветные и редкие металлы, позволяя вести разведку целенаправленно на заведомо перспективных площадях и на «слепых» месторождениях. В каждом конкретном случае, исходя из геологических условий, выбирают тот или иной комплекс методов. Как правило, геофизические методы дают не прямые, а косвенные указания на наличие месторождений, выявляя участки, наиболее благоприятные для залегания руд, в том числе на флангах известных месторождений. Поэтому в комплексе с геофизическими в качестве прямых поисковых применяют геохимические методы, чаще всего металлотрическую съемку.

Для поисков цветных металлов, как правило полиметаллических руд, используются электромагнитные профилирования естественными и вызванными потенциалами (ЕП, ВП) и индуктивные методы: низкочастотные (НЧМ) или переходных процессов (МПП). Детальная разведка проводится методами ВЭЗ-ВП, МПП, геоэлектрохимическими методами с использованием скважин.

При поисках и разведке месторождений радиоактивного сырья, разнообразных по генетическим признакам и условиям залегания, основными поисковыми методами являются ядерно-геофизические. При этом измеряется естественная радиоактивность горных пород и руд (пешеходная, автомобильная и аэрогамма-съемки, эманационная съемка, гамма-картаж) (см. рис. 4.3).

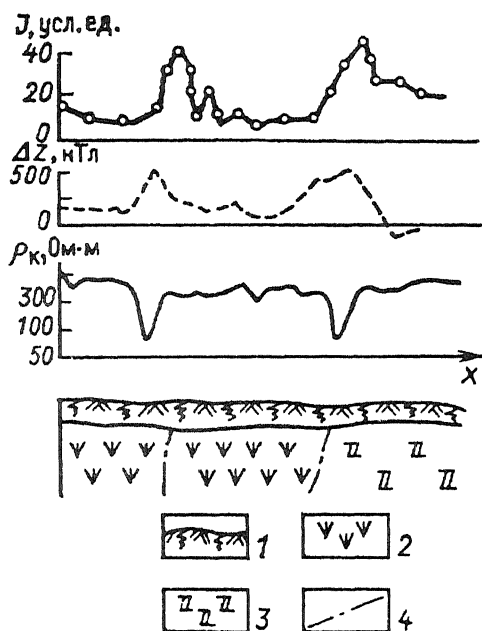


Рис. 4.3. Графики J , ΔZ и ρ_k над ураноносными тектоническими зонами дробления в эффузивах: 1 — элювий-делювий, 2 — трахилипариты, 3 — трахидациты и их туфы, 4 — разрывные нарушения

Полезные ископаемые россыпных месторождений благородных металлов (золото, платина и др.) содержатся в рудах в ничтожных концентрациях, и их присутствие практически не изменяет физические свойства рудных залежей по сравнению с аналогич-

ными безрудными участками. Поэтому геофизические методы при их поисках и разведке решают задачи геолого-геоморфологического картирования, по результатам которого изучают особенности современного и погребенного (древнего) рельефа, определяют характер формирования россыпей и возможное положение их в современных и древних долинах.

4.3. Поиски нерудных месторождений полезных ископаемых и угля

4.3.1. Общая характеристика нерудных и твердых горючих полезных ископаемых. К нерудным (неметаллическим) полезным ископаемым относятся свыше 200 минералов и горных пород, которые могут служить сырьем: индустриальным (алмаз, пьезокварц, слюда, корунд, графит, барит, флюорит, боксит и др.); химическим и агрохимическим (соли натрия, калия, апатит, фосфорит и др.); строительным минеральным, в том числе керамическим (глина, полевой шпат, кварцевый песок и др.), огнеупорным (магнезит, песчаники, кварциты и др.) и строительным (известняк, песок, гравий, изверженные и метаморфические породы и др.).

Объемы и стоимость разработки нерудных полезных ископаемых больше, чем рудных, а удельные затраты на геофизические методы среди других геологоразведочных работ меньше. Объективно не способствуют развитию нерудной геофизики сравнительно небольшие глубины залегания продуктивных толщ и слабое отличие их по физическим свойствам от вмещающих пород. Вместе с тем рациональный комплекс из нескольких (двух-четырех) геофизических методов может, как показывает практика нерудной геофизики, более чем на треть сократить расходы на разведку этих полезных ископаемых с помощью буровых скважин только бурением скважин при повышении качества геологических результатов и сокращении сроков на изыскания.

Основными задачами нерудной геофизики являются: выявление особенностей геологического строения, установление прогнозно-поисковых признаков, выделение перспективных площадей и, наконец, поиски и разведка сырья. Решение первых трех задач можно проводить в ходе целенаправленной переинтерпретации материалов крупномасштабных картировочных работ с применением геофизических методов (см. 3.4). На перспективных площадях следует применять более детальные комплексные поиско-

во-разведочные геолого-геофизические исследования в масштабах 1:25000 — 1:2000.

Площадная сеть геофизических наблюдений изменяется от 250×100 до 20×10 м.

Выбор того или иного комплекса методов геофизики определяется контрастностью физических свойств объектов исследований и вмещающих пород и их геометрией, т.е. начинается с формирования физико-геологической модели (ФГМ) объекта. Простейшими ФГМ в нерудной геофизике являются горизонтально-, полого- и крутослойные тонкие (мощностью меньше глубины залегания верхней кромки) и толстые (мощностью больше глубины залегания) пласты конечного и бесконечного простирания, столбообразные, изометрические и другие объекты с петрофизическими характеристиками, отличающимися от вмещающей среды. ФГМ используются для математического моделирования прямых и обратных задач, необходимого для интерпретации полевых материалов. В ходе поисково-разведочных работ ФГМ уточняют, а в результате проверки горно-геологическими работами получают точные сведения о положении и запасах выявляемого сырья или материалов.

Определенное сходство по количеству разрабатываемого сырья, морфологическим особенностям и физическим параметрам залежи наблюдается между нерудными и твердыми горючими ископаемыми (уголь, горючие сланцы, торф). Хотя методы угольной геофизики развиваются относительно самостоятельно, общность методических принципов, особенно при наземных работах, позволяет пока объединить их в один раздел разведочной геофизики — нерудную и угольную.

4.3.2. Индустриальное сырье и его геофизические поиски. Алмаз является одним из ценных видов индустриального сырья. Коренные месторождения алмазов приурочены к кимберлитам, а вторичные осадочные (россыпные) располагаются в углублениях палеозойских пород и речных долинах. Кимберлитовые, вертикально залегающие, столбообразные тела диаметром от 10 до 700—800 м, уходящие на большую глубину, сложены ультраосновной брекчированной породой с многочисленными включениями ксенолитов (обломков окружающих пород и фундамента). Физико-геологической моделью для кимберлитовых трубок служит вертикальный цилиндр (столб) бесконечного простирания с отличающимися от вмещающей среды плотностью, магнитной восприимчивостью, удельным электрическим сопротивлением. Сами же алмазы, занимая малый объем в кимберлите, не могут служить объектом геофизических поисков.

Ведущими методами поисково-разведочных работ на кимберлитовые трубки являются аэромагниторазведка и наземная магнитная съемка. Однако узкими локальными аномалиями на графиках магнитной съемки выделяются не только кимберлитовые трубки, но и многочисленные дайки пород основного состава, траппов и т.п. Поэтому для разбраковки полученных магнитных аномалий применяют гравиразведку, электрическое и электромагнитное профилирование (ЭП, ДЭМП, СДВР).

Россыпные месторождения алмаза изучают так же, как и подобные месторождения металлов, с помощью геофизических методов (ВЭЗ, электропрофилирование, сейсморазведка МПВ). Они служат для выявления углублений в фундаменте, которые могут быть ловушками для алмазов.

Пьезоэлектрическое минеральное сырье (пьезокварц, оптический флюорит), слюды, а также некоторые редкие и благородные металлы (вольфрам, молибден, золото и др.), приуроченные к кварцевым и пегматитовым жилам, изучаются геофизическими методами реже. В целом кварцевые жилы отличаются от вмещающих интрузивных, а иногда осадочных пород низкими величинами магнитной восприимчивости и гамма-активности, повышенными (для плотных, ненарушенных) или пониженными (у разрушенных, трещиноватых жил с глинистым заполнителем) сопротивлением и плотностью, повышенной теплопроводностью, а главное — очень высокими (в 10—100 раз больше, чем во вмещающих породах) пьезоэлектрическими модулями.

Поисковыми методами на кварц являются магнитная, тепловая (шпуровая) и гамма-съемки, электрическое и электромагнитное профилирование (ЭП, ДЭМП, СДВР), электрические зондирования методом ВЭЗ для определения мощности наносов, высокоточные грави- и сейсморазведка для выявления россыпей кварца. Выбор комплекса методов определяется геолого-геофизическими условиями. Наиболее надежный поиск и разведку (в наземном, скважинном и шахтном вариантах) кварца можно провести пьезоэлектрическим или сейсмоэлектрическим методами.

Пегматитовые жилы характеризуются высокими (свыше 10^4 Ом·м) удельными электрическими сопротивлениями, повышенными поляризуемостью, гамма-активностью, пьезоэлектрическим модулем. Иногда они отличаются от вмещающих пород по плотности, скорости распространения упругих волн и магнитным свойствам. Наземными поисково-разведочными методами на пегматитовые жилы являются: электропрофилирование, радиометрия, магниторазведка, иногда высокоточная гравиразведка. При детальной разведке пегматитовых жил следует применять пьезоэлектрический метод.

4.3.3. Поиски химического и агрохимического сырья методами геофизики.

Минеральные соли (простые и сложные хлориды и сульфаты натрия, калия, магния и ряд других соединений) разрабатываются открытым и закрытым способами. Месторождения представлены в виде пластовых, штокообразных, куполообразных залежей. От вмещающих терригенных пород минеральные соли отличаются пониженными плотностью и магнитной восприимчивостью, повышенными удельным электрическим сопротивлением, скоростью распространения упругих колебаний, теплопроводностью, пониженной для солей натрия и магния и повышенной для солей калия гамма-активностью.

Поиск минеральных солей можно проводить гравимагнитными и радиометрическими съемками, электрическим и электромагнитным профилированием, используемым при изучении крутозалегающих приповерхностных залежей, и зондированиями (ВЭЗ, ЗСБ, ЧЗ), применяемыми при изучении глубоко залегающих соляных структур. Разведку минеральных солей проводят с помощью полевых электромагнитных и сейсмических зондирований (ВЭЗ, ЗСБ и МПВ, МОВ) и геофизическими исследованиями скважин (электрическими, ядерными).

Агрохимическое сырье (апатиты, фосфориты) изучается геофизическими методами редко. Апатитовые руды приурочены к изверженно-метаморфическим комплексам пород. В зависимости от генезиса, морфологии и состава вмещающих пород апатитовые залежи отличаются от них: повышенными плотностью, гамма-активностью, повышенными или пониженными магнитной восприимчивостью и удельным электрическим сопротивлением.

Фосфориты, используемые для производства фосфорных и комплексных удобрений, приурочены к осадочным породам. Для фосфоритов характерны: повышенные гамма-активность (за счет аномально высокого содержания урана) и поляризуемость; повышенные, а иногда пониженные магнитная восприимчивость и удельное электрическое сопротивление.

Основными поисковыми методами на агрохимическое сырье могут быть гравимагниторазведка, ядерно-физические методы (гамма-, эманационная и нейтронно-активационная съемки), электрическое профилирование (ЭП) и зондирование (ВЭЗ), иногда для структурных исследований применяют сейсморазведку (МПВ, МОВ).

4.3.4. Изучение месторождений строительного минерального сырья геофизическими методами. Рыхлые глинистые, песчанистые, песчано-гравийные, гравийно-галечниковые, галечно-валунные материалы, широко применяемые в строительстве, связаны, главным образом, с четвертичными отложениями и добываются как на суше, так и на дне акваторий (рек, озер, на шельфе морей).

В ряду рыхлых осадочных пород (глины — пески — гравий — галька — валуны) физические свойства увеличиваются следующим образом: от 0,01 до 100 мм — средний диаметр твердых частиц, от единиц до тысячи омметров — удельное электрическое сопротивление, незначительно — плотность. Уменьшаются естественная, иногда вызванная поляризуемость, гамма-активность, скорость распространения упругих волн, иногда магнитная восприимчивость.

Для расчленения перечисленных рыхлых пород, поисков и разведки тех или иных из них можно использовать электрические профилирования (ЭП, ЕП, ВП) и зондирования (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП), сейсморазведку МПВ, гамма-съемку, иногда гравимагниторазведку. Обычно применяют одновременно не более двух методов.

Скальные строительные материалы: изверженные (граниты, гранодиориты, габбро, диабазы, базальты и др.), метаморфические (гнейсы, кварциты, песчаники, мрамор и др.) и осадочные (известняки, доломиты, мрамор, мел и др.) породы широко используются в строительстве. Для изверженных и метаморфических пород характерны высокие плотности, скорости распространения упругих волн, удельные электрические сопротивления, хотя разрушенные разности этих пород могут отличаться пониженными значениями перечисленных параметров. Магнитная восприимчивость у них изменяется в зависимости от петрографо-тектонических особенностей. Радиоактивность возрастает от метаморфических к ультраосновным, основным и кислым породам.

Месторождения скальных карбонатных пород относятся к осадочным и метаморфическим типам. Карбонатные породы, по сравнению с изверженными и метаморфическими, имеют меньшие, а по сравнению с осадочными — большие значения следующих физических свойств: плотности, скорости распространения упругих волн, удельного электрического сопротивления, магнитной восприимчивости. Они отличаются низкой гамма-активностью.

Физико-геологические модели при изучении скальных строительных материалов бывают разными: от горизонтально и полого залегающих пластов до мощных лакколи-

тов. Поэтому комплексы геофизических методов различаются. Пластовые крутослоистые залежи изучают гравимагниторазведкой, электрическим и электромагнитным профилированием, гамма- и эманационной съемкой, а полого залегающие — методами гравимагниторазведки, электрическими и электромагнитными зондированиями, сейсморазведкой.

4.3.5. Разведка угольных месторождений полевыми и скважинными геофизическими методами. Ведущими наземными и скважинными методами разведки угольных месторождений являются электрические. Это объясняется характерными свойствами углей, удельное электрическое сопротивление которых изменяется в очень широких пределах (от 10^{-5} до 10^4 Ом·м). Оно зависит от химико-технологических характеристик угля, степени их углефикации и обводненности. Под химико-технологическими характеристиками понимают качественный (химический) и количественный состав органической массы (углерод, водород, кислород, азот и др.), а также количество твердой негорючей массы, называемой золой. На величину электрического сопротивления оказывает влияние в основном зольность углей. При переходе от малозольных (негорючий остаток меньше 10%) к среднезольным (10—30%) и высокзолным (зола больше 30%) бурым и каменным углям сопротивление уменьшается в 3—5 раз. Наоборот, у хорошо проводящих ток антрацитов с увеличением зольности сопротивление растет.

Антрациты и графит, являясь электронными проводниками, отличаются высокой электропроводностью, электрохимической активностью и поляризуемостью. В зависимости от литологии, степени метаморфизма и обводненности угли могут отличаться как высоким, так и низким электрическим сопротивлением от вмещающих пород. Иногда их электрическое сопротивление такое же, как у вмещающих пород. Кроме того, угольные пласты характеризуются пониженными, по сравнению с вмещающими породами, плотностью, скоростью упругих волн, повышенной поляризуемостью.

Сланцы, торф отличаются от окружающих пород пониженными значениями плотности, скорости распространения упругих волн, электрохимического сопротивления.

В целом с помощью методов угольной геофизики решают следующие задачи:

- уточняют границы месторождения;
- картируют выходы пластов угля, сланцев под наносы;

- определяют мощность надугольных, угленосных отложений;
- прослеживают обводненные, трещиноватые и закарстованные породы;
- трассируют малоамплитудные нарушения в угленосной толще;
- изучают горно-геологические условия эксплуатации месторождений;
- оценивают физико-механические и прочностные свойства пород в целях прогнозирования устойчивости горных выработок;
- определяют литологический состав вмещающих пород, марку (зольность) углей, мощность угольных пластов, ведут подсчет запасов;
- выявляют зоны выгорания угольных пластов.

В зависимости от структурных и генетических особенностей угольных месторождений их изучение проводят разными комплексами геофизических методов. Например, на месторождениях платформенного типа с горизонтальным и пологим залеганием угленосных толщ применяют электрические и электромагнитные зондирования, сейсморазведку МОВ, гравиразведку. На месторождениях геосинклинального типа с крутым залеганием угольных толщ набор геофизических методов определяется глубиной их залегания. При больших глубинах залегания (на закрытых угольных месторождениях) применяют те же методы, что и на месторождениях платформенного типа. На месторождениях открытого типа с мощностью наносов до нескольких десятков метров широко используют методы электрического и электромагнитного профилирования (ЭП, ЕЦ, ДЭМП), гравиразведку и сейсморазведку МПВ.

Изучение мощности залежей торфа целесообразно проводить зимой, когда болота замерзают, с помощью зондирований (ВЭЗ, ЧЗ), особенно радиолокационного (РЛЗ), выполняемого в движении с помощью вездеходов и вручную.

На стадии детальной разведки при подготовке и в ходе эксплуатации угольных месторождений основным методом разведки является бурение. Оно служит для проверки геофизических данных, подсчета запасов, определения качества (марки) углей. Особое место на этом этапе детальной разведки занимают геофизические методы исследования скважин: электрические, ядерные, сейсмоакустические. С их помощью не только сокращается стоимость бурения благодаря проходке скважин без отбора керна, но и проводится документация разреза не менее точно, чем при сплошном отборе керна. Комплексные геофизические исследования в скважинах служат также для определения зольности, плотности, пористости, механического, петрографо-минерального со-

става угля и окружающих пород, оценки их физико-механических свойств и прочности, что необходимо для выбора способов крепления выработок. В ходе интерпретации материалов устанавливают корреляционные зависимости между геофизическими параметрами и перечисленными выше физико-химическими свойствами углей.

4.4. Изучение подводных месторождений твердых полезных ископаемых

4.4.1. Подводные месторождения твердых полезных ископаемых. На дне океанов и морей выявлены разнообразные по генезису и видам минерального сырья месторождения твердых полезных ископаемых. По запасам сырья многие из них сопоставимы, а в ряде случаев и превосходят известные рудно-сырьевые месторождения на суше. Эксплуатация этих месторождений может осуществляться драгированием, откачками, эрлифтным (воздушным) подъемом и т.д.

В настоящее время среди разнообразных подводных месторождений твердых полезных ископаемых можно выделить:

- прибрежно-морские россыпи благородных (золото, платина и др.), редких (тантал, ниобий и др.), цветных (цинк, ванадий и др.) и черных (железо, титан, хром) металлов, а также алмазов;
- скопления железомарганцевых конкреций (ЖМК) абиссальных (глубинных) равнин Мирового океана;
- железомарганцевые корки на склонах подводных гор;
- скопления глубоководных полиметаллических и сульфидных руд в срединно-океанических хребтах.

4.4.2. Геофизические поиски подводных рудных месторождений. Основной задачей геофизических исследований при разведке россыпных месторождений является выяснение общей морфологии залежи, определение мощности и состава рыхлых отложений и рельефа подстилающих коренных пород. В связи с приуроченностью многих прибрежных морских россыпей к затопленным речным долинам, содержащим древние аллювиальные россыпи, важной задачей является выяснение геоморфологических особенностей шельфа и прослеживание аллювиальных отложений в подводных палеодолинах рек. Ведущими геофизическими методами при разведке россыпных месторожде-

ний шельфа являются непрерывное сейсмическое профилирование (НСП), электроразведка (ЕП, ВП, КС), магниторазведка и скважинные наблюдения.

Глубоководные месторождения железомарганцевых конкреций (ЖМК) привлекают особое внимание промышленности как весьма перспективный и крупнейший источник марганца, никеля, кобальта, частично меди и некоторых редких металлов. Месторождения ЖМК распространены почти на половине площади дна Мирового океана. В большинстве случаев они приурочены к абиссальным (глубинным) котловинам глубиной 4—5 км. Близки к ЖМК по составу и, видимо, по условиям образования железомарганцевые корки, покрывающие склоны подводных гор на глубинах от 600 до 2000 м. При поисках и разведке ЖМК и рудных корок применяют магниторазведку, НСП, электроразведку (КС, ВП, ЕП) и в меньшем объеме гравиразведку.

По данным магниторазведки и электроразведки по соседним профилям (галсам) коррелируются аномалии, к которым приурочены скопления ЖМК. Метод НСП позволяет определить мощность рыхлых донных осадков над консолидированными или кристаллическими породами. С ростом мощности донных осадков от нескольких метров до 300 м изменяется состав конкреций и уменьшается практически до нуля концентрация полезных компонент в них.

Месторождения глубоководных полиметаллических сульфидных руд вошли в разряд перспективных потенциальных источников меди, цинка, серебра и ряда других металлов. Несмотря на слабую изученность этого нового типа рудных месторождений океанов, уже сейчас ясно, что концентрация в них цветных металлов может быть сопоставима с крупнейшими рудно-сырьевыми объектами континентальных областей. Подводные сульфидные руды образуют сплошные линзообразные залежи в центральных частях срединно-океанических хребтов, преимущественно в тех зонах, где активно проявляется подводный вулканизм.

Установлена связь между скоростью раздвижения дна в рифтах и условиями, благоприятствующими сульфидообразованию. Поэтому интерпретация результатов региональных гидромагнитных и гравиметровых съемок в океанах с точки зрения возраста пород могут служить поисковым критерием на сульфидоносность. При разведке выявленных сульфидных месторождений эффективны придонная сейсморазведка, электромагнитное профилирование на постоянном токе (ЭП), переменными полями (НЧМ) и вызванными потенциалами (ВП), съемка естественных электрических полей (ЕП). Если

сейсморазведка решает литолого-структурные задачи, то электроразведка служит для прямых поисков сульфидных руд. Объясняется это тем, что руды отличаются от донных осадков высокой электрохимической активностью, электропроводностью, поляризуемостью.

Перспективны для промышленной разработки месторождения донных фосфоритов, которые встречаются на шельфе и континентальном склоне океанов и морей. По данным региональных акваториальных наблюдений выявляются участки дна, где благоприятны условия для залегания фосфоритов. Поисково-разведочные работы на фосфориты ведутся донной гравиметрией, методом НСП и электрическим профилированием.

К поискам поддонных рудных месторождений примыкают проблемы выявления затонувших кораблей, археологических объектов, выполняемые сейсмоакустическими и электрическими методами.

ГЛАВА 5

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОФИЗИКА

5.1. Геологическая среда и геофизические методы для ее исследования

Верхнюю оболочку земной коры (мощностью в первые тысячи метров), где в наибольшей степени проявляются природные, экзогенные геологические и антропогенно-техногенные процессы, геологи называют геологической средой, а геофизики — геофизической средой. По нашему мнению, ее следует называть экзотехносферой, так как здесь на почвы, грунты, горные породы воздействуют внешние, экзогенные, воздушные и водные процессы, влияют естественные и искусственные физические поля, проявляется антропогенная (инженерно-хозяйственная) деятельность человека. Геологическая среда и особенно ее верхняя часть разреза (ВЧР) мощностью в десятки, реже первые сотни метров является объектом исследований прикладного раздела геофизики, называемого инженерной или инженерно-гидрогеологической геофизикой (*Огильви А.А.*, 1990).

К геофизическим методам, используемым для изучения геологической среды, предъявляют специфические требования:

— высокую детальность изучения геологической среды на сравнительно небольших глубинах (от нескольких единиц до десятков, реже первых сотен метров) с изменяющимися в пространстве и во времени физическими свойствами, а значит, литологией, водно-физическими характеристиками, с широким проявлением природных процессов и инженерно-хозяйственной деятельности человека;

— использование портативных методов и облегченных измерительных установок для ускорения, удешевления геофизических работ и возможности проведения повторных наблюдений;

— применение нескольких (до 3—4) геофизических методов разной физической природы для повышения точности получаемой информации;

— широкое использование буровых скважин и горных выработок, проходка которых не сложна при небольших глубинах разведки.

Геологическая среда является объектом прямых исследований различных научно-прикладных дисциплин: гидрогеологии, почвоведения, инженерной геологии, мерзловедения, гляциологии, геоэкологии. Однако геофизика может дать дополнительную информацию, в результате чего повышается общая эффективность работ.

В соответствии с названными научно-прикладными направлениями инженерная геофизика подразделяется на гидрогеологическую, почвенно-мелиоративную, инженерно-геологическую, мерзлотную, гляциологическую. К ней можно отнести и экологическую геофизику. Однако возрастающее значение для человечества экологических проблем приводит к целесообразности выделения ее в отдельный научно-прикладной раздел геофизики.

5.2. Гидрогеологическая и почвенно-мелиоративная геофизика

Геофизические методы давно и с успехом используют для решения следующих гидрогеологических задач: гидрогеологических съемок разных масштабов; поисков и разведки грунтовых, пластовых, трещинно-карстовых и артезианских вод; изучения динамики подземных вод; выяснения условий обводнения месторождений полезных ископаемых и объектов строительства или реконструкции; определения минерализации грунтовых и подземных вод; проведения гидромелиоративных и почвенно-мелиоративных исследований. Методы решения этих и других задач исследований подземной гидросферы объединяют в гидрогеологическую геофизику, выделяя в ней почвенно-мелиоративное направление (*Шарапанов Н.Н. и др., 1974*).

5.2.1. Геофизические методы при гидрогеологических съемках. Гидрогеологические съемки начинаются с обзорных и мелкомасштабных (мельче 1:500000) съемок крупных территорий, проводимых в ходе геологических съемок более мелкого масштаба. Их целью является районирование территорий с точки зрения выделения гидрогеологических бассейнов и структур с артезианскими, пластовыми, трещинными, пластово-трещинными, грунтовыми водами и грубой оценки ресурсов пресных, минерализованных и термальных вод (*Полевые методы..., 1982*).

Специальные исследования геофизическими методами при этих съемках не проводят, а используют данные структурно-картировочных геофизических методов (см. 3.3). Результаты геофизических исследований целесообразно подвергать целенаправленной переинтерпретации с точки зрения выделения водоносных толщ и водоупоров, определения глубины залегания регионального водоупора (по данным сейсморазведки и электромагнитных зондирований), оценки водных свойств толщ по суммарным поперечным сопротивлениям и продольным проводимостям, рассчитываемым в результате интерпретации вертикальных и дипольных электрических зондирований (ВЭЗ, ДЭЗ).

Среднемасштабные гидрогеологические съемки (1:200000 — 1:100000) предназначены для попланшетного (полистного) изучения территории. Они служат для решения следующих гидрогеологических задач: гидрогеологической стратификации разрезов с выделением водоносных и водоупорных комплексов; изучения зон аэрации, грунтовых, пластовых и трещинных вод; выявления пресных, минеральных, термальных вод; выяснения изменений гидродинамических, гидрохимических, гидротермических и криологических условий в плане и по глубине; проведения работ по водоснабжению, сельскохозяйственной мелиорации и изучению инженерно-геологических условий территории.

При среднемасштабных гидрогеологических съемках используют данные дистанционных аэрокосмических (радиотепловых и радиотелеметрических) съемок, а также методов электромагнитных зондирований, профилирований и гравимагниторазведки. Выбор методов определяется природными условиями (аридные, гумидные области или территории распространения многолетнемерзлых пород), геолого-геофизическим строением, решаемыми задачами и глубиной залегания подземных вод.

Полевые работы ведут либо в виде сплошных площадных съемок с густотой сети зондирований около 1×1 км, либо путем изучения по более густой сети отдельных ключевых участков с интерполяцией результатов между ними. Профилирование с шагом до 100—200 м проводят по направлениям с наиболее контрастными изменениями геоморфологических и геолого-геофизических условий.

Интерпретация данных геофизических методов должна быть направлена не только на получение геометрических параметров разреза, но главным образом на геолого-гидрогеологическое истолкование результатов и, прежде всего, определение фильтра-

ционных свойств пород (коэффициентов фильтрации, водопроницаемости и др.). Для этого устанавливаются вероятностно-статистические связи между геолого-геофизическими свойствами по данным параметрического бурения, опорных геофизических наблюдений у скважин и выполнения ГИС в скважинах.

Крупномасштабные (1:50000 и крупнее) гидрогеологические съемки предназначены для решения конкретных задач питьевого, промышленного и сельскохозяйственного водоснабжения, обводнения пастбищ и мелиорации земель подземными водами. Гидрогеологические цели детальных крупномасштабных геофизических съемок те же, что и среднемасштабных. Они предназначены для технического проектирования водоснабженческих и мелиоративных мероприятий и поэтому должны отличаться: высокой точностью количественных определений физико-механических и водно-фильтрационных свойств, сравнимой с точностью, получаемой с помощью наблюдений в скважинах; ограниченными сроками проведения работ и меньшей стоимостью за счет сокращения в 2—5 раз бурения, но с обязательным проведением опытно-фильтрационных параметрических наблюдений в скважинах (или шурфах).

При крупномасштабных гидрогеологических съемках применяют комплекс полевых и скважинных геофизических методов, а также геолого-гидрогеологических опытных наблюдений. Основными полевыми геофизическими методами в рамках этого комплекса являются зондирования: электрические (ВЭЗ), электромагнитные частотные (ЧЗ) или становлением поля (ЗС) (в условиях распространения пресных вод), вызванных потенциалов (ВЭЗ-ВП) или сейсморазведки методом преломленных волн (МПВ) (в условиях распространения подземных вод повышенной минерализации). Вспомогательными методами служат электромагнитные профилирования.

Густота сети наблюдений при выполнении зондирований не должна превышать 200×500 м, а на ключевых участках 100×200 м. Шаг наблюдений при профилировании не должен превышать 50 м. Интерпретация данных крупномасштабных геофизических съемок, проводимых с целью решения гидрогеологических задач, сводится к построению разрезов и карт послойных или обобщенных геофильтрационных параметров. Их получают в результате корреляции геофизических и гидрогеологических параметров по опытно-фильтрационным наблюдениям в скважинах и в ходе геофизических работ около них.

5.2.2. Поиски и разведка пресных подземных вод. С увеличением водонасыщенности горных пород увеличивается их электропроводность и скорости распространения упругих волн, меняются электрохимическая активность и поляризуемость, поэтому методы электроразведки и сейсморазведки давно используются при поисках и разведке подземных вод (см. 1.4).

Основными задачами геофизических методов при поисках, предварительной и детальной разведке месторождений подземных вод являются (Методы геофизики..., 1985):

— на стадии поисков — литологическое картирование в плане и по глубине с выделением водовмещающих рыхлых или трещиноватых и закарстованных скальных пород, изучение грунтовых, пластовых и трещинных подземных вод, оценка геофильтрационной и гидрохимической обстановки;

— на стадии предварительной разведки — изучение литологического строения, выделение зон повышенной обводненности по значениям коэффициентов фильтрации и водопроницаемости, определение глубин залегания и мощностей водоносных и водонепроницаемых горизонтов, выявление «гидрогеологических окон» в локальных водоупорах, обеспечивающих связь разных водоносных горизонтов, гидрогеохимическое картирование зон с разной минерализацией подземных вод;

— на стадии детальной разведки — детализация и проверка данных предварительной разведки бурением скважин, определение эксплуатационных запасов подземных вод разной минерализации путем анализа всех полевых материалов и данных скважинных, в том числе режимных, геофизических наблюдений.

Основными методами поисков и предварительной разведки месторождений пресных, пластовых и грунтовых подземных вод являются вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП) и сейсморазведка методом преломленных волн (МПВ), а при изучении глубоких артезианских бассейнов — сейсморазведка методом отраженных волн (МОВ) и электроразведка (ДЗ, ЗСБ, МТЗ). Трещиноватые обводненные зоны выявляют с помощью методов электромагнитного профилирования. Детализацию выявленных зон с трещинно-карстовыми водами осуществляют методами кругового профилирования (КЭП) и кругового вертикального зондирования (КВЗ).

Сеть наблюдений зависит от масштаба съемок и сложности гидрогеофизических условий. Расстояние между точками наблюдения должно составлять около 1 см в мас-

штабе результирующих разрезов и карт. Очень ответственным является этап физической интерпретации материалов, который обычно проводят с использованием ЭВМ. Геолого-гидрогеологическое истолкование геофизических данных осуществляется на основе вероятностно-статистических связей между геофизическими параметрами и геофильтрационными свойствами в массиве горных пород, определяемыми по данным опытно-фильтрационных работ и геофизических исследований в скважинах.

5.2.3. Поиски и разведка термальных вод. Крупные месторождения термальных вод приурочены к парогидротермальным системам и резервуарам с термальной водой («тепловым котлам»), которые характеризуются следующими особенностями:

- повышенными значениями теплопроводности, температуры, геотермических градиентов и тепловых потоков, что вызывает появление аномалий при геотермических исследованиях;
- пониженными электрическими сопротивлениями, что приводит к появлению минимумов на кривых электромагнитных зондирований;
- возрастанием термоэлектрических электрокинетических потенциалов, сопровождающимся максимумами потенциалов естественных электрических полей;
- обогащением разреза сульфидными минералами, вызывающими аномалии вызванной поляризации;
- низкими скоростями распространения упругих волн и их затуханий;
- понижениями плотности и магнитной восприимчивости, т.е. слабыми отрицательными гравимагнитными аномалиями.

В зависимости от природных физико-геологических условий осуществляют мелко-, средне-, крупномасштабные геофизические съемки с увеличенной густотой сети над резервуарами термальных вод. Основными методами поисков термальных вод являются аэрогеофизические (в том числе инфракрасные) съемки; шпуровая и скважинная терморазведка; электромагнитные зондирования (ЗСБ, ВЭЗ-ВП или МТЗ) и методы профилирования (ЕП, ВП); сейсморазведка МПВ и МОВ; гравимагнитные съемки. Среди скважинных ведущими методами являются термические, вспомогательными — электрические.

5.2.4. Поиски и разведка минеральных вод. Поиски и разведка минеральных вод, пригодных для лечебных целей или являющихся источником химического сырья, — достаточно специфическая задача. Поиски таких месторождений имеют сходство с поис-

ками месторождений пресных вод, а разведку проводят бурением скважин и проведением в них геофизических исследований. Среди методов ГИС основными являются резистивиметрия, электрические и ядерные. Ниже рассмотрены способы определения минерализации подземных вод по их удельному электрическому сопротивлению (5.2.8).

5.2.5. Изучение динамики подземных вод и водных свойств толщ горных пород. Важным этапом разведки грунтовых, пластовых и трещинно-карстовых вод является оценка их запасов, расходов, динамики. На этом этапе исследований весьма перспективны скважинные электрические методы, с помощью которых проводят литологическое расчленение разрезов и определяют такие динамические характеристики потока, как скорость фильтрации (или коэффициент фильтрации) и действительная скорость.

Одним из давно применяющихся способов определения действительной скорости подземного потока по одиночной скважине является метод заряженного тела (МЗТ). На рис. 5.1 приведен пример определения действительной скорости подземных вод (V) этим методом, сводящимся к изучению эквипотенциальных линий электрического поля от помещенного в засоленную скважину источника постоянного тока на разных временах после добавления поваренной соли в поток подземных вод.

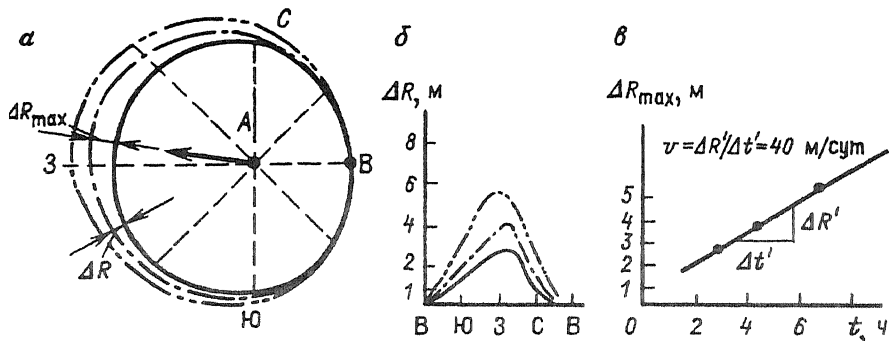


Рис. 5.1. Пример определения направления и скорости движения подземных вод методом заряженного тела: *a* — план эквипотенциальных линий, *б* — график смещения эквипотенциальных линий, *в* — график скоростей, $\Delta R'$ — максимальное смещение изолиний за время $\Delta t'$ после засолки

Для оценки вертикальной фильтрационной неоднородности водоносного пласта и послойного определения коэффициентов фильтрации разрезов с ненапорными подземными водами используют резистивиметрические наблюдения в скважинах с искусст-

венно засоленным подземным потоком. При этом с помощью резистивиметра периодически измеряют удельное сопротивление предварительно засоленной поваренной солью воды в стволе скважины. По сопротивлениям до засоления ρ_0 и после засоления ρ_1 и ρ_2 , определенным через время t_1 и t_2 после засолки, можно оценить скорость фильтрации по формуле

$$v_{\phi} \approx \frac{2d}{(t_1 - t_2)} \cdot \lg \frac{\rho_2(\rho_0 - \rho_1)}{\rho_1(\rho_0 - \rho_2)},$$

где d — диаметр скважины.

На рис. 5.2 приведены результаты скважинных наблюдений на одном из участков Северо-Уральских бокситовых рудников (СУБР). В практике совместных гидрогеологических исследований динамики подземных вод широко используются определения водных и фильтрационных свойств по удельному электрическому сопротивлению слоев толщ горных пород (см. 5.2.8).

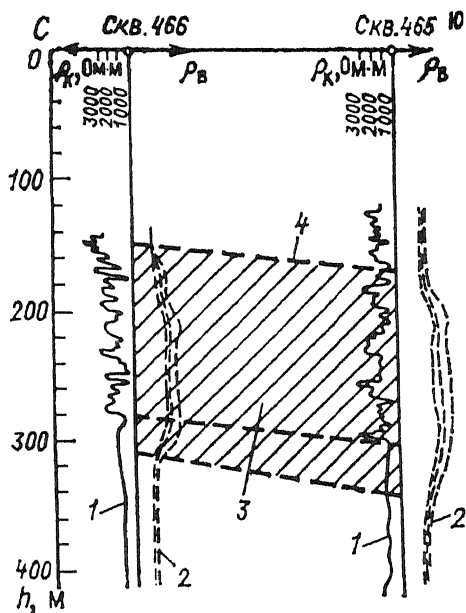


Рис. 5.2. Результаты скважинных геофизических исследований на одном из участков СУБР: 1 — график кажущихся сопротивлений по данным каротажа КС; 2 — кривые резистивиметрических наблюдений; 3 — зона активной циркуляции подземных вод; 4 — границы слоев

5.2.6. Изучение условий обводненности горных выработок. При изучении обводненности горных выработок в ходе разработки месторождений твердых полезных ископаемых наиболее важной практической задачей является выявление обводненных зон для бурения водононизительных скважин и проектирования других осушительных

мероприятий. Особенно значительна обводненность месторождений, сложенных песчано-глинистыми или неравномерно закарстованными и трещиноватыми карбонатными породами. Обводненные зоны здесь носят локальный, незакономерный характер и приурочены к увеличениям в разрезе содержания толщ песчаных коллекторов или карстовых водонасыщенных полостей и трещиноватых зон.

Основными полевыми методами изучения обводненности горных выработок являются ВЭЗ, ВЭЗ-ВП, МПВ, а также электромагнитные профилирования (ЭП, ЕП). Методика полевых работ сводится к площадным съемкам с густотой сети наблюдений $(100—500) \times (100—500)$ м. Глубинность разведки должна превышать проектируемые глубины выработок.

5.2.7. Гидромелиоративные и почвенно-мелиоративные исследования. Мелиоративные работы, гарантирующие устойчивость сельскохозяйственного производства, требуют постановки научно обоснованных гидромелиоративных изысканий как на стадии проектирования и строительства различных водохозяйственных сооружений, так и особенно в процессе их эксплуатации для контроля качества осушения или обводнения земель.

В результате гидромелиоративных изысканий на объектах водохозяйственного строительства необходимо дать оценку условий заложения и работы дренажных и оросительных систем, а также водообмена через зону аэрации. При этом должны быть решены следующие задачи:

— определена литологическая характеристика верхней (5—10 м) толщи пород и проведено почвенное картирование;

— выявлены глубины залегания уровня грунтовых вод, регионального водоупора, мощности и взаимосвязь различных водоносных горизонтов между собой и с поверхностными потоками;

— изучены физико-механические и водные свойства горных пород зоны аэрации и полного водонасыщения, т.е. определены коэффициенты пористости, влажности, проницаемости, фильтрации, водопроводимости, а также минерализация и динамика вод, засоленность и заболоченность почв.

Решение этих задач только методами почвенных, гидрогеологических и инженерно-геологических исследований (проходка скважин, шурфов и наблюдения в них) тру-

доемко, дорого и носит точечный характер. При использовании геофизических методов можно не только получить информацию о разрезе, но и повысить ценность точечных гидрогеологических обследований, так как водно-физические свойства, определенные в параметрических (опорных) точках, легко увязать с площадными электрическими, экстраполировав их на всю изучаемую площадь. При этом необходимы дешевые, ускоренные геофизические съемки, которые проводят следующими методами:

— среднемасштабными дистанционными электромагнитными исследованиями — инфракрасной (радиотепловой) съемкой с помощью тепловизоров и высокочастотной радиотелеметрии, активной радиолокацией с помощью радиолокаторов миллиметрового и сантиметрового диапазона волн;

— крупномасштабными электромагнитными профилированиями (СДВР, ДИП (ДЭМП), ЭП, ЕП, ВП) и зондированиями (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП, РВЗ);

— скважинными наблюдениями электрическими, нейтронными, термическими методами.

Методика и принципы обработки данных геофизических методов, гидромелиоративных и почвенных исследований такие же, как и при рассмотренных выше гидрогеологических исследованиях. Особенно перспективны повторные измерения для контроля водного, солевого и температурного режимов мелиорируемых земель, которые можно выполнять с помощью дистанционных аэрокосмических, радиотепловой и радиотелеметрической съемок.

5.2.8. Изучение минерализации подземных вод, литологии и флюидонасыщенности горных пород электроразведкой методом сопротивлений. Особо ценное значение гидрогеологической и почвенно-мелиоративной геофизики заключается в возможности получения количественных характеристик водных свойств горных пород при совместных гидрогеологических и почвенно-мелиоративных работах, с одной стороны, и электроразведки — с другой. Подобное совмещение обеспечивает повышение информативной и экономической эффективности работ, так как позволяет интерполировать и экстраполировать данные трудоемких геолого-гидрогеологических и почвенно-мелиоративных исследований на отдельных опорных точках на всю площадь, изученную высокопроизводительными электроразведочными методами.

Среди методов электроразведки методы сопротивлений, основанные на измерении кажущихся сопротивлений ($KС$ или ρ_k) в постоянных и низкочастотных переменных искусственных полях, находят наибольшее применение при решении гидрогеологических задач. В результате интерпретации электроразведки методом сопротивлений получают пластовые или осредненные по пачке слоев значения удельного электрического сопротивления ($УЭС$ или ρ_k).

1. *Определение минерализации подземных вод.* УЭС горных пород, особенно трещиноватых и обводненных, определяется в значительной мере минерализацией подземных вод, так как электропроводность у пород в основном ионная. Поэтому для геологического истолкования данных метода сопротивлений надо знать общую минерализацию (M) подземных вод. Ее определяют путем резистивиметрических измерений, т.е. определением УЭС воды (ρ_w) с помощью установок метода сопротивлений малых размеров, помещенных в трубу (сосуд), изготовленную из изолирующего материала. Перемещая резистивиметр по скважине с водой или залив воду в сосуд, можно определить величину ρ_w (в Ом·м), а по ней можно рассчитать M в г/л по формуле $M = 0,12\rho_w$. Если известен химический состав подземных вод по данным гидрохимических анализов, легко можно определить концентрацию солей C в г/л (см. рис. 5.3).

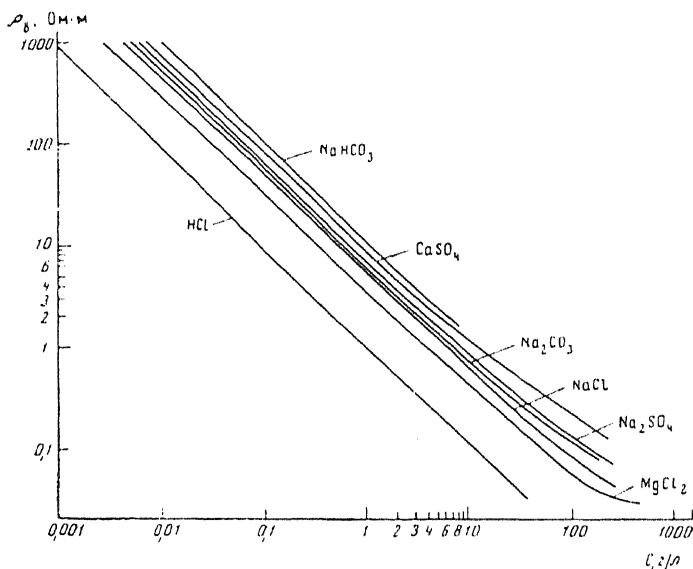


Рис. 5.3. Зависимости удельного электрического сопротивления подземных вод (ρ_w) от концентрации (C) и химического состава растворенных солей (Методы геофизики..., 1985)

По общей минерализации подземные воды подразделяются на пресные ($M < 1$ г/л), слабо минерализованные ($M < 3-5$ г/л) и сильно минерализованные ($M > 5-10$ г/л). Для сильно минерализованных подземных вод параметры M и C оказывают основное влияние на УЭС горных пород, особенно трещиноватых скальных и всех осадочных (см. рис. 5.4).

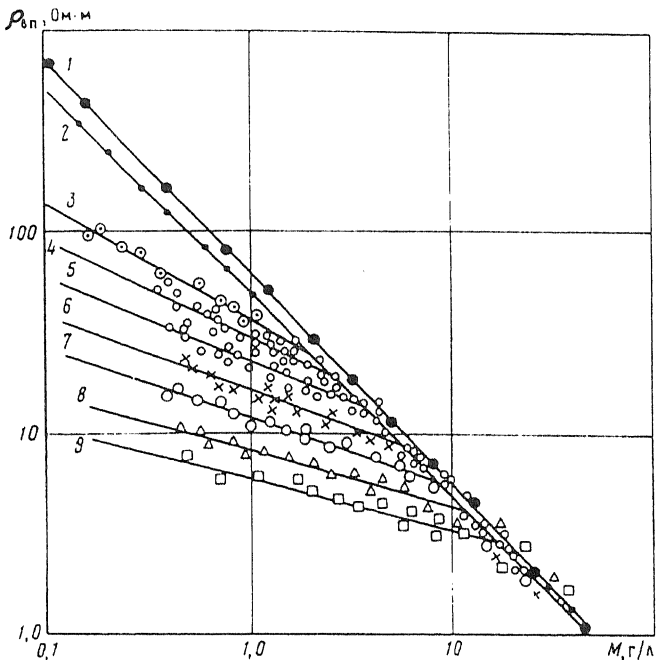


Рис. 5.4. Зависимость удельного электрического сопротивления ($\rho_{эл}$) водонасыщенных пород от минерализации (M): 1 — природные воды; 2 — гравийно-галечниковые отложения; пески: 3 — крупнозернистые, 4 — среднезернистые, 5 — мелкозернистые; суглинки: 6 — легкие, 7 — средние, 8 — тяжелые глины, 9 — глины (Методы геофизики..., 1985)

2. *Определение литологии и водных свойств горных пород, насыщенных пресными водами.* При $M < 10$ г/л литология и прежде всего гранулометрический состав горных пород (средний диаметр твердых частиц $d_{ср}$), а также их пористость, глинистость, флюидонасыщенность начинают влиять на УЭС горных пород, становясь определяющими факторами при заполнении пород пресными подземными водами. С помощью диаграммы, представленной на рис. 5.4 по УЭС разных водонасыщенных пород и известной минерализации M можно оценить литологию пород.

Важной характеристикой коллекторских свойств песчано-глинистых пород является их глинистость, которая оценивается по формуле $\Gamma = \rho_r / \rho_{нг}$, где ρ_r и $\rho_{нг}$ — УЭС чистых глин и песчано-глинистых пород изучаемого района. Коэффициент пористости горных пород K_n можно определить с помощью их относительного сопротивления, называемого параметром пористости ($P = \rho / \rho_b$, где ρ и ρ_b — УЭС породы и насыщающей ее воды). На рис. 5.5 приведены кривые зависимости относительных сопротивлений некоторых горных пород от коэффициента пористости (K_n).

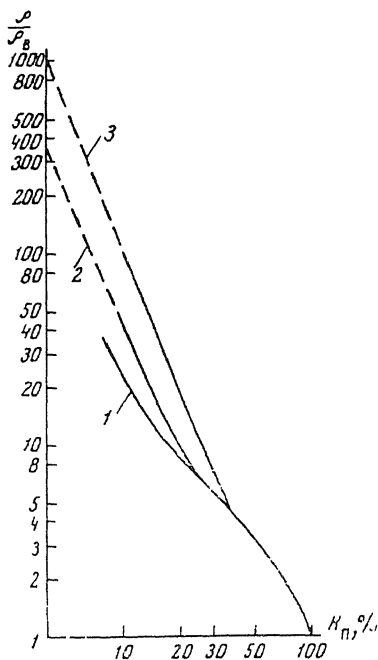


Рис. 5.5. Кривые зависимости относительного сопротивления (ρ / ρ_b) от коэффициента пористости (K_n): 1 — пески; 2 — слабосцементированные песчаники и рыхлые известняки; 3 — сильносцементированные песчаники, известняки и доломиты (Методы геофизики..., 1985)

Среди водно-физических свойств горных пород основным является их водонасыщенность, выражаемая через коэффициент K_n . Для рыхлых осадочных пород коэффициент K_v может быть определен через параметр пористости с помощью табл. 5.1. Возможность отбора (откачки) подземных вод характеризуется водоотдачей, которая для песчано-глинистых пород определяется формулой $K_m = V / \rho$, где V — эмпирический коэффициент, который как здесь, так и в последующих формулах рассчитывается при совместных гидрогеологических и геофизических исследованиях на опорных точках.

Зависимость P от K_n

$P = \rho / \rho_n$, отн. ед.	110	50	30	15	13	6,5	4	3,2	2,2	1
K_n , %	10	15	20	25	30	40	50	60	70	100

О количестве (запасах) подземных вод можно судить по коэффициенту фильтрации (K_f), измеряемому в м/сут, который через величину УЭС песчано-глинистых пород ρ (в Ом-м) оценивается по формуле $K_f = 0,01\rho$. Водопроницаемость ($T_n = K_f h$) толщи водоносных пород мощностью h корреляционно связана с поперечным удельным сопротивлением этой толщи $T = \rho h$, которое при интерпретации данных электроразведки может быть получено самостоятельно. Формула связи имеет вид $T_n = DT$, где D — эмпирический коэффициент, близкий для песчано-глинистых пород к 0,01.

3. *Зависимость удельного электрического сопротивления от насыщенности нефтепродуктами.* Одной из проблем гидрогеологических и гидроэкологических исследований является изучение загрязненности горных пород нефтепродуктами вследствие их непрерывных или залповых утечек из трубопроводов, емкостей нефтеперерабатывающих заводов, хранилищ и т.п. Проникая в горные породы, они скапливаются в коллекторах над грунтовыми водами (верхний водоносный горизонт) или в подземных водах. Поэтому решение гидроэкологических задач, связанных с загрязнением почв, грунтов и верхней части геологической среды нефтепродуктами, начинается с выявления коллекторов (песков, пористых известняков, полускальных пород) и водоупоров (глин, скальных пород).

Хотя нефтепродукты по УЭС близки к изоляторам, в горных породах, насыщенных ими, УЭС может быть как выше, так и ниже, чем у тех же пород, но водоносных. Объясняется это вымыванием нефти водой, химическим и биологическим (под воздействием микроорганизмов) окислением. Окисление, идущее на контакте вода — нефть, происходит тем быстрее, чем больше воды в породе и скорость ее движения, а значит, выше в ней концентрация кислорода. В результате нефтезагрязнение замещается продуктами окисления (сульфиды, в частности, пирит и др.), которые образуют в подземной воде электролит с низким УЭС. Поэтому в обводненных породах при разных соотношениях высокоомного слоя нефти или нефтепродуктов и окружающего их низкоом-

ного слоя за счет переработки нефтепродуктов могут создаваться зоны как повышенного, так чаще и пониженного УЭС. В районах, где расположены необводненные породы, нефтепродукты могут сохраняться сколь угодно долго, а загрязненные ими породы выделяются как высокоомные объекты.

5.3. Инженерно-геологическая геофизика

5.3.1. Общая характеристика инженерно-геологической геофизики. Инженерно-геологическая геофизика — это раздел прикладной геофизики, предназначенный для решения разнообразных инженерно-геологических задач. Геофизические исследования выполняются при проведении средне- и крупномасштабной инженерно-геологических съемок, а также при детальных работах, связанных с проектированием, строительством и эксплуатацией различных сооружений. Они позволяют повышать детальность и точность изысканий, уменьшать затраты времени и средств на проведение инженерно-геологических работ (Ляховицкий Ф.М. и др., 1989; Методы геофизики..., 1985; Полевые методы..., 1982).

Объектом этих исследований обычно является верхняя часть разреза (ВЧР), характеризующаяся значительной неоднородностью, изменчивостью литологического состава, строения и физических свойств горных пород. Эффективность геофизических исследований при изучении этого сложного объекта достигается применением методов различной физической природы, с повышенной детальностью наблюдений, получением интегральных характеристик, отражающих особенности строения и свойств массива пород в его естественном залегании, возможностью многократных повторных наблюдений без нарушения строения и состояния геологической среды. Последнее обстоятельство позволяет осуществлять режимные геофизические наблюдения за интенсивностью геологических процессов, происходящих под воздействием естественных и техногенных факторов.

Инженерно-геологические геофизические исследования выполняют на земной поверхности, в скважинах и горных выработках. Используют также аэрокосмические и аэрогеофизические материалы. Ведущими методами являются сейсмические: метод преломленных волн (МПВ), реже — отраженных волн (МОВ), а также один-два из следующих: электропрофилирование методами естественного поля (ЕП), кажущихся со-

противлений, радиоволновым (РВП), вертикальные электрические зондирования методом сопротивлений или вызванной поляризации (ВЭЗ или ВЭЗ-ВП), частотные зондирования (ЧЗ), зондирования становлением поля (ЗС) и радиоволновые (РВЗ), гравимагнитные, ядерные и скважинные методы.

5.3.2. Инженерно-геологические съемки. Инженерно-геологические съемки бывают средне-, крупномасштабными и детальными. При этих видах съемок применяются некоторые из перечисленных в 5.3.1 методов.

При среднемасштабных съемках (1:200000 — 1:100000) используют данные одного-трех наиболее производительных геофизических методов профилирования (космические и воздушные, включая радиотепловые (РТС) или инфракрасные (ИКС) и магнитные съемки) и намечают детализационные или ключевые участки. В пределах этих участков работы проводят по более густой сети наблюдений и более широким комплексом, включающим два-три из упомянутых в 5.3.1 полевых геофизических методов. Работы проводят одновременно с бурением скважин, инженерно-геологическими и фильтрационными исследованиями, отбором образцов пород для лабораторных исследований и выполнением ГИС. Число пунктов геолого-гидрогеологических исследований может быть в два и более раз меньше, чем без применения геофизики.

Крупномасштабное картирование (1:25000 — 1:10000) проводят, как правило, без использования ключевых участков, а в виде сплошной съемки. Применяют комплекс геофизических методов, включающий преимущественно сейсморазведку МПВ и электромагнитные зондирования (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП, ЗСБ, РВЗ), а при наличии скважин выполняют сейсмоакустические и электрические исследования в них.

5.3.3. Изучение условий строительства инженерных сооружений. Расчленение поверхностных и коренных отложений и изучение оснований проектируемых наземных и подземных инженерных сооружений (промышленных, гражданских, гидротехнических, транспортных и др.) проводят для оценки несущей способности и устойчивости массивов горных пород на конкретных строительных площадках. Эти работы характеризуются большой детальностью (масштаб исследований от 1:10000 до 1:1000). Геофизические методы используют для картирования рыхлых отложений и определения глубины залегания коренных скальных пород, детального расчленения верхней

части разреза, оценки физико-механических и водно-физических свойств пород в их естественном залегании, изучения трещиноватости и нарушенности массива, определения уровня грунтовых вод и их динамики (см. 5.2.8 — 5.3.8). В задачи геофизических методов входит также изучение напряженного состояния коренных пород, выявление геодинамических явлений и сейсмичности (карст, суффозия, оползни, обвалы, просадки и др.), представляющих опасность для будущего строительства, проведение мониторинга за работой ответственных сооружений и изучение их влияния на геологическую среду (Комплексные инженерно-геофизические исследования..., 1990).

Для этого применяют комплекс методов, состав которого в значительной степени аналогичен используемому на ключевых участках, но ведущими в комплексе являются сейсморазведка методом преломленных волн (МПВ), а также электромагнитные зондирования (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП или ЗСБ), которые дополняются, по возможности, микромагнитной, эманационной, гамма-съемками. Применяют также сейсмоакустическое и электромагнитное межскважинные просвечивания. В качестве примера на рис. 5.6 приведены результаты комплексных геофизических исследований для изучения рыхлых и скальных пород.

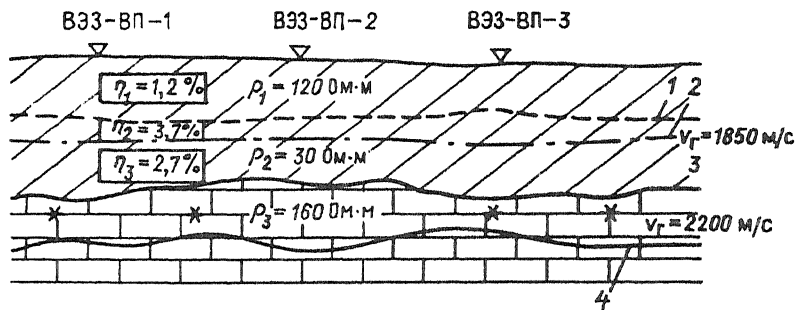


Рис. 5.6. Пример определения условий залегания скальных пород под рыхлыми образованиями по данным методов ВЭЗ, ВЭЗ-ВП и МПВ: 1 — уровень капиллярного поднятия по данным ВЭЗ-ВП; 2 — поверхность грунтовых вод по данным ВЭЗ, ВЭЗ-ВП и МПВ; 3 и 4 — кровля скальных пород по данным ВЭЗ, сохранных пород по данным МПВ (v_1 — граничная скорость) (Геофизические методы..., 1988)

5.3.4. Изучение тектонических нарушений. При изучении тектонических нарушений, выделении трещиноватых и ослабленных зон целесообразно использовать аэрокосмические фото- и инфракрасные съемки, а также не менее двух-трех из следую-

ших методов: электропрофилирование, метод преломленных волн, микромагнитную и эманационную съемки, круговые электрические зондирования (КВЭЗ).

Совместная интерпретация полученных материалов дает возможность определить положение тектонических нарушений, их амплитуды и простирания, оценить интенсивность трещиноватости пород и ее затухание с глубиной. В благоприятных условиях удается выяснить степень заполнения трещин переотложенным материалом и связанные с трещиноватостью особенности движения подземных вод, изучить локальные неоднородности пород и пустоты.

Особый интерес представляет выявление слабо проявленных в геолого-геофизических полях малоамплитудных тектонических разломов, связанных с активными движениями земной коры. Такие разломы, как правило, являются долгоживущими, т.е. прослеживаются от земной поверхности до больших глубин. К ним приурочены зоны повышенной трещиноватости и проницаемости, опасные как в динамическом, так и в экологическом отношении. Для выявления указанных зон широко используются методы комплексной интерпретации площадной или профильной геолого-геофизической информации. При этом чрезвычайно важно использовать методы, обладающие постепенно увеличивающейся глубинностью, например, аэрокосмические, гравимагнитные и эманационные съемки, электромагнитные профилирования. Применение специальных методик интерпретации (многоуровневого, системного интегрированного анализов) позволяет установить пространственное положение зон малоамплитудной тектоники и оценить особенности затухания трещиноватости с глубиной.

5.3.5. Изучение физико-геологических явлений и процессов. Из всех физико-геологических явлений и процессов геофизические методы чаще всего используют при изучении карста и оползней.

Карст, т.е. наличие пустот и трещин в растворимых породах, активно изучается геофизическими методами, так как растворимые породы (карбонаты, соли) отличаются по физическим свойствам от нерастворимых (глины, песок, изверженные) горных пород.

Методика геофизических работ и состав методов определяются особенностями закарстованной территории. Например, при изучении поверхностных карстовых форм (воронок, впадин, понор), заполненных глинистым материалом и перекрытых рыхлыми отложениями небольшой мощности, используются методы электроразведки (ВЭЗ или ЕП, ЭП); можно применять тепловую съемку, высокоточную гравиразведку.

Изучение глубинных карстовых форм представляет собой сложную задачу. В этом случае, наряду с методами электроразведки (ВЭЗ, ЭП), можно использовать сейсморазведку (МПВ), гравиразведку, ядерно-физические и скважинные методы. Для детального изучения зон закарстованности используются круговые установки зондирований и профилирований. По вытянутости диаграмм КС можно определить направление трещиноватости, а по величине отношения больших осей диаграмм к малым — оценить ее интенсивность (Огильви А.А., 1990).

В задачи геофизических методов при изучении оползней входят:

- изучение строения оползневых склонов с определением глубины залегания уровня грунтовых вод, зеркала скольжения и поверхности коренных пород;
- оценка изменения физических свойств и состояния оползневых накоплений во времени;
- изучение динамики и прогноз оползневого процесса;
- выявление качества противооползневых мероприятий.

Предпосылки применения геофизических методов при изучении оползней заключаются в дифференциации физических свойств залегающих на склонах коренных пород и оползневых накоплений. В теле оползня появляются дополнительные границы, связанные с поверхностью фильтрационного потока.

Оползневые накопления картируют методами электро- и сейсмопрофилирования (ЭП, ЕП, МПВ). Детальное расчленение разреза оползневого склона проводят методами зондирований (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП) и МПВ.

Изучение обводненности оползней имеет решающее значение для прогноза их устойчивости. При определении уровня грунтовых вод, степени увлажнения оползневых тел эффективны методы МПВ, ВЭЗ, ВЭЗ-ВП. Изучение изменения физических свойств и состояния оползневых накоплений во времени осуществляется режимными геофизическими наблюдениями с использованием тех же полевых, а также скважинных методов.

Для изучения динамики оползневого процесса можно использовать магнитные реперы. Периодическая микромагнитная съемка, выполняемая над участком заземления таких реперов, позволяет оценить движение оползневого тела по смещению создаваемых реперами локальных магнитных аномалий.

Изучение динамики упругих напряжений в теле оползня вследствие внутренних процессов и внешних нагрузок, сопровождающих смещение оползневых масс, можно проводить с помощью методов акустической (АЭ) и электромагнитной (ЭМЭ) эмиссии. Сущность этих методов сводится к регулярному определению акустических и электромагнитных шумов, т.е. регистрации естественных упругих и электромагнитных колебаний разных частот. Количество и интенсивность акустических и электромагнитных импульсов изменяются при изменении напряженного состояния массива, что может служить для диагностирования движения оползня.

5.3.6. Изучение инженерно-геологических условий строительства на акваториях и берегах. Изучение инженерно-геологических условий строительства разнообразных сооружений на акваториях морей, озер, рек невозможно без геофизических методов (Литвинов Э.М., 1993).

1. *Основные задачи инженерно-геологических исследований акваторий.* Интенсивное освоение шельфа океанов и морей для подводной добычи нефти и газа, строительства разнообразных прибрежных и речных объектов (портов, плотин, дамб, газонефтепроводов, тоннелей, каналов, мостов и др.) привело к появлению инженерной геологии акваторий. Перед ней ставятся различные задачи:

- расчленение прибрежных и донных осадков по литологии, возрасту, условиям осадконакопления;
- определение глубины залегания коренных пород или мощности современных осадков;
- восстановление палеогеографических условий формирования берегов, бухт, заливов и петрофизических свойств горных пород;
- картирование тектонических нарушений, зон трещиноватости и закарстованности скальных пород;
- изучение сейсмостойкости, физико-механических, прочностных и воднофизических свойств горных пород в массиве и на образцах;
- анализ связи подземных вод на суше с водами окружающих акваторий;
- оценка экологических последствий строительства.

Решение этих задач проводится на стадии предварительных изысканий под строительство, в ходе технического проектирования и эксплуатации сооружений.

В комплекс инженерно-геологических исследований акваторий входят: инженерно-геологическое картирование, геофизические исследования на акваториях и прибрежных участках, бурение скважин, проходка разведочных горных выработок с целью изучения горных пород в массиве и отбора образцов для лабораторных испытаний, геофизические исследования скважин.

2. *Целевые и технологические комплексы геофизических методов инженерно-геологических исследований акваторий.* Даже в самых благоприятных условиях один геофизический метод не может решить перечисленные в п. 1 задачи, поэтому одновременно используются несколько методов. Реализация комплексных геофизических исследований акваторий облегчается возможностью измерений нескольких геофизических параметров с одного движущегося судна, что во много раз сокращает стоимость и время проведения изысканий.

Расчленение горных пород по литологии, условиям залегания, физико-механическому состоянию, обводненности пресными или минерализованными водами осуществляется следующим акваториальным технологическим комплексом геофизических методов: сейморазведкой методом непрерывного сейсмического профилирования (НСП), многоразносными электрическими (ВЭЗ-ДОЗ) и одноразносными электромагнитными (ЭМЗ) зондированиями, съемкой естественных электрического (ЕП) и температурного (ТП) полей. НСП служит для расчленения слоистых осадков, определения глубины залегания коренных (особенно скальных) пород, являющихся наилучшим основанием для сооружений, картирования тектонических нарушений и зон трещиноватости, оценки устойчивости и прочностных свойств массивов горных пород. ВЭЗ-ДОЗ и ЭМЗ дают информацию о физико-геологическом состоянии массивов пород, в том числе их закарстованности, трещиноватости, водонасыщенности. Метод ЕП позволяет разделить участки распространения скальных, песчаных и глинистых пород, отличающихся соответственно нулевыми, отрицательными и положительными естественными потенциалами. Метод ЕП служит также для изучения мест фильтрации вод из водохранилищ, рек или притока в них подземных вод. Совместное применение сейморазведки и электроразведки позволяет решать практически все задачи, рассмотренные в 5.3.1.

Акваториальные (чисто водные) исследования сочетаются с наземными и скважинными геофизическими исследованиями на прибрежных участках.

Примером совместного применения наземного электропрофилирования (ЭП) и речных резистивметрических наблюдений (определение электропроводности воды в реке) для изучения интенсивности карстовых явлений в хорошо растворимых породах могут служить исследования, выполненные вблизи одного из крупных химических заводов (рис. 5.7). Производство серной кислоты на этом заводе привело к непредвиденному притоку кислотных растворов в подземные воды, что повлекло за собой повышение агрессивности вод по отношению к присутствующим в разрезе гипсоносным породам. В результате процесс карстообразования в этих породах, залегающих на незначительной глубине, усилился. Стали увеличиваться существующие и возникать новые полости. Соединяясь между собой, они образовали протяженные водотоки, по которым растворенные вещества начали выноситься в реку. Повторные наземные наблюдения кажущихся сопротивлений (ρ_k) методом ЭП и измерений электропроводности воды в реке позволили выявить положение основных водотоков и оценить развитие карстового процесса во времени.

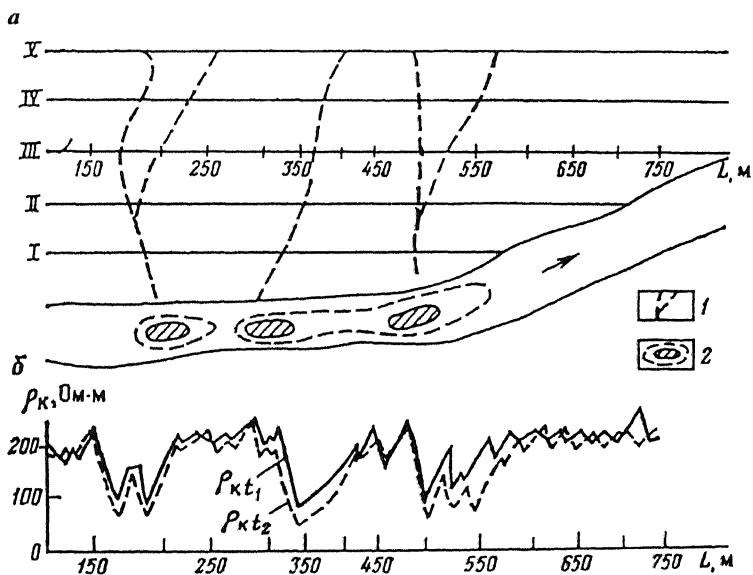


Рис. 5.7. Результаты наземного электропрофилирования и речной резистивметрии для изучения техногенных карстовых явлений: а — план, б — графики ρ_k по профилю III в моменты времени t_1 и t_2 ; I—IV — профили наблюдений; 1 — водотоки, 2 — зоны разгрузки (повышенная проводимость воды) в реке

5.3.7. Определение физико-механических свойств горных пород по данным сейсморазведки. По скоростям продольных (желательно и поперечных) упругих волн, получаемым в результате полевой и акваториальной сейсморазведки, а также сейсмоакустических исследований скважин, определяются физико-механические свойства горных пород (плотность, пустотность, пористость, заполнитель пустот) (Комплексные инженерно-геофизические исследования..., 1990; Ляховицкий Ф.М. и др., 1989; Полевые методы..., 1982; Савич А.И., Яценко З.Г., 1979).

Плотность (σ) горных пород, зависящая от плотности породообразующих минералов, пустотности, водо-, нефте-, газонасыщенности, может быть оценена по известным скоростям продольных упругих волн и литологии с помощью табл. 1.1 или рис. 5.8.

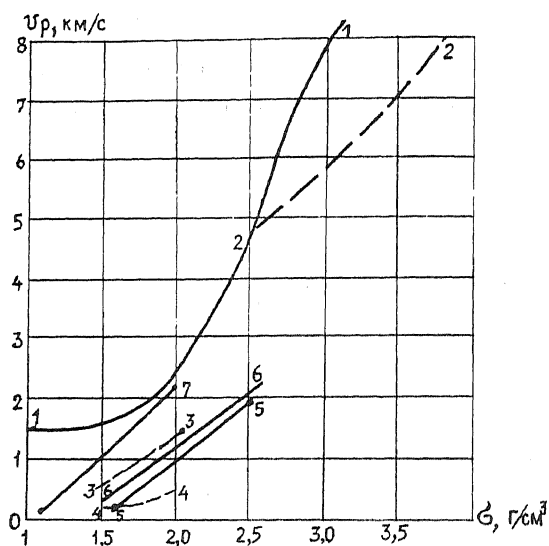


Рис. 5.8. Графики зависимостей скоростей продольных волн (V_p) от плотности (σ) по данным разных авторов: теоретические данные для осадочных пород (1); экспериментальные данные для магматических и метаморфических пород (2), глин (3), песчано-гравийных отложений (4), песков (5), песчано-глинистых грунтов (6), неводонасыщенных грунтов (7)

Пустотность магматических и метаморфических пород мала (0,01—5%). Если пустоты заполнены воздухом или водой, то пустотность называется открытой. Она может быть оценена через скорости продольных волн V_p (в км/с) по следующей эмпирической формуле $\Pi = a / V_p - b$, где $a = 0,3$, $b = -0,5$ (при заполнении пор воздухом) и $a = 0,4$, $b = -0,06$ (при заполнении пор водой).

Пористость (n) песчано-глинистых пород через V_p (в км/с) можно рассчитать по эмпирической формуле В.И.Бондарева: $n = \text{alg}(3,5/V_p)$, где $a = 0,5$ (для сухих) и $a = 1,7$ (для водонасыщенных пород). Погрешности в определении плотности, пустотности и пористости составляют около 20% (Применение сейсмоакустических методов..., 1992).

Относительную пустотность (трещиноватость) массива скальных пород можно оценить по коэффициенту сохранности $q_c \equiv 0,5(V_p/V_{p\max})^2$, где V_p и $V_{p\max}$ — скорость продольных волн на данном участке и максимальная скорость продольных волн на той части изучаемой площади, где залегают заведомо массивные породы. Сохранность пород считается хорошей при $q_c > 70\%$ и плохой при $q_c < 30\%$.

Насыщенность пустот воздухом, водой, вторичными продуктами разрушения по-разному влияют на V_p и V_s . В целом с увеличением пустотности (пористости и трещиноватости) скорость продольных волн уменьшается в большей степени для сухих пород и в меньшей — для полностью водонасыщенных. Например, для магматических пород увеличение пустотности от 0,1—0,3% до 0,3—1%, т.е. в три раза, уменьшает V_p на 10—20% для водонасыщенных пород и на 30—50% — для газонасыщенных. При постоянной открытой пустотности (Π) скорость продольных волн возрастает с ростом водонасыщенности (K_n) в 1,5—6 раз соответственно при $\Pi < 1\%$ — $\Pi > 30\%$. Поскольку часть пор и трещин в полускальных и рыхлых породах заполнены вторичными продуктами разрушения с V_p на порядок меньшими, чем в твердом скелете породы, то V_p сложным образом зависит от Π , K_n и заполнителя пор. Так, для скальных и полускальных пород, массивных (V_{pm}) и трещиноватых, насыщенных водой (V_{pw}), вторичными продуктами их разрушения (V_{pr}) или воздухом (газом) (V_{pr}) справедливо соотношение: $V_{pm} \geq V_{pw} > V_{pr} \geq V_{pr}$. Величины неравенств в зависимости от литологии и пористости бывают разными.

Таким образом, по скоростям продольных волн определить K_v сложно, а скорости поперечных волн еще меньше зависят от заполнителя пор. Например, увеличение V_s на 10—30% соответствует росту K_v от 0 до 100%.

5.3.8. Определение деформационно-прочностных свойств горных пород по данным сейсморазведки и сейсмоакустических исследований. По скоростям продольных (желательно и поперечных) упругих волн, получаемых в результате интерпретации данных сейсморазведки МПВ, МОВ и сейсмоакустических исследований скважин, определяются динамические деформационно-прочностные свойства горных пород в массиве в естественных условиях залегания, по которым, в свою очередь, оцениваются статические деформационно-прочностные свойства (Комплексные инженерно-геофизические исследования..., 1990; Савич А.И., Яценко З.Г., 1979).

Динамический коэффициент поперечных деформаций (коэффициент Пуассона ν_g) зависит от отношения V_s/V_p , которое меняется от 0,2 до 0,7. Его рассчитывают по формуле $\nu = (V_p^2 - 2V_s^2) / 2(V_p - V_s^2)$ или определяют по правой шкале номограммы на рис. 5.9. С помощью этой же номограммы определяется динамический модуль Юнга $E_g = 2V_s^2 \sigma(1 + \nu)$ (E_g — в МПа, V_s — в км/с, σ — в г/см³). Заметим, что все упругие модули измеряются в паскалях (Па), гигапаскалях (1 ГПа = 10⁹ Па), мегапаскалях (1 МПа = 10⁶ Па) или в ньютонах на 1 кв. м (1 Н/м² = 10 Па = 10⁻⁵ кг/см²).

Номограмма на рис. 5.9 позволяет определить достаточно точно параметры ν_g и E_g (погрешности не превышают 20%) для сплошных однородных и изотропных упругих сред, к которым можно отнести скальные породы. Для дискретных неоднородных (полускальные и рыхлые осадочные) и особенно анизотропных (сланцы, глины) геологических сред получаемые с помощью этой номограммы параметры ν_g и E_g являются эффективными, т.е. характеризуют усредненные упругие свойства. С достаточной точностью они могут использоваться для получения лишь относительных значений $\Delta\nu_g$, ΔE_g , которыми определяется упругая неоднородность среды. Абсолютные же величины этих модулей можно получить, установив корреляционные связи между геолого-геофизическими свойствами изучаемого района. В целом для различных пород ν_g меняется от 0,1 до 0,5, а E_g — от единиц до сотен 10² МПа (от долей единиц до десятков ГПа).

Поскольку при инженерно-геологических испытаниях получаются статические, а в МПВ и МОВ динамические модули упругости, то между ними пытаются установить корреляционные связи. Для скальных и мерзлых пород такие связи довольно устойчивы. Так, для скальных пород В.Н.Никитиным рекомендуется зависимость $E_c = 1,03E_g - 0,9$ (E — в ГПа). E_c называется приведенным модулем упругости и широко используется при изучении скальных массивов горных пород. Погрешности при расчетах E_c достигают 40%. Для полускальных и рыхлых пород эти связи в каждом районе устанавливаются путем корреляции между геолого-геофизическими параметрами.

Модуль общей деформации ($E_{\text{деф}}$), характеризующий полные упругие деформации в массиве при значительных длительных нагрузках одного знака, сложным образом зависит от E_c и E_g , а аналитические связи между ними не установлены. Обобщенные многами авторами экспериментальные зависимости $E_{\text{деф}}$ от E_g представлены на рис. 5.10.

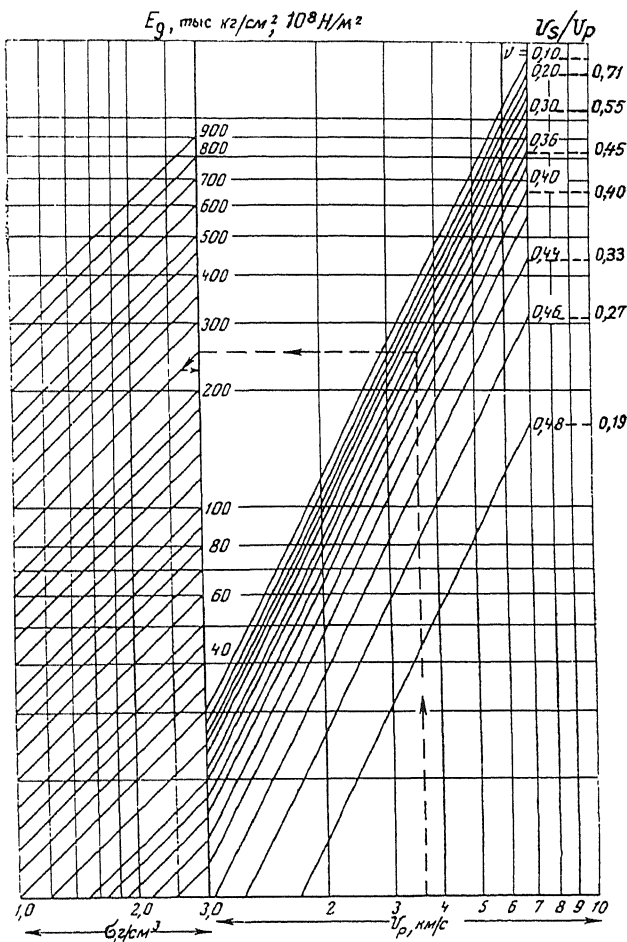


Рис. 5.9. Номограмма В.Н.Никитина для вычисления динамического модуля упругости (E_g) по V_p , σ , ν (Савич А.И., Яценко З.Г., 1979)

Модуль общей деформации скальных пород может быть оценен либо с помощью рис. 5.10, либо вычислен по формуле В.И.Бондарева: $E_{\text{деф}} = (0,093E_g + 0,4)$ МПа. Для песчано-глинистых пород его можно определить с помощью графиков, представленных на рис. 5.11, если известны скорости распространения продольных волн. Максимальные значения $E_{\text{деф}}$ у массивных скальных горных пород (10000—50000) МПа = (10—50) ГПа, а у полускальных — в 100 раз меньше.

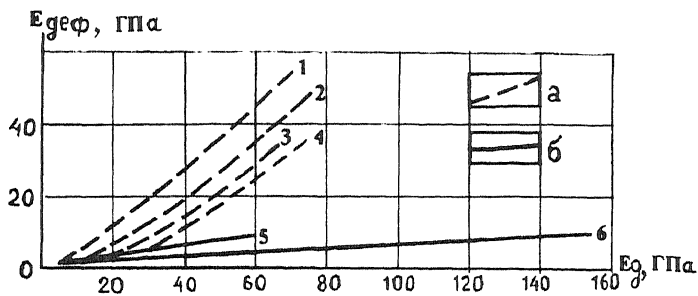


Рис. 5.10. Графики зависимости общего модуля деформации (E_{def}) от динамического модуля упругости (E_d) для разных пород: 1 и 3 — воздушно-сухих и водонасыщенных магматических и метаморфических, 2, 5 и 4, 6 — воздушно-сухих и водонасыщенных осадочных при испытании на образцах (а) и натуральных наблюдениях (б) (Савич А.И., Яценко З.Г., 1979)

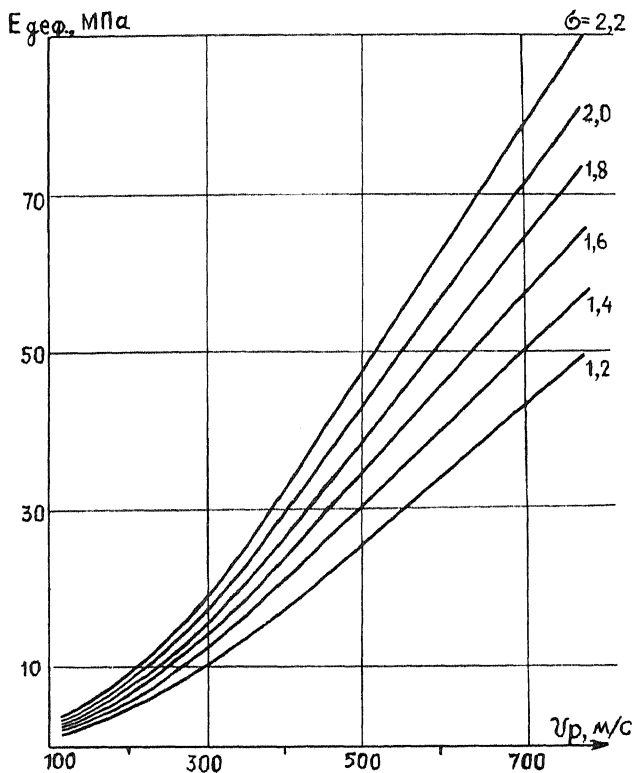


Рис. 5.11. Графики зависимости модуля общей деформации (E_{def}) от скорости распространения продольных упругих волн V_p для песчано-глинистых пород разной плотности (σ) (Савич А.И., Яценко З.Г., 1979)

Среди прочностных свойств горных пород часто используется предел прочности на сжатие ($\sigma_{сж}$), равный напряжению одноосного сжатия образца, при котором он разрушается. Предел прочности характеризует крепость пород с точки зрения переносимых нагрузок. Формула для расчета $\sigma_{сж}$ образцов неводонасыщенных скальных пород имеет вид $\sigma_{сж} = [V_p^2 \sigma_g (1 - 2\nu_g)] / [(1 - \nu_g) C]$ ($\sigma_{сж}$ — в Па, V_p — в м/с, σ_g — в кг/м³), где коэффициент C устанавливается путем получения корреляционных связей при экспериментальных геолого-геофизических наблюдениях. Он приблизительно равен: 240 (для известняков), 180 (для метаморфических и древних (доюрских) эффузивных пород), 120 (для древних интрузивных пород), 60 (для молодых (послеюрских) скальных пород). Величину $\sigma_{сж}$ (в МПа) через V_p (в км/с) для скальных пород можно определить с помощью графиков, представленных на рис. 5.12, а для глин — по формуле Н.Н.Горяинова $\sigma_{сж} = 0,7V_p^2 - 0,07$. Для рыхлых осадочных пород $\sigma_{сж}$ связан с V_p и V_s зависимостью $\sigma_{сж} \gg V_p^2/v^4 \gg CV_s^2/v^2$, где $\sigma_{сж}$ — в МПа, V — в км/с, ν — коэффициент Пуассона, C — коэффициент, который при относительных измерениях можно принять за 1, а при абсолютных его следует определить с помощью совместных геолого-геофизических работ. В целом наибольшие значения $\sigma_{сж}$ (200—300 МПа) наблюдаются в массивных магматических породах, примерно в 2 раза меньше $\sigma_{сж}$ — у скальных осадочных пород и в 100—200 раз меньше — у сильно трещиноватых полускальных пород.

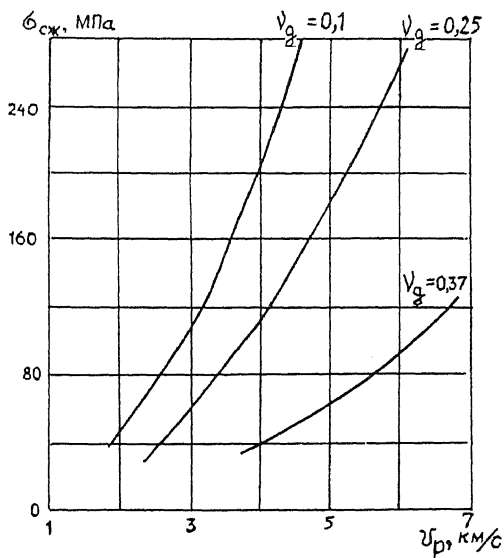


Рис. 5.12. Теоретические графики зависимости предела прочности пород на сжатие ($\sigma_{сж}$) от скорости продольных волн (V_p) для разных значений ν_g скальных пород (Савич А.И., Яценко З.Г., 1979)

В целом с помощью достаточно простого и быстрого геофизического метода (МПВ) получаются количественные параметры для построения обобщенных геомеханических моделей геологической среды, необходимых при проектировании сооружений. Абсолютные значения физико-механических свойств определяются с погрешностями до 20%, а деформационно-прочностных — порядка 50%. Однако относительные изменения тех или иных параметров вдоль профилей или в пределах площадей проведения МПВ, т.е. их пространственная изменчивость, определяются значительно точнее. В результате осуществляется картирование геологической среды, т.е. расчленение ее на неоднородные зонально-блоковые участки разных размеров. По различиям сейсмических и геомеханических свойств на изучаемой площади эти участки только по геофизическим данным можно разделить на относительно устойчивые с точки зрения строительства, где V_p , V_s , σ , E_g , E_c , $E_{\text{деф}}$, $\sigma_{\text{сж}}$ достигают максимумов, и неустойчивые, где эти параметры меньше максимальных в 5—10 раз.

5.4. Мерзлотно-гляциологическая геофизика

5.4.1. Строеие мерзлых пород и задачи их изучения. Геофизические методы давно применяют при мерзлотных исследованиях, т.е. при изучении таких сложных объектов и явлений природной геологической среды, какими являются многолетнемерзлые породы мощностью от единиц до сотен метров. Они отличаются отрицательными температурами при положительных температурах подстилающих пород. Перекрывающий многолетнемерзлые породы деятельный слой мощностью 0,3—3 м характеризуется положительными температурами в течение меньшей части года (летом) и отрицательными температурами на протяжении остальной части года.

Физические свойства льдов и многолетнемерзлых горных пород определяются прежде всего их температурой, хотя и другие природные факторы (литология, структура, текстура, пористость, водонасыщенность, минерализация подземных вод) оказывают на них существенное влияние. Геолого-геофизические разрезы в районах распространения многолетнемерзлых пород характеризуются большой изменчивостью в пространстве и во времени.

Геофизические методы можно применять для решения следующих трех групп задач:

— картирования мерзлых и талых отложений (выявление литологических контактов, тектонических нарушений, зон трещиноватости, участков сквозных и несквозных таликов, подземных льдов, обводненных зон);

— расчленения мерзлых и талых горных пород по глубине (определение кровли и подошвы многолетнемерзлых пород, изучение распространения на глубине мерзлых и талых пород, сквозных и несквозных таликов, т.е. выяснение строения многолетнемерзлых пород в плане и по глубине, поиски и разведка межмерзлотных и подмерзлотных подземных вод);

— изучения мерзлотных процессов и явлений, в том числе динамики сезонного промерзания и оттаивания, процессов наледообразования, пучения, термокарста, морозобойного растрескивания и др.

5.4.2. Физические свойства и строение мерзлотно-геофизических разрезов.

Для районов распространения многолетнемерзлых пород и льдов характерны особые типы мерзлотно-геофизических разрезов, которые обусловлены прежде всего физическими свойствами горных пород при отрицательных температурах. Например, плотность горных пород с увеличением льдистости уменьшается, так как лед имеет малую плотность (0,9—0,95 г/см³). Магнитная проницаемость и восприимчивость при промерзании пород не изменяются. Вместе с тем магнитная восприимчивость подземных льдов в десятки и сотни раз меньше, чем вмещающих пород. Удельное электрическое сопротивление льдов из пресных вод очень высокое (10⁵—10⁸ Ом·м), а льдов из минерализованных вод ниже (10²—10⁴ Ом·м) и зависит от содержания в них солей и их состава. Поэтому при промерзании горных пород их сопротивление возрастает обычно скачком (при температурах от –0,5 до –5 °С), а иногда плавно (при температурах от –2 до –10 °С). В зависимости от литологии, пористости, обводненности, особенностей термического режима, льдистости и криогенного строения сопротивление скальных пород при замерзании увеличивается не более чем в 10 раз, тонкодисперсных рыхлых пород (глины, суглинки) в 10—100 раз, грубодисперсных пород (пески, гравийно-галечниковые отложения) в 100—1000 раз.

Электрохимическая активность (α) мерзлых и талых пород может значительно различаться вследствие наличия и движения надмерзлотных и межмерзлотных вод.

Вызванная поляризация (η) у мерзлых пород выше, чем у талых, и достигает 2—3% для мелкодисперсных пород, 10% — для льда и 15 % — для грубодисперсных пород.

Так как относительная диэлектрическая проницаемость воды $\epsilon_{\text{отн}} = 80$, т.е. на порядок выше, чем для большинства породообразующих минералов, а для льда $\epsilon_{\text{отн}} \approx 3$, то при замерзании пород $\epsilon_{\text{отн}}$ убывает с уменьшением содержания незамерзшей воды. Скорость распространения упругих волн V при переходе пород в мерзлое состояние возрастает. Для льда скорость продольных волн больше ($V_p \approx 3500$ — 4000 м/с), чем для воды ($V_p \approx 1450$ м/с). При промерзании грубодисперсных пород значения V_p возрастают резко, в 3—5 раз. Увеличение V_p тонкодисперсных пород происходит более плавно с общим увеличением в 1,5—3 раза. При промерзании скальных пород значения V_p возрастают обычно не более чем в 2 раза для трещиноватых пород, а для массивных пород скорость может не изменяться. Аналогичные закономерности отмечаются для скорости поперечных волн V_s . Характерно, что для любых мерзлых пород отношение V_s / V_p примерно постоянно и составляет 0,4—0,6.

Мерзлотно-геофизические разрезы характеризуются следующими основными особенностями:

— непостоянством физических свойств в плане и по глубине даже для одних и тех же литологических комплексов горных пород, если в них изменяются температура, льдистость, криогенное строение;

— резким (например, для ρ на несколько порядков) изменением физических свойств горных пород в слое годовых колебаний температур, мощность которого 0,3—3 м, что приводит к различиям «зимних» и «летних» свойств горных пород;

— скачкообразным, а иногда плавным (градиентным) увеличением ρ и V в зоне годовых теплообменов мощностью 10—30 м;

— наличием в средней части многолетнемерзлых отложений зоны (мощностью от 0,1 до 0,3 от общей мощности многолетнемерзлых пород) с высокими электрическими сопротивлениями и скоростями упругих волн;

— скачкообразным или плавным изменением физических свойств в нижней части многолетнемерзлых пород, т.е. на границе мерзлых и талых пород.

5.4.3. Картирование мерзлых и талых пород. Для мерзлотного картирования и районирования, т.е. выявления контактов, тектонических нарушений, границ распространения мерзлых пород с разными геокриологическими особенностями, а также участков распространения талых пород можно применять следующие геофизические методы профилирования:

— аэрогеофизические (особенно аэромагнитные) и полевые гравимагнитные съемки;

— электрические и электромагнитные профилирования следующими методами: естественного поля (ЕП), кажущихся сопротивлений (ЭП), вызванной поляризации (ВП), бесконтактного измерения электрического поля (БИЭП), дипольного электромагнитного (ДЭМП), высокочастотного непрерывного (ВЧЭП или НЭП), сверхдлинноволнового радиокомпарационного (СДВ-РК);

— инфракрасные (ИКС) и радиотепловые (РТС) съемки.

Однако основным методом остается термометрия (измерения температуры в шпурах и скважинах).

Опорную информацию получают с помощью электромагнитных (ВЭЗ или ЗС) и сейсмических (МПВ, реже МОВ) зондирований и геофизических исследований сухих скважин (каротаж с промывочной жидкостью в таких условиях не дает сведений об истинных свойствах горных пород).

Для наиболее уверенного решения задач мерзлотного картирования используют не менее двух-трех из перечисленных выше геофизических методов (в том числе термические съемки). Выбор методов определяется мерзлотно-геофизическими и геоморфологическими условиями, а также глубиной разведки. Наименьшей глубиной (около 10 м) и удобством при проведении работ зимой, а также в районах с неблагоприятными поверхностными условиями (выходы скальных пород, курумы и др.) характеризуются методы ИКС, СДВ-РК. Глубиной, превышающей несколько десятков метров, обладают методы ЕП, ДЭМП, БИЭП, а несколько первых сотен метров — ЭП, ВП, а также гравимагниторазведка и зондирования.

Система или сеть наблюдений зависят от масштаба, целевой направленности работ, особенностей мерзлотно-геофизических и геоморфологических условий. При мерзлотно-геофизических съемках в мелком и среднем масштабах работы проводят на отдельных ключевых участках, выявленных в ходе ландшафтно-мерзлотных съемок и

дешифрирования аэрокосмических снимков. При крупномасштабных и детальных геофизических съемках выполняют площадные наблюдения с направлением профилей в крест простиранию элементов рельефа и границ участков, выделенных при ландшафтно-мерзлотных съемках. Расстояние между профилями в масштабе получаемых карт составляет 1—2 см, а шаг наблюдений берут в несколько раз меньше, так чтобы он составлял на местности 1—10 м.

Интерпретация материалов разных методов геофизического профилирования качественная и сводится к выделению на графиках и картах наблюдаемых параметров различных аномалий — максимумов, к которым чаще всего приурочены мерзлые породы, минимумов, обусловленных иногда тальми породами, участков разных уровней, степени изменчивости параметров и т.д. При истолковании результатов необходимо опираться на мерзлотно-геологическую информацию, устанавливая корреляционные связи между теми или иными геофизическими и мерзлотными (льדיстость, литология и т.д.) параметрами.

5.4.4. Расчленение мерзлых и талых горных пород. Для определения глубины залегания кровли и подошвы многолетнемерзлых пород, изучения строения надмерзлотной, мерзлотной и подмерзлотной частей разреза, выявления грунтовых, межмерзлотных и подмерзлотных вод, кроме термических исследований в скважинах, используют различные виды электромагнитных зондирований: вертикальные (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП), частотные (ЧЗ), радиолокационные (РЛЗ). Для этих же целей применяют сейсморазведку (МПВ, МОВ).

Выбор одного-двух из названных методов зондирования определяется геоморфологическими и мерзлотно-геофизическими условиями, а также задачами, стоящими перед геофизическими методами. Наибольшее применение находят ВЭЗ, отличающиеся простотой проведения измерений и приемов интерпретации. Их применяют летом, когда условия заземления бывают вполне удовлетворительными. Метод ВЭЗ-ВП относится к детализационным, его используют реже. Несмотря на методические преимущества зондирований, выполняемых на постоянных разносах и переменных частотах (ЧЗ) или временах становления поля (ЗС), эти методы применяются мало из-за сложных приемов интерпретации. В зимних условиях и в случае наличия поверхностных отложений высокого сопротивления целесообразно применять ЧЗ, ЗС или наиболее эффек-

тивное радиолокационное зондирование (РЛЗ). Сейсморазведку, несмотря на возможность проведения работ и летом и зимой, при мерзлотных исследованиях применяют реже, чем электроразведку. Это объясняется не только более сложной техникой и методикой, но и сложными сейсмогеологическими условиями.

Система наблюдений и густота точек зависят не только от масштаба работ (расстояния между центрами зондирований изменяются от 1 до 5 см в масштабе получаемых разрезов), но и от данных микрорайонирования и результатов предшествующих мерзлотно-геофизических съемок. Точки зондирований располагают в центральных участках выделенных микрорайонов, где искажающее влияние горизонтальных неоднородностей ожидается меньшим.

При интерпретации кривых зондирований и данных сейсморазведки, полученных в районах многолетнемерзлых пород, большие трудности связаны с боковыми искажениями; резким контрастом свойств отдельных слоев (особенно электрических сопротивлений мерзлых и талых пород); градиентным изменением свойств с глубиной в верхней и нижней частях слоя многолетнемерзлых пород; экранирующим влиянием высокольдистых слоев, затрудняющим изучение толщ под ними; изменчивостью летних и зимних кривых зондирований и другими факторами. Поэтому разработанные приемы интерпретации данных зондирований для пологослоистых (одномерных) разрезов с отсутствием многолетнемерзлых слоев не обеспечивают достаточной точности, а получаемые геоэлектрические и сейсмогеологические разрезы являются часто полуколичественными. Наиболее достоверное истолкование данных зондирований можно ожидать при комплексировании ряда геофизических методов с привлечением всей геолого-мерзлотной информации.

Динамику мерзлотных процессов и явлений изучают путем повторных геофизических съемок в разные времена года, особенно в конце лета и зимы.

5.4.5. Изучение ледников. Для гляциологических исследований (определения мощности покровных и горных ледников, изучения их внутреннего строения, морфологии подледных пород) применяют электрические и электромагнитные зондирования (ВЭЗ, ЧЗ, ЗС, РЛЗ), сейсморазведку (МОВ, МПВ), гравиразведку. Методы ВЭЗ, ЧЗ, ЗС, МПВ используют в основном при исследовании относительно маломощных горных ледников. Сейсморазведку МОВ используют при исследовании мощных ледниковых покровов.

Ведущими и самыми точными методами исследования ледников являются воздушный и полевой варианты радиолокационного зондирования (РЛЗ). С их помощью определяют мощность ледника, глубину залегания различных отражающих границ в нем, среднюю температуру ледников, иногда скорость их движения, выявляют скрытые трещины и зоны инфильтрации в них морских вод. Высокая точность определения мощности ледников по формуле $h = Vt/2$, где $V \approx 300/\sqrt{\epsilon_{отн}}$ (в м/мкс) — скорость распространения радиоволн во льду, $\epsilon_{отн}$ — относительная диэлектрическая проницаемость льда, t — время запаздывания отраженного импульса, объясняется постоянным значением $\epsilon_{отн} = 3,1—3,5$ для льда. Метод РЛЗ при ледовой разведке обладает очень большой глубиной (до 4 км), что объясняется высоким удельным электрическим сопротивлением льда и малым поглощением радиоволн в нем. Методом РЛЗ исследованы значительные территории покровных ледников в Антарктиде, Гренландии, ледяные купола Арктики, многие горные ледники.

5.5. Археологическая и техническая геофизика

5.5.1. Особенности выявления искусственных малоглубинных погруженных объектов. Актуальными направлениями инженерной геофизики являются археологическое и техническое, предназначенное для выявления в верхней части геологического разреза (ВЧР) искусственных древних и современных погруженных в землю сооружений. Вмещающей средой для них является та часть ВЧР, которая изменена человеческой деятельностью и называется «культурным слоем», т.е. исторически сложившейся системой многовековых напластований или сравнительно современных техногенных накоплений, образовавшихся в ходе строительства и эксплуатации промышленных объектов и городских агломераций.

Особенностью изучения «культурного слоя», мощностью от десятков сантиметров до десяти метров, является наличие переработанных грунтов с резко неоднородными физическими свойствами, высокого уровня как природных, так и особенно техногенных помех (электромагнитных, вибрационных, акустических, магнитных, ядерных, тепловых), а также вещественных загрязнений, обусловленных засоренностью мусором. Кроме того, физические свойства искоемых объектов (археологических памятников, подземных сооружений, труб, кладов и т.п.) слабо изучены и резко меняются. Если к

этому добавить неоднородность рельефа, то перед геофизиками стоит сложная задача, подобная той, которую можно представить при «рассмотрении объектов под разбитым стеклом или подернутой волновой рябью поверхностью воды». Из-за малых глубин залегания искомым объектам выявленные аномалии нетрудно проверить, поэтому точность интерпретации должна быть высокой.

5.5.2. Археологическая геофизика. По классификации А.К.Станюковича (1994), археологическая геофизика изучает скрытые объекты историко-культурного наследия: археологические объекты и комплексы, содержащиеся в культурных напластованиях; археологические памятники и комплексы, утратившие внешние отличительные признаки (грунтовые могильники, фундаменты несохранившихся архитектурных сооружений); умышленно спрятанные объекты-склады и иные сокрытия; памятники гидроархеологии и затонувшие объекты.

Геофизические методы исследований, в отличие от археологических, являются неразрушающими, что позволяет привлекать геофизику для создания кадастров археологических памятников и карт охранных историко-археологических зон. Сочетание результатов геофизических исследований всего археологического памятника с раскопками небольшой его части позволяет законсервировать культурный слой для будущих более совершенных методов археологических исследований. Актуальность проведения геофизической разведки особенно возрастает при экстренных исследованиях территорий перед застройкой, там, где раскопки не запланированы или по каким-либо причинам затруднены или невозможны, а также в случаях, когда ни в рельефе местности, ни в растительности нет каких-либо признаков погребенных объектов или они находятся под угрозой исчезновения в силу природных и техногенных процессов. При невозможности проведения раскопок на всей территории в зоне строительства такая геофизическая информация может оказаться единственным источником знаний о нераскопанной части памятника.

Предпосылками применения геофизических методов являются контрастность свойств объектов и среды, соотношение размеров объекта и глубины его залегания и уровень сигнала от объекта по сравнению с уровнем помех. Хотя глубины археологических объектов невелики, но по перечисленным выше предпосылкам применения археологическая геофизика не имеет серьезных преимуществ перед другими областями при-

менения, скорее наоборот — археологические объекты оказываются весьма трудными для изучения геофизикой. У археологической геофизики есть два преимущества: обычно эти исследования столь детальные, что передвижение по площади осуществляется очень быстро и не требует транспорта, а проверки геофизических аномалий могут быть выполнены с небольшими затратами из-за их малых глубин. Без геофизики трудоемкость археологических раскопок велика, так как часто осуществляется с огромной избыточностью, напоминая поиск иголки в стоге сена. Поэтому археологи очень заинтересованы в использовании геофизических методов, чтобы заменить сплошные раскопки выборочными.

Для изучения археологических объектов могут применяться многие геофизические и близкие к ним другие методы дистанционных исследований: аэрофотосъемка, тепловая съемка, магниторазведка, электроразведка, в том числе радарная съемка, гравиразведка, сейсморазведка и ядерно-физические методы. Хорошо зарекомендовали себя в археологии каппа-метрия (изучение магнитных свойств верхнего слоя грунта) и металлоискатели — приборы, аналогичные армейским миноискателям. Наиболее универсальными и эффективными для археологических целей являются магниторазведка и электроразведка.

Геофизические методы могут применяться для построения детальных планов погребенных объектов, поисков скоплений керамического материала, очагов, зольников, изучения рвов и валов, гончарных и металлургических печей, различных погребений: в грунтовых могилах, склепах и даже курганах. Отдельной интересной проблемой геофизики в археологии является археомагнитная датировка. Многие археологические объекты с высокой термоостаточной намагниченностью (очаги, печи, горны) «запоминают» положение магнитного поля, существовавшее во время их нагрева. Так как магнитное поле за исторический период меняло свое направление вплоть до инверсии полюсов, то определение точного положения вектора магнитного поля позволяет соотнести памятник с соответствующим этому положению поля историческим периодом. Датировка является однозначной только для некоторых исторических эпох, так как одинаковые значения элементов геомагнитного поля периодически повторяются. В палеомагнитном методе разведочной геофизики из породы, обладающей термоостаточной намагниченностью, вырезается ориентированный образец, который исследуется в лаборатории на остаточную намагниченность.

Рассмотрим несколько примеров изучения археологических памятников с помощью геофизических методов, полученных геофизической группой геологического факультета МГУ. Например, работы на некрополе Херсона (г. Севастополь) сводились к выработке оптимальной методики поиска склепов и их картированию на некрополе, занимающем склоны Песочной балки. Исследования в основном выполнялись электрозвездкой методом симметричного профилирования ($MN = 1$, $AB = 3$ и 15 м) и среднего градиента ($AB = 90$ м, $MN = 1$ м) с сетью наблюдений 1×1 м. Из выявленных аномалий более 100 можно было, разумеется с разной степенью вероятности, связать со склепами. Источниками некоторых аномалий являлись неровности рельефа и неоднородности, которые исключались по аномалиям малоразностного электропрофилеирования. Выявление наиболее вероятностного положения склепов осуществлялось с учетом строения геологического разреза.

Древние строители некрополей вырубали склепы только в определенных геологических горизонтах: рыхлых известняках, снизу и сверху ограниченных тонкими слоями очень крепких, перекристаллизованных известняков. На рис. 5.13 приведены результаты электропрофилеирования по одному из профилей. Повышенными значениями кажущихся сопротивлений (ρ_k) выделяются склепы в рыхлых известняках. К сожалению, не все аномалии ρ_k оказывались над склепами.

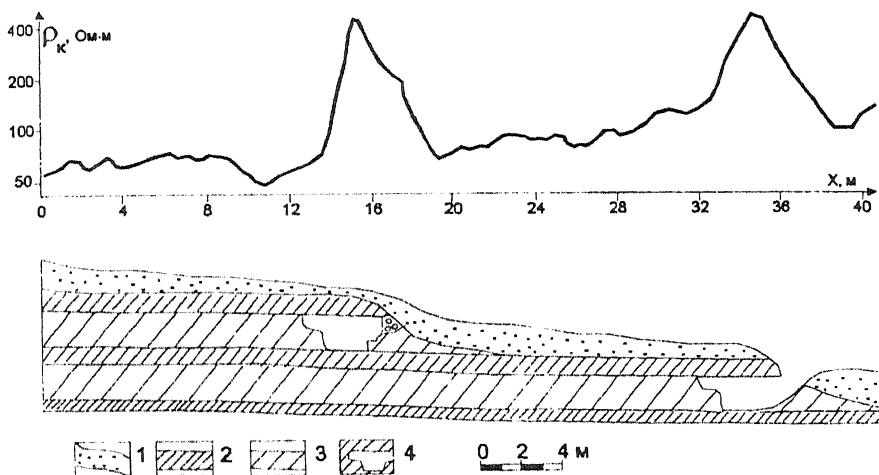


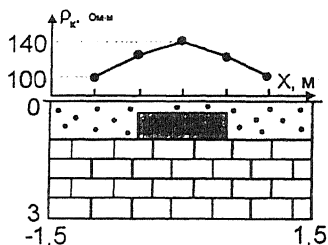
Рис. 5.13. Схема строения склона Песочной балки со склепами и идеализированный график электропроводности в крест склону: 1 — почвенный слой ($\rho_k = 30\text{—}70$ Ом·м); 2 — прослой плотных известняков ($\rho_k = 300\text{—}600$ Ом·м); 3 — рыхлые обломочные известняки ($\rho_k = 20\text{—}50$ Ом·м); 4 — склепы

Второй пример связан с исследованием древних земельных наделов Гераклейского полуострова (г. Севастополь). Земельные наделы здесь являются античным археологическим памятником мирового значения, так как только на Гераклейском полуострове они сохранились практически полностью, а их изучение служит реконструкцией древнего способа возделывания винограда и фруктовых деревьев. Такая обширная территория не может быть изучена с помощью раскопок. Поэтому эффективным средством картирования плантажных стен оказались методы геофизики.

Верхняя часть геологического разреза изучаемой территории представляет собой переслаивание различных по плотности известняков сарматского возраста. Известняки перекрыты тонким чехлом рыхлых отложений (0,2—1 м). В более плотных известняках древние земледельцы прорубали канавы, а на глинистых известняках возводили плантажные стены из бутового камня. Канавы, расположенные между стенами, засыпались землей. Стены, на которые укладывалась виноградная лоза, выступали из почвы не более чем на 10 см и накапливали атмосферную влагу. Тонкий почвенный слой в случае необходимости искусственно наращивался.

Плантажные стены шириной около 1 м возводились параллельно друг другу через расстояние примерно 5 и 2 м. Они картировались с помощью электроразведки методом электропрофилирования дипольной экваториальной установкой, которая обладает высокой чувствительностью при прослеживании высокоомных объектов, какими являются стены (см. рис. 5.14). Амплитуды выявленных линейно вытянутых аномалий оказались невелики и плохо коррелировались по профилям из-за сравнительно большого межпрофильного расстояния. Поэтому были рассчитаны модули спектров пространственных частот аномалий ρ_k с наиболее ярко выраженными гармониками с периодами

2 и 6 м. Следовательно, расстояние между осевыми линиями основных плантажных стенок может составлять, по нашему мнению, около 6 м, а система плантажа — с периодом 2 м.



1 —  2 —  3 — 

Рис. 5.14. Монтаж плантажной стены и аномалии ρ_k над ней в среде с электрическим сопротивлением: 1 — 30 Ом·м, 2 — 100 Ом·м, 3 — 30 Ом·м

Третий пример, связанный с распознаванием типов источников статистического ансамбля магнитных аномалий городища Камно, расположенного недалеко от Пскова на высоком мысе при слиянии двух истоков р.Каменки, взят из работ В.В.Глазунова (1978). Городище занимает оконечность мыса и отделено от остальной части плато валом и рвом. Остатки построек не сохранились, поскольку стены были деревянными. В жилищах размещались очаги и глинобитные печи. Для реконструкции поселения требовалось уточнить стратиграфию культурного слоя и установить количество, назначение и размещение построек в пределах городища. Изучение культурного слоя с помощью магниторазведки оказалось возможным, потому что сохранившиеся очаги и печи, в отличие от вмещающего их слоя гумуса и подстилающих коренных пород, характеризуются индивидуальным и устойчивым комплексом магнитных свойств.

Магнитная съемка производилась по сети 1×1 м с помощью магнитометра М-27. Наблюдение выполнялось на высоте 0,65 м от земной поверхности. Соблюдение специальных мер обеспечивало точность съемки, вычисленной на основании 10% контрольных наблюдений, в $\pm 2,5$ нТл.

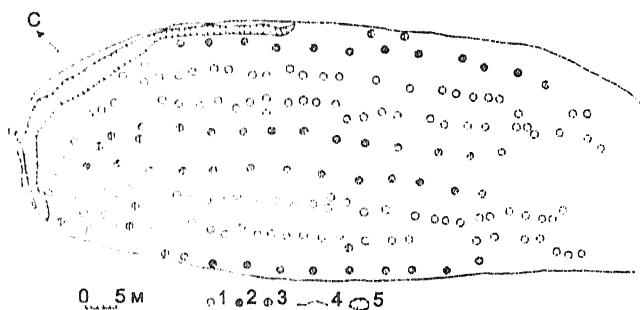


Рис. 5.15. Схематическая карта размещения очагов и печей в пределах городища Камно: 1 — очаг, 2 — печь, 3 — объект неустановленного типа, 4 — край площадки городища, 5 — траншеи и ямы по данным магнитных съемок

Аномальное магнитное поле городища складывается из совокупности однотипных аномалий (изометричных или близких к изометричным) интенсивностью 7—40 нТл (см. рис. 5.15). Локальные аномалии магнитного поля складывались из 152 почти округлых в плане аномалий, имеющих примерно одинаковую форму, интенсивность и размеры 1—1,8 м. В размещении аномалий заметна закономерность. Они объединены в ряды. Центральные ряды прямолинейны и параллельны оси площадки, периферийные

повторяют изгибы ее краев. Закономерная структура магнитного поля особенно четко проступает в средней части городища. Очаги представляли собой линзы прокаленного песка с круглой или прямоугольной оградкой из не крупного бутового камня. Остатки глинобитных печей представлены развалами обожженной глины, из которой был сооружен свод печей. В основании развалов находится вымостка из прокаленных булыжников, которые составляли под печи. Очаги являются древними сооружениями, а многие жилые постройки с печами создавались позднее. Польза от геофизических материалов во многом зависела от возможности распознавания этих объектов по аномалиям магнитного поля.

5.5.3. Техническая геофизика (изучение подземных коммуникаций). Развитая сеть подземных коммуникаций — один из признаков высокоразвитой современной цивилизации. Трубопроводы являются системами жизнеобеспечения современного общества. С начала века десятки тысяч километров различных труб и кабелей были уложены в землю на глубину до 5—6 м. Большая их часть концентрируется в городах, особенно на территории крупных промышленных предприятий. По трубам на предприятия приходит нефть и нефтепродукты, питьевая и техническая вода, вода для отопления, отводятся бытовые и промышленные стоки. Большая часть труб погружена в землю. При длительном взаимодействии труб с окружающим их грунтом возникает коррозия металла. Просадки грунта вызывают напряжения и механические деформации труб, что приводит к образованию трещин в гидроизоляции.

Из основных задач, связанных с изучением подземных коммуникаций, можно выделить следующие:

- изучение трасс под строительство трубопроводов;
- поиск труб и определение их пространственного положения;
- оценка состояния гидроизоляции труб;
- наличие корродируемых участков трубы;
- локализация мест утечек жидкого или газообразного наполнителя через повреждения в трубах.

Для защиты от коррозии применяют катодную защиту магистральных трубопроводов постоянным током низкого напряжения (около $-1,5$ В). При катодной защите на трубу подается отрицательный потенциал (катод), в то время как положительный по-

люс (анод) относится в сторону от трубы и заземляется в специальные скважины. В местах нарушения изоляции с трубы стекает электрический ток, который предохраняет трубу от коррозии. При нарушении слоя гидроизоляции коррозия сильно зависит от удельного электрического сопротивления окружающих пород. При этом чем ниже сопротивление вмещающего грунта, тем больше тока может перетекать из трубы и, следовательно, выше коррозионная опасность.

Трубы в земле имеют ограниченный срок эксплуатации порядка 25 лет. Многие из них находятся под повышенным давлением (в магистральных нефтепроводах поддерживается давление от 20 до 50 атм) и содержат опасные для человека горючие и токсичные вещества. Отклонения в состоянии трубопроводов часто приводят к авариям, которые приносят колоссальный экономический и экологический ущерб. Так или иначе для принятия инженерных решений необходимо знать реальное состояние подземных коммуникаций на данный момент. Замена труб по истечении срока эксплуатации — особенно дорогостоящая операция. При эксплуатации трубопроводов необходимы постоянные наблюдения за их состоянием, своевременное выявление различных нарушений в состоянии труб и их ремонт. Отдельная проблема — утечка воды из системы водоснабжения. Эта система труб самая разветвленная. Потери воды не представляют такой опасности, как утечки газа. В то же время чистая питьевая вода является ценным продуктом, а ее потери приводят к большим убыткам. Кроме этого избыточное увлажнение грунтов вблизи мест утечки и повышения уровня грунтовых вод приводит к так называемому подтоплению территорий. Оценки потерь воды из водопроводных сетей в разных странах осуществляются различными методами и оцениваются от 5 до 40%.

Как отмечалось выше, геофизические методы могут помочь при решении многих задач контроля состояния труб. Первая задача — это тщательное изучение трассы под строительство трубопровода, особенно в наиболее ответственных местах, например, на пересечениях рек. В последнее время переход к укладке труб под рекой осуществляется с помощью скважин наклонного бурения, которые проходят в слое с наилучшими прочностными свойствами. При изысканиях в местах переходов трубопровода через реки используется комплекс акваторных и наземных геофизических методов: речная сейсмоакустика, вертикальные (ВЭЗ) и сплошные (СЭЗ) электрические зондирования, исследования с георадаром, бурение опорных скважин на суше и на акваториях. Сейсмоакустика дает детальное послойное расчленение верхних слоев осадков в пределах

акватории. Совместно с электроразведкой это позволяет оценить литологию каждого слоя, определить степень его сохранности. Наземная и акваториальная электроразведка позволяют связать в единый разрез исследования на берегах и на акватории. На рис. 5.16 показан разрез по геофизическим данным и бурению в месте проектируемого перехода трубопровода под проект наклонного бурения для прокладки трубы под рекой.

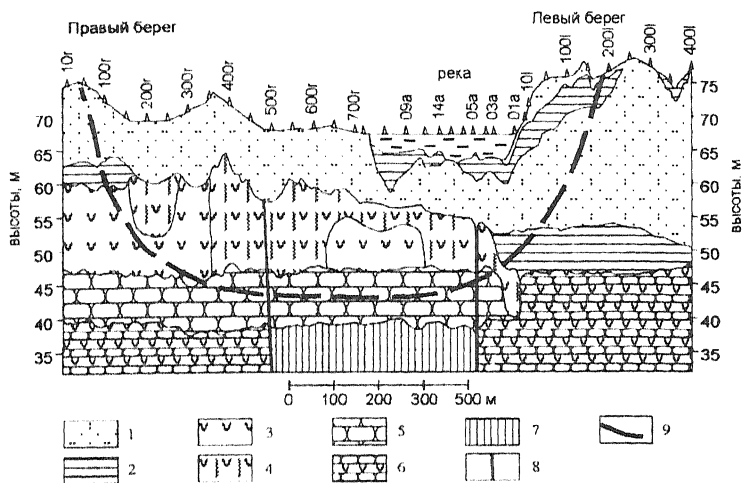


Рис. 5.16. Результаты геолого-геофизических исследований под проект наклонного бурения для прокладки трубы под рекой: 1 — пески и сунеси (20 Ом·м), 2 — глины и суглинки (12—70 Ом·м), 3 — гипсы (300—500 Ом·м), 4 — гипсы трещиноватые (100—500 Ом·м), 5 — ангидриты (160—250 Ом·м), 6 — ангидриты и гипсы (> 400 Ом·м), 7 — проводящие зоны по данным ВЭЗ (20—30 Ом·м), 8 — разломы, 9 — проектная трасса трубы

Когда укладка труб завершена, возникает ряд других задач. Одна из них — достоверное определение местоположения и глубины трубы. Фактическое местоположение может отличаться от запланированного при строительстве. Глубина может быть изменена как в процессе укладки, так и в ходе их эксплуатации. В частности, при пересечении рек труба может быть закрыта слоем рыхлых осадков или обнажаться на дне реки. Грунты, окружающие трубу на всем пути ее следования, могут быть в разной степени коррозионно-опасными. Важными задачами являются: контроль за работой катодной защиты, контроль физической изношенности трубы (например толщины стенок), обнаружение микротрещин и утечек из труб.

Среди приборов, с помощью которых обследуют трассы трубопроводов, преобладают различные модификации трассоискателей, аппаратура для измерения потенциалов катодной защиты и георадары. Комплекс методов также включает метод сопротивлений в модификациях электрических зондирований, профилирований и более сложные методы индуктивной электроразведки.

Трубы в условиях города находятся в земле, поверхность которой закрыта асфальтом. Для их изучения в подобных условиях используют бесконтактные методы электрических зондирований без гальванических заземлений на переменном токе низкой частоты.

Для поисков местоположения трубы в плане и по глубине очень удобны наблюдения с георадаром. На радарограммах труба проявляется как характерное отражение в виде опрокинутой гиперболы (см. рис. 5.17). Кроме того, для обнаружения труб можно применить несколько других геофизических методов.

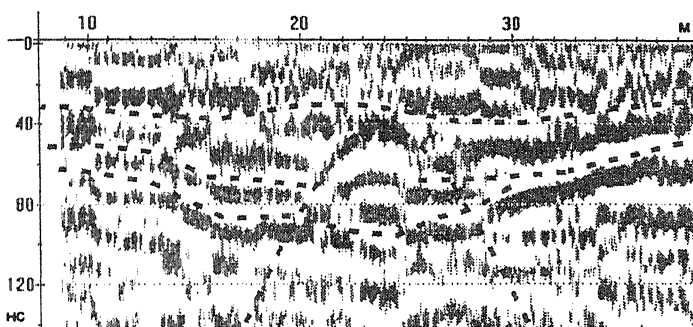


Рис. 5.17. Результаты георадарного профилирования над трубой магистрального нефтепровода, расположенного в траншее

1. Пассивное индукционное выявление положения трубы на частоте 50 Гц за счет промышленных помех, которые вызывают в трубе появление индуцированных токов, а над трубой — аномального магнитного поля. Недостаток этого метода состоит в высоком уровне помех частотой 50 Гц, поступающих от самых разных источников.

2. Если труба находится под катодной защитой, то ее обнаружение и прослеживание может выполняться с помощью магнитной антенны на частоте 100 Гц или на другой частоте, в которой проявляется труба.

3. Если к трубе удастся подключить один или два полюса питающей линии от генератора переменного тока, то прослеживание трубы можно вести с помощью магнитной антенны на соответствующей частоте.

4. Если параллельно трубе положить провод, питаемый переменным током, то возбужденную этим током трубу можно также обнаружить с помощью магнитной антенны.

За последнее время на кафедре геофизики геологического факультета МГУ накоплен большой опыт работ в этой области. Работы подкреплены исследованиями в области теории, методики и принципов интерпретации результатов наблюдений. Измерения ведутся с помощью геофизической аппаратуры «ЭРА», которая дает возможность документально визуализировать наблюдаемые поля и путем обработки перевести их в параметры, понятные эксплуатационщикам. Исследования идут в три этапа. На первом этапе ведется поиск подземных коммуникаций. На втором производится точная разметка оси трубопровода, определяется его глубина и степень нарушения гидроизоляции. Кроме этого делается оценка степени коррозионной опасности грунтов, которые поражают трубу, и ищутся места, где развиваются коррозионные процессы. На третьем этапе производится детализация полученных аномалий, обработка и интерпретация полевых данных.

Пример применения измерений постоянной составляющей потенциалов катодной защиты (ПКЗ) магистрального нефтепровода приведен на рис. 5.18.

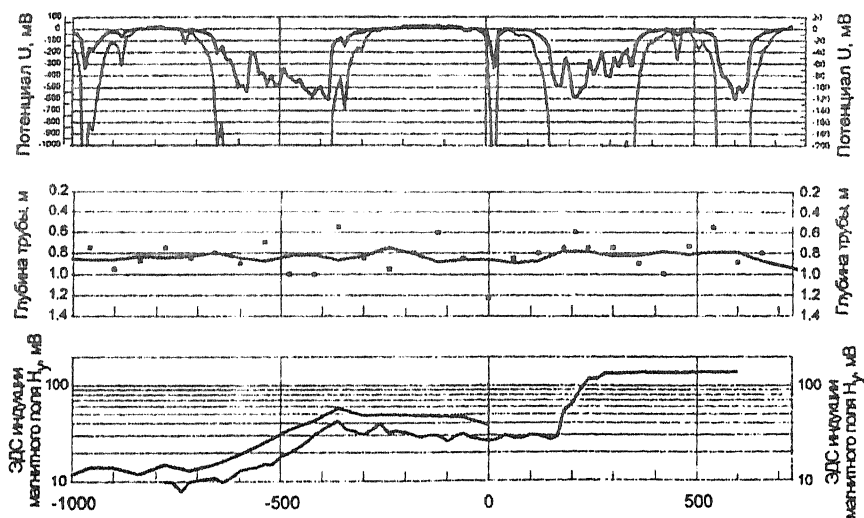


Рис. 5.18. Результаты измерения ПКЗ, глубины трубы и амплитуды H_y с магнитной антенной

Если гидроизоляция трубы идеальна, то между анодом и катодом не будет тока, а потенциал трубы не будет передаваться в окружающую среду. При нарушениях гидроизоляции в отдельных местах ток по трубе течет к местам нарушения изоляции и через них уходит в землю. Труба продолжает оставаться под отрицательным потенциалом, препятствующим коррозии, но значение потенциала передается в окружающую среду, и мы можем его измерить. Над трубой в местах нарушения изоляции появляются отрицательные аномалии потенциалов катодной защиты (ПКЗ): аномалии амплитудой до -10 мВ можно не учитывать, аномалии ПКЗ от -10 до -50 мВ соответствуют участкам слабого нарушения изоляции, участки со средними повреждениями изоляции дают аномалии от -50 до -200 мВ, а участки сильных повреждений — отрицательные аномалии ПКЗ от -200 до -1000 мВ.

Для обнаружения зон потенциально повышенной коррозионной опасности может выполняться как традиционное, так и бесконтактное электрическое профилирование (ЭП) и метод естественного электрического поля (ЕП). Участки пониженного сопротивления ЭП и интенсивных аномалий ЕП потенциально опасны с точки зрения коррозии.

ГЛАВА 6

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОФИЗИКА

6.1. Основные понятия, предмет и методы геолого-геофизических исследований в экологии

6.1.1. Экогеофизика и экогеология. Экологическая геофизика (экогеофизика) — это научно-прикладной раздел геофизики, предназначенный для решения экологических задач с целью изучения состояния и динамики взаимоотношений человека и биоты («живого вещества») с верхней частью литосферы (каменной оболочки Земли, которую совместно с подземной гидросферой называют гидролитосферой). Взаимоотношения эти устанавливаются на уровне околоземных и земных (естественных) и техногенных (искусственных) физических полей. Похожие задачи стоят и перед экологической геологией (экогеологией) — разделом геологии, изучающим взаимоотношения биосферы (оболочки Земли, где обитает биота) с верхней частью литосферы, часто называемой геологической средой. Согласно Е.М.Сергееву, под геологической средой понимается «поверхностная оболочка литосферы, находящаяся под воздействием инженерно-хозяйственной деятельности человека и, в свою очередь, в известной степени определяющая эту деятельность». Мощность геологической среды определяется глубиной, на которую распространяется производственно-техническая деятельность людей. За нее можно принять, например, максимальную глубину нефтегазовых скважин, которая по состоянию на конец XX века составляет 6—7 км.

Приповерхностная часть геологической среды мощностью в десятки, реже первые сотни метров называется верхней частью разреза (ВЧР). Она включает почвы, грунты, горные породы, поверхностные, грунтовые и подземные воды, приповерхностные физико-геологические явления (оползни, карст и т.п.), объекты человеческой деятельности. ВЧР в наибольшей степени подвержена экзогенным (атмосферным и поверхностным) и техно-

генным (физико-химическим и энергетическим) процессам, а также воздействию эндогенных (внутриземных) факторов. ВЧР характеризуется экстремальным проявлением процессов, как природных (резкой геологической, петрофизической и физической неоднородностью в пространстве и во времени), так и техногенных (максимальным проявлением всевозможных искусственных физических полей). Она является специфической частью геопространства, объектом изучения и основным источником информации, получаемой экогеофизикой об окружающей среде (*Вахромеев Г.С. Экологическая геофизика, 1995*).

Таким образом, у экогеологии и экогеофизики в сущности общий предмет исследования — геологическая среда и прежде всего ВЧР. Однако геофизики называют ее геофизической (или геолого-геофизической), подчеркивая этим то, что геологическая среда проявляется в изменяющихся в пространстве и во времени естественных и техногенных физических полях через количественно измеряемые аномалии этих полей.

Геофизическая среда, как часть литосферы, характеризуется нелинейностью и изменчивостью во времени параметров. Нелинейность проявляется в тензочувствительности (зависимости упругих параметров горных пород от давления), флюидочувствительности (зависимости упругих, электромагнитных и других параметров не только от геохимического состава твердой фазы горных пород, но и состава флюидов (вода, нефть, газ), их перемещений) и неадекватной реакции среды на внешние воздействия (*Атлас временных вариаций..., 1994*). Вариации космических полей во времени приводят как к ритмичным (упорядоченным), так и хаотичным (случайным) изменениям параметров естественных и искусственных земных физических полей и сопровождающих их процессов. Таким образом, геологическая среда зависит от физических и химических свойств, геометрических параметров твердой фазы и флюидов, а также от вариаций природных и все более возрастающих по интенсивности техногенных физических полей.

У экогеологии и экогеофизики близкие цели. По В.Т.Трофимову и др., они сводятся к выяснению таких экологических свойств и функций литосферы, как (*Теория и методология..., 1997*):

- органо-минеральные, необходимые для жизни биоты и человека;
- структурные (геодинамические) нарушения верхних частей литосферы;
- вещественные (геохимические) изменения в ВЧР;
- энергетические (полевые, физические) загрязнения окружающей человека и биоту среды.

Имеют сходство и основные решаемые задачи, которыми можно считать следующие:

1. Изучение изменений приповерхностных частей литосферы под влиянием природных и техногенных катастрофических и медленных процессов и оценка их экологических последствий.

2. Создание методов оценки экологической устойчивости литосферы и способов сохранения ее экологических функций.

3. Медико-биологическое и социально-экологическое обеспечение деятельности людей, связанной с геологической средой.

Различаются лишь методы исследований: они либо прямые геолого-геохимические, либо прямые и косвенные — физические (геофизические).

Литосфера и геологическая среда являются предметом исследований всех методов прикладной геофизики: глубинной, региональной, разведочной и инженерной, а экологические задачи в какой-то мере давно ими решаются. Однако возрастающая роль экологии в жизни людей и движения общественности за сохранение окружающей среды, как и сложность поставленных проблем, приводят к необходимости создания отдельных научно-прикладных дисциплин — экологической геологии и экологической геофизики, так же тесно связанных между собой, как и фундаментальные науки — геология и геофизика.

Главная особенность экогеологии и экогеофизики состоит в организации мониторинга, т.е. слежения за изменением состояния геологической среды с целью определения места и времени как быстрых (катастрофических), так и медленных (эволюционных) отклонений от нормального устойчивого состояния. Эти отклонения сказываются на функционировании природно-техногенных (технических) систем (ПТС), таких, например, как крупные электростанции, отдельные природно-техногенно-социальные объекты (ПТСО), хранилища ядерных отходов, и особенно природно-техногенных процессов (ПТП). К последним относятся естественные и искусственно вызванные землетрясения, горные удары, оползни, сели, взрывы и т.п.

6.1.2. Понятийная терминологическая база. В экологических дисциплинах терминологическая база неоднозначна. Она достаточно четко, по нашему мнению, упорядочена М.К.Бахтеевым в учебнике «Геоэкология» (1997) и в книге «Теория и методология экологической геологии» (1997) под редакцией В.Т.Трофимова.

Экология, возникшая как часть биологии, раньше означала науку о взаимоотношениях биоты с окружающей средой. В настоящее время такое понимание этого термина соответствует «биоэкологии». Экология в широком значении этого термина — это комплексная наука (или система наук), изучающая общие законы функционирования экосистемы и воздействие человеческой (антропогенно-техногенной) деятельности на них.

Под экосистемой, называемой также геоэкосистемой, биосистемой или биогеоценозом, понимают сообщество живых организмов (растений, животных, микроорганизмов) и окружающей среды обитания. Такое сообщество представляется нам как единое функциональное целое с разными уровнями организации от отдельных особей до всей биосферы — «живой пленки» Земли, где существует жизнь. Биосфера состоит из естественной природной среды, занимая часть атмосферы, гидросферы, литосферы, и создает искусственную антропогенно-техногенную среду, называемую социосферой. Она, в свою очередь, состоит из техносферы, включающей искусственно созданные объекты инженерно-хозяйственной деятельности людей (агломерации, сельхозугодья, а также воздухо-зайственные, транспортные, энергетические, промышленные и другие сооружения), и ноосферы (сфера разума, по В.И.Вернадскому), связанной с преобразующей ролью человеческой цивилизации. Влияние техносферы на природную среду и биосферу настолько велико, что можно говорить о биотехносфере как окружающей среде обитания человека и биоты.

Таким образом, под окружающей средой (ее называют также географической оболочкой Земли) понимаются взаимосвязанные природная среда (части атмосферы, гидросферы, литосферы), биотехносфера и социосфера. Благодаря возрастающим темпам роста населения Земли, интенсивному использованию природных ресурсов и загрязненности природной среды человечество вступило в противоречие с ней. Судьба цивилизации стоит под угрозой, если не будет преодолено нарушение естественного экологического равновесия. Поэтому экологические исследования и экологическое воспитание населения становятся актуальным видом человеческой деятельности.

6.1.3. Геологическая экология и геофизическая экология. Наряду с понятием экогеология, в географии, геологии и других науках, связанных с природоохранной деятельностью, используется термин геоэкология, в который разные авторы вкладывают свой смысл. Так, В.Т.Трофимов и др. (1997) считают геологическую экологию

(геоэкологию) «междисциплинарной наукой, изучающей состав, структуру, закономерности функционирования и эволюции естественных и антропогенных экосистем высокого уровня организации с целью сохранения жизнеобеспечения человека и жизни на Земле». В таком понимании геоэкология должна объединять исследования экологических проблем Земли, проводимые в биологии, геологии, географии, почвоведении, т.е. стать «биологией окружающей среды». В.И.Осипов и др. (1997) считают, что геоэкология — это междисциплинарное направление, объединяющее только науки о Земле, занимающиеся экологией геосфер. В этом случае она подразделяется на экологию атмосферы (метеоэкологию), гидросферы (гидроэкологию), почв (педоэкологию), литосферы (экогеологию). Согласно этим определениям геоэкология — это фундаментальная междисциплинарная наука, находящаяся на стыке ряда наук, занимающихся экологическими проблемами. Поэтому геоэкология должна базироваться на комплексировании биологической, геологической, гидрогеологической, почвенной, геохимической, геофизической информации о состоянии природных систем, а главное — использовать эту информацию для организации мониторинга. Под мониторингом понимается система повторных измерений с прогнозом, анализом, слежением за изменением в пространстве и во времени параметров природной среды с оценкой состояния биосферы и принятием рекомендаций для управленческих решений по защите биоты и человека от антропогенно-техногенного воздействия, а также контроля за их осуществлением. Главные задачи экологического мониторинга — получение объективной, по возможности, количественной информации об изменении биологических, геологических, гидрогеологических, почвенных, геохимических, геофизических параметров природной среды в глобальном, региональном и локальном масштабах. Геофизической информации, получаемой в большом количестве с помощью экспресс-методов и позволяющей создавать простые системы мониторинга, должна принадлежать большая роль, поскольку ее можно использовать во всех перечисленных научных дисциплинах. В результате комплексного геосистемного мониторинга даются оценки территорий с точки зрения их медико-санитарного состояния и возможности нормального функционирования экосистем.

Геоэкологии в геофизике должно соответствовать фундаментальное научное теоретическое направление, которое можно назвать геофизической экологией или геофизикой биотехносферы. Это направление геофизики имеет тот же ранг, что и геофизика атмо-

сферы, гидросферы и литосферы, которые вместе с физикой Земли и составляют геофизику (общую или фундаментальную геофизику).

Предметом исследования геофизической экологии являются физическое состояние и свойства, изменение в пространстве и во времени естественных (космических и земных), искусственных (антропогенно-техногенных) физических полей окружающей чело- века и биоту среды. В нее с учетом сказанного выше входят:

- природная среда (части атмосферы, литосферы, гидросферы);
- геологическая среда (почвы, грунты, горные породы и подземные воды);
- географическая среда (географические системы или природно-территориальные комплексы разного уровня организации (фации, урочища, наборы урочищ, ландшафты), взаимосвязанные в пространственно-временной организации материи на уровне ландшафтной среды Земли) (Дьяконов К.Н., 1988);

- поверхностная гидросфера (акватории рек, озер, шельфы морей и океанов);
- биосфера и техносфера (биотехносфера);
- социосфера.

Геофизическая экология как фундаментальный раздел геофизики, связанный с изучением экологических проблем физическими методами, находится в стадии формирования. Глобальный характер космических и земных физических полей (гравитационных, магнитных, электромагнитных и др.), их пространственно-временная дифференциация, косморитмичность и космокатастрофичность позволяют нам считать, что они играют главную роль в развитии Земли, литосферы, биосферы (Разработка концепции мониторинга..., 1993). Поэтому правомерность геофизической экологии (геофизики биотехносферы) не вызывает сомнения. Научно-прикладной же раздел геофизической экологии — экологическая геофизика (экогеофизика) активно развивается. В этом разделе настоящей работы рассмотрены три основных направления экогеофизики, связанных со структурными (геодинамическими) нарушениями, вещественными (геохимическими) и энергетическими (полевыми и физическими) видами загрязнения окружающей среды.

6.1.4. Особенности физико-геологических моделей в экогеофизике. Во всех рассмотренных выше прикладных методах геофизики (глубинной, региональной, разведочной и инженерной) в той или иной мере решаются экологические задачи. Их выделение в экологическую геофизику следует начать с построения физико-геологической модели

источника экономалий (ФГМЭ) (Вахромеев Г.С., 1995). Это необходимо для осмысленной постановки задач, выбора геофизических методов для их решения, а также рациональной методики работ и интерпретации получаемых данных.

Под ФГМЭ можно понимать абстрактное тело простой геометрической формы, которым можно аппроксимировать источник экономалий. Например, захороненный радиоактивный источник — это точечный источник, зона тектонического нарушения — вертикальный пласт, пленка нефтепродуктов в грунтовом потоке — горизонтальная тонкая плоскость и т.п. Источник экономалии выделяется из вмещающей среды одним или несколькими петрофизическими свойствами и излучением (созданием) физических полей. В приведенном выше примере это повышенная радиоактивность источника и аномальное гамма-поле; повышенные электропроводность, альфа-активность, магнитность, теплопроводность зоны тектонического нарушения и аномальные электрическое, радионное, магнитное, тепловые поля; пониженные значения удельного электрического сопротивления, диэлектрической проницаемости пленки нефтепродуктов. ФГМЭ, по Г.С.Вахромееву (1995), могут быть:

1) статическими (постоянными во времени, например, создаваемыми радиоактивным источником или зоной нарушения) и динамическими (переменными во времени, например, наблюдаемыми над пленкой нефтепродуктов);

2) дуальтернативными, когда геопространство делится на аномалосоздающий объект и вмещающую среду (например, в случае радиоактивного источника) и многоальтернативными, состоящими из нескольких возмущающих источников (например, в случае зон нарушений и пленки нефтепродуктов);

3) детерминированными (закономерно обусловленными и рассчитываемыми), например, радиоактивное тело, зона нарушений, и вероятностно-статистическими, например, пленка нефтепродуктов;

4) априорными, используемыми при проектировании работ и решении прямых задач, и апостериорными, которые получаются при интерпретации и решении обратных задач.

Кроме того, ФГМЭ могут быть локальными, региональными, планетарными, близповерхностными и глубинными, постоянными, низкочастотными, высокочастотными, импульсными и др. Разумеется, каждый экологический объект, исследуемый с помощью геофизики, может быть представлен несколькими ФГМЭ, постепенно меняющимися по

мере получения дополнительной информации в ходе комплексных геолого-геофизических исследований.

Экогеофизическая информация отличается высокой точностью, воспроизводимостью и экспрессностью съемок, получением большого числа параметров, возможностью проведения дистанционных и повторных измерений, разработанностью компьютерных технологий получения «пометодных» и комплексных физических параметров. Конечной целью интерпретации является использование геофизических параметров для получения тех или иных экологических, экогеохимических, экогеодинамических, экогидрогеологических и других экопараметров путем установления корреляционных связей.

Ниже рассмотрены сущность, задачи и методы геодинамического, геохимического и физического (энергетического) направлений экогеофизики.

6.2. Эколого-геофизические исследования и мониторинг геодинамических природных и техногенных процессов

6.2.1. Геодинамические природно-техногенные процессы и устойчивость геологической среды. Геодинамическими природно-техногенными процессами называют:

- извержения вулканов;
- изменения напряженного состояния горных пород, приводящие к уплотнению, разрушениям, обвалам, осыпям и другим гравитационным процессам;
- сейсмичность, обусловленную удаленными, местными естественными и техногенными землетрясениями;
- оползневые процессы и абразию берегов, вызываемые природными процессами и инженерно-технической деятельностью;
- карстовые явления, связанные с суффозией (вымыванием) рыхлых пород и растворением карбонатных пород подземными водами, возрастающими при изменении их режима под воздействием природно-техногенных факторов;
- криогенные процессы, сопровождающиеся переходом температуры пород от отрицательной к положительной и приводящие к деструкции мерзлоты, а значит, к изменению физико-механических и прочностных свойств горных пород.

Природные геодинамические процессы развиваются или в виде плавных ритмичных изменений с периодами от секунд до миллионов лет, что является признаком

«порядка» в литосфере и на Земле, или в виде катастрофических проявлений — «хаоса» [Атлас временных вариаций природных процессов, 1994]. «Порядок» и «хаос» определяются как земными, так и космическими причинами и передаются через физический вакуум. Он характеризуется безмассовой энергией высокой плотности и наличием колебаний. Сложение ритмов разной природы, например влияния Солнца, планет, Луны, может привести к резонансам, вызывающим катастрофы. Поскольку геологическая среда является неоднородной, состоящей из твердых частиц, пустот, флюидов, слоев, блоков и т.п. с разным напряженным состоянием, то ритмы и катастрофы передаются по-разному и фиксируются в породах неодинаково. А.Синяковым высказана гипотеза локальных геофизических резонансов (ЛГР), согласно которой сложение взаимодействий разных объектов Солнечной системы и космоса может быть направлено в некоторую локальную часть Земли, в «заданное» время (прошедшее и будущее). Возникший здесь ЛГР оказывает мощное воздействие на природу, технику, человека, что и приводит к природно-техногенным катастрофам, а также к нарушениям функциональной деятельности людей (оцепенение), сопутствующим техногенным катастрофам. Разработанные им алгоритмы, программы и результаты математического моделирования позволили объяснить некоторые антропогенно-техногенные катастрофы локальным геофизическим резонансом.

Современное состояние инженерно-геологических условий и прогноз их изменений под действием геодинамических природных и техногенных процессов и факторов можно охарактеризовать введенным В.Т.Трофимовым понятием устойчивости геологической среды (УГС). Под УГС следует понимать зависимость геологической среды (ГС) от состояния и скорости развития эндогенных (внутренних) и экзогенных (внешних) природных, а также техногенных процессов. Они, в свою очередь, изменяют геолого-геофизические свойства: физико-механические и деформационно-прочностные, характеризующие тензо- и виброчувствительность; водно-физические свойства, меняющие ее флюидочувствительность, и геофизические (плотность, намагниченность, электропроводность, упругие параметры, теплопроводность и др.), которыми и определяются аномалии физических полей.

Наблюдается непрерывное усиление естественных и техногенных геодинамических процессов. Плавные, эволюционные процессы приводят к отклонению состояния литосферы от оптимального, а катастрофические — к разрушению среды обитания и гибели людей.

Основными разделами геодинамической экогеофизики являются: экосейсмология, экогравитация, экогидрогеофизика, экокриология.

6.2.2. Экосейсмология. Чтобы изучить геодинамическую и особенно сейсмологическую устойчивость геологической среды, надо, прежде всего, определить ее геолого-геофизические свойства, а затем оценить динамику их изменений посредством сейсмоэкомониторинга. Физико-геологической основой сейсмоэкомониторинга является высокая тензочувствительность и флюидочувствительность границ блоков литосферы, проходящих, как правило, по тектоническим нарушениям, к эндогенным и экзогенным воздействиям, нередко обусловленным космическими и техногенными физическими полями (Разработка концепции мониторинга..., 1993).

Методика сейсмоэкомониторинга сводится к изучению деформации оснований сооружений с помощью деформографов и наклономеров, а также напряженного состояния, физико-механических и прочностных свойств среды полевыми, акваториальными и скважинными сейсмоакустическими методами. К полевым и акваториальным относятся методы преломленных (МПВ) и отраженных (МОВ) волн. При исследовании в скважинах используются методы акустического профилирования и просвечивания и микросеймокаротажа. По скоростям продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн, а также их затуханиям и рассеяниям с помощью теоретических и экспериментально установленных зависимостей можно оценить пористость, динамический модуль упругости, коэффициент крепости пород и другие параметры (см. 1.4). Для точного определения этих же параметров необходимы разномасштабные (полевые, скважинные измерения на образцах) геолого-геофизические экспериментальные работы на изучаемом участке. С их помощью устанавливаются корреляционно-регрессионные уравнения для определения физико-механических и деформационно-прочностных свойств пород через данные сейсмоакустических наблюдений (см. 5.3).

Методика сплошных съемок изучаемых площадей, кроме определения физико-механических и прочностных свойств, должна обеспечить микросейсморайонирование, предназначенное для уточнения имеющихся карт регионального сейсмического районирования с точки зрения изменения ожидаемой балльности землетрясений. Определив особенности геолого-тектонического строения разных участков: наличие зон тектонических нарушений, трещиноватости, глинистых пород с пльвунами, растепленных мерзлых

пород или, наоборот, прочного скального основания мерзлых пород, можно уточнить балльность до ± 2 баллов 12-балльной шкалы сейсмичности. Точный количественный расчет балльности проводят на стационарных или временных сейсмических станциях, где автоматически в течение длительного времени регистрируются упругие колебания разных интенсивностей и частот. Приращение балльности какого-то участка по сравнению с данными регионального сейсмического районирования свидетельствует о его меньшей устойчивости к дальним, ближним или вызванным искусственно землетрясениям. Убывание балльности указывает на наличие устойчивых к ним массивов горных пород. Вспомогательную роль при районировании территории по устойчивости к землетрясениям, обвалам и другим динамическим процессам играют гравиразведка, магниторазведка, электромагнитные профилирование и зондирование.

Если сейсмическое и микросейсмическое районирование обеспечивает прогнозирование места и балльности ожидаемых землетрясений, то предсказание времени землетрясений — проблема более сложная. Она, являясь сердцевиной сейсмомониторинга, с той или иной степенью приближения решается комплексом режимных геофизических методов:

- изучением изменений упругих параметров среды и шумов (сейсмическая эмиссия или шумовая сейсмотомография), позволяющим выявить наиболее активные участки среды, строить временные ряды наблюдаемых упругих процессов, статистическая обработка которых позволяет дать прогноз этих процессов на будущее;

- регистрацией естественных электромагнитных полей космического и земного происхождения (электрическая эмиссия), с помощью которой намечаются подходы к предсказанию землетрясений;

- анализом концентрации газов (радон, гелий, аргон и др.), проникающих из глубин за счет раскрытия трещин перед землетрясениями («газовое дыхание Земли»), и др.

В целом к прогнозу землетрясений подходят путем комплексного анализа предвестников землетрясений с учетом полевых, лабораторных, экспериментальных и теоретических работ и накопленного мирового эмпирического опыта (Разработка концепции мониторинга..., 1993). К предвестникам сильного землетрясения, как отмечалось выше, относятся аномальные деформации блоков земной коры, статистический анализ слабой сейсмичности (сейсмотомография), особый вид вариаций геомагнитных и электромагнитных полей, изменение дебита, температуры, химического состава подземных вод и

десятки других факторов. Учет множества факторов позволяет в настоящее время давать долгосрочный (на десятки лет вперед) и среднесрочный (годы и месяцы) прогнозы. Что касается краткосрочного прогноза (дни и часы), то при существующей сети наблюдений и теории сейсмологии он не проводится.

Паряду с природными существуют возбужденные землетрясения (наведенная сейсмичность). Они возникают при перераспределении упругих напряжений в геологической среде под действием антропогенно-техногенных факторов (крупные города и промышленные объекты, шахты и карьеры, водохранилища и закачка вод в скважины, подземные воды и горные удары на шахтах и т.п.). Подобные факторы могут либо сами создавать землетрясения, либо служить спусковым «крючком» для природных землетрясений.

6.2.3. Экогравитация. Экогравитация объединяет процессы механического перемещения горных пород под действием силы тяжести на склонах гор, берегах морей, озер, рек. Такие перемещения возникают как в результате экзогенной геодинамики, так и провоцируются эндогенными процессами (землетрясениями, вулканической деятельностью и т.п.) и техногенной деятельностью людей (строительство, подрезка склонов и т.п.). Наибольшее применение геофизические методы нашли при изучении оползневых процессов.

Оползни (медленные или внезапные перемещения горных пород по склонам под действием силы тяжести) являются проявлением нарушения устойчивости геологической среды и обусловлены определенной крутизной склонов, гор и прибрежных районов, литологией, обводненностью слагающих пород, наличием глин-пльвунов. Оползни могут находиться в спокойном, стабилизированном состоянии, а сдвиги провоцируются как землетрясениями, так и искусственными вибрациями от промышленных предприятий, транспорта и т.п.

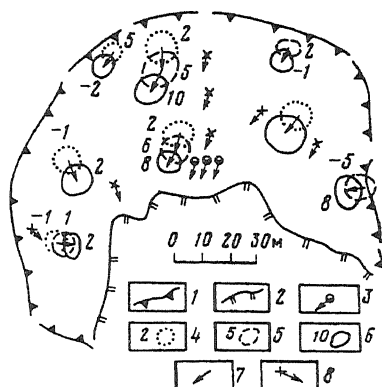
При изучении оползней перед геофизикой ставятся следующие основные задачи (см. 5.3.5):

1. Выявление структуры и геологического строения тела оползня и окружающего горного массива.
2. Изучение гидрогеологических условий как в теле оползня, так и в окружающем массиве.
3. Оценка динамики (скорости движения) оползня, изменения напряженного состояния и определение ожидаемого времени подвижек.

Геофизические свойства горных пород тела оползня по сравнению с окружающим массивом отличаются увеличением естественных электрических потенциалов, понижением удельного электрического сопротивления и скоростей распространения упругих волн, увеличением их затухания, появлением термических аномалий и др. Поэтому основными методами решения 1-й и 2-й из названных задач являются методы естественного поля (ЕП), электромагнитные зондирования (ВЭЗ, ЗСБ) и профилирования (ЭП, ДИП), сейсморазведка методом преломленных волн (МПВ), прослушивание электрических и сейсмических шумов (электрическая и сейсмическая эмиссия). Выбор одного-трех из этих методов диктуется природными (геоморфологическими и геолого-гидрогеологическими) условиями. В стабилизированном состоянии оползня геофизические параметры, получаемые при интерпретации режимных наблюдений, сохраняются постоянными. При подготовке активизации оползня они начинают заметно изменяться, что объясняется увлажнением, ростом трещиноватости и напряженного состояния, техногенными причинами (подрезка склонов, строительство на оползнях и т.п.). Это и позволяет прогнозировать время начала скольжения и предсказывать катастрофические сходы оползней. За скоростью движения оползней (задача 3) можно следить, например, по сдвиганию магнитных реперов. Для этого в тело оползня помещают ряд вертикальных труб или стержней и проводят периодические магнитные съемки. По направлению максимального смещения изолиний и по величине смещений за известное время можно рассчитать направление движения и скорость оползня.

На рис. 6.1 приводится пример изучения скорости движения одного из оползневых потоков на Черноморском побережье Кавказа с помощью магнитных реперов, установленных на различных глубинах. Кроме того, здесь же был использован принцип наблюдений за «естественными» реперами, в качестве которых выбираются неоднородности литологического строения, обводненности, напряженного состояния оползневого тела. Эти неоднородности четко фиксируются аномалиями параметров, получаемых по данным метода естественного электрического поля (ЕП). При выполнении режимных наблюдений смещение центров таких аномалий указывает направление и скорость смещения оползневых масс. Можно видеть, что результаты за «естественными» электрическими реперами хорошо согласуются с данными магнитных реперов.

Рис. 6.1. Результаты комплексных геофизических и геодезических исследований на оползне: 1 — контур стенки отвыва; 2 — граница каньона; 3 — направление смещения магнитных реперов; 4—6 — эквипотенциалы естественного поля за три последовательных периода; 7 — направление смещения аномалии ЕП; 8 — направление смещений геодезических реперов



6.2.4. Экогидрогеофизика. Экогидрогеофизика предназначена для изучения карсто-суффозионных явлений, изменения динамики и химизма подземных вод. Карстовые и суффозионные явления связаны с растворением скальных (карбонатных, гипсоносных, соленосных пород) и вымыванием рыхлых пород подземными водами. Эти явления встречаются почти на одной трети территории суши, нередко изменяя поверхностные формы рельефа. Благоприятствуют развитию карста тектоническая трещиноватость пород и ее увеличение вследствие природно-техногенных причин, интенсивное движение подземных вод и изменения гидрогеологического режима. Например, за счет подземного водоснабжения и возникающего вследствие этого понижения уровня грунтовых вод проникающие в породы загрязненные атмосферные и поверхностные воды оказываются более агрессивными и увеличивают скорость выщелачивания. В результате образуются как поверхностные карстовые формы (карстовые воронки, котловины, колодцы, шахты и т.п.), так и глубинные (подземные полости, каналы, пещеры, гроты). Часто они заполнены водой или глинистыми продуктами выветривания пород (см. 5.3).

Вследствие карсто-суффозионных процессов и явлений уменьшается устойчивость геологической среды, что приводит к катастрофическим последствиям (просадки, провалы, деформации сооружений) (см. 3.3.5).

Для изучения устойчивости геологической среды перед геофизикой ставятся следующие задачи (Огильви А.А., 1990):

1. Выделение регионов, где встречаются растворимые породы, оценка литологии и мощности перекрывающих пород, самих карстующихся пород и глубины залегания базиса коррозии, т.е. поверхности скальных пород, ниже которой закарстованности нет.

2. Изучение гидрогеологических условий: наличия водоносных и водоупорных пород, пластовых и трещинно-карстовых вод, их минерализации, динамики (скоростей движения и фильтрации).

3. Выявление трещинно-карстовых зон, отдельных карстовых форм, полостей и т.п.

4. Оценка динамики карстово-суффозионных процессов и устойчивости закарстованных территорий.

Возможность решения поставленных задач геофизическими методами определяется различием геофизических свойств закарстованных скальных пород по сравнению с теми же породами, но не затронутыми карстовыми процессами (ниже базиса коррозии), и перекрывающими, как правило, песчано-глинистыми породами. Закарстованные породы, несмотря на наличие в них полостей, заполненных воздухом, отличаются тем не менее пониженными удельными электрическими сопротивлениями и скоростями распространения упругих волн, существованием аномалий естественного электрического поля, повышением гамма-активности. Это объясняется наличием в них глинистых пород и трещинно-карстовых подземных вод, характеризующихся пониженными удельными электрическими сопротивлениями, а часто и скоростями упругих волн. Глинистые породы повышают гамма-активность, измеряемую при гамма-съемках, а трещиноватые — альфа-активность, измеряемую при эманиционной (радоновой) съемке.

Решение первой задачи производится геофизическими методами, используемыми для картирования. В условиях круто слоистых сред применяются методы гравиразведки, магниторазведки, электромагнитного профилирования (методами естественного поля (ЕП), сопротивлений (ЭП), низкочастотного (НЧП) и высокочастотного (РВП)), гамма- и эманиционные съемки. В условиях горизонтально и полого залегающих пород используются электромагнитные зондирования (вертикальные (ВЭЗ), частотные (ЧЗ) или становлением поля (ЗС) или другие), а также сейсморазведка методом преломленных (МПВ) и отраженных (МОВ) волн (см. 3.4).

Решение задач 3 и 4 проводится одиночными или режимными электромагнитными профилированиями, сейсморазведкой МПВ. С помощью скважинных геофизических исследований изучаются физические свойства горных пород вокруг скважин и между скважинами, определяются скорости движения и фильтрации подземных вод. Применение не менее двух методов, например одного электроразведочного и одного сейсмического, может дать более достоверное решение поставленных задач (см. 1.3).

В качестве примера эффективности скважинных геофизических исследований при изучении карсто-суффозионных процессов можно привести результаты режимных наблюдений на территории г.Москвы. На рис. 6.2 видно, что полости в закарстованных известняках, заполненные переложенным глинистым материалом естественных электрического ($\Delta U_{\text{ЭП}}$) и радиоактивного (J_{γ}) полей, интервального времени (Δt) по акустическим исследованиям и кажущегося сопротивления (ρ_k) по данным метода сопротивлений, отличаются заметными аномалиями. Процесс вымывания глинистого заполнителя из полостей, возникающий под влиянием интенсивной откачки подземных вод, особенно хорошо можно проследить по изменению комплексного показателя θ , рассчитанного на основании суммирования контрастностей Q_i (отношений аномалий к нормальному полю) всех измеренных геофизических параметров: $\theta = \sum_{i=1}^n |Q_i|$, где n — число методов, входящих в комплекс. В данном примере $n = 4$. График изменения значений θ , рассчитанный для серии наблюдений, выполненных в последовательные моменты времени t_1, t_2, t_3 с интервалом 3 месяца, даст возможность оценить время активизации суффозионного процесса.

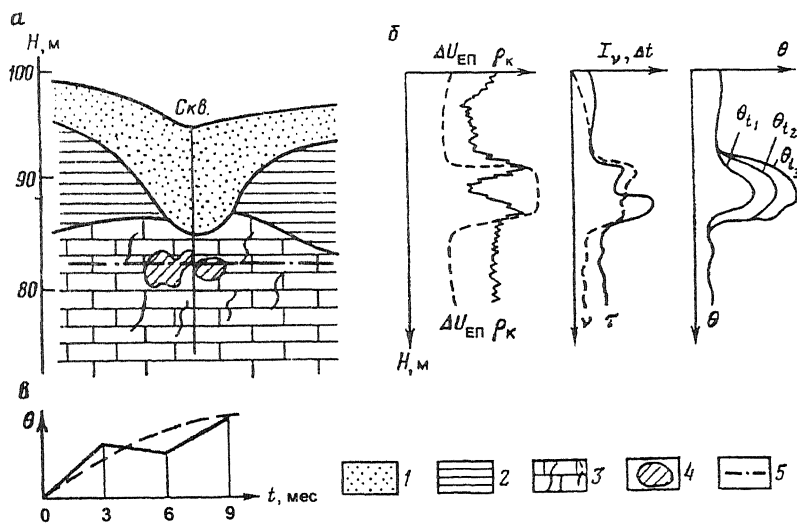


Рис. 6.2. Результаты комплексных скважинных геофизических наблюдений при изучении карсто-суффозионного процесса: *a* — геологический разрез, *b* — каротажные диаграммы и графики изменения во времени комплексного показателя $\theta = f(t)$, *в* — режим средних значений комплексного показателя θ в изучаемом интервале глубин; 1 — пески, 2 — глины, 3 — закарстованные известняки, 4 — карстовые полости, 5 — уровень грунтовых вод

Вопросы изучения динамики подземных вод, их химизма рассмотрены в 5.2. С ними тесно связаны проблемы истощения подземных вод и их загрязнения, подтопления городов, промышленных объектов, сельскохозяйственных земель (заболачивание), вторичное засоление мелиорируемых земель и др. Особенности решения этих проблем сводятся к периодическим повторениям геофизических съемок, сопоставлению с результатами опытных гидрогеологических наблюдений, получению совместных гидрогеофизических рекомендаций.

6.2.5. Экокриология. Криогенные (мерзлотно-геологические) процессы проявляются в районах распространения многолетнемерзлых пород и замерзшей воды в порых и трещинах пород. Изучение строения геологического разреза в условиях криолитозоны сводится к определению мощности деятельного слоя, который в летний период оттаивает на 1—2 м, и надмерзлотных вод; изучению строения и мощности мерзлых пород, наличия в них и под ними межмерзлотных и подмерзлотных вод; картированию поверхностных талых пород; выявлению зон термокарста, бугров пучения, наледей, зон течения мерзлых пород на склонах (солифлюкция) и каменных потоков (курумы) и других неблагоприятных криогенных процессов (см. 5.4). Для изучения этих явлений широко используются геофизические методы. Важную роль с точки зрения экологии играют периодические повторения геофизических съемок, т.е. организация экомониторинга криогенных процессов, особенно в промышленно освоенных районах.

Под воздействием инженерно-технических сооружений в районах распространения многолетнемерзлых горных пород тепловой режим постепенно нарушается, что при приближении температур к 0 °С ведет к деградации мерзлоты и протаиванию пород. По геологической устойчивости массивов горных пород мерзлые породы близки к скальным, а талые — к рыхлым. Как отмечалось выше (см. 5.4), одни и те же горные породы в мерзлом и талом состоянии различаются в 1,5—5 раз по скоростям распространения упругих волн и в 2—1000 раз по удельным электрическим сопротивлениям. В мерзлых породах эти параметры выше, чем в талых. Поэтому основными методами экомониторинга многолетнемерзлых горных пород на объектах промышленного и гражданского строительства являются сейсморазведка (чаще методом преломленных волн) и электромагнитные зондирования (чаще вертикальные электрические, частотные или радиолокационные), выполняемые в режиме периодических повторений. Обязательной является и термометрия (см. 5.4).

6.3. Эколого-геофизические исследования и мониторинг вещественного (химического) загрязнения окружающей среды

6.3.1. Природа источников загрязнений окружающей среды и особенности геофизических аномалий. Природа источников загрязнений окружающей среды и специфика экологофизических аномалий, наиболее полно рассмотренные в работе Г.С.Вахромеева «Экологическая геофизика» (1995), приводятся ниже.

Антропогенно-техногенное вещественное (или химическое, точнее геохимическое) загрязнение окружающей среды, включая геологическую среду с подземными водами и околоземную часть атмосферы, касается свыше 10% земной суши. Оно образуется за счет:

- захоронений радиоактивных отходов, а также последствий аварий и катастроф на ядерных объектах;
- отвалов горных пород вблизи шахт, рудников, называемых хвостохранилищами, где складированы продукты после обработки полезных руд;
- отходов крупных промышленных и строительных предприятий и городских агломераций (свалок);
- утечек нефтепродуктов на нефтегазовых промыслах и нефтеперегонных заводах, из трубопроводов, вблизи станций, перекачивающих нефть и газ, нефтехранилищ, складов горюче-смазочных материалов, бензоколонок и т.п.;
- сельскохозяйственной деятельности (разрыхления и засоления почв, растворения удобрений и ядохимикатов) и других источников.

Названные, как и другие, загрязнения являются, как писал В.И.Вернадский, «огромной геологообразующей силой, изменяющей на глазах условия существования биосферы».

По геометрии, изменениям во времени и составу источники антропогенно-техногенного загрязнения геологической среды и подземных вод Г.С.Вахромеев подразделяет на:

- точечные (сброс сточных вод в водоемы или скважины и др.), линейные (утечки из нефтепроводов, загрязнения вдоль дорог, каналов и др.), площадные (распашка и удобрение почв, урбанизированные территории городов, промышленные предприятия и др.). Характерно, что аномалообразующие объекты в экологофизике имеют субгоризонтальное строение, т.е. их мощность меньше ширины, длины и глубины;

- постоянные, периодические разной частоты, импульсные;
- слабые, средние и сильные по интенсивности, создающие соответственно аномалии физических полей меньшие, сравнимые и значительно превышающие природные;
- с изъятием и перемещением горных пород и без видимых изменений поверхностных условий;
- с изменением режима или химического состава подземных вод и попаданием в них не существовавших ранее геохимических элементов, например, вследствие пиритизации, окисления и др.;
- с нарушением температуры, что особенно опасно в районах распространения многолетнемерзлых пород.

В результате вещественного (механического, а в основном геохимического) загрязнения геологической среды меняются физические свойства ее верхней части. Поэтому искажаются существующие или создаются новые геофизические поля разной интенсивности и частоты.

Аномалии геофизических полей часто не совпадают с местоположением источников загрязнения вследствие миграции поллютантов (загрязняющих веществ) с воздушными массами, подземными водами, перемещением горных пород и т.п.

6.3.2. Изучение загрязнения геологической среды геофизическими методами. В результате изучения геологической среды (ГС) с помощью геофизических методов выявляются статические и динамические (изменяющиеся во времени) геофизические аномалии над источниками загрязнения. С точки зрения геофизики основными видами загрязнения ГС являются радиоактивное и геохимическое.

1. *Экорadiометрия* предназначена для выявления и изучения радиоактивных аномалий природного и техногенного происхождения. Наибольшую опасность представляют радиоактивные заражения разными радионуклидами после аварий и катастроф. Например, после аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. площадь зараженных территорий составила 10 тыс. кв. км. Для изучения распределения естественных и искусственных радионуклидов используются радиометрические методы, с помощью которых решаются различные радиозоологические задачи, а главное — осуществляется проведение радиационного мониторинга.

Основными методами экорадиометрии являются аэро- и автогамма-спектрометрические съемки, предназначенные для измерения не только суммарного гамма-излучения (J_γ) и его составляющих по урану-радию, торию и калию-40, как при геологических поисках, но и по цезию-137, кобальту-60 (см. 4.2). Это повышает надежность выявления и мониторинга техногенных радиоактивных аномалий.

Важным экорадиометрическим методом является эманационная съемка, которая сводится к оценке концентрации радона как в почвенном воздухе, так и в воздухе горных выработок и помещений ($J_{\text{рад}}$). Как известно, в воздухе, накачанном в датчик эманометра определяется концентрация радона по его альфа-излучению (см. 4.2).

Аэрогамма-спектрометрические съемки выполняются в масштабе 1:25000 с расстояниями между профилями порядка 200—300 м при высоте полета 100—300 м и скорости около 100 км/ч со спутниковой привязкой профилей и периодическим (до 2—4 раз в год) повторением. Автогамма-спектрометрические съемки проводятся в масштабах крупнее 1:25000 с неравномерно распределенными по площади маршрутами, проходящими вдоль магистралей, улиц, со скоростью движения до 15 км/ч. Для детализации выявленных аномалий выполняются пешеходные гамма-спектрометрические и эманационная съемки. Этими же методами обследуются подвалы предприятий, домов в жилых массивах, зонах отдыха, а также строительные материалы, изделия и т.п. Нормальными считаются поля с $J_\gamma < 20$ мкР/ч и $J_{\text{рад}} < 0,1$ Ек/ч.

2. Загрязнение почв, грунтов, подземных вод нефтепродуктами становится особенно частым. При проникновении нефтепродуктов в горные породы в результате непрерывных или залпových утечек они скапливаются в коллекторах (пески, трещиноватые известняки), не проникая в водоупоры (глины, скальные породы). Удельное электрическое сопротивление (ρ) нефтепродуктов высокое, но, проникая в породы, они иногда повышают, а чаще понижают ρ у тех же пород, но водонасыщенных (см. 5.2.8). Заполняя сухие породы или вытесняя из них застойные воды, нефтепродукты повышают ρ и уменьшают диэлектрическую проницаемость ε (величина ε у воды в 40 раз больше, чем у нефти). В водоносных породах с активным движением подземных вод нефтепродукты вымываются, но в ходе химического и биологического окисления разрушаются, оставляя продукты окисления (сульфиды, в частности, пирит и др.). Последние образуют электро-

лит, для которого характерны пониженные значения ρ , повышенные значения естественной (α) и вызванной (η) поляризуемости при неизменной величине ε горных пород.

В соответствии с отмеченными изменениями электрических свойств основными экоэлектроразведочными методами изучения загрязнений нефтепродуктами являются следующие:

— методы естественного поля (ЕП) и вызванной поляризации (ВП), основанные на изменении α и ε ;

— методы сопротивлений, включая электропрофилирование (ЭП), вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) и радиоволновое профилирование (РВП), зондирование (георадар или радиолокационные зондирования — РЛЗ), базирующиеся соответственно на изменении ρ и ε ;

— термометрия и инфракрасные съемки, предназначенные для расчленения пород по отличию их температур.

Выбор одного-двух из названных методов зависит от геолого-геофизических условий объектов исследований. Периодически повторяя профильные или площадные съемки этими методами, можно судить об изменении загрязненности и осуществлять прогноз (мониторинг).

Проведение электроразведки на нефтепромыслах, нефтегазохранилищах и заводах сопряжено с большими трудностями из-за невозможности проводить равномерную площадную съемку, приспособив профили к дорогам, участкам, где можно вести измерения. Большие помехи особенно на низких частотах создают металлические конструкции, линии электропередач, трубопроводы, которые, кстати, сами часто являются объектами исследования.

В пределах шельфа морей, на озерах и реках загрязнение нефтепродуктами изучается с помощью сейсмоакустических, электромагнитных и термических методов.

3. Геохимическое загрязнение почв, грунтов, коренных пород и подземных вод может быть природным, например, за счет естественных электрических полей окислительно-восстановительной природы на рудных месторождениях, и искусственным, например, твердыми отходами при разведке и эксплуатации шахт и рудников, отходами промышленного сельскохозяйственного производства, бытовыми свалками и т.п., жидкими загрязнителями при разливах нефти, нефтепродуктов, стоками от горнопромышленных предприятий, сохраняемых в отстойниках, шлакоохранилищах и др., газовыми

выбросами при эксплуатации газовых месторождений на химических производствах и др. Такого рода загрязнение приводит к изменению физических свойств пород.

Эколого-геохимическое картирование предполагаемых площадей загрязнения геологической среды различными химическими элементами и детальное исследование выявленных техногенных аномалий проводятся прежде всего в ходе геохимических съемок — литогеохимических, атомохимических (газовых), гидрогеохимических (снегохимических, биогеохимических). При их выполнении берутся пробы почв, грунтов и горных пород с поверхностных обнажений или из горных выработок, проба воздуха и воды. В лабораториях проводятся химические анализы с определением качественного и количественного состава элементов-загрязнителей. Среди них наиболее опасные: бериллий, фтор, хром, мышьяк, кадмий, ртуть, таллий, свинец и др. Густоту точек отбора проб можно резко сократить, ограничившись лишь точечными отборами проб для химических анализов, если провести съемки методами разведочной геофизики (см. 4.2). Для этого надо знать теоретические или эмпирические связи между физико-химическими свойствами изучаемой среды и геофизическими параметрами. К геофизическим методам эколого-геохимических исследований относятся: радиометрия и различные ядерно-геофизические методы (гамма-спектрометрические, нейтронно-активационные, радиоизотопные и др.), лазерная (лидарная) спектрометрия, ядерно-магнитно-резонансная спектрометрия и др. (см. 3.4, 4.2). Они обеспечивают картирование по параметру концентраций химических элементов, осуществляемое дистанционными (бесконтактными) способами, достаточно точно и экономически эффективно.

6.3.3. Комплексирование геофизических методов для изучения загрязнений геологической среды. Как и во всех областях применения геофизики, в геоэкологии эффективны лишь комплексы из нескольких методов: гравиметрические, магнитометрические, электромагнитные, сейсмоакустические, термические, ядерные с использованием четырехуровневых технологий: космической и воздушной, наземной и акваториальной, скважинной и подземной (см. гл. 1). Выбору рационального комплекса методов решения задач в определенных геолого-геофизических условиях должно предшествовать составление априорных физико-геологических моделей экосистем (ФГМЭ). Как отмечалось выше, под ФГМЭ понимается теоретически ожидаемый источник загрязнения геологической среды, который можно аппроксимировать объектом простой гео-

метрической формы (точечный или сферический, линейный или вытянутый цилиндр, площадной, например, горизонтально- или вертикально-слоистая толща и др.) с заданными отличиями петрофизических свойств от вмещающей среды и интервалом их изменения во времени. Любая ФГМЭ может быть представлена из трех составляющих: исходной петрофизической модели вмещающей среды, устойчивой (квазипостоянной) модели загрязняющего объекта (источника) и изменчивой (импульсно-периодической) модели, характеризующей изменение загрязненности и физических свойств источника во времени. Таким образом, ФГМЭ является четырехмерной (4Д) (три измерения — пространственные координаты, четвертое — время).

ФГМЭ должна быть такой, чтобы для каждого метода геофизики можно было оперативно с помощью ЭВМ решать прямые задачи при разных параметрах моделей. Это необходимо как при проектировании работ и оценке возможностей тех или иных геофизических методов, так и в ходе комплексной интерпретации, когда обратная задача решается методом сравнения наблюдаемых аномалий с расчетными.

В состав комплекса геофизических методов для изучения вещественного загрязнения геологической среды должны, по возможности, вводиться аэрокосмические, наземные, аквальные, скважинные, подземные методы разной физической природы. Одни из них должны применяться на стадии картирования территории для оценки разной чувствительности к загрязнениям и с целью нахождения источников загрязнения (аэрокосмические и наземные), другие — для изучения выявленных источников, их положения в пространстве и изменения во времени с составлением возможных прогнозов воздействия на биосферу, т.е. проводиться с целью мониторинга (наземно-аквальные и скважино-подземные методы). В качестве примера в 5.3.6 (см. рис. 5.1) приведены результаты наземной и речной электроразведки для изучения зон проникновения отходов химического завода с потоком карстово-трещинных подземных вод.

В ходе истолкования геофизических материалов проводится:

— сопоставление результатов экогеофизики с данными экогеологии, экогидрогеологии и других экологических дисциплин, для которых экогеофизика является источником экспрессной, как правило, дистанционной, легко повторяемой и обрабатываемой с помощью ЭВМ информации;

— установление одномерных или многомерных связей между геофизическими и негеофизическими параметрами и свойствами объектов исследования на основе пара-

метрических совместных наблюдений на ключевых участках и получением эмпирических, логических, эвристических количественных соотношений для определения через физические параметры статических и динамических негеофизических характеристик. Например, данные экогеофизики вместе с данными экологической геологии и геохимии могут использоваться для оценки и прогноза антропогенно-техногенного загрязнения, соответствия его предельно допустимым концентрациям (ПДК) по тем или иным нигradientам. ПДК — это максимально допустимые концентрации тех или иных веществ, опасных для здоровья людей и вредных для биосферы, устанавливаемые законодательными органами. Разработка ПДК и других предельных характеристик загрязнений экосистем далека от завершения. Полученные экогеофизикой и экогеологией данные могут служить материалом для контроля и регулировки загрязненности, храниться в банках данных для использования в будущем.

Практическим примером использования комплексных наземно-аквальных геофизических и геохимических исследований для изучения загрязнения геологической среды могут служить результаты работ, выполненных в районе одной из городских свалок г.Москвы — Кучинского полигона захоронения твердых бытовых отходов (ПЗТБО). Скопившиеся на полигоне отходы насыщены метаном, вследствие частых возгораний значительно прогреты, отличаются высокими концентрациями ряда тяжелых металлов, которые во много раз превосходят содержания в земной коре и фоновой почве (см. рис. 6.3). Свалочный фильтрат, насыщающий массив отходов, представляет собой темно-коричневую жидкость с минерализацией 10—12 г/л и высоким содержанием органики. Тяжелые металлы, установленные в результате геохимических исследований в отходах, присутствуют в повышенных концентрациях и в свалочном фильтрате. Однако ввиду большого разбавления высокие концентрации фильтрата мало сказываются на составе поверхностных вод. Исключение представляют зоны стекания фильтрата в р.Пехорку, где концентрации кадмия и нитрат-иона в 5—7 раз превышают предельно допустимые концентрации. Особенно загрязнены донные отложения рек Пехорка и Чичера в местах стекания фильтрата и ниже свалки, где их суммарный показатель загрязнения (СПЗ) превышает фоновые значения в 65—140 раз.

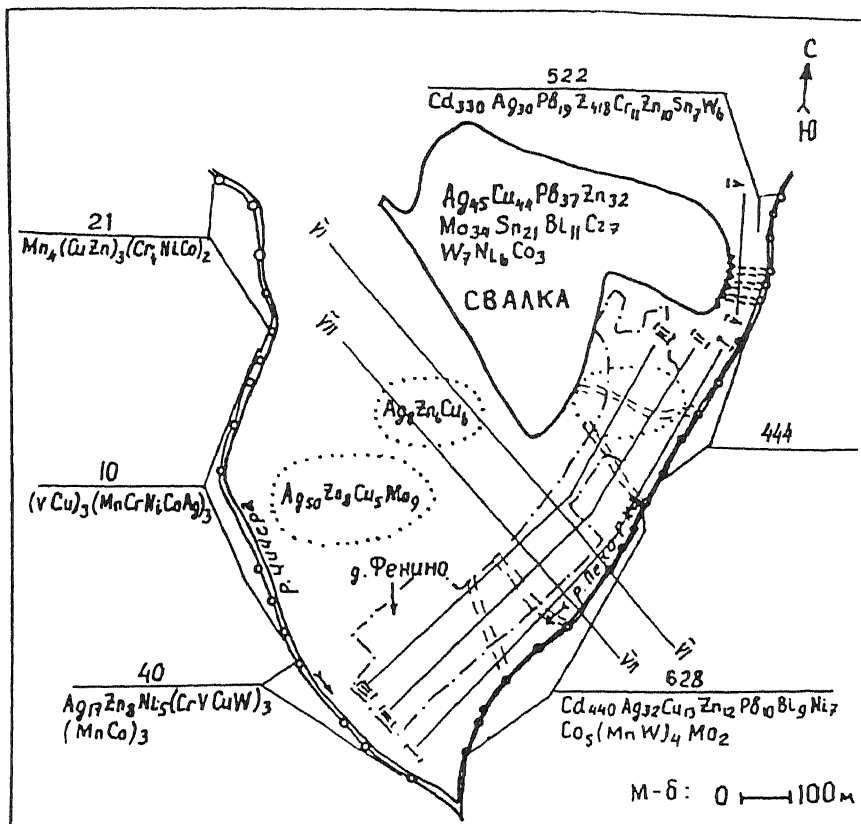


Рис. 6.3. Загрязнение тяжелыми металлами техногенных грунтов свалки, почв и донных отложений в районе ПЗТБО «Кучино»: 1 — точки отбора проб донных отложений; 2 — параметры загрязнения (в числителе — суммарный показатель загрязнения, в знаменателе — элементы загрязнения с коэффициентами относительно фоновых значений); 3 — зоны загрязнения почв с коэффициентами элементов-загрязнителей относительно фоновых значений; 4 — границы д.Фенино; 5 — зона стекания свалочного фильтрата в р.Пехорка; 6 — профили наземных геофизических наблюдений

Геофизические наблюдения выполнялись вдоль периметра свалки в окрестностях д. Фенино. Использовались наземные методы электропрофилеирования (ЭП) и зондирования (ВЭЗ) и речные методы естественного электрического поля (ЕП), термометрии, резистивиметрии. Задачей ВЭЗ являлось уточнение разреза четвертичных и мезозойских отложений, изучение его геоэлектрических и эколого-гидрогеологических параметров.

Цель ЭП — картирование загрязненных лент потока в подземных водах. Задачей речной (руслевой) геофизики было установление мест разгрузок подземных вод в руслах рек и, в частности, картирование зоны разгрузки свалочного фильтрата в р.Пехорка. Геофизические работы дополнялись данными почвенной геохимической съемки и гидрохимическо-го опробования подземных и поверхностных вод (рис. 6.3). Геофизические наблюдения позволяют выявить положение зон сосредоточенных разгрузок загрязненных грунтовых вод в русле р.Пехорки. Им соответствуют аномалии температуры придонных грунтов, пониженные значения электрических сопротивлений придонных слоев воды и горных пород на берегах, положительные аномалии ЕП, совпадающие с зонами стекающего свалочного фильтрата.

6.4. Изучение техногенного физического загрязнения¹

6.4.1. Природа техногенного физического загрязнения. Техногенное физическое (его можно также называть энергетическим или полевым) загрязнение представляет собой присутствие в окружающей среде (литосфере, атмосфере и гидросфере) дополнительно к естественным геофизическим полям физических полей, создаваемых человеком в процессе реализации современных технологий. Такие физические поля носят название техногенных (или технологических).

Техногенное физическое загрязнение, наряду с другими видами загрязнения — химическим и биологическим, играет важную роль в формировании общей геоэкологической обстановки, поскольку оказывает влияние на процессы энергетического обмена живой и неживой природы, на функционирование живых организмов и может коренным образом изменять качество окружающей среды.

Жизнь на Земле возникла в условиях абсолютного преобладающего влияния гравитационного, геомагнитного и температурного полей, к непрерывному воздействию которых живые организмы хорошо приспособились за длительное (даже в геологическом понимании) время своего существования. В настоящее время, однако, благодаря влиянию человеческой деятельности, наблюдается устойчивая тенденция к изменению энергетического баланса, к насыщению окружающей среды электромагнитными полями в широком частотном диапазоне и другими искусственно создаваемыми физическими полями. По-

¹ Автором этого раздела является А.Д.Жигалин.

этому живым организмам, в том числе и человеку, приходится приспосабливаться к новым условиям.

Техногенное физическое загрязнение наиболее характерно для территорий крупных городов, промышленных районов и других интенсивно используемых территорий. В пределах таких территорий, благодаря большому количеству производимой, преобразуемой и потребляемой энергии, возникает и устойчиво существует повышенный фон техногенных физических полей. Так, например, Москва в течение года производит в среднем $2,15 \cdot 10^{17}$ Дж энергии, что соответствует реализации мощности в $6,82 \cdot 10^3$ МВт. Это превышает мощность Братской ГЭС ($4,1 \cdot 10^3$ МВт) и сопоставимо с мощностью Красноярской ГЭС ($6,0 \cdot 10^3$ МВт).

Не будучи в состоянии воспринять полностью поступающую в избытке энергию технологических физических полей, среда часть этой энергии «расходует» на изменение свойств геологической среды, в частности на подготовку, активизацию и поддержание экзогенных геологических процессов, которые становятся, таким образом, в значительной мере техногенными. Избыточная энергия техногенных физических полей может также оказывать повреждающее и разрушающее воздействие на инженерные сооружения и коммуникации, негативным образом влиять на живые организмы и в том числе на организм человека. Таким образом, техногенное физическое (энергетическое или полевое) загрязнение можно определить как суммарный энергетический потенциал искусственно создаваемых (техногенных) физических полей, значительно превосходящий по величине потенциал естественных геофизических полей и оказывающий в силу этого негативное воздействие на окружающую среду, инженерные сооружения, живые организмы и организм человека. И в соответствии с этим техногенное физическое загрязнение можно рассматривать как результат воздействия энерговооруженного человека на окружающую среду, опосредованного через искусственно создаваемые физические поля. Воздействие это, как уже отмечалось, носит энергетический характер и этим принципиально отличается от других видов воздействия (химического и биологического), являющихся вещественными по своей сути. На рис. 6.4 представлена схема формирования общего техногенного загрязнения, одним из компонентов которого является рассматриваемое физическое загрязнение. Схема показывает, как техногенные физические поля, оказывая на окружающую среду энергетическое воздействие, вместе с химическими веществами и микроорганизмами способствуют формированию техногенного загрязнения, последствия которого проявляются в виде изменения геологической среды, деструкции (повреждения) инженерных объектов и физиологических нарушений в живых организмах.



Рис. 6.4. Формирование и последствия техногенного загрязнения среды

6.4.2. Виды техногенного физического загрязнения. Техногенное физическое загрязнение вызывается опосредованным через искусственно создаваемые физические поля воздействием человека на окружающую среду. Техногенные физические поля, о которых идет речь, представляют собой своего рода «отходы» реализуемых технологий, побочные продукты функционирования промышленных и энергетических установок, горнопроходческих комплексов, используемых при разработке месторождений полезных ископаемых, средств наземного, подземного и воздушного транспорта, коммуникационных и электропередающих линий, строительных машин и механизмов, а также агрегатов и механизмов.

обеспечивающих нормальные условия в жилых и производственных помещениях, бытовой техники.

Из всех видов техногенного физического загрязнения окружающей среды наиболее существенными с позиций оценки экологических последствий и наиболее часто встречающимися являются шумовое (акустическое), вибрационное (вынужденные механические колебания), тепловое, электрическое (блуждающие токи и атмосферное электричество), электромагнитное, а также радиационное, создаваемые полями соответствующей природы (табл. 6.1).

Таблица 6.1

Сравнительные характеристики естественных и техногенных физических полей

Вид физического поля	Единица измерения	Уровень поля			
		Фоновый	Достижимый	Санитарный предел	Технический предел
Акустическое	дБ (А)	25—30	80—120	45—60	—
Вибрационное	мм·с	0,02—0,50	0,02—16,0	0,12	0,20—0,40
Температурное	°С	от -2 до +1	от -160 до +1500	16—24*	—
Электрическое: блуждающие токи атм. электричество	мВ/м	5—10	10—1600	—	3—5
	+ион / -ион	1,15—1,2	1,0—1,5	—	—
Электромагнитное	кВ/м	10 ⁻⁶	2,5—10,0	5,0	—
Радиационное	мР/ч**	0,003—0,025	0,018	0,024	—

* Санитарные нормы для служебных и жилых помещений.

** 1 мР/ч равен 0,01 мЗв/ч.

Шумовое, или акустическое, загрязнение среды относится к категории чисто экологических факторов (прямого экологического воздействия), поскольку оказывает непосредственное и исключительное воздействие на живые организмы. Основным и повсеместным источником шума является наземный (автомобильный и железнодорожный) транспорт, хотя и другие источники, такие как воздушный транспорт, промышленные предприятия, строительные машины и механизмы, вносят свой вклад в создание шумового поля. Уровень шума, создаваемый отдельными источниками (измеряется в децибелах (дБ) — относительных единицах, показывающих превышение звукового давления над пороговым значением этого параметра, составляющим $2 \cdot 10^{-5}$ Па), может значительно

превышать санитарный уровень, установленный для жилых и производственных помещений, школ и лечебных учреждений, как это видно из табл. 6.1.

При социологических опросах в городах шум в качестве раздражающего фактора фигурирует обычно приблизительно в 80% ответов опрашиваемых. Шум вблизи городских магистралей устойчиво держится примерно 15—18 часов в сутки, затухая лишь на короткое время ночью с 2 до 4 часов. С санитарно-гигиенических позиций нормальным (по градостроительной классификации — комфортным) считается акустический режим при уровне звука 10—65 дБ и максимально дискомфортным — при уровне звука выше 80 дБ. Для нервной системы человека вреден шум, превышающий 50—60 дБ (уровень звука обычного аудиоплеера достигает 60—70 дБ). При уровне звука 80—90 дБ (железная дорога и промышленные предприятия) возможны необратимые изменения в органах слуха, а при уровне 120—140 дБ (железная дорога, реактивные авиалайнеры) — повреждения этих органов.

Вибрация, или динамическое воздействие на среду, проявляется в виде поля вынужденных механических колебаний, которые воспринимаются и передаются ею от источников к различным объектам, в том числе и к объектам живой природы. Поле вибрации создается многочисленными и разнообразными источниками, наиболее значимыми из которых являются движущиеся транспортные средства, оборудование промышленных предприятий, строительные машины и механизмы, техническое оборудование зданий и инженерных сооружений. Поле вибрации можно квалифицировать как экологический фактор двойного действия — прямого, если речь идет о непосредственном контакте с виброгенерирующими объектами, например, при пользовании железнодорожным транспортом или при работе с ручными перфораторами, и опосредованного, если непосредственный контакт с создающим вибрацию объектом отсутствует, а вибрация воспринимается через передающую среду, например, при нахождении в зданиях, расположенных недалеко от железнодорожного пути или линий метрополитена неглубокого заложения, а также на стройплощадках. Основная часть колебательной энергии от виброгенерирующих объектов-источников переносится поверхностными волнами, распространяющимися в пределах верхней части грунтовой толщи (10—15 м). В силу этого в сфере воздействия поля вибрации оказываются фундаменты зданий и инженерных сооружений, многие коммуникации.

Вибрационное загрязнение, т.е. воздействие поля вибрации непосредственно на грунтовые массивы, может приводить к изменению рельефа поверхности, снижению механической прочности пород или, наоборот, к их уплотнению и улучшению прочностных характеристик. Длительное вибрационное воздействие способно вызывать или активизировать экзогенные геологические процессы, такие, например, как оползни и обвалы на крутых склонах, карст, проседание поверхности, образование полостей в насыпях на железнодорожных магистралях и т.п. При воздействии через грунтовые массивы на фундаменты зданий вибрация может причинять им серьезный урон. Так, при виброколебаниях со скоростью перемещения частиц грунта $0,4 \cdot 10^{-3} — 1,2 \cdot 10^{-3}$ м/с могут происходить сверхнормативные осадки фундаментов, возникать повреждения в старых зданиях, а при скорости $5 \cdot 10^{-3} — 8 \cdot 10^{-3}$ м/с возможны серьезные повреждения зданий с деревянными и бетонными перекрытиями.

Оценка вибрационного воздействия с экологических позиций показывает, что виброколебания с частотой до 20 Гц и амплитудой до $0,25 \cdot 10^{-3}$ м (виброскорость до 0,01 м/с) хотя и ощутимы, но не вызывают неприятных последствий, которые имеют место при более высоких частотах и больших амплитудах. Так, при частотах 20—40 Гц и амплитудах $0,3 \cdot 10^{-3} — 0,5 \cdot 10^{-3}$ м (виброскорость до 0,04 м/с) вибрация оказывает раздражающее действие, вызывая неприятное и даже болезненное состояние организма. В табл. 6.1 показано соотношение указанных величин с параметрами поля вибрации, создаваемого различными источниками.

Тепловое загрязнение среды, вызываемое техногенным изменением температурного режима верхних слоев литосферы, в настоящее время представляет собой серьезную геоэкологическую проблему. Согласно прогнозам, уровень ежегодного прироста тепловой энергии в больших городах к 2000 году может достигнуть величины 10^{10} Дж/м².

Источниками теплового загрязнения могут служить горячие цеха и подземные газоходы металлургических предприятий, теплотрассы, сборные коллекторы, коммуникационные туннели и туннели метрополитена, обогреваемые подземные сооружения, а также сбросы горячих технологических вод в реки и открытые водоемы. С другой стороны, в качестве охладителей грунтовой толщи могут рассматриваться установки, используемые для промораживания слабых и пльвунных грунтов при строительстве, подземные хранилища сжиженного газа. Оказываемое этими источниками тепловое воздействие может быть охарактеризовано данными, приводимыми в табл. 6.1.

Концентрация большого числа источников тепловой энергии в верхних частях литосферного пространства (например, под большими городами-мегаполисами) создает предпосылки формирования так называемых тепловых куполов — прогретых объемов геологического пространства, частично или полностью охватывающих своими контурами территории мегаполисов во многих районах земного шара. В пределах территорий крупных городов на небольших глубинах (10—30 м) формируются обширные геотермические аномалии с превышением температуры над фоновой на 6—10 °С.

В регионах с сезонно промерзающими грунтами прогрев скальных и дисперсных песчано-глинистых пород до температуры от 16—20 до 150—160 °С обычно не оказывает существенного влияния на их прочностные свойства, вызывая лишь повышение фильтрующей способности и уменьшение пластичности и влагоемкости. Вместе с тем даже при умеренном нагревании пород увеличивается их агрессивность по отношению к бетону, железобетону и металлу элементов конструкций, возрастает опасность химической и биохимической грунтовой коррозии.

В регионах, где распространены многолетнемерзлые породы, температура которых варьирует от –0,6 до –4,2 °С, даже небольшие флуктуации температуры (всего на 2—3 °С) в верхних частях грунтовой толщи могут приводить к заметным изменениям прочностных и деформационных свойств грунтов, ухудшению их несущей способности.

Искусственное промораживание грунтов при строительстве в сложных гидрогеологических условиях приводит к формированию временных криолитозон (массивов мерзлых пород) шириной до нескольких метров или десятков метров. По мере оттаивания после остановки процесса искусственного охлаждения грунтовой массив постепенно восстанавливает свои качественные характеристики. Однако в период удержания грунта в замороженном состоянии возможны нарушения сложившегося до начала заморозки режима водонасыщения, массо- и теплообмена. Не исключены также негативные реакции на холод со стороны растительного мира и мира микробных сообществ.

Тепловое воздействие и воздействие холодом на грунтовую толщу способствует проявлению таких экзогенных геологических процессов, как термопросадки, термокарст, солифлюкция и деградация многолетней мерзлоты (при тепловом воздействии), а также образование наледей, морозное пучение (при воздействии холодом). В данном случае тепловое воздействие может квалифицироваться как экзогенный (и техногенный) геологический фактор.

Реальные техногенные вариации температурных полей непосредственного влияния на человеческий организм не оказывают, и в этом смысле роль теплового загрязнения как экологического фактора относительно невелика. Экологические эффекты техногенного теплового загрязнения проявляются прежде всего в особенностях взаимодействия прогретого (или замороженного) грунта с растениями и микробными сообществами, для которых грунтовая толща является средой обитания. В этом выражается прямое экологическое действие фактора теплового загрязнения. В то же время негативные проявления экзогенных геологических процессов, вызываемых техногенными изменениями температурного режима, могут ухудшать условия жизни и работы людей и даже таить в себе опасность в случаях, например, возможного коррозионного повреждения тепло- и газопроводов, канализации и т.п., и в этом выражается роль теплового загрязнения в качестве экологического фактора опосредованного воздействия.

Электрическое загрязнение среды проявляется в формировании электрического поля блуждающих токов и в перенасыщении приземного слоя атмосферы ионами (аэроионами) разной полярности и в первую очередь положительными ионами тяжелых элементов. Источниками электрического загрязнения служат промышленные предприятия, электрифицированные железные дороги, станции катодной противокоррозионной защиты. Характеристики техногенного электрического загрязнения приведены в табл. 6.1.

Воздействие блуждающих токов на различные материалы (как правило, металлы, железобетон и бетон) можно оценить по скорости электрокоррозии металла и по среднегодовым потерям несущей способности металлических и железобетонных конструкций, соотнесенных с напряженностью поля блуждающих токов. Напряженность электрического поля блуждающих токов, создаваемого различными источниками, варьирует в пределах от 10 до 1600 мВ/м, что зависит от источника, строения и состояния грунтовой толщи. При изменении напряженности поля блуждающих токов от 0,8 до 3,6 мВ/м скорость коррозии металла возрастает с 0,2 до 2,0 мм в год, а потери несущей способности металлических и железобетонных конструкций увеличиваются с 10 до 15% и с 5 до 8% соответственно. Электрическое загрязнение в виде поля блуждающих токов является опосредованно действующим экологическим фактором, поскольку прямого воздействия на живые организмы и на человека не оказывает, но способно вызывать негативные изменения коррозионной обстановки, что, в свою очередь, увеличивает

ет степень вероятности повреждения с выходом из строя подземных коммуникаций (водопроводов, газопроводов, теплотрасс, канализации и т.п.).

Атмосферное электричество является важным экологическим фактором, поскольку ионизация воздуха — одно из неперенных условий нормального развития высокоорганизованной живой материи. Ионизация воздуха предполагает, что некоторая, весьма незначительная, часть молекул газов, входящих в состав воздуха, несет положительный или отрицательный электрический заряд. В естественных условиях ионизация воздуха происходит под действием радиоактивного излучения Земли и космического и ультрафиолетового солнечного излучения. При этом на 1 м^2 земной поверхности приходится в среднем $6,7 \cdot 10^9$ элементарных зарядов, а в 1 см^3 воздуха содержится 500—700 пар ионов, среди которых преобладают положительные аэроионы. Для примера, московский воздух в 1 см^3 содержит приблизительно 1500 аэроионов обоих знаков, воздух в Сочи — около 1800, а воздух Кисловодска — примерно 3700 аэроионов.

Преобладание в воздухе ионов того или иного знака и их количественное соотношение имеет большое значение для органической жизни. Соотношение количества положительных и отрицательных аэроионов измеряется коэффициентом униполярности $q = \frac{+n}{-n}$, где n — число ионов разной полярности. Чем больше величина коэффициента униполярности, т.е. чем значительнее преобладание положительных аэроионов над отрицательными, тем менее благоприятными оказываются условия для существования живых организмов, что в первую очередь относится к человеку. Экспериментально установлено, что отрицательные аэроионы (в основном это ионы кислорода) благоприятно влияют на жизнедеятельность органического мира, тогда как положительные аэроионы в большинстве случаев оказывают негативное воздействие на биоту, а в больших концентрациях способны приносить вред. В нормальных условиях коэффициент униполярности $q \leq 1,20$. Превышение этой величины свидетельствует о неблагоприятности экологического состояния приземного слоя атмосферы. Загрязнение воздуха пылью, копотью, дымом, а также увеличение влажности воздуха уменьшают подвижность отрицательных аэроионов при сохранении подвижности положительных аэроионов. Наблюдения показывают, что в городском воздухе, особенно это заметно в пределах промышленных зон, концентрация тяжелых положительных аэроионов значительно выше, чем в пригородных лесных массивах и на территориях парков и зон отдыха в пределах городской черты. Таким образом, избыточное количество положительных аэроионов в воздухе, в большинст-

ве случаев техногенного происхождения, может квалифицироваться как техногенное электрическое загрязнение среды и рассматриваться в качестве экологического фактора прямого действия.

Электромагнитное загрязнение представляет собой весьма биологически активный экологический фактор прямого воздействия. Причиной возникновения электромагнитного загрязнения является электромагнитное излучение промышленной частоты (50 и 400 Гц), а также излучение в радиочастотном диапазоне (0,100 МГц — 300 ГГц).

Источниками электромагнитных полей промышленной частоты могут служить так называемые передаточные шины (общие токовые проводники) высоковольтных электрических трансформаторных подстанций, токонесущие провода воздушных линий электропередачи (ЛЭП), тяговые электромоторы и энергетические установки. Источники электромагнитных полей в диапазоне радиоволн — это антенны радиовещательных и телепередающих станций, излучатели специальных средств связи и радиолокационных станций, а также многие промышленные установки, лабораторные приборы и бытовая техника.

Экологическое (физиологическое) воздействие электромагнитных полей на биоту и, в частности, на организм человека обуславливается индуцированными токами, текущими через живые ткани, и индуктивным взаимодействием внешних полей с собственными электромагнитными полями, генерируемыми живыми организмами. Уровень воздействия определяется напряженностью поля, продолжительностью воздействия и состоянием подвергающегося воздействию организма. Параметры, характеризующие электромагнитное загрязнение, приведены в табл. 6.1.

Электромагнитное загрязнение и обусловленное им систематическое и продолжительное воздействие интенсивных электромагнитных полей на человеческий организм может приводить к негативным последствиям. Здоровый организм способен успешно сопротивляться внешнему воздействию энергии электромагнитных полей. Однако в тех случаях, когда организм ослаблен, сопротивляемость его воздействию электромагнитных полей заметно падает. Даже если в организме при этом и не происходит патологических изменений, при длительном воздействии электромагнитного излучения у отдельных людей могут появляться признаки повышенной утомляемости, чувства апатии или, наоборот, повышенного беспокойства, другие отклонения от нормального состояния.

Реальная опасность электромагнитного облучения полем, создаваемым высоковольтными ЛЭП или энергетическими установками, существует в непосредственной близости от них, например, в пределах полосы шириной 60—90 м под линией электропередачи или в кабине электровоза. Радио- и телепередающие антенны и другие излучатели электромагнитного поля в радиоволновом диапазоне способны оказывать воздействие на живые организмы в пределах прямой видимости на расстоянии до нескольких десятков километров, что зависит от мощности и остроты диаграммы направленности передающего устройства.

Радиационное загрязнение привлекает к себе наибольший интерес, поскольку представляет собой весьма опасный (в чем убеждает опыт нынешнего столетия) с экологических позиций фактор прямого воздействия на живые организмы. Источниками естественного радиационного поля являются космические лучи и ионизирующее излучение природных радиоактивных веществ, содержащихся в почве, горных породах и воде. К естественному радиационному фону добавляется создающее загрязнение техногенное ионизирующее излучение, поступающее в окружающую среду от новообразованных (создаваемых в процессе реализации промышленных технологий) радионуклидов, используемых строительных материалов, а также от складированных отходов атомного производства и т.п.

Космическое излучение в связи с малой мощностью дозы (до 30 мР/год; 1 мР = 0,01 Зв) как экологический фактор играет второстепенную роль. Корпускулярное ионизирующее излучение (α -излучение и β -излучение) земного, естественного и искусственного происхождения имеет ограниченный радиус действия (от нескольких сантиметров до нескольких метров) и по этой причине также играет незначительную роль в формировании радиоактивного загрязнения окружающей среды.

Существенным с экологических позиций фактором радиационного воздействия на все виды животного и растительного мира является ионизирующее электромагнитное γ -излучение, распространяющееся на большое расстояние и обладающее высокой проникающей способностью. Действие γ -излучения зависит от интенсивности источника излучения и от расстояния до него. Вблизи земной поверхности мощность дозы естественного ионизирующего излучения варьирует от 0,003 до 0,025 мР/ч. В условиях промышленно-городских агломераций этот фон может несколько увеличиваться за счет излучения строительных материалов (бутового и облицовочного камня, гранитного щебня и т.п.),

используемого бытового газа и водопроводной воды. Однако суммарная, естественная и техногенная, мощность дозы излучения, как правило, не превышает в обычных условиях (если не происходит аварийных выбросов или утечек радиоактивных материалов) санитарных норм (см. табл. 6.1).

В то же время следует отметить, что при значительной интенсивности ионизирующее излучение оказывает на живые организмы вредное, а иногда и губительное воздействие. Превышение уровня излучения над фоновым и даже просто повышение естественного фона могут приводить к генетическим изменениям в живых организмах. Так, при мощности дозы в 0,09—0,21 Р/ч происходит замедление роста растений и уменьшается видовое разнообразие животного мира. При увеличении мощности дозы до 0,42—1,67 Р/ч растительность угнетается, легко поражается насекомыми и возбудителями болезней.

Человеческий организм отличается особой чувствительностью к радиационному воздействию. Доза излучения в 400 Р приводит к тяжелой форме лучевой болезни, симптомы которой начинают проявляться уже при дозах облучения 25—100 Р. Даже при малых дозах хроническое воздействие радиоактивного загрязнения может приводить к негативным последствиям, которые обнаруживаются по прошествии большого количества времени. Для человека безопасной считается мощность дозы облучения 0,008—0,024 мР/ч (или 70—210 мР/год).

6.4.3. Оценка техногенного физического загрязнения геофизическими методами. Техногенное физическое загрязнение определяет инженерно-геологические и экологические качества окружающей среды, играющей роль вмещающей среды, основания инженерных сооружений или среды обитания. Эффективность использования геофизических методов при оценке изменений окружающей среды при наличии физического загрязнения определяется тем, в какой мере эти изменения отображаются в измеряемых геофизических параметрах. Геофизические методы при изучении техногенного физического загрязнения и оценке его воздействия на живые организмы применяются для решения следующих задач:

- определения параметров источников техногенного физического загрязнения;
- определения характеристик техногенных физических полей и размеров зон влияния источников.

При определении параметров источников техногенного физического загрязнения следует руководствоваться классификацией, в соответствии с которой источники по геометрической форме и размерам подразделяются на точечные, линейные, распределенные по площади (площадные) и объемные.

В зависимости от вида создаваемого источниками поля может варьировать число измеряемых параметров. Так, для акустического, вибрационного и электромагнитного полей измеряются обычно частотные и амплитудные характеристики, тогда как для температурного, электрического и радиационного полей проводится измерение лишь одного параметра — температуры, напряженности поля или мощности дозы ионизирующего излучения. Проведение многократных измерений в течение длительного времени позволяет получать пространственно-временные характеристики источников техногенного физического загрязнения.

Определение характеристик техногенных физических полей и размеров зон влияния источников осуществляется проведением в окрестностях этих источников геофизических наблюдений. Конфигурация сети наблюдений в пределах обследуемых территорий определяется, в первую очередь, геометрической формой и размерами источников (если они известны). В случае точечного источника наблюдения следует проводить по радиальной системе профилей с центром схождения радиусов-профилей в месте расположения источника, если оно известно. Наблюдения рекомендуется начинать с конца профиля, обращенного в сторону источника, и продолжать до тех пор, пока величины измеряемых параметров не станут сопоставимыми с их фоновыми значениями для данной территории. Расстояния между точками наблюдения на отдельных профилях следует выдерживать постоянными, но можно также и увеличивать по мере удаления от источника, поскольку скорость убывания величины измеряемого параметра уменьшается с увеличением расстояния от источника. Примером, иллюстрирующим возможный характер изменения техногенного физического поля по мере удаления от его источника, могут служить графики изменения уровня вибрационного поля, создаваемого различными источниками, в зависимости от расстояния до источников. Подобного рода графики приведены на рис. 6.5.

В случае линейного источника измерения следует проводить вдоль профилей, ориентированных в крест простираанию источника и отстоящих друг от друга на равном расстоянии. Расстояния между точками наблюдения вдоль профилей следует выбирать, руко-

водствуясь теми же соображениями, что и в случае точечного источника. Во всех случаях расстояния между отдельными профилями и точками наблюдений на них не должны быть меньше 1 см в масштабе представляемых графических материалов (графиков, карт, планов и схем).

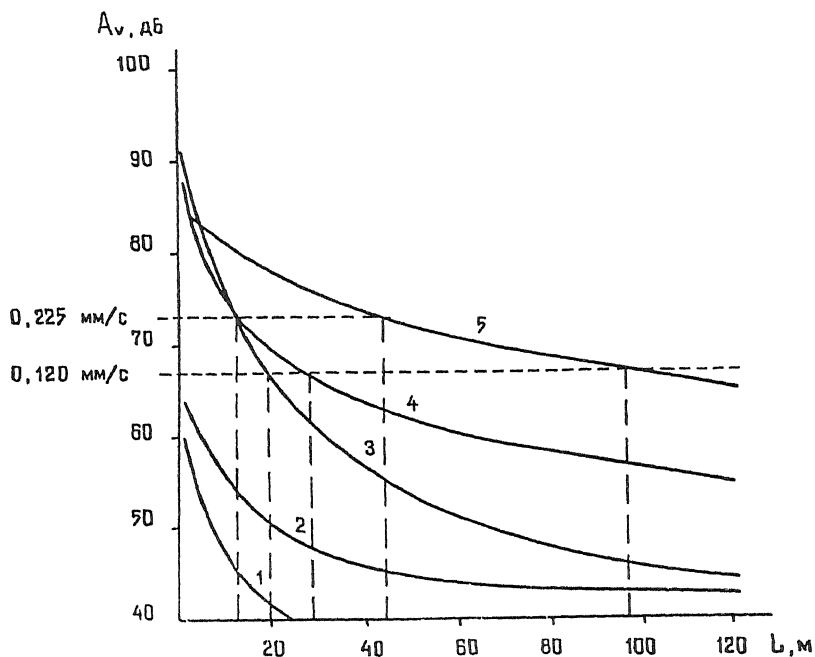


Рис. 6.5. Изменение поля вибрации, создаваемого различными источниками, при увеличении расстояния до источника: 1 — вентиляционная шахта; 2 — автомобильный транспорт; 3 — железнодорожный транспорт; 4 — трамвай; 5 — механический копер

Это значит, что если работы проводятся в масштабе 1:10000 или 1:5000, то расстояния между профилями и точками наблюдений не должны быть меньше 100 или 50 м соответственно. Исключение могут составлять лишь детализационные измерения, при которых допускаются расстояния между точками наблюдения, меньшие 1 см в масштабе представляемых графических материалов. При оценке уровня техногенного физического загрязнения, вызываемого распределенными по площади или объемными источниками, геофизические измерения следует проводить по равномерной сети наблюдений с одинаковыми расстояниями между профилями и точками наблюдений. Густота сети наблюдений определяется тем же пространственным критерием — рядовые пункты наблюдения следует располагать по отношению друг к другу не ближе 1 см в масштабе представляемых графических материалов.

Изучение характеристик техногенных физических полей проводится сейсмоакустическими, электромагнитными, термическими, радиометрическими геофизическими методами как в наземном, так и в воздушном и скважинном вариантах.

Результаты геофизических наблюдений представляются в виде графиков, показывающих изменение измеряемых параметров техногенных физических полей вдоль профилей, или в виде карт, планов и схем, отображающих пространственное изменение параметров. На картах, планах и схемах должны быть показаны все источники, создающие техногенные физические поля.

Пространственное распределение изучаемых техногенных физических полей, уровня воздействия (загрязнения) можно отображать изолиниями соответствующих параметров (уровня шума, виброскорости или виброускорения, температуры, напряженности электрического поля, коэффициента униполярности, мощности дозы ионизирующего излучения и т.д.) или посредством разделения (зонирования) исследуемой территории на участки, различающиеся по уровню техногенного физического воздействия, по степени физического загрязнения и, соответственно, по сформировавшейся экологической ситуации.

Техногенное физическое воздействие, степень вызываемого им физического загрязнения, а также создаваемая экологическая обстановка и условия жизнедеятельности людей можно оценивать посредством деления всего диапазона изменения условий на четыре категории — слабое, умеренное, сильное и опасное воздействие; низкая, средняя, высокая и очень высокая степень загрязнения; экологическая норма, экологический риск, экологический кризис и экологическое бедствие; комфортные, дискомфортные, очень дискомфортные и опасные условия для жизнедеятельности людей. Для наглядности такое деление приведено в виде таблицы (табл. 6.2), где также показана градация вызываемых физическим загрязнением изменений состояния человеческого организма от безупречного здоровья до патологии (болезни), коррелирующаяся с соответствующими оценочными геоэкологическими категориями.

В соответствии с приводимой таблицей к первой категории — слабому техногенному физическому воздействию (низкой степени техногенного физического загрязнения, экологической норме, комфортным условиям) — можно отнести такое воздействие, при котором не возникает ситуаций, выходящих за рамки естественных вариаций состояния окружающей среды и условий существования живых организмов, включая человека.

Ко второй категории — умеренному воздействию (средней степени загрязнения, экологическому риску, дискомфортным условиям) — следует относить воздействие такого уровня, при котором могут возникать заметные изменения окружающей среды и условий существования живых организмов, не требующие, однако, специальных мероприятий для устранения последствий этих изменений.

Третья категория — сильное воздействие (высокая степень загрязнения, экологический кризис, очень дискомфортные условия) — предполагает воздействие такого уровня, при котором возникающие в окружающей среде и условиях существования живых организмов изменения требуют специальных мероприятий, направленных на предотвращение негативных последствий воздействия.

Т а б л и ц а 6.2

Оценка техногенного физического загрязнения и состояния окружающей среды

Вид оценки	Категории (уровни)			
	I	II	III	IV
Техногенное физическое воздействие	слабое	умеренное	сильное	опасное
Техногенное физическое загрязнение	низкое	среднее	высокое	очень высокое
Экологическое состояние среды	экологическая норма	экологический риск	экологический кризис	экологическое бедствие
Условия жизнедеятельности человека	комфортные	дискомфортные	очень дискомфортные	опасные
Состояние здоровья человека	здоровье	напряжение	утомление	болезнь

Четвертая категория — опасное воздействие (очень высокая степень загрязнения, экологическое бедствие, опасные условия жизнедеятельности) — предполагает такой уровень воздействия, при котором возможны разрушительные и катастрофические изменения в окружающей среде, деградация и гибель представителей животного и растительного мира и в том числе патологические изменения в организме человека с самыми серьезными негативными последствиями.

В качестве граничных значений при разделении уровня воздействия или степени загрязнения окружающей среды на указанные четыре категории выбираются количественные показатели, регламентируемые действующими санитарными и техническими нормативными документами или определяемые опытным путем, которые отвечают оп-

ределенному состоянию среды, совокупности условий существования живых организмов и в первую очередь людей. Примером выбора такого рода показателей может служить разделение по уровню шумового загрязнения, вызываемого воздействием техногенного акустического поля. Так, интервал изменения уровня шума (звука) от 0 до 35 дБ соответствует слабому воздействию (низкой степени шумового загрязнения, экологической норме, комфортным условиям жизнедеятельности), интервал от 35 до 80 дБ — умеренному воздействию (средней степени шумового загрязнения, области экологического риска и дискомфортным условиям жизнедеятельности людей), интервал от 80 до 120 дБ — сильному воздействию, высокой степени шумового загрязнения, области экологического кризиса и очень дискомфортным условиям существования для человека, а интервал за пределами 120 дБ отвечает опасному воздействию, очень высокой степени шумового загрязнения, области экологического бедствия и опасным условиям с точки зрения жизнедеятельности людей. Подобным же образом могут быть выбраны граничные значения и для других видов техногенного физического загрязнения.

Результативные карты, планы и схемы могут содержать сведения, касающиеся одного какого-либо вида загрязнения (так называемые аналитические карты, планы или схемы) или совокупности видов загрязнения (синтетические карты, планы или схемы). В зависимости от цели составления подобного рода карт, планов или схем выбираются и соответствующие критерии для оценки суммарного (интегрального) техногенного физического загрязнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бахтеев М.К.* Геозкология.— Дубна: Международный университет природы, общества и человека «Дубна», 1997.
2. *Бродовой В.В.* Системные геофизические исследования рудных районов.— Известия вузов, сер. Геология и разведка, 1979, № 9; 1980.
3. *Вахромеев Г.С.* Экологическая геофизика.— Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1995.
4. *Вахромеев Г.С., Ерофеев Л.Я., Канайкин В.С., Номоконова Г.Г.* Петрофизика.— Томск: Изд-во Томского университета, 1997.
5. Геофизические методы исследования / Под ред. В.К.Хмелевского.— М.: Недра, 1988.
6. *Горбачев Ю.И.* Геофизические исследования скважин. — М.: Недра, 1990.
7. *Дьяконов К.Н.* Геофизика ландшафтов.— М.: Изд-во МГУ, 1988.
8. Комплексирование методов разведочной геофизики. Справочник геофизика.—М.: Недра, 1984.
9. Комплексные инженерно-геофизические исследования при строительстве гидротехнических сооружений.— М.: Недра, 1990.
10. *Кузнецов О.Л., Никитин А.А.* Геоинформатика.— М.: Недра, 1992.
11. *Литвинов Э.М.* Введение в морскую геофизику.— М.: Недра, 1993.
12. *Ляховицкий Ф.М., Хмелевской В.К., Яценко З.Г.* Инженерная геофизика.— М.: Недра, 1989.
13. Методы геофизики в гидрогеологии и инженерной геологии. — М.: Недра, 1985.
14. *Огильви А.А.* Основы инженерной геофизики.— М.: Недра, 1990.
15. Полевые методы гидрогеологических, инженерно-геологических, мерзлотных и инженерно-геофизических исследований.— М.: Изд-во МГУ, 1982.
16. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии / Под ред. Н.Н.Горяинова.— М.: Недра, 1992.
17. Разработка концепции мониторинга природно-техногенных систем. Т. 1, 2.— М.: Изд-во РАН, 1993.
18. *Савич А.И., Яценко З.Г.* Исследования упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами.— М.: Недра, 1979.
19. *Страхов В.Н.* О развитии геофизики в современных условиях.— Физика Земли, 1995, № 10.
20. *Тархов А.Г., Бондаренко В.М., Никитин А.А.* Комплексирование геофизических методов.—М.: Недра, 1982.
21. Теория и методология экологической геологии / Под ред. В.Т.Трофимова.— М.: Изд-во МГУ, 1997.
22. *Хмелевской В.К.* Геофизические методы исследования земной коры. Кн. 1.— Дубна: Международный университет природы, общества и человека «Дубна», 1997.
23. *Шарапанов Н.Н., Черняк Г.Я., Барон В.А.* Методика геофизических исследований при гидрогеологических съемках с целью мелиорации земель.— М.: Недра, 1974.

ХМЕЛЕВСКОЙ Виктор Казимирович

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Книга 2

Региональная, разведочная, инженерная и экологическая геофизика

Редактор: *Е.В.Калинникова*

Оригинал-макет выполнила *Г.А.Володина*

ЛР № 040863 от 16.12.97 г.

Рукопись поступила 15.06.98. Подписано в печать 07.04.99
Формат 60×90/16. Компьютерная верстка. Гарнитура «Times»

Печать офсетная. Усл.-печ. л. 11,5

Тираж 250 экз. Заказ № 51493

Международный университет природы, общества и человека «Дубна»
141980 г.Дубна, ул. Университетская, 19

Объединенный институт ядерных исследований, Издательский отдел
141980 г.Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6