

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Н. Е. ФОМЕНКО

**КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ
ИЗЫСКАНИЯХ**

Учебник

*Рекомендован Ученым советом Института наук о Земле
Южного федерального университета в качестве учебника*

Ростов-на-Дону
Издательство Южного федерального университета
2016

УДК 550.83(075.8)

ББК 26я73

Ф761

*Печатается по решению редакционно-издательского совета
Южного федерального университета
(протокол № 4 от 5 мая 2016 г.)*

Рецензенты:

ведущий научный сотрудник АО «ВНИГРИУголь»,
доктор геолого-минералогических наук *Б. И. Журбицкий*;

зав. кафедрой социально-экономической географии
и природопользования ЮФУ, доктор географических наук,
профессор *А. Д. Хованский*

Фоменко, Н. Е.

Ф761 Комплексирование геофизических методов при инженерно-экологических изысканиях : учебник / Н. Е. Фоменко ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону : Издательство Южного федерального университета, 2016. – 291 с.

ISBN 978-5-9275-2344-3

В учебнике рассмотрены основы комплексного применения геофизических методов при решении геоэкологических, инженерно-геологических и геологических задач. Приводятся краткие сведения о геофизических полях, сущности геофизических методов, использовании современной аппаратуры и программного обеспечения. Показана на множестве примеров необходимость комплексирования геофизических методов в процессе выполнения геоэкологических, инженерно-геологических и других видов геолого-разведочных работ.

Для студентов магистратуры направления подготовки 05.04.06 «Экология и природопользование».

УДК 550.83(075.8)

ББК 26я73

ISBN 978-5-9275-2344-3

© Южный федеральный университет, 2016

© Фоменко Н. Е., 2016

© Оформление. Макет. Издательство

Южного федерального университета, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
Список сокращений	6
Введение.	8
Часть 1. Сущность, разрешающая способность и особенности использования геофизических методов при решении геологических и инженерно-геоэкологических задач	15
1.1. Гравиразведка	16
1.2. Магниторазведка	28
1.3. Электроразведка	38
1.4. Сейсморазведка	65
1.5. Ядерная геофизика	89
1.6. Терморазведка	106
1.7. Геофизические методы исследования скважин (ГИС)	116
Часть 2. Комплексирование геофизических методов и комплексная интерпретация результатов геолого-геофизических исследований при решении геологических и инженерно-геоэкологических задач .	133
2.1. Основные положения комплексирования геофизических методов	134
2.2. Формирование целевого комплекса экогеофизических исследований для решения геоэкологических задач. Физико-геологическое моделирование.	142
2.3. Неоднозначность решения обратных задач в геофизике.	183
2.4. Комплексный анализ и комплексная интерпретация результатов инженерно-геофизических исследований при решении практических задач	201
2.5. Особенности исследования геологической среды в задачах инженерной и экологической геофизики	240
Заключение.	283
Основные термины и определения	284
Литература	290

Предисловие

В основу учебника положен курс лекций и практических занятий по дисциплине «Комплексирование геофизических методов при инженерно-экологических изысканиях», читаемых и проводимых автором со студентами Института наук о Земле Южного федерального университета. Структура и материал лекций соответствуют программам учебно-методического комплекса, рекомендуемым УМО для классических университетов по направлению подготовки 05.04.06 «Экология и природопользование» магистерской программы «Прикладная геоэкология».

Учебная дисциплина обеспечивает студентам магистратуры профессиональную компетенцию по разделам: 1) сущность и применение методов разведочной геофизики в геоэкологии и экологической геофизике; 2) методологические основы комплексирования, к которым отнесены физико-геологическое моделирование, изучение качественной и количественной неоднозначности геофизических методов, комплексный анализ и комплексная интерпретация геофизических данных, выбор типового, рационального и оптимального комплексов; 3) решение различных геоэкологических, инженерно-геологических и гидрогеологических задач посредством комплексного использования геофизических методов и технологий.

Объектом исследования предмета «Комплексирование геофизических методов при инженерно-экологических изысканиях» является система знаний по выбору типовых, рациональных и оптимальных комплексов геофизических методов, комплексному анализу и комплексной интерпретации геофизических данных, умению анализировать и обобщать явления и факты по изучаемой дисциплине, четко излагать полученные знания на семинарских, лабораторных и практических занятиях.

Цель изучения дисциплины – получение студентами знаний о геофизических полях и созданных на их основе геофизических методах, их сущности и необходимости комплексирования, как одного из важных направлений научно-технического прогресса в прикладной, в частности экологической, геофизике, занимающейся решением геоэкологических задач совместно с геологическими, геохимическими, гидрогеологическими, инженерно-исследовательскими и другими методами.

Настоящий учебник состоит из двух основных частей. В первой части излагаются сущность, разрешающая способность и особенности использования геофизических методов при решении геологических, геоэкологических и других задач. Во второй части рассматриваются вопросы комплексирования геофизических исследований, включающие методику выбора типового, рационального и оптимального комплексов, физико-геологическое моделирование, изучение качественной и количественной неоднозначности геофизических методов, комплексные анализ и интерпретацию геофизических данных.

В процессе написания учебника автор использовал собственные материалы, другие учебники и учебные пособия по разведочной геофизике, а также опубликованные в научных журналах и сборниках результаты комплексных геофизических исследований при решении тех или иных геологических и геоэкологических задач. Структура данного учебника и понятийная терминологическая база экологической геофизики заимствованы из учебника А. А. Никитина и В. К. Хмелевского «Комплексирование геофизических методов» (2004).

В списке литературных источников приведены только базовые учебники и учебные пособия, которые могут способствовать более глубокому освоению курса. Полные ссылки на конкретные источники рисунков и таблиц в тексте не даются – они громоздки для учебника и вряд ли актуальны, поскольку его разделы не претендуют на научные приоритеты.

Автор выражает глубокую признательность руководителю направления подготовки программы учебно-методического комплекса 05.04.06 «Экология и природопользование», магистерская программа «Прикладная геоэкология», заведующему кафедрой геоэкологии и прикладной геохимии, доктору геол.-минерал. наук, проф. В. Е. Закруткину, инициировавшему написание настоящего учебника, и старшему преподавателю этой кафедры Н. В. Коханистой, взявшей на себя труд по техническому редактированию рукописи. Особую благодарность автор приносит рецензентам учебника: ведущему научному сотруднику АО «ВНИГРИуголь», доктору геол.-минерал. наук Б. И. Журбицкому, заведующему кафедрой социально-экономической географии и природопользования, доктору геогр. наук, проф. А. Д. Хованскому – за труд по изучению книги и внесению в нее замечаний и поправок.

Список сокращений

АК – акустический каротаж
АКФ – автокорреляционная функция
АЦП – автоматический цифровой преобразователь
БК – боковой каротаж
БКЗ – боковое каротажное зондирование
ВИКИЗ – высокочастотный индукционный каротаж изопараметрических зондирований
ВКФ – взаимно-корреляционная функция
ВП – вызванная поляризация
ВСП – вертикальное сейсмическое профилирование
ВЧР – верхняя часть геологического разреза
ВЭЗ – вертикальное электромагнитное зондирование
ГИС – геофизическое исследование скважин
ГК – гамма-каротаж
ГС – геологическая среда
ДАКФ – двумерная автокорреляционная функция
ДЭЗ – дипольное электромагнитное зондирование
ДЭМП – дипольное электромагнитное профилирование
ЕИЭМПЗ – естественное импульсное электромагнитное поле Земли
ЕП – естественный потенциал
ЕРЭ – естественно-радиоактивные элементы
ЗСБ – зондирование сопротивлением поля в ближней зоне
ЗМС – зоны малых скоростей
ЗСД – зондирование сопротивлением поля в дальней зоне
ЗУ – запоминающее устройство
ИКИ – инфракрасное излучение
ИКС – инфракрасная съемка
И-П – источник-приемник
КП – комбинированное профилирование
КПК – короткопериодные колебания
КрП – круговое профилирование
КС – кажущееся сопротивление
КЭП – комбинированное электропрофилирование
МЗТ – метод заряженного тела
МОВ – метод отраженных волн
МПВ – метод преломленных волн
МПП – метод переходных процессов

МПФ – методы пространственной физической фильтрации
МПЭФ – метод пространственной электрической фильтрации
МТЗ – магнитотеллурическое зондирование
МТП – магнитотеллурическое профилирование
НК – нейтронный каротаж
ОГТ – общая глубинная точка
ОПВ – общий пункт возбуждения
ОПП – общий пункт приема
ОТВ – общая точка возбуждения
ПВ – пункт возбуждения
ПЗТВО – полигон захоронения твердых бытовых отходов
ПК – персональный компьютер
ПП – пункт приема
ПС – потенциал собственной поляризации
ПСГ – продольный срединный градиент
РЛЗ – радиолокационное зондирование
РЛП – радиолокационное профилирование
РТС – радиотепловая съемка
САТ – скважинное акустическое телевидение
СГ – срединный градиент
СПЗ – суммарный показатель загрязнения
СЭП – симметричное электропрофилирование
ТОПП – твердые отходы производства и потребления
УВ – углеводороды
УЭС – удельное электрическое сопротивление
ФГМ – физико-геологическая модель
ФГМЭ – физико-геологическая модель экосистемы
ФНВ – фильтры направленного возбуждения
ФНП – фильтры направленного приема
ЧЗ – частотное зондирование
ЭЗ – электромагнитное зондирование
ЭМИ – электромагнитные измерения
ЭМП – электромагнитное профилирование
ЭП – электропрофилирование
ЭПТЗ – электропотенциальное томографическое зондирование
ЭС – эманационная съемка

Введение

Курсы геофизических дисциплин (геофизика общая, разведочная, полевая, инженерная, гидрогеологическая, экологическая, ландшафтная и др.) читаются более чем в 70 вузах Российской Федерации студентам геологического, географического, биологического, археологического, мелиоративного и других профилей. За время возникновения и становления разведочной геофизики (более 80 лет) для ее изучения составлено не менее ста учебников, учебных пособий и методических руководств как по отдельным разделам, ставшим в то же время самостоятельными курсами, так и по дисциплине в целом. Периодичность издания и переиздания составляет в среднем пять лет. Это определенным образом связано с постоянным появлением новых прогрессивных технологий полевых, дистанционных и аквальных геофизических съемок, с разработкой современной геофизической аппаратуры и оборудования, созданием компьютерных программ обработки геофизической информации. **ведение**

По комплексированию геофизических методов к настоящему времени имеется три базовых учебника (А. Г. Тархов, В. М. Бондаренко, А. А. Никитин, 1982; В. В. Бродовой, 1991; А. А. Никитин, В. К. Хмелевской, 2004) и одно учебное пособие (Г. П. Новицкий, 1974). Эти учебники и учебное пособие предназначены для специальностей «Геофизика» и «Геофизические методы поисков месторождений полезных ископаемых» и стали в большинстве случаев библиографической редкостью. Их освоение предопределяется предшествующим изучением базовых дисциплин разведочной геофизики (грави-, магнито-, электро-, сейсмо-, терморазведки, радиометрии и ядерной геофизики, геофизических методов исследования скважин), которые студентам геологических и геоэкологических специальностей читаются в сокращенном виде в общем курсе «Геофизика». Поэтому в настоящем учебнике «Комплексирование геофизических методов для решения инженерно-геоэкологических задач», адресованном магистрантам-геоэкологам, в предельно доступной форме изложены физико-геологические основы и особенности применения методов прикладной, в особенности экологической и инженерной, геофизики, что позволяет дополнить и усовершенствовать

систему знаний, необходимых для дальнейшей производственной и научной деятельности.

Отличительная особенность данного учебника заключается в одинаковом структурировании всех разделов, начиная с описания сущности того или иного геофизического поля и созданных для изучения распределения в земной коре этих полей геофизических методов; формулировании геологических задач; изучении физико-геологических предпосылок применимости геофизических методов, оценке их геологической и экономической результативности. Такое изложение курса, по мнению автора, способствует более глубокому усвоению достаточно сложной и емкой дисциплины, какой является разведочная геофизика.

Экологическая геофизика использует все методы разведочной геофизики и является ее научно-прикладным разделом. Структуру экологической геофизики в системе других видов разведочной (прикладной) геофизики (структурная, нефтегазовая, рудная, угольная и др.) по направлениям работ и по используемым геофизическим полям можно отобразить схемой, представленной на рис. 1.

Под геофизическим полем следует понимать материальную среду, в которой определенным образом распределяются физические потоки, а именно: поле испытывает в земной коре дефор-

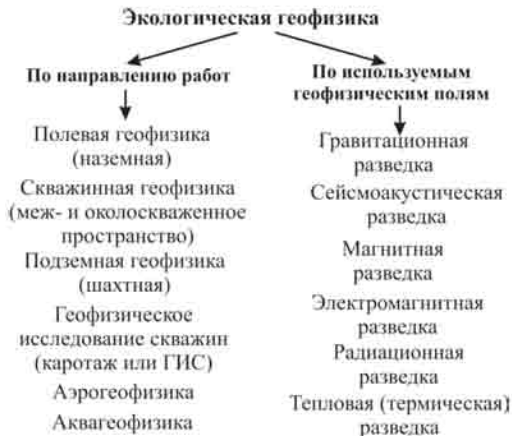


Рис. 1. Структурная схема экологической геофизики

мации (усиление или ослабление) в зависимости от физических свойств геологических объектов. Поскольку геологическая среда является гетерогенной (неоднородной), то деформация геофизических полей происходит повсеместно, и задача разведочной (в том числе экологической) геофизики, а следовательно, и всех ее разделов состоит в изучении особенностей аномальных значений поля, приуроченных к тем или иным геологическим, геоэкологическим и другим объектам.

Цель применения методов экологической геофизики – получить над исследуемым объектом аномальные значения и в дальнейшем истолковать полученную информацию. Этот процесс достаточно сложен. Поэтому система знаний экологической геофизики требует изучения таких наук, как физика, геология (литология, геохимия, структурная геология), математика, информатика, радиотехника и радиоэлектроника. Обязательно знание закономерностей изучения физических свойств пород (петрофизика).

Полный цикл геофизических исследований включает:

1) полевые геофизические наблюдения, цель которых зарегистрировать сигналы геофизических полей с соответствующей аппаратурой;

2) получение сведений и проведение измерений физических свойств горных пород;

3) решение прямой геофизической задачи (физическое или математическое моделирование);

4) решение обратной геофизической задачи с целью получения геофизического разреза или геофизической карты;

5) трансформацию геофизического разреза в геологический посредством петрофизических связей.

Таким образом, разведочную, включая экологическую, геофизику можно представить как информационно-измерительный тракт (рис. 2).

Прямая геофизическая задача – это получение теоретической кривой (графика) над объектом заданной геометрической формы с конкретными физическими параметрами. Задача решается путем математического или физического моделирования.

Обратная геофизическая задача – это интерпретация результатов полевых измерений с целью получения полного представления о геологических структурах, геометрической форме и физических свойствах изучаемого объекта. Задача решается путем

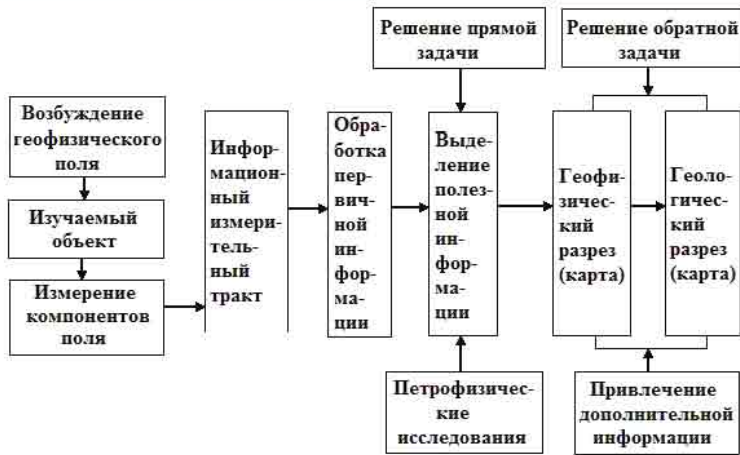


Рис. 2. Схема процесса эколого-геофизических работ

сопоставления полевых (наблюденных) кривых с теоретическими кривыми (метод подбора). При неоднозначности решения требуется комплексирование геофизических методов с привлечением дополнительных геолого-геофизических данных.

Как правило, регистрируемые геофизические параметры являются интегральными показателями изучаемой среды, где наибольший вклад в суммарное аномальное поле выполняют те объекты, которые наиболее контрастны по физическим свойствам и, соответственно, имеют большие геометрические размеры. Выявление таких локальных объектов производят специальными интерпретационными приемами. Наиболее простой способ заключается в вычитании из аномального поля нормального поля. Считается, что геологическая среда, содержащая изучаемый объект, является нормальным полем и аномалию создает только изучаемый объект.

Все геофизические поля характеризуются параметрами, основными из которых являются потенциал (U) и напряженность (E). При этом U выражает концентрацию указанных полей в той или иной точке исследования, а E (первая производная потенциала) – особенности их распределения. В нормальном поле распределение (дифференциация) E равномерная, а в аномальном происходит деформация поля, т. е. его усиление или ослабление.

Переход от параметров поля к показателям среды, которые, собственно, создают геофизические поля, т. е. к значениям физических свойств, осуществляется путем так называемых материальных уравнений. К ним относятся уравнения классических физических законов, например Ньютона, Ома, Био, Савара и др.

Изменение физических свойств горных пород связано с их различным вещественным (петрографическим) составом и с действием таких геологических факторов, как давление, температура и др. При этом горная порода, представляющая собой совокупный агрегат из минералов определенного состава, рассматривается как полифазная, многокомпонентная, термодинамическая система с присущими ей количественными физическими показателями. Типовая классификация горных пород для изучения физических показателей представлена на рис. 3.

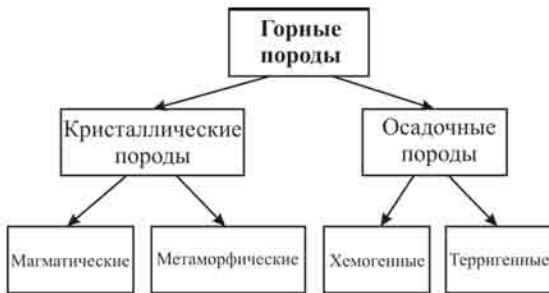


Рис. 3. Классификация горных пород для изучения физических свойств

Тенденции изменения геофизических показателей изучаемой геологической среды, таким образом, определяются ее особенностями. Для магматических пород эти тенденции удобно изучать в щелочно-земельном ряду, а для метаморфических – по стадиям метаморфизма (рис. 4).

В группе осадочных пород наиболее подвержены изменениям терригенные образования. У них под действием давления и температуры происходит большая подвижность межзерновых контактов, нежели в хемогенных породах. Основные геологические факторы, влияющие на изменение осадочных пород, это процессы окаменения (эпигенеза), которые происходят в период формирования синклинальных структур вследствие действия давления и температуры. Следовательно, на больших глубинах породы испытывают нарастающее уплотнение, притом что этот процесс не одинаков для пород, отличающихся по литологическому составу. Поэтому тенденции изменения физических показателей



Рис. 4. Схема изучения тенденций изменения физических показателей для магматических и метаморфических пород

следует рассматривать, с одной стороны, по стадиям преобразования для строго определенных литотипов, а с другой – в зависимости от литологического состава для строго конкретной стадии преобразования (рис. 5).

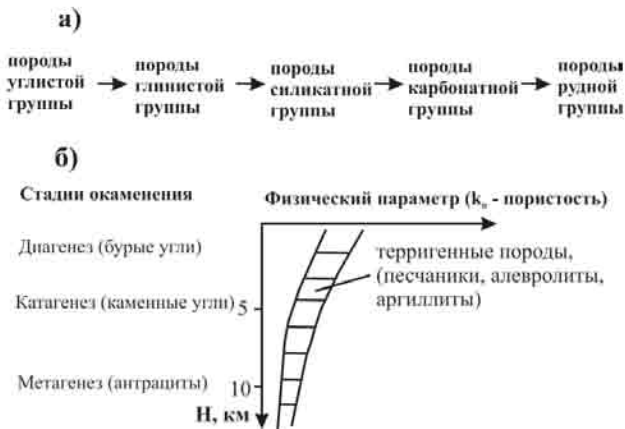


Рис. 5. Схемы изучения тенденций изменения физических свойств осадочных пород:

а) увеличение-уменьшение физического параметра в зависимости от литологического состава осадочных пород; б) то же для физических показателей в зависимости от стадий преобразования осадочных пород (на примере пористости)

Вопросы и задания для контроля самостоятельной работы

1. Дайте определение геофизики как фундаментальной и прикладной науки.
2. Объясните сущность возникновения естественных и создания искусственных геофизических полей.
3. Объясните содержание прямой и обратной геофизических задач.
4. Составьте логическую схему экологической геофизики как информационно-измерительного тракта.
5. Перечислите и объясните тенденции изменения геофизических параметров.

ЧАСТЬ 1.

**СУЩНОСТЬ, РАЗРЕШАЮЩАЯ
СПОСОБНОСТЬ И ОСОБЕННОСТИ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ
МЕТОДОВ ПРИ РЕШЕНИИ
ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ИНЖЕНЕРНО-
ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

1.1. Гравиразведка

Гравиразведка – один из основных разделов разведочной (полевой) геофизики, исследующий распределение в земной коре гравитационного поля с целью изучения ее строения, а также для решения геологических задач при поисках, оценке, разведке и эксплуатации месторождений полезных ископаемых.

Гравитационное поле – это поле силы тяжести, т. е. поле взаимодействия механических масс в материальной среде. В основе лежит закон Ньютона:

$$F = -f \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}, \quad (1)$$

где F – сила притяжения; f – постоянная гравитационного поля, равняется $6,67 \cdot 10^{-8} \text{ г}^{-1} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-2}$; m_1 и m_2 – взаимодействующие массы; r – расстояние между m_1 и m_2 .

Если m_1 считать точечной массой, а m_2 увеличить до массы Земли (рис. 6), то формула Ньютона примет вид

$$F = -f \frac{m_2}{r^2} = g', \quad (2)$$

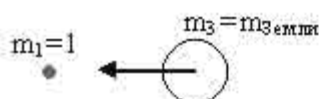


Рис. 6. Схема взаимодействия массы Земли с точечной массой

где g' – ускорение свободного падения, значение которого с учетом центробежной силы, возникающей от вращения Земли, составляет $9,81 \text{ м/с}^2$.

В гравиразведке за единицу свободного падения принят $1 \text{ мГ/г} = 10^{-3} \text{ см/с}^2$.

Основной параметр гравитационного поля, его потенциал, описывается формулой

$$U = -f \int \frac{dm}{r}, \quad (3)$$

Поскольку в прямоугольной системе координат приращение массы является произведением плотности на объем, т. е. $dm = \delta \cdot dx \cdot dy \cdot dz$, то

$$U = -f \iiint \delta \frac{dx \cdot dy \cdot dz}{r} = -f \int \delta \frac{dv}{r}. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует, что U является функцией плотности.

В гравиразведке измерения выполняются по параметру Δg_E — приращению силы тяжести в редукции Буге. Этот параметр является результирующим между аномальным $g_{аном}$ (измеренным) и нормальным $g_{норм}$ (теоретическим) значениями силы тяжести. Кроме того, в показания Δg_E вводятся поправки: 1) за свободный воздух $\Delta g_{св.возд.}$; 2) за промежуточный слой пород (толщ. пород между точкой наблюдения и поверхностью геоида), которая носит название «поправка Буге» и обозначается Δg_B ; 3) за рельеф Δg_r (рис. 7).

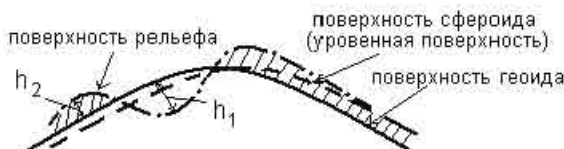


Рис. 7. Состношение урoвeнных пoверхнoстей гeоида и сфeрoида с пoверхнoстью рeльефа: h_1 , h_2 — тoлщины слoев вoздуха и пoрoд, зaлeгающих вышe пoверхнoсти гeоида

Измеренное значение силы тяжести $g_{аном}$ является частной производной от потенциала гравитационного поля в точке наблюдения:

$$g_{аном} = \frac{\partial U}{\partial r}. \quad (5)$$

Параметр $\Delta g_{норм}$ представляет собой ускорение силы тяжести Земли как сфероида малого сжатия. Последний описывается урoвeнной пoверхнoстью, близкой к гeоиду, который, в свою очередь, также является урoвeнной пoверхнoстью свободной вoды океанов.

Показатель $\Delta g_{св.возд.}$, или Δg_ϕ (Фая), учитывается в гравиметрических измерениях как поправка за слой воздуха, находящийся между точкой наблюдения и поверхностью геоида.

$$g_\phi = 0,8086h_1, \quad (6)$$

где h_1 — толщина слоя воздуха.

Параметр g_6 вводится в измеренные значения как поправка за промежуточный слой и носит еще название поправки Буге. Поправка g_6 необходима в том случае, если измерения производятся в точке, находящейся выше поверхности геоида, и, следовательно, проявляется влияние толщи пород, заключенных между поверхностью геоида и поверхностью рельефа (см. рис. 6).

$$g_6 = -0,418 \delta h_2, \quad (7)$$

где δ – средняя плотность, h_2 – толщина промежуточного слоя.

Поправка за рельеф Δg_p учитывается, если этот рельеф очень сложный, например в горной местности.

В конечном виде формула аномальной силы тяжести в редукции Буге включает разность значений наблюдаемого и теоретического полей и сумму поправок за свободный воздух, промежуточный слой и рельеф:

$$\Delta g_B = g_{\text{аном}} - g_{\text{норм}} + g_\phi + g_6 + g_p. \quad (8)$$

Как и любое геофизическое, гравитационное поле может быть измерено путем специальных приборов. В основу их функционирования положено физическое явление притяжения. Следовательно, измерения могут быть выполнены путем маятниковых наблюдений, процесса растягивания или кручения пружин и засекания времени падения грузов. Эти измерения разделяются на относительные и абсолютные. Среди них преимущество получили первые, которые более легко реализуются в практике полевых гравиразведочных работ. Абсолютные же измерения требуют очень высокой точности и могут осуществляться только в специальных обсерваториях.

Основной тип гравиметров – это **астазированные**. Общий вид и механизм их действия поясняются на рис. 8. Конструкция находится в сосуде Дьюара, чтобы максимально снизить влияние температуры воздуха, влажности, ветровых воздействий и т. д. Работа системы осуществляется таким образом, что при размещении гравиметра в точке измерения на массу m главного рычага воздействует сила притяжения. Пропорционально ей изменяется угол ϕ . Этот угол тарируется (размечается) делениями микрометрического винта. Последний регулирует действие измерительной пружины. При этом роль главной пружины заключает-

ся в поддержании равновесности рычажной системы. Диапазонная пружина предназначена для искусственного увеличения угла φ . Эта операция называется астазированием, что и предопределяет название гравиметров. Астазированием достигают высокой точности измерений (до 0,01 мГал).

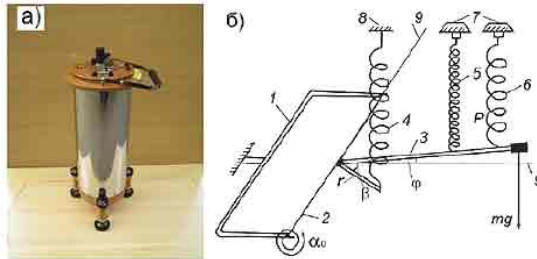


Рис. 8. Общий вид (а) и схема механизма действия астазированных гравиметров (б):

- 1 – рамка крепления нити; 2 – упругая кварцевая нить; 3 – главный рычаг с массой m , r – дополнительный рычаг, жестко связанный с главным; 4 – главная пружина; 5 – диапазонная пружина; 6 – измерительная пружина; 7 – микрометрические винты; 8 – корпус прибора; 9 – линия горизонта

Визуализация микрометрических меток осуществляется с помощью оптической системы. Последовательность работ такова (рис. 9):

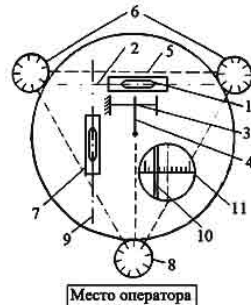


Рис. 9. Настройка уровней гравиметра ГНУ-КВ:

- 1, 2 – поперечный уровень и его ось; 3 – ось вращения рычага маятника (4); 5 – линия, соединяющая два поперечных подъемных винта (6); 7, 9 – продольный уровень и его ось; 8 – продольный подъемный винт; 10 – индекс маятника в поле зрения окуляра 11

а) устанавливают гравиметр на точке измерения и производят его горизонтирование с помощью юстировочных (подъемных) винтов: пузырек продольного уровня приводят в горизонтальное

положение вращением подъемного винта 8, а пузырек поперечного уровня – вращением винтов 6 в разные стороны;

б) подключают питание к разъемам гравиметра и совмещают блик 10 в окуляре 11 с нулевой линией внутренней шкалы путем вращения микрометричного винта измерительной системы;

в) снимают показания на отсчетном устройстве гравиметра, учитывая, что на диске 1 снимаются целые обороты микровинта

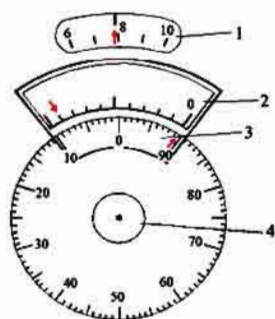


Рис. 10. Отсчетное устройство гравиметра



Рис. 11. Гравиметр CG-5 AutoGrav

относительно отсчетного (основного) диска 3, соединенного с микровинтом 4 (рис. 10). По шкале диска 3 считываются десятые и сотые доли оборота микровинта. Отсчетным индексом является нулевой штрих диска-нониуса 2. Например, если нулевой штрих диска-нониуса 2 расположен между 90-м и 91-м штрихом основной шкалы, то следует записать 90 сотых, а тысячные доли отсчитываются в направлении против часовой стрелки по штриху нониуса, совпавшему со штрихом диска 3. На рис. 9 отсчет по гравиметру равен 7,909 оборота.

Наряду с отечественными астазировавшими гравиметрами используются и зарубежные гравиметры Scintrex CG-5 Autograv, причем совместно с геодезической аппаратурой, включающей дифференциальные приемники Trimble GNSS R8 и тахеометры Trimble M3 DR. Это позволяет производить определение аномалий поля силы тяжести в редукции Буге с точностью 3–5 мкГал, что необходимо для решения многих геоэкологических, инженерных и геотехнических задач. На рис. 11 показан внешний вид гравиметра CG-5 AutoGrav. Чрезвычайно важной особенностью этого типа гравиметров является автоматическая коррекция шумов, позволяющая реализовать

требуемую точность измерений в условиях городских сейсмических помех.

Параметры силы притяжения Δg_x при их измерениях в исследуемых районах зависят прежде всего от плотностных характеристик пород геологического разреза.

Плотность горных пород

Плотность δ_n — это физический показатель, определяемый отношением массы (m) к объему (V):

$$\delta_n = m/V. \quad (9)$$

Единица измерения δ_n в системе СИ — $\text{кг/м}^3 \times 10^3$. Внесистемная единица — г/см^3 .

Плотность дистиллированной воды составляет $1,01 \text{ г/см}^3$, а у нефти она изменяется от $1,3$ до $1,5 \text{ г/см}^3$. При увеличении степени минерализации плотность воды возрастает.

Воздух, газо-воздушные смеси и чистые газы (метан, пентан и др.) имеют плотность $\delta_n < 0,001 \text{ г/см}^3$.

У магматических пород щелочноземельного ряда наблюдается увеличение плотности от кислых к ультраосновным, а у метаморфических пород одноименного минерального состава имеет место та же тенденция по мере возрастания степени метаморфизма (рис. 12).

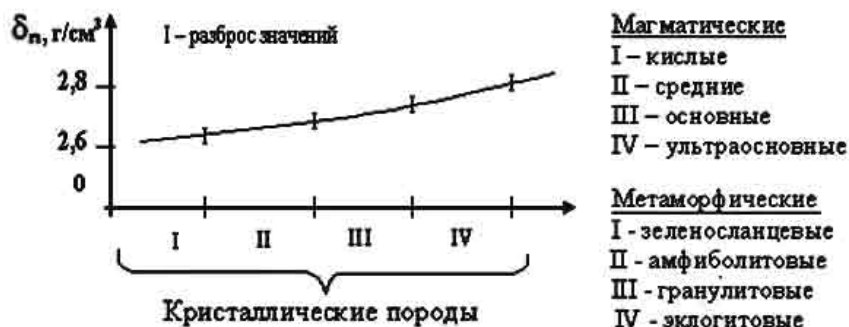


Рис. 12. Тенденция изменения плотности магматических и метаморфических пород

Для осадочных пород в пределах одноименных стадий литогенеза тенденция изменения плотности определяется вещественно-петрографическим составом и соответствует изменению $\delta_{\text{л}}$ твердой фазы (рис. 13).



Рис. 13. Тенденция изменения плотности осадочных пород при одинаковой степени их преобразования (окаменения)

В пределах отдельных групп осадочных пород проявляется тенденция увеличения $\delta_{\text{л}}$ в зависимости от стадий их преобразования (литогенеза) (рис. 14).

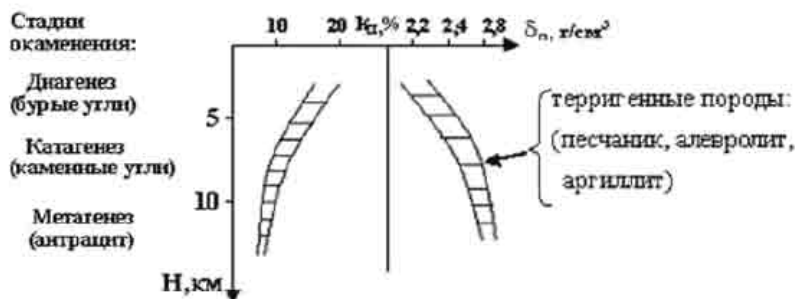


Рис. 14. Тенденция изменения плотности осадочных пород для одноименных литологических разностей в зависимости от стадий их преобразования

Методика проведения гравиразведочных работ включает:

- 1) выбор вида и характера съемки;
- 2) топографическую разбивку участка работ;

3) порядок и последовательность гравиметрических измерений;
4) первичную обработку и последующую качественную и количественную интерпретацию исходных материалов.

Основной вид гравиметрической съемки – это полевая съемка, предусматривающая измерения параметра Δg_E на заданной площади по системам профилей. Первично производится сбор априорных данных о предполагаемом геологическом объекте, а затем уже выполняется ориентация геофизических профилей. Предполагаемый объект должен пересекаться не менее чем 3–4 профилями. Расстояние между профилями определяется масштабом съемки. Например, при расстоянии в 1 км масштаб будет равен 1:100 000. Соответственно, расстояние между точками на профиле должно быть не меньше расстояния между профилями (рис. 15).



Рис. 15. Пример расположения геофизических профилей при гравитационной съемке:

1 – профили; 2–4 – рядовые, опорные и контрольные точки наблюдения;

5 – предполагаемое простирание искомого геологического объекта;

6 – изоаномалы Δg_E .

После разметки всех точек среди них определяются контрольные и опорные. Контрольные точки составляют $\approx 10\%$, а опорные $\approx 10\text{--}15\%$. Их распределение должно быть равномерным по площадке. Конкретные измерения на опорных точках необходимы для характеристики процесса сползания нуля гравиметра, обусловленного кручениями кварцевой нити за счет атмосферных явлений. Размещение опорных точек должно производиться в знаковых (реперных) местах. При топографической разбивке участка съемки осуществляется геодезическая привязка всех точек, причем опорные точки обязательно привязываются к государственной геодезической сети 3-го или 2-го класса по системе замкнутых полигонов. Опорные точки являются реперными, т. е. служат для увязки измерений на рядовых точках. Для определения значений в опорных точках осуществляется разброс невязок по формуле

$$\varepsilon_{\text{опор}} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i^2}{m-n}}, \quad (10)$$

где $\varepsilon_{\text{опор}}$ – средняя квадратичная погрешность полигона опорных точек; δ_i – разность основных и контрольных измерений; m – общее количество точек; n – количество контрольных точек.

Интерпретация гравиметрических данных разделяется на качественную и количественную.

Качественная интерпретация предусматривает выявление общей геологической ситуации, в результате которой геологам даются сведения о местоположении, приблизительных геометрических параметрах и природе геологических образований. То есть по построенным планам графиков или картам устанавливается геологическая природа гравитационных аномалий, оценивается местоположение изучаемых объектов.

Количественная интерпретация – суть решения обратных задач гравиметрии. Используются варианты решения прямых задач с привлечением априорных геолого-геофизических данных. Это необходимо ввиду того, что решение обратных задач может быть неоднозначно, поскольку разные по литологическому составу породы могут иметь одинаковую плотность. В то же время одинаковые по величине гравитационные аномалии могут быть получены от геологических образований, расположенных на различных глубинах, если объекты имеют неодинаковую плотность. Количественная интерпретация предусматривает сопоставление

теоретических и наблюдаемых кривых. Этот классический прием в разведочной геофизике носит название способа подбора. Он осуществляется как в ручном, так и в автоматизированном режиме. Разработаны программы для 1D-, 2D-, 3D-моделей геологической среды. Интерпретация носит название *D-инверсии*.

Конечным результатом количественной интерпретации является определение формы, размеров, глубины залегания и пространственного положения объектов. При этом обязательно определение их плотностных характеристик и геологической принадлежности. Это достигается с помощью петрофизических связей, т. е. связей между плотностью и геологической характеристикой объекта.

Результаты гравиметрических съемок представляются в виде планов графиков или карт параметров гравитационного поля. Построения производятся по параметру Δg_B (приращение силы тяжести в редукции Буте). Положительная аномалия — избыточная плотность, отрицательная аномалия — пониженная плотность.

В качестве примера на рис. 16 приведен фрагмент карты графиков поля силы тяжести для участка Васильевского спуска Красной площади в г. Москве (а) и результат качественной интерпретации — горизонтальный срез проходного коллектора (тоннеля размещения подземных коммуникаций) относительно гравиметрических профилей (б).

Отмечается локализованный характер гравитационных аномалий, создаваемых коллектором. На западных

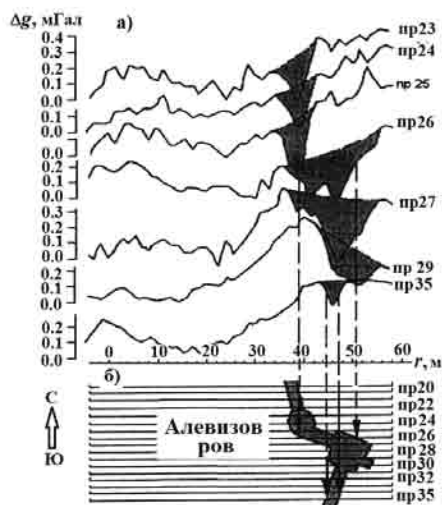


Рис. 16. Фрагмент карты графиков поля силы тяжести для участка Васильевского спуска Красной площади в Москве (а) и горизонтальный срез проходного коллектора относительно гравиметрических профилей (б) (по М. И. Лоджевскому, И. Н. Михайлову, К. А. Чертовских)

участках значения гравитационных аномалий понижены и отражают засыпанный в начале XIX в. Алевизов ров (XV в.) – крупнейшее фортификационное сооружение Московского Кремля. С запада и востока сравнительно широкий минимум Δg_B ограничен локальными повышенными значениями поля. Эти максимумы связаны с субвертикальными стенами Алевизова рва, построенными древними строителями из более плотных блоков известняков мячковского горизонта верхнего карбона или частично сложенными кирпичной кладкой.

Второй пример (рис. 17) иллюстрирует результаты крупномасштабной гравиметрической съемки золоторудного узла на участке Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Выполнена качественная интерпретация посредством фильтрационной томографии, которая позволила выявить зону широтного глубинного разлома и не выходящие на дневную поверхность объекты повышенной плотности, отождествляемые с интрузиями диоритов.

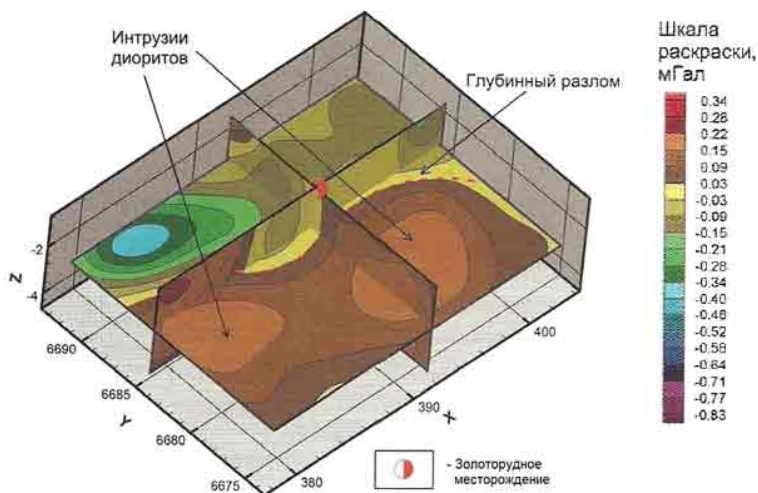


Рис. 17. Результаты интерпретации данных крупномасштабной гравиметрической съемки методом фильтрационной томографии на участке Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (по А. С. Долгаль, В. И. Костицыну)

Вопросы и задания для контроля самостоятельной работы

1. Составьте картину нормального гравитационного поля и объясните необходимость его учета при анализе аномального поля.

2. Предложите методику наблюдений для обнаружения геологических объектов правильной геометрической формы – последовательность и порядок измерения силы тяжести на пунктах (рядовых и опорных) гравиметрической сети, позволяющей учитывать смещение нуля-пункта гравиметра.

3. Напишите реферат о принципах работы гравиметров, их типах и конструктивных особенностях, включая современные разработки.

1.2. Магниторазведка

Магниторазведка – раздел разведочной (полевой геофизики), изучающий особенности распределения геомагнитного поля в земной коре с целью решения поставленных геологических, геоэкологических, инженерно-геологических и других задач.

Геомагнитное поле – это часть общего магнитного поля Земли, имеющего потенциальный характер. Основой является закон Кулона, описывающий взаимодействие магнитных масс (элементарных дипольных масс):

$$F = \frac{m_1 \cdot m_2}{\mu_a \cdot r^2}, \quad (11)$$

где F – сила взаимодействия магнитных масс m_1 и m_2 ; r – расстояние между взаимодействующими массами; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость, равная

$$\mu_a = \mu_0 \cdot \mu, \quad (12)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – проницаемость вакуума; μ – относительная магнитная проницаемость.

Если Землю представить как космическое тело, имеющее массу m_2 , то согласно закону Кулона она будет притягивать массу m_1 с силой, равной напряженности магнитного поля H :

$$H = \frac{F}{m_2} = \frac{m_1}{r^2}, \quad (13)$$

при условии, что $\mu = 1$, т. е. среда не магнитная. Потенциал магнитного поля для элементарных магнитных масс, как и гравиметрический потенциал, обладает свойством аддитивности:

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{m_i}{r} = \int \frac{dm}{r}. \quad (14)$$

Суммарное магнитное поле Земли складывается: 1) из постоянного геомагнитного поля, которое представляет собой поле диполя большого намагниченного шара (рис. 18); 2) материкового поля, созданного породами глубинных структур; 3) переменного магнитного поля, под действием которого в Земле формируются вихревые токи. Последние вызывают магнитную индукцию:

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}, \quad (15)$$

где B – магнитная индукция; $\vec{H}$ – напряженность магнитного поля.

Магнитная индукция измеряется в теслах (Тл), ее дробная величина – 1 нТл, что равно 10^{-9} Тл.

Магнитная ось Земли наклонена по отношению к оси вращения под углом 11° . При этом северный магнитный полюс находится с противоположной стороны северного географического полюса, но условно его принимают со стороны северного. Существует инверсия полюсов, которая происходит с периодичностью более 0,5 млн лет.

Основной параметр магнитного поля – суммарный магнитный вектор T , а его вертикальная проекция – ось Z (рис. 19).



Рис. 18. Схема геомагнитного поля Земли

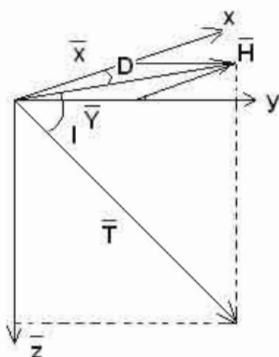


Рис. 19. Элементы геомагнитного поля

Другими параметрами являются магнитное склонение D , магнитное наклонение I , северная проекция X , западная (восточная) проекция Y . На полюсах $T=Z=0,66 \cdot 10^5$ нТл при $H=0$. На экваторе $T=H=0,33 \cdot 10^5$ нТл при $Z=0$.

$$H_{\Sigma} = H_0 + H_{\text{св}} + H_{\text{л}} + H_{\text{м}} + \Delta H, \quad (16)$$

где H_m – суммарное магнитное поле; H_o – поле диполя Земли; H_m – поле материковое; H_a – аномальное поле; $H_{\text{вн}}$ – внешнее поле; ΔH – поле магнитных вариаций.

Нормальное поле – это совокупное поле Земли (поле диполя и материковое), которое формирует картину силовых линий от северного к южному магнитному полюсу.

Аномальное поле – это локальное поле от намагниченных геологических тел.

Внешнее поле – это поле от объектов помех, например всевозможных металлических сооружений.

Поле вариаций – это вариации:

- 1) вековые;
- 2) годовые;
- 3) суточные (солнечно-суточные и лунно-суточные);
- 4) магнитные бури.

Происхождение магнитного поля Земли связано с существованием в ядре слабых вихревых токов, которые вследствие вращения Земли и под действием гидромагнитного эффекта приводят к первоначально слабому эффекту электромагнитной индукции. Процесс «диффундирует» (последовательно передается) к поверхности Земли, где компенсируется поверхностными токами. В результате на земной поверхности постоянно существует геомагнитное поле, которое в разной степени деформировано в зависимости от намагниченности тех или иных геологических тел.

Магнитные свойства горных пород

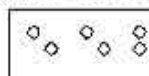
Все природные объекты, в том числе горные породы, делятся на две группы: 1) диамагнетики (магнитная проницаемость $\mu < 1$); 2) парамагнетики (магнитная проницаемость $\mu > 1$). В группе парамагнетиков выделяются специальная группа ферро-, ферри- и антиферромагнетиков ($\mu \gg 1$). Природа магнетизма обусловлена структурой спин-орбитальных моментов атомов под действием магнитного поля (рис. 20–22).

Ферро-, ферри- и антиферромагнетики – очень сильные природные магниты. Их внутренняя структура содержит специальные области – домены. Присутствие ферромагнитных минералов в горных породах (магнетит, титано-магнетит, гематит, самородное и метеоритное железо и др.) определяет их магнитные свойства.

Вода и нефть диамагнитны. Газы и газозоудные смеси также диамагнитны.

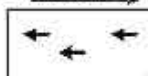
Диамагнетики:

До действия поля



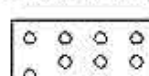
Спин-орбитальные моменты взаимно скомпенсированы, объект не магнитен

Во время действия поля



Спин-орбитальные моменты противоположны направлению поля

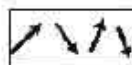
После действия поля



Спин-орбитальные моменты возвращаются в первоначальное состояние

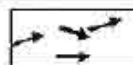
Рис. 20. Структура спин-орбитальных моментов атомов под действием магнитного поля у диамагнетиков

До действия поля



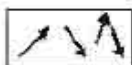
Спин-орбитальные моменты взаимно скомпенсированы из-за разориентации

Во время действия поля



Спин-орбитальные моменты преимущественно ориентированы в направлении поля

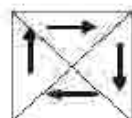
После действия поля



Спин-орбитальные моменты возвращаются в первоначальное состояние

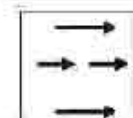
Рис. 21. Структура спин-орбитальных моментов атомов под действием магнитного поля у парамагнетиков

До действия поля



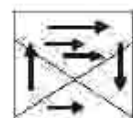
Моменты между собой взаимно скомпенсированы

Во время действия поля



Моменты целиком ориентируются вдоль поля

После действия поля



Моментам не хватает энергии возвратиться в исходное состояние

Рис. 22. Структура спин-орбитальных моментов атомов под действием магнитного поля у ферро-, ферри- и антиферромагнетиков

У магматических пород наблюдается тенденция увеличения магнитных свойств в щелочноземельном ряду от кислых к ультраосновным (рис. 23).

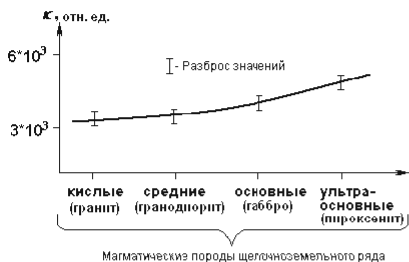


Рис. 23. Тенденция изменения магнитной восприимчивости у магматических пород щелочноземельного ряда (k (капша) — магнитная восприимчивость)

У метаморфических пород вещественно-петрографический состав практически не изменяется на разных стадиях метаморфизма, следовательно, не изменяются и магнитные свойства (рис. 24). Исключение составляют железистые кварциты и метаморфические породы, в которых присутствуют вкрапленные руды.

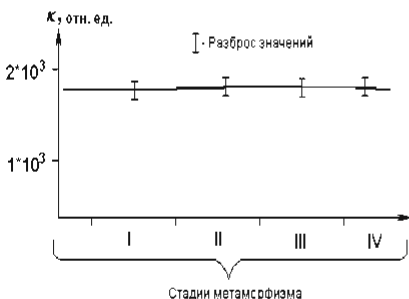


Рис. 24. Тенденция изменения магнитной восприимчивости у метаморфических пород:

Стадии метаморфизма:

I — зеленосланцевая,

II — амфиболитовая,

III — гранулитовая,

IV — эклогитовая;

k (капша) — магнитная восприимчивость

В осадочных породах для одноименных стадий окаменения (преобразования) тенденция изменения магнитных свойств соответствует твердой фазе (рис. 25).

От стадии к стадии преобразования (в процессе окаменения) магнитные свойства изменяются только у парамагнитных литологических разностей, в частности у аргиллитов (рис. 26). Это связано с изменением пористости, поскольку заполненные водой, нефтью или газом поры диамагнитны. Следовательно, с увеличением пористости намагниченность пород уменьшается.



Рис. 25. Тенденция изменения магнитной восприимчивости у осадочных пород для одноименных стадий их преобразования (κ (каппа) – магнитная восприимчивость)

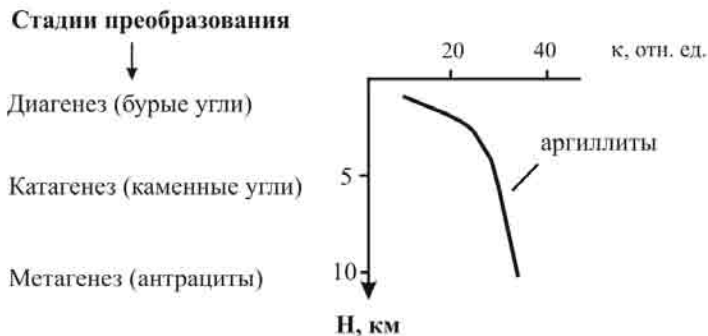


Рис. 26. Тенденция изменения магнитной восприимчивости у парамагнитных осадочных пород в зависимости от стадии их преобразования

Методика и технология магниторазведочных работ включает: 1) выбор характера и вида съемки, в том числе методов, аппаратуры, технологии; 2) топографическую (геодезическую) разбивку сети; 3) увязку результатов профильных (площадных) наблюдений с определением погрешностей; 4) представление результатов съемки.

Перечисленные виды, методики и технологии в принципе соответствуют гравиметрическим работам с определенной спецификой касательно особенностей проявления деформации магнитных полей на том или ином участке исследования. Для производства измерений применяются современные протонные и квантовые магнитометры, где отсутствует сползание нуля-пункта. Следовательно, отпадает необходимость в наличии опорных точек. Остаются только контрольные. При этом топографическая раз-

бивка сети может выполняться с определением координат первой и конечной точек профиля. Остальные координаты определяются мерным шнуром или шагомером.

В протонных магнитометрах (рис. 27) используется физическое явление прецессии протонов, сущность которого в ориентации магнитных моментов протонов вдоль силовых линий магнитного поля. Поэтому датчик поля представляет собой сосуд, наполненный протонообразующей жидкостью (вода, спирт, бензол или их смеси). Вокруг сосуда намотаны генераторная и измерительная катушки. С помощью первой создается эффект поляризации протонов, а с помощью второй – изменение ориентации магнитных моментов вследствие деформации магнитного поля под

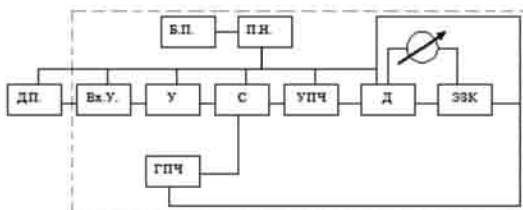


Рис. 27. Общий вид и блок-схема протонного магнитометра:

Д.П. – датчик поля; Вх.У. – выходной усилитель; У – усилитель мощности;
С – смеситель; УПЧ – усилитель промежуточной частоты; Д – детектор; ЭЗК –
электронная записная книжка; ГПЧ – генератор промежуточной частоты;
Б.П. – блок питания; П.Н. – преобразователь напряжения

действием тех или иных магнитных объектов. Прецессия выражается формулой

$$\omega = \alpha \cdot T, \quad (16)$$

где T – суммарный магнитный вектор; ω – частота; α – коэффициент, характеризующийся отношением механического и магнитного моментов.

Квантовые магнитометры (внешний вид их показан на рис. 28) – это современные приборы, в основе которых лежит то же уравнение прецессии (16), что и для протонных магнитометров. Используется физическое явление Леемана, сущность которого в переходе электронов на новый энергетический уровень под действием монохроматического света. Вспышка этого света называется накачкой. Под действием этого света электроны атомов отдельных элементов переходят на другой энергетический уровень, причем их магнитные моменты, как и у протонов, ориентируются вдоль силовых линий магнитного поля. После прекращения накачки (вспышки монохроматического света) электроны возвращаются на прежние уровни, но при этом выделяется энергия с частотой, пропорциональной суммарному вектору магнитного поля T . Сосуд (лампа) квантового магнитометра наполнен парами цезия, рубидия или гелия, которые являются насыщенными атомосодержащими объектами. Блок-схема приборов аналогична протонным магнитометрам. Протонные и квантовые магнитометры отличаются высокой точностью.



Рис. 28. Общий вид квантового магнитометра

В процессе проведения магниторазведочных работ обязательны вариационные наблюдения (непрерывные по времени измере-

ния стационарным магнитометром, установленным на базе) с целью записи магнитных пульсаций (бурь).

Представление результатов магнитометрической съемки, как и в гравиразведке, производится в виде планов графиков суммарного вектора магнитного поля (T) или карт изодинам (z, h), изогон (d), изоклин (I). Обязательно выполнение качественной и количественной интерпретации полученных материалов с последующим геологическим истолкованием магниторазведочных аномалий. В качестве примера на рис. 29 приведены результаты магниторазведочных работ в Западном жилом массиве Советского района г. Ростова-на-Дону по улице Зорге между зданиями Института наук о Земле и химического факультета Южного федерального университета.

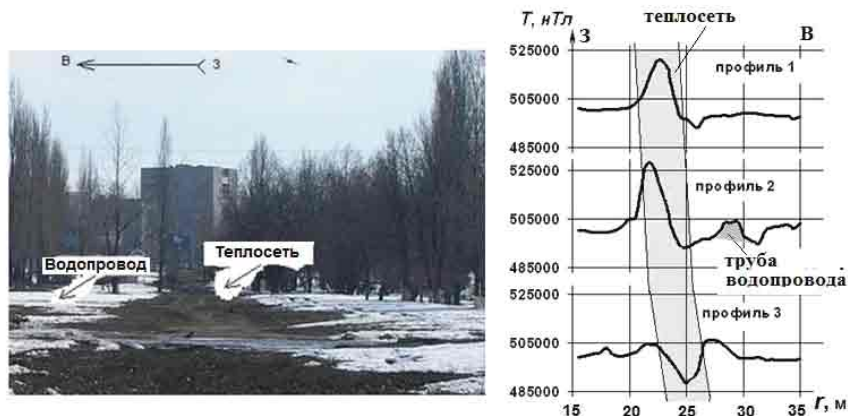


Рис. 29. Фото эталонной площадки на ул. Зорге в г. Ростове-на-Дону и план графиков магнитометрических измерений над теплотрассой

Участок работ представляет собой ровную газонного вида поверхность, где отсутствуют строения. Через площадку проходят подземная трасса теплоснабжения на глубине 1,6 м и трубы водопровода диаметром 0,4 м на глубине $\approx 1,8-2$ м. Из рассмотрения плана графиков следует, что трубы теплотрассы (прямая и обратная), диаметром порядка 1 м каждая и с таким же расстоянием между ними, проявляются в магнитном поле на 1-м и 2-м профилях едиными (неразделенными) положительными аномалиями.

ми. Амплитуда составляет около 20 000 нТл. Водопроводная труба зафиксирована на 2-м профиле. Амплитуда от этой трубы примерно в три раза меньше, чем от труб теплосети, вследствие меньшего диаметра и большей глубины залегания. При этом надо отметить, что на 3-м профиле суммарная аномалия от труб теплосети становится отрицательной и ее амплитуда примерно в 1,5 раза меньше положительных аномалий. Такая смена знака амплитуды магнитного поля вполне закономерна и объясняется «состыковкой» труб с разнонаправленной намагниченностью в местах врезки отводных нитей.

Качественная и количественная интерпретация результатов магниторазведочных работ

Качественная интерпретация заключается в истолковании характера распределения магнитного поля на изучаемой площади с обязательным извлечением геологической информации из геофизических данных. Пример в описательной форме приведен выше посредством анализа плана графиков, изображенных на рис. 29.

Количественная интерпретация материалов магниторазведки включает численные методы решения прямой и обратной задач в рамках 1D-, 2D-, 3D-инверсии. Существуют специальные компьютерные программы. Обязательно привлечение априорной информации. Погрешности результатов магнитометрических наблюдений вычисляются по разности измеренных значений суммарного вектора напряженности магнитного поля на контрольных точках:

$$\varepsilon_i = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{2n-1}}, \quad (17)$$

где δ – разность основных и контрольных замеров; n – общее количество контрольных точек.

Вопросы и задания для контроля самостоятельной работы

1. Как взаимосвязаны магнито- и гравиразведка?
2. Опишите принцип действия современной магниторазведочной аппаратуры.
3. Какие факторы определяют интенсивность магнитных аномалий?

1.3. Электроразведка

Электроразведка – раздел полевой (разведочной) геофизики, изучающий распределение электромагнитных полей в земной коре с целью поисков, разведки и эксплуатации месторождений полезных ископаемых, а также решения геозокологических, гидрогеологических, инженерно-геологических и других задач.

Электромагнитное поле – сумма электрического и магнитного полей, обуславливающих существование в земной коре электромагнитных волн. В классической физике электромагнитное поле описывается системой уравнений Максвелла. Основные параметры поля:

$\vec{E}$ – напряженность электрического поля;

$\vec{H}$ – напряженность магнитного поля;

$\vec{D}$ – электрическая индукция;

$\vec{B}$ – магнитная индукция;

$\vec{J}$ – плотность тока.

Взаимодействие электромагнитного поля с материальными средами вызывает деформацию этого поля в зависимости от их электрических свойств.

Электрические свойства:

1) ρ – удельное электрическое сопротивление, $1/\rho = \sigma$, – удельная электропроводность;

2) ε – диэлектрическая проницаемость;

3) η – поляризуемость;

4) μ – магнитная проницаемость.

Показатели ρ , ε – основные, носят название материальных и связаны с параметрами поля определенными соотношениями.

Материальные уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \vec{D} &= \varepsilon \cdot \vec{E} \\ \vec{J} &= \sigma \cdot \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \cdot \vec{H} \end{aligned} \right\} \text{ – закон Ома в дифференциальной форме} \quad (18)$$

Электромагнитные поля характеризуются частотой f . В зависимости от используемого диапазона f , в электроразведке условно выделяют три модели:

1) *стационарную*, где $f \rightarrow 0$ (постоянное электрическое поле) и основную роль играют токи проводимости (направленное движение электронов, ионов);

2) *полустационарную* (индукционную), где $\infty > f > 0$ и в разной мере соотносятся токи проводимости и смещения. В области сравнительно низких частот преобладают токи проводимости, а в области относительно высоких – как токи проводимости, так и токи смещения;

3) *волновую*, где $f \rightarrow \infty$ (переменное электромагнитное поле высокой частоты) и основную роль играют токи смещения (волнообразная передача энергии от одних двойных электрических слоев к другим).

Электромагнитные поля, изучаемые в электроразведке, разделяют на естественные и искусственные. К первым из них относятся:

1) постоянное естественное электрическое поле, как поле естественных потенциалов (ЕП), возникающих в земной коре вследствие электрохимических и электрокинетических процессов;

2) магнитотеллурическое поле, как поле космического происхождения вследствие корпускулярного излучения солнца (солнечного ветра);

3) поле дальних радиостанций, как поле электромагнитных излучений относительно низких (первые десятки килогерц) частот от радиовещания;

4) поле ЕИЭМПЗ (естественное импульсное электромагнитное поле Земли), как поле действия механических напряжений, вызывающих сейсмоакустические и динамические процессы в земной коре.

К искусственным относятся поля, создаваемые в земной коре принудительно с использованием электрических батарей или специальных генераторных устройств. Этих полей также несколько:

1) постоянное и (или) инфранизкочастотное (квазипостоянное) электрическое поле, как поле, описываемое в рамках стационарной модели и возникающее вследствие пропускания («задавливания») постоянного электрического тока в земной коре;

2) переменное гармонически изменяющееся поле, как поле, описываемое в рамках полустационарной модели и возникающее вследствие пропускания («задавливания») переменного электрического тока в земной коре в относительно широком диапазоне частот от первых сотен герц до единиц мегагерц;

3) неустановившееся поле, называемое еще полем переходных процессов, описываемое, как и гармонически изменяющееся,

в рамках полустационарной модели и возникающее во временном промежутке между импульсным включением или выключением постоянного тока;

4) электроволновое поле, как поле, описываемое в рамках волновой модели и возникающее вследствие излучения высокочастотных импульсов (электромагнитных волн) метрового и дециметрового диапазонов в геологической среде.

Как и в других разделах разведочной геофизики, в электро-разведке предусмотрено решение прямых (аналитический расчет, физическое и математическое моделирование) и обратных (выполнение интерпретации) задач. В основу их решения положено понятие о геоэлектрическом разрезе, т. е. о разрезе, в котором каждому геологическому объекту присваиваются электрические показатели физических свойств (рис. 30). Измерения в электро-разведке в соответствии с понятиями геоэлектрического разреза выполняются в рамках 1D-, 2D-, 3D-моделей.

Рис. 30. Геологический (А) и геоэлектрический (Б) разрезы:
1 – покровные отложения; 2 – интрузия; 3 – известняк; 4 – карст

Характеристика электрических свойств горных пород

По электрическим свойствам все природные объекты подразделяются на:

- 1) проводники ($\rho \rightarrow 0$ и $\varepsilon \rightarrow \infty$);
- 2) полупроводники ($1 \text{ Ом}\cdot\text{м} > \rho > 0$ и 20 отн. ед. $< \varepsilon < \infty$);
- 3) диэлектрики ($\rho \rightarrow \infty$ и $\varepsilon \rightarrow 1$).

В проводниках электромагнитное поле обусловлено сквозным током электронов и ионов, в полупроводниках – сквозным током

ионов и дырок, в диэлектриках преобладают волновые процессы, связанные с токами смещения, т. е. передачей энергии электромагнитного поля от одних двойных электрических слоев к другим (беспроводная поляризация).

Изменение электрических свойств в природных объектах зависит от частоты электромагнитного поля: чем выше частота, тем меньше ρ и ϵ .

Нефть и дистиллированная вода относятся к диэлектрикам, поэтому у них $\rho \rightarrow \infty$, притом что $\epsilon \rightarrow 1$ только у нефти, а у воды $\epsilon = 80$.

По мере увеличения концентрации солей в природных водах и по мере окисления нефти (если она существует длительное время в виде разливов на дневной поверхности и в покровных отложениях) показатель ρ уменьшается, а показатель ϵ при таких же условиях практически не изменяется в природных водах и уменьшается по мере увеличения окисления нефтей.

Воздух и все природные газы – диэлектрики, поэтому $\rho \rightarrow \infty$ и $\epsilon \rightarrow 1$. Таким образом, все пористые среды, заполненные газом или природной нефтью, являются более высокоомными по сравнению с таковыми, заполненными водой.

Кристаллические породы (магматические и метаморфические) ввиду малой пористости относятся к разряду диэлектриков. В то же время эта малая пористость закономерно изменяется, уменьшаясь у магматических пород в ряду от кислых к ультраосновным и у метаморфических пород по мере усиления степени метаморфизма. Определенную роль в формировании показателей ρ и ϵ играет и скелетная проводимость, определяемая как химическим составом минералов, так и строением их кристаллической решетки. Вследствие действия вышеперечисленных факторов имеет место тенденция увеличения удельного электрического сопротивления в ряду магматических пород от кислых к ультраосновным, а у метаморфических пород – по мере усиления степени метаморфизма (рис. 31).

В осадочных породах одноименных стадий преобразования тенденция изменения электрических свойств соответствует твердой фазе (рис. 32).

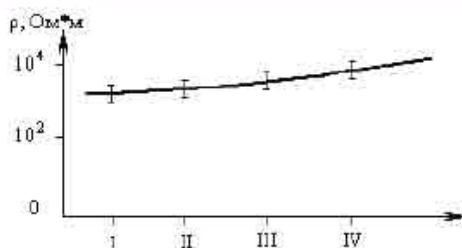


Рис. 31. Тенденция изменения удельного электрического сопротивления у кристаллических пород

Магматические породы

I – кислые

II – средние

III – основные

IV – ультраосновные

Стадии метаморфизма:

I – зеленосланцевая

II – амфиболитовая

III – гранулитовая

IV – эклогитовая

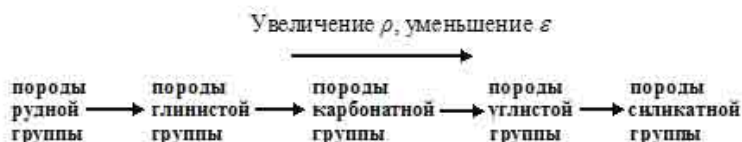


Рис. 32. Тенденция изменения удельного электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости для одноименных по степени преобразования осадочных пород

В одноименных по вещественно-петрографическому составу терригенных породах и угольных пластах тенденция изменения электрических параметров в зависимости от стадий преобразования иллюстрируется рис. 33.

Следует заметить, что для слоистых толщ значения $\rho_{\text{верт}}$ и $\rho_{\text{гориз}}$ неодинаковы. Такая среда называется анизотропной и характеризуется коэффициентом анизотропии $\lambda = (\rho_{\text{верт}} / \rho_{\text{гориз}})^{1/2}$.

Для возбуждения и регистрации электромагнитных полей существует два способа:

1) гальванический – с помощью штыревых металлических электродов;

2) индуктивный (индукционный) – с помощью индукционных рамок или магнитных антенн.

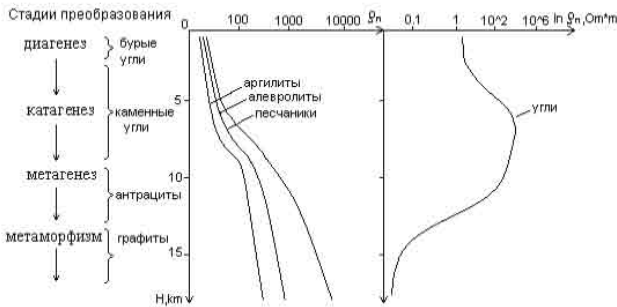


Рис. 33. Тенденция изменения удельного электрического сопротивления у терригенных осадочных пород в зависимости от стадий их преобразования

Оба этих способа или их сочетание, например гальваническое заземление (индуктивный прием), используются в двух основных модификациях электроразведки:

- *электромагнитном профилировании*, т. е. картировании участков геологоразведочных работ путем перемещения фиксированных по размерам электроразведочных установок или модулей по системе профилей;

- *электромагнитном зондировании*, т. е. изучении геологических разрезов на глубину в заданных точках, где инструментом бурения выступает электрический ток.

Модификации электропрофилирования и электрозондирования реализуются применением специальной электроразведочной аппаратуры и оборудования путем возбуждения (создания) электромагнитных полей и измерения составляющих этих полей (получения значений напряженности и потенциалов). Используются специальные электроразведочные установки. Они состоят из питающих и измерительных модулей, включающих генераторы и измерители, электроразведочные провода, штыревые металлические электроды, индукционные рамки, магнитные антенны и др. Схемы гальванического и индуктивного возбуждения и приема сигналов электромагнитного поля приведены на рис. 34.

На рис. 35 и 36 приведены типовые блок-схемы генератора и измерителя электроразведочной аппаратуры.

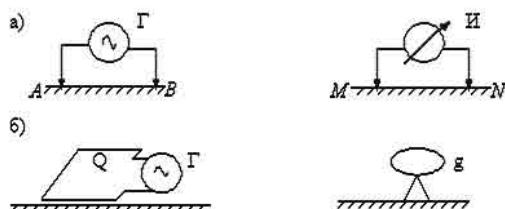


Рис. 34. Схемы гальванического (а) и индуктивного (б) возбуждения и приема сигналов электромагнитного поля:

A и B – питающие электроды; M и N – измерительные электроды; Γ – генератор; $И$ – измеритель; Q – площадь генераторной петли; g – площадь измерительной рамки

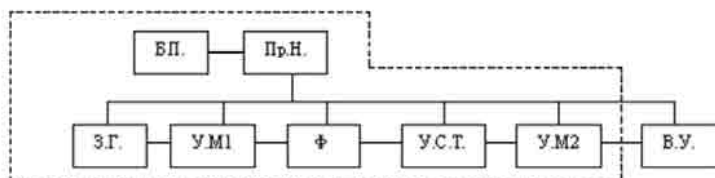


Рис. 35. Типовая блок-схема электроразведочного генератора:

З.Г. – задающий генератор; У.М. – усилитель мощности; Ф – фильтр; У.С.Т. – устройство стабилизации тока; В.У. – выходное устройство; Б.П. – блок питания; Пр.Н. – преобразователь напряжения

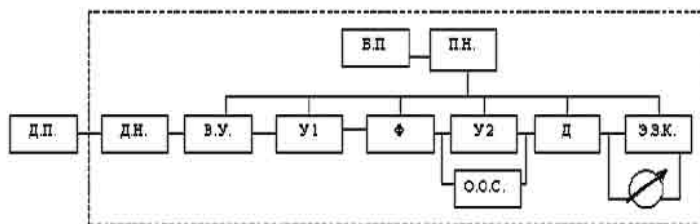


Рис. 36. Типовая блок-схема электроразведочного измерителя:

Д.П. – датчик поля; Д.Н. – делитель напряжения; В.У. – входное устройство (обеспечение высокоомного входа); U_1 и U_2 – усилители сигналов; Ф – фильтр (фильтрация всевозможных помех); Д – детектор (выпрямление сигнала); Э.З.К. – электрозаписная книга; О.О.С. – отрицательная обратная связь (многократное усиление); Б.П. – блок питания; П.Н. – преобразователь напряжения

Методы электроразведки на основе естественного и искусственного электрических полей

Метод естественного постоянного электрического поля (ЕП) основан на изучении окислительно-восстановительных, диффузионно-адсорбционных и фильтрационных процессов в земной коре. Для производства работ используются специальные неполяризующиеся электроды, так как металлические из-за окисления в грунте создают значительную (до 1 В) электродную разность потенциалов. Полевые наблюдения состоят в измерениях потенциала (U_{EP}) или разности потенциалов (ΔU_{EP}) между измерительными электродами M и N (рис. 37).

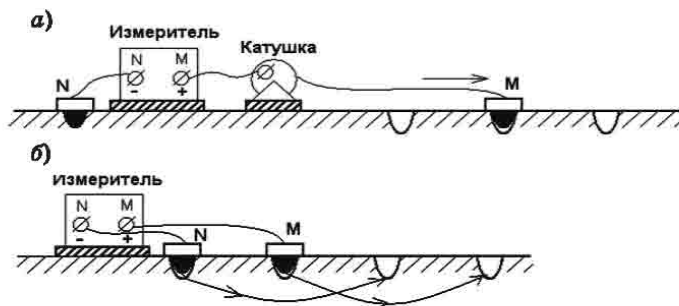


Рис. 37. Схема съемки потенциалов (а) и градиентов потенциала (б) методом ЕП

Усовершенствованной методикой работ ЕП предусматривается помещение неполяризующихся электродов в тряпичные чехлы (мешочки), обильно смоченные водой, которая из пластиковых бутылок также заливается в лунки точек измерения, заранее подготовленные на профиле. Таким простым и оригинальным способом («тряпичным фитилем») осуществляется контакт неполяризующихся электродов с грунтом в период измерений, что значительно увеличивает производительность и повышает точность.

При длине профилей до 1 км целесообразно использовать способ измерения потенциала, а свыше 1 км – способ измерения гра-

диента потенциала. Для выявления аномальных зон повышенной флюидопроницаемости вполне приемлем шаг измерений 10 м. При этом, работая по способу градиента (ΔU), через каждые 200 м необходимо производить контрольные (повторные) измерения ΔU для оценки накапливающейся погрешности и последующей ее ликвидации.

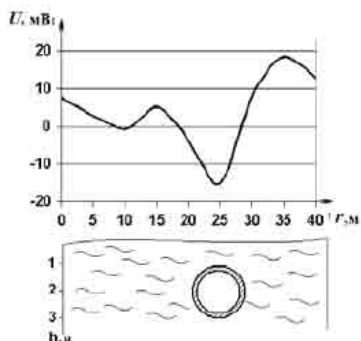


Рис. 38. Форма графика ЕП над стальной трубой

На рис. 38 показан типовой график ЕП над трубой водовода. Исследования методом ЕП также эффективны при изучении зон инфильтрации (отрицательные аномалии) и разгрузки (положительные аномалии) подземных вод.

На рис. 39 приведены результаты изучения методом ЕП гидродинамики подземных вод на поле закрытой и затопливаемой шахты «Степная» в Восточном Донбассе. Здесь с шагом 10 м засняты четыре профиля на склонах балки Вургушта. Один из профилей (4) прохо-

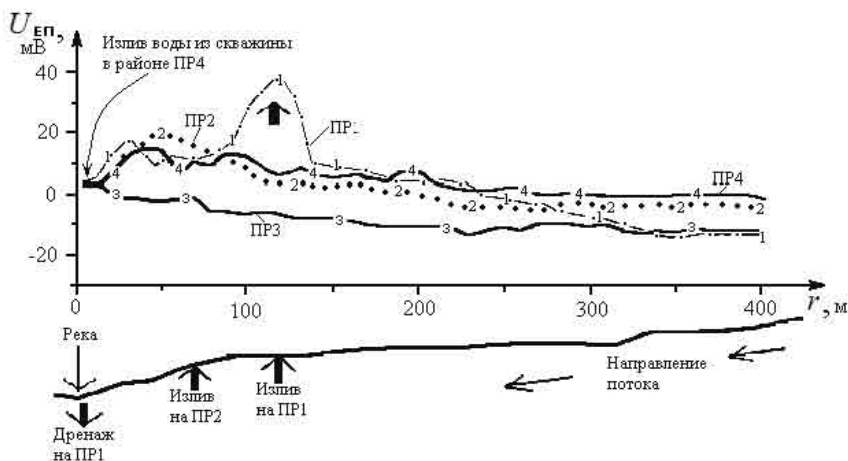


Рис. 39. Изучение методом постоянного естественного электрического поля гидродинамики подземных вод на поле закрытой шахты «Степная» ОАО «Гукувотоль»

дит вблизи дренажной скважины. Из рисунка следует, что возрастание естественных потенциалов вниз по склону балки отражает направление потока грунтовых вод. Кроме того, локальными положительными аномалиями фиксируются участки разгрузки подземных вод (в том числе на профиле 4 в районе скважины), а по локальным отрицательным аномалиям на профилях 1 и 2 в тальвеге балки установлена область дренажа.

Методы электропрофилирования и электроразведки на основе искусственного постоянного электрического поля получили название методов сопротивлений (КС). Все процессы рассматриваются в рамках стационарной модели. В основе лежит теория распределения в геологической среде постоянного электрического поля, когда $f \rightarrow 0$ и основную роль играют токи проводимости. Название методов связано с понятием кажущегося сопротивления ρ_k , которое отличается от истинного ρ_{Π} в силу того, что во всех случаях изучаемый объект выступает частью гетерогенной (неоднородной) геологической среды и поэтому регистрируемые параметры поля являются интегральными показателями, в которых учитывается доля каждого из присутствующих в этой среде других объектов.

Для производства работ в электроразведке используются установки с гальваническим способом возбуждения и приема. Параметр ρ_k рассчитывается по формуле

$$\rho_k = k \cdot (\Delta U / I), \quad (19)$$

где k – коэффициент электроразведочной установки, зависящий от геометрического расположения электродов; ΔU – разность потенциалов между электродами M и N ; I – сила тока в цепи AB .

$$k = 2\pi / (1/AM - 1/BM - 1/AN + 1/BN). \quad (20)$$

Как следует из (20), k зависит только от геометрических размеров между питающими и измерительными электродами и его сущность – в компенсации уменьшения потенциала поля или его напряженности по мере удаления точек измерения от источника.

В практике электроразведки наибольшее применение получили осевые, экваториальные и радиальные электроразведочные установки (рис. 40).



Рис. 40. Типы электроразведочных установок

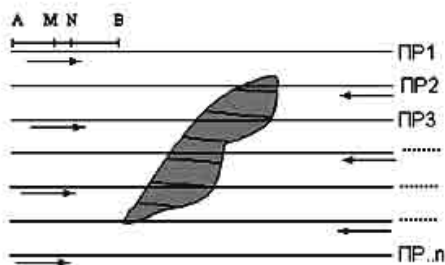


Рис. 41. Схема электропрофилирования челночным способом

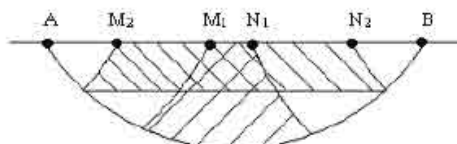


Рис. 42. Глубинность электроразведочной установки в зависимости от размеров приемной линии

Электропрофилирование (ЭП) методами КС выполняется путем перемещения электроразведочной установки с заданными и неизменяющимися параметрами по системе профилей. Профили располагаются, как правило, вкрест простирания искомого объекта (рис. 41).

Размеры электроразведочных установок и шаг перемещения выбирают исходя из предполагаемой глубины залегания объектов. Чем больше длина AB и меньше MN , тем больше увеличивается глубинность исследований (рис. 42). Мерой увеличения является коэффициент установки

$$k_{AMNAB} > k_{AMNB}$$

Физической основой электропрофилирования является квазилинейное изменение напряженности поля $E=f(\Delta U)$ в центре линии AB в однородной изотропной среде, где ρ среды во всех направлениях одинаково.

Для осевых электроразведочных установок справедлив принцип взаимности. Суть его в следующем: если поменять местами питающие и измерительные электроды, то, поскольку коэффициент электроразведочной установки не изменяется, неизменной остается и форма графиков ρ_r .

Способов и методов электропрофилирования много. Наиболее широко применяемыми являются:

1. Симметричное электропрофилирование (СЭП). Форма графика для таких установок приведена на рис. 43.

2. Электропрофилирование методом среднего градиента (СГ), когда электроды A и B неподвижны и расстояние между ними в три раза превышает длину профилей, по которым перемещается линия MN . Результаты наблюдений изображают в виде планов графиков ρ_x или ΔU . Вид установки и форма графиков приведены на рис. 44.

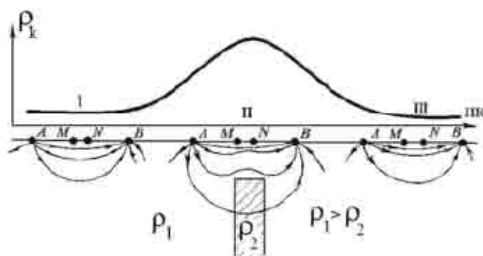


Рис. 43. График, полученный при профилировании симметричной установкой над плохо проводящим пластом: I–III – положения установки

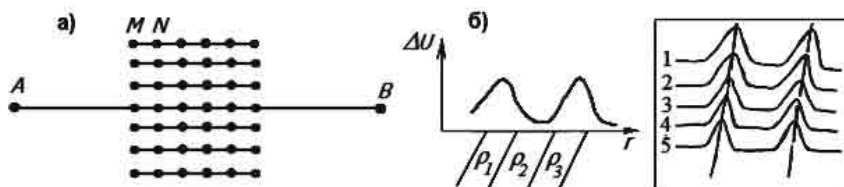


Рис. 44. Вид установки (а) и изображение результатов наблюдений электрического профилирования методом СГ (б)

3. Комбинированное профилирование (КП) – способ, применяемый с двумя встречными 3-электродными установками AMN и MNB . Линия MN общая, имеется питающий электрод C , отнесенный в бесконечность (рис. 45, а). По результатам исследований получается два графика ρ_x отдельно для каждой установки, что позволяет при их совместном рассмотрении выявить определенные особенности геологического разреза, которые не удастся рассмотреть по другим модификациям электропрофилирования (рис. 45, б).

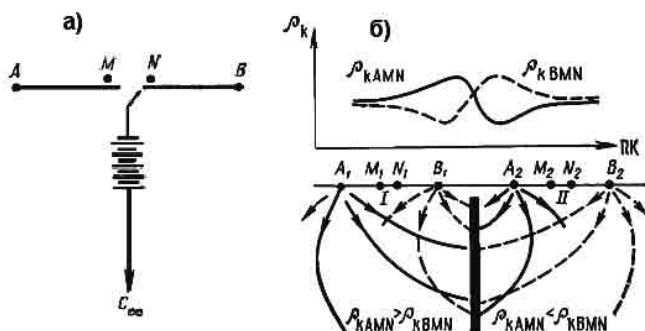


Рис. 45. Вид установки (а) и изображение результатов наблюдений (б) электрического профилирования методом КЭП

4. **Круговое профилирование (КрП)** – способ, в основе которого лежит вращение линейной 4-электродной симметричной установки по различным азимутам. Затем строятся полярные диаграммы, по которым производится определение пространственного расположения геологических образований, в частности господствующего направления трещиноватости.

Электромагнитное зондирование (ЭЗ) – вторая основная модификация электроразведки, цель которой изучение геологических разрезов на глубину в заданной точке. Другими словами, это электробурение, инструментом которого служит электрический ток. Способов ЭЗ, как и ЭП, много. Наиболее распространены в методах КС два способа: ВЭЗ – вертикальное и ДЭЗ – дипольное электрическое зондирование.

ВЭЗ осуществляется путем последовательного увеличения размеров питающей линии АВ, когда каждый последующий разнос увеличивается по отношению к предыдущему в 1,5–2 раза, что соответствует логнормальному закону, т. е. чем больше разнос (длина линии АВ), тем больше вклад вторичных зарядов, формирующихся на границах разделов сред.

Технология выполнения ВЭЗ описана в многочисленных учебниках, справочниках и руководствах. Она сводится к устройству на поверхности земли электроразведочной установки, состоящей из двух питающих А и В и двух измерительных (при-

емных) M и N электродов, расположенных симметрично относительно центра (рис. 46).

Через электроды A и B от батареи или генератора в землю поступает электрический ток силой I , а между приемными электродами M и N измеряют разность потенциалов ΔU . Сделав первый замер, увеличивают разнос AB и вновь измеряют силу тока I и разность потенциалов ΔU . На одной стоянке прибора выполняют

20–25 измерений при последовательном увеличении разносов, на каждом из которых вычисляют кажущееся сопротивление по формуле (19). Максимальные разносы выбирают исходя из заданной глубины исследования, которую оценивают приближенно по формуле

$$(Z_{\phi})_{\max} \approx 0,1AB. \quad (21)$$

ДЭЗ основан на последовательном удалении друг от друга питающего и измерительного диполей (линий AB и MN), линейный размер которых меньше расстояния между их центрами. При этом линия MN последовательно удаляется с заданным шагом от AB (рис. 47). Возможен вариант, когда от точки зондирования в противоположных направлениях удаляются и AB , и MN . В обоих случаях физика процесса такова, что чем дальше MN от AB , тем больший «опускается» вклад вторичных зарядов от все более и более глубоких горизонтов. Регистрируемые сигналы на каждом удалении MN , как и при ВЭЗ, отражают интегральный (суммарный) вклад зарядов, притом что чем больше по толщине слой, тем больше и вклад зарядов от него.

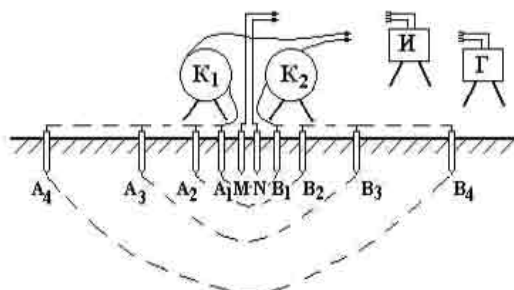


Рис. 46. Схема установки вертикального электрического зондирования:
 K_1, K_2 — катушки с проводом; Γ — генератор;
 I — измеритель; A, B, M, N — питающие и измерительные электроды; пунктиром показаны токовые линии

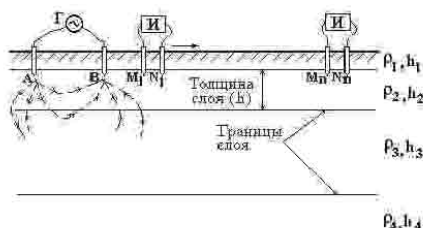


Рис. 47. Схема установки ДЭЗ:
Г – генератор; И – измеритель; А, В, М, N – питающие и измерительные электроды; пунктиром показаны токовые линии

Метод ДЭЗ по отношению к ВЭЗ точнее регистрирует локальные неоднородности за счет повышенной глубинности. Кроме того, его установки более мобильны. Недостаток ДЭЗ в том, что напряженность поля убывает пропорционально кубу расстояния (у ВЭЗ пропорционально квадрату расстояния), и поэтому требуется использование более мощного генератора, чем для ВЭЗ.

В настоящее время разработаны томографические системы наблюдений с использованием многоэлектродных кос. Это позволяет существенно повысить производительность электроразведочных работ, в том числе за счет визуализации результатов с помощью встроенных в аппаратурный комплекс компьютерных устройств.

Методы электроразведки на основе гармонически изменяющегося поля

Возбуждение (создание) гармонически изменяющегося поля производится как гальваническим, так и индуктивным способом. Исследования выполняются преимущественно в диапазоне частот от первых сотен герц до единиц мегагерц. Все элементы поля изменяются во времени по закону косинуса или синуса.

Модификация ЭП включает не менее десятка методов и способов. Широко известен метод дипольного электромагнитного профилирования (ДЭМП). Профилирование заключается в передвижении электроразведочной установки источник-приемник (И-П), где в качестве излучателя используется индукционная рамка, а в качестве приемника магнитная антенна (рис. 48).

Генератор размещен в пластмассовой трубе и имеет узел периодического выключения тока. В моменты выключения производятся измерения фоновой составляющей вертикальной компоненты магнитного поля H_z^{act} , а в моменты включения – такой же компоненты наведенного поля $H_z^{нае}$. По результатам ЭП строятся графики и карты.

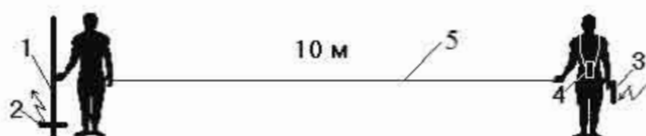


Рис. 48. Схема работы методом дипольного электромагнитного профилирования:
1 – генератор; 2 – передающая антенна; 3 – приемная антенна;
4 – измеритель; 5 – направленный пшур

Модификация ЭЗ выполняется двумя способами. Первый из них относится к малоглубинной электроразведке и носит название радиально-частотного зондирования. Оно основано по аналогии с ВЭЗ на последовательном изменении размера питающей линии на фиксированной частоте (рис. 49).

Второй способ – частотное зондирование (ЧЗ). Суть этого способа в том, что расстояние между питающим и измерительным модулем является постоянным, а частота изменяется от высоких значений до инфранизких. Происходит «задавливание» вихревых электрических токов вглубь Земли. Метод относится к разряду глубинных. Проникновение электрического тока на глубину происходит вследствие скин-эффекта, суть которого в том, что на высоких частотах токи концентрируются у поверхности Земли, а на низких, наоборот, все в большей мере проникают на глубину. Исследования относятся к дальней зоне, где на удалении от источника формируются плоские электромагнитные волны, проникающие в Землю по вертикали. Установка ЧЗ показана на рис. 50.

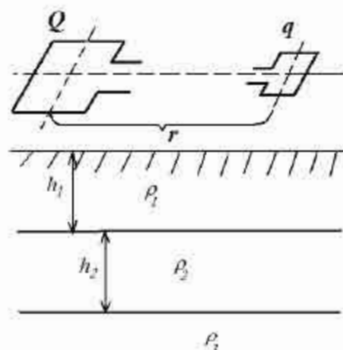


Рис. 49. Схема установки радиально-частотного зондирования

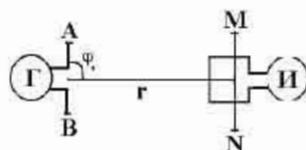


Рис. 50. Установка частотного зондирования

В процессе ЧЗ частота f изменяется с коэффициентами 1,2–1,5. На каждой частоте измеряют $\Delta U(\omega)$ и I и вычисляют ρ_x :

$$\rho_x = k_{BZ} \frac{\Delta U(\omega)}{I}, \quad (22)$$

где

$$k_{BZ} = \frac{2\pi \cdot r^4 \cdot 10^{-6}}{3AB \cdot q \cdot \sin \varphi}. \quad (23)$$

Методы на основе неустановившегося электромагнитного поля

Неустановившееся поле – поле переходных процессов, возникающих при ступенчатом изменении силы тока в источнике. Постоянный электрический ток пропускают через возбуждающие устройства гальванического (линия AB) или индукционного (петля) типа. В момент включения или выключения тока резко изменяется магнитная индукция, в проводящей среде образуется вихревое переменное электромагнитное поле, структура и частотная характеристика которого непрерывно изменяются во времени и в пространстве.

Ранняя стадия – в частотном спектре высокие гармоники, вихревые токи концентрируются у поверхности.

Средняя стадия – высокочастотная часть поля затухает (энергия поглощается средой), возрастает роль низкочастотных гармоник.

Поздняя стадия – поле выравнивается, токи равномерно распределяются в пространстве, их интенсивность зависит от суммарной продольной проводимости пород.

Основной параметр неустановившегося поля – время (t).

Модификации ЭП носят название методов переходных процессов (МПП), основанных преимущественно на петлевых установках (индукционные рамки возбуждения и приема сигналов). Измерения выполняют на всех временных задержках (рис. 51).

Модификации ЭЗ основаны на явлении проникновения вихревых токов во все более глубокие горизонты с течением переходного процесса. Методы относятся к разряду глубинных и разделяются на зондирование становлением поля в дальней (ЗСД) и ближней (ЗСБ) зонах.

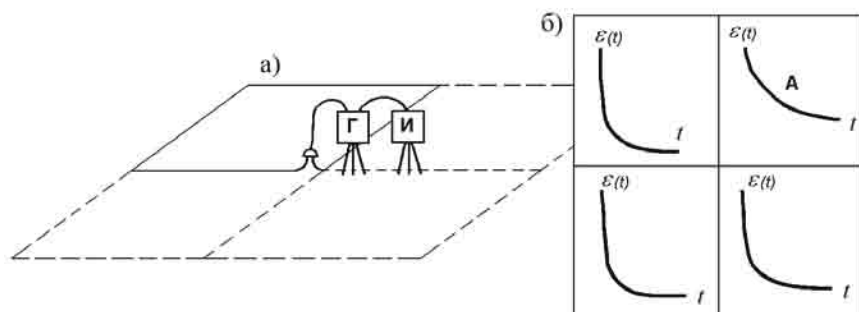


Рис. 51. Схема съемки для однопетлевого варианта МПП (а) и план отработанных петель с нанесенными переходными характеристиками (б):

А – переходная характеристика над аномальной зоной; Г – генератор; И – измеритель

ЗСД выполняют в дальней зоне, где преобладают линейные процессы распределения электромагнитного поля. Неустановившееся поле регистрируют в режиме включения тока. Применяется экваториальная установка, состоящая из питающего диполя АВ (гальваническое возбуждение) и приемного контура q (индуктивный прием) при расстоянии между ними до 10–15 км. Разнос АВ– q должен в два и более раз превышать глубину залегания основного опорного горизонта. Установка ЗСД, форма тока и кривая зондирования приведены на рис. 52.

ЗСБ основано на изучении неустановившегося поля в ближней зоне, когда преобладают процессы поздней стадии. Поле «выравнивается» и равномерно распределяется в разрезе. Наблюдения выполняют с различными установками (рис. 53) после выключения тока. Графики ρ_{τ} и S_{τ} используют для

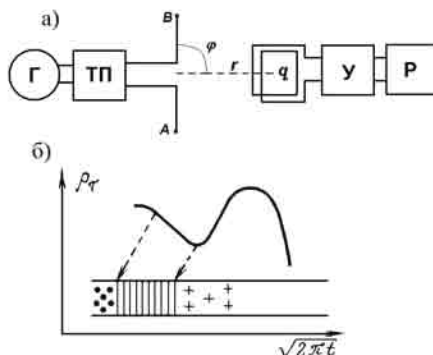


Рис. 52. Установка ЗСД (а), кривая зондирования (б):

У – усилитель; Р – регистратор; q – приемная петля

детализации геоэлектрического разреза и выделения в них проводящих слоев.

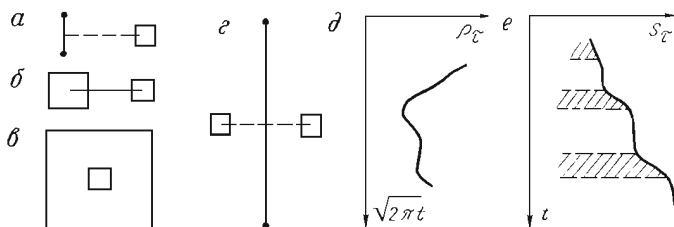


Рис. 53. Схемы установок ЗСБ:

а) диполь-петля; б) петля-петля; в) петля в петле; г) длинный кабель-петля; д), е) кривые кажущегося сопротивления ρ_{Σ} и кажущейся проводимости S_{Σ}

Методы на основе магнитотеллурического поля

Магнитотеллурическое поле – это естественное электромагнитное поле Земли, наблюдаемое на больших пространствах в виде вариаций электрических и магнитных компонент. Источники первичного поля зарождаются в магнитосфере и ионосфере Земли под воздействием корпускулярного излучения Солнца. У поверхности Земли формируются на ограниченном пространстве квазиплоские волны, падающие по вертикали. Они возбуждают вихревые токи, глубина проникновения которых определяется частотой колебаний или периодом вариаций.

В электроразведке используют короткопериодные колебания (КПК). Изучают пять компонент магнитотеллурического поля: E_x , E_y , H_x , H_y , H_z . Ось X – вдоль простирания объектов. Об источнике поля сведений нет, поэтому используется относительный параметр – импеданс: $Z = E/H$. Основные импедансы: $E_x/H_y = Z_{xy}$, $E_y/H_x = Z_{yx}$.

Кажущееся удельное электрическое сопротивление ρ_T и фазу импедансов φ_T рассчитывают по формулам

$$\rho_{Txy} = a \cdot |Z_{xy}|^2, \rho_{Tyx} = a \cdot |Z_{yx}|^2, \varphi_T = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360^\circ, \quad (24)$$

где a и b – коэффициенты, зависящие от геоэлектрических условий.

Значения E_x , E_y , H_x , H_y , T и Δt снимают с графиков короткопериодных вариаций (рис. 54). Все операции компьютеризированы.

Модификация ЭП, т. е. магнитотеллурическое профилирование (МТП), заключается в измерении взаимно перпендикулярных составляющих E_x , H_x , E_y , H_y электрического и магнитного полей на земной поверхности. Диапазон периодов T составляет 10–100 с, что соответствует квазигармоническим колебаниям с частотой f , равной 0,1–0,01 Гц. Глубинность $Z_{эфф}$ оценивается по формуле

$$Z_{эфф} \approx 0,1 \cdot \lambda_{эфф} \approx 0,1 \cdot \sqrt{10 \cdot \rho_i / f}, \quad (25)$$

где ρ_i – продольное сопротивление среды; $\lambda_{эфф}$ – длина волны.

Согласно формуле (25), МТП относится к разряду глубинных методов. Например, если $\rho_i = 10$ Ом·м, то $Z_{эфф}$ будет составлять порядка 3 км. Полевые работы МТП сводятся к выполнению рекогносцировочных магнитотеллурических измерений в точках, равномерно распределенных по площади. Строится кривая рекогносцировочного магнитотеллурического зондирования (рис. 55). Далее работы МТП проводятся или в диапазоне h , или в диапазоне S . Время измерений 1–2 часа на каждой точке. Диапазон S используют для вычисления суммарной продольной про-

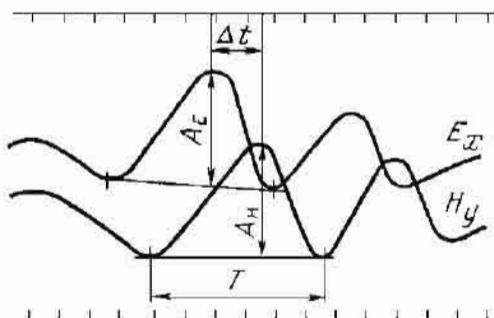


Рис. 54. Фрагмент записи короткопериодных вариаций

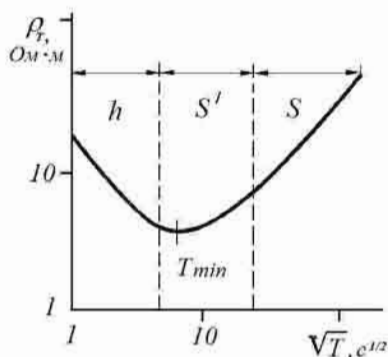


Рис. 55. Кривая рекогносцировочных измерений магнитотеллурического поля:

S' – расширенный диапазон S

водимости S толщи пород до опорного электрического горизонта, например фундамента, а диапазон h – для определения глубины горизонта с ρ_2 . Затем строят карты этого горизонта и карты равных значений S .

Модификация ЭЗ на основе изучения магнитотеллурического поля носит название МТЗ. Его сущность заключается в одновременной регистрации компонентов магнитотеллурического поля E_x, E_y, H_x, H_y, H_z на поверхности Земли и последующем спектральном анализе результатов измерений. В общем случае МТЗ – это индуктивное зондирование, основанное на использовании скин-эффекта. Глубина проникновения тока зависит от периода вариаций T .

Измерительная установка состоит из двух взаимно перпендикулярных приемных линий M_1N_1 и M_2N_2 (датчики электрического поля) и трех магнитометров-вариометров H_x, H_y, H_z (датчики магнитного поля). Датчики электрического и магнитного полей располагают строго в соответствии с элементами залегания пород и тектоникой района. Наблюдения производят в отдельных пунктах по системе профилей. Возможны одновременные наблюдения в нескольких пунктах.

Обработка данных МТЗ производится с помощью специального программного обеспечения, включающего:

- 1) узкополосную фильтрацию;
- 2) выделение гармонических составляющих E_x, E_y, H_x, H_y, H_z для заданной последовательности периодов T ;
- 3) вычисление импедансов $Z_{xy} = E_x/H_y, Z_{yx} = E_y/H_x$;
- 4) определение сдвига фаз между взаимно перпендикулярными составляющими E_x, H_y, E_y, H_x ;

5) вычисление кажущихся сопротивлений: $\rho_{txy} = \frac{T}{2\pi \cdot \mu} \cdot \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2$,
 $\rho_{txy} = \frac{T}{2\pi \cdot \mu} \cdot \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2$;

- 6) построение графиков зондирования.

Интерпретация данных ЭП для всех используемых в электроразведке методов преимущественно качественная. Результаты оформляют в виде графиков характерных эффективных параметров (рис. 56).

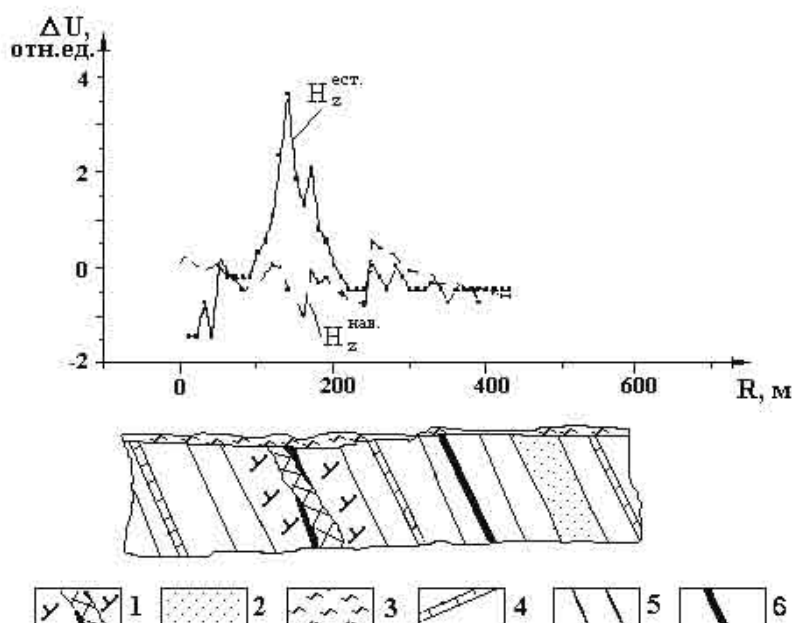


Рис. 56. Графики ДЭМП над согласным тектоническим нарушением, равнинным и угленосной толще:
 1 – тектонически нарушенная зона; 2 – песчаник; 3 – покровные отложения;
 4 – известняк; 5 – аргиллито-алевролитовая толща; 6 – уголь

Наряду с графиками строят планы графиков (сопоставление графиков и их корреляция по профилям) и карты этих параметров. Это позволяет составить представление о местоположении искомых объектов и их геометрических особенностях (простираение, падение, примерные размеры). Необходимое условие достоверности интерпретации данных ЭП – использование дополнительной геолого-геофизической информации.

Интерпретация данных ЭЗ независимо от используемых электромагнитных полей включает анализ кривых зондирования, построение геоэлектрической модели (разреза) на основе решения прямой и обратной задач и геологическое истолкование результатов (трансформацию геоэлектрического разреза в геологический).

Первоначально по значениям полевых измерений строятся в билогарифмическом масштабе (по осям абсцисс и ординат логарифмический масштаб с заданным модулем) кривые ЭЗ с последующей их качественной и количественной интерпретацией. Последняя представляет собой достаточно сложный процесс. Основной рабочей моделью служит трехслойный геоэлектрический разрез, согласно которому все кривые зондирования разделяются на четыре типа (рис. 57).

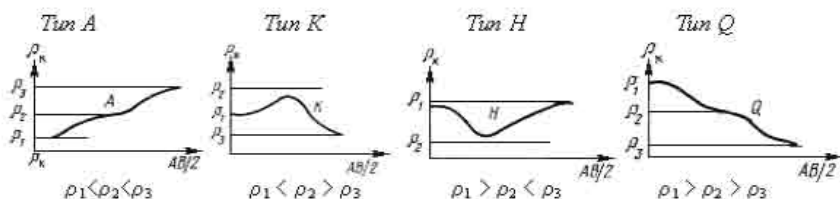


Рис. 57. Типы трехслойных кривых ЭЗ

Семейства этих кривых называются палетками. Интерпретация с их использованием основана на методе подбора, т. е. сравнении теоретических (палеточных) кривых с наблюдаемыми (рис. 58).

Наилучшим образом интерпретация кривых электромагнитного зондирования осуществляется тогда, когда ЭЗ выполнены в горизонтально-слоистых средах и когда суммарная толщина вышележащих слоев примерно в три раза меньше каждого последующего. Если это условие не соблюдается, то тонкие слои оказываются «прозрачными» и для их выявления требуются априорные, дополнительные сведения.

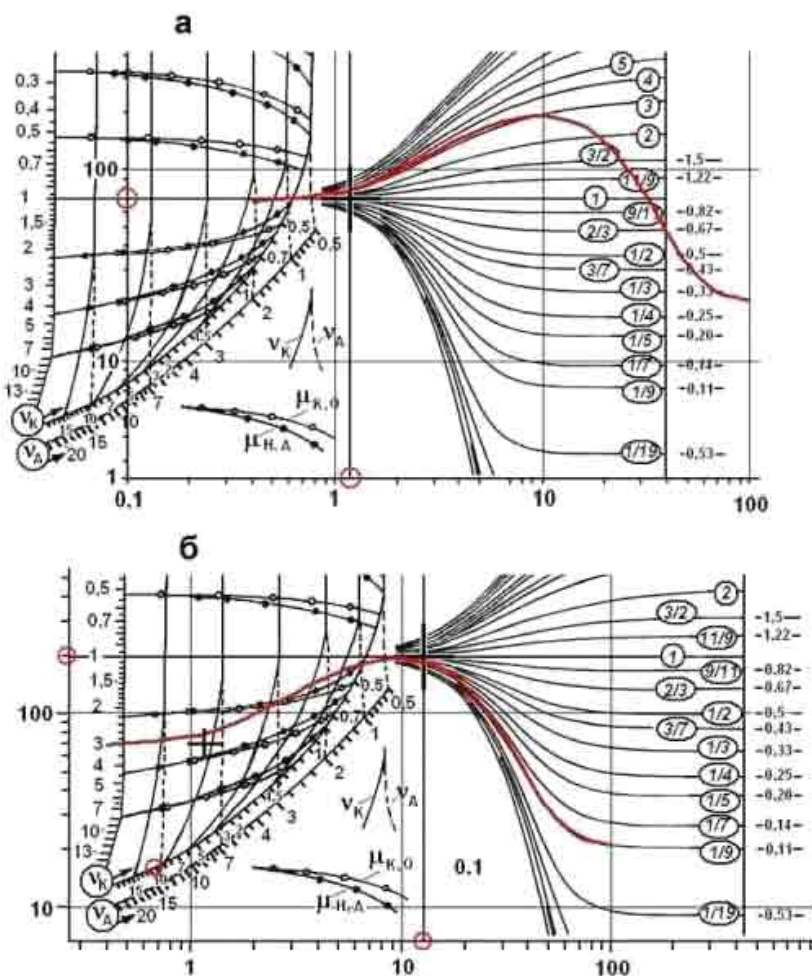


Рис. 58. Пример ручной (палеточной) интерпретации кривых ВЭЗ:
а, б – совмещение наблюдаемой и теоретической кривых для первых двух (а)
 и последующих двух (б) электродов разреза

Далее строится геоэлектрический разрез, трансформируемый в геологический. При построении привлекаются результаты других геофизических методов (рис. 59).

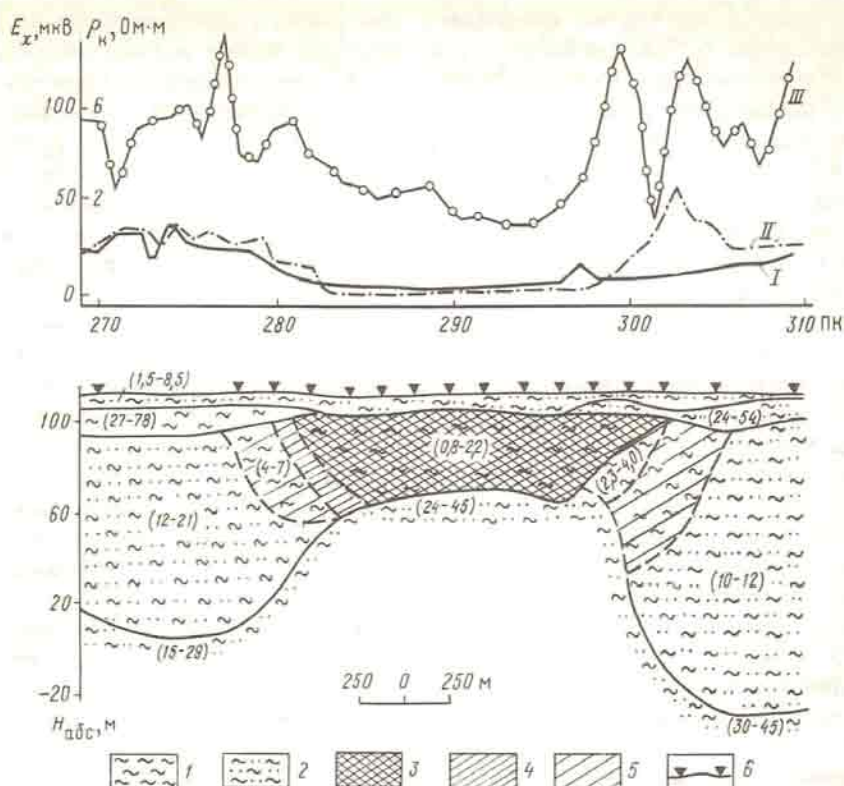


Рис. 59. Пример построения геоэлектрического разреза по данным ВЭЗ с привлечением результатов электропрофилирования (В. М. Рычков, Е. И. Глазычев, 1974):

- 1 – глины; 2 – песчано-глинистые отложения;
3, 4, 5 – зоны распространения подземных вод с различной минерализацией;
6 – точки ВЭЗ. I, II – графики СЭП при $AB=200$ м и 50 м в значениях ρ_k ;
III – график поля дальних радиостанций (метод РадиоКип) в значениях E_x .

В настоящее время количественная интерпретация результатов ЭЗ преимущественно выполняется с использованием компьютерных программ при обязательном диалоговом (интерактивном) подходе. Для этого создается начальная (стартовая) геоэлектрическая модель среды, в которой задаются примерные (ожидаемые) мощности и электромагнитные свойства слоев. Модельная

(стартовая) кривая сопоставляется с наблюдаемой. Итерационный процесс сопоставления сводится к корректировке стартовой модели и продолжается до тех пор, пока расхождение между модельной и наблюдаемой кривыми не окажется в пределах точности полевых измерений ($<5\%$). В результате на дисплее компьютера высвечивается таблица наиболее вероятных значений мощностей и электромагнитных свойств слоев (рис. 60). Далее, как и при палочной интерпретации, строятся геоэлектрические разрезы (см. рис. 59).

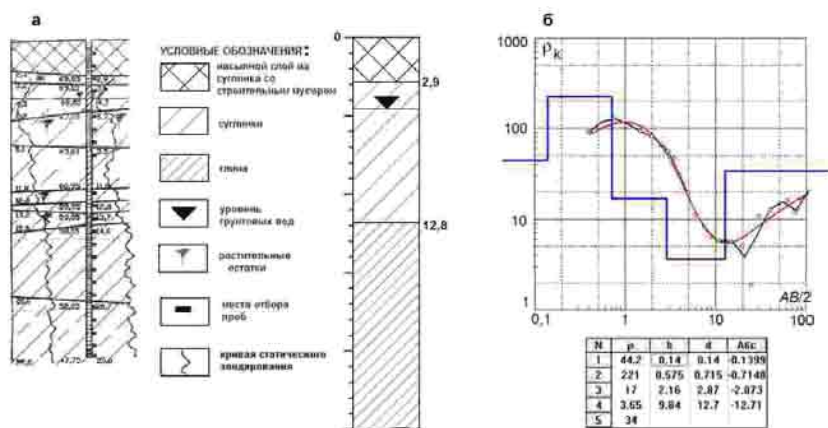


Рис. 60. Геологический разрез грунтовой толщи на эталонной площадке по ул. Зорге в г. Ростове-на-Дону по данным бурения (а) и формализованный результат компьютерной интерпретации кривой ВЭЗ в программе IPI2Win (б)

Вопросы и задания для контроля самостоятельной работы

1. Составьте схему основных модификаций электроразведки и их разновидностей.
2. Раскройте сущность электрических свойств природных сред и опишите модели электромагнитного поля (волновую, квазистационарную и стационарную).
3. Какие существуют способы возбуждения и приема сигналов электромагнитного поля?

4. Раскройте сущность основных модификаций электроразведки в методах постоянного и переменного тока.
5. Как выполняется качественная и количественная интерпретация результатов электроразведочных работ?
6. Чем объясняется востребованность электроразведочных технологий при решении геоэкологических задач?

1.4. Сейсморазведка

Сейсморазведка – раздел разведочной геофизики, в котором изучаются поля упругих деформаций, происходящих в геологических средах вследствие механических воздействий. Это взрывы, удары, техногенные вибрации, тектонические процессы, в частности землетрясения. Как и в других разделах геофизики, поля разделяются на искусственные, используемые преимущественно в сейсморазведке, и естественные, которые изучают в основном в сейсмологии.

Упругость – свойство природных объектов сопротивляться изменению их объема и формы вследствие механических напряжений. Параметрами упругости являются модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν . Модуль E измеряется в паскалях (Па) и выражается формулой

$$E = P_x / e_x, \quad (26)$$

где P_x – приложенное напряжение по заданному направлению x , а e_x – деформация от приложенного напряжения.

Объемная деформация $\Delta v / v$ для каждой точки среды есть сумма деформаций по направлениям координатных осей прямоугольной системы:

$$\Delta v / v = e_x + e_y + e_z. \quad (27)$$

Коэффициент ν выражается отношением меры растяжения-сжатия геологических объектов к их удлинению при приложении растягивающей нагрузки:

$$\nu = e_y / e_x. \quad (28)$$

В результате упругих деформаций в природных объектах возникают упругие волны, основными из которых являются **продольные** V_p и **поперечные** V_s . Эти волны называются **объемными**. Продольные волны возникают вследствие процессов расширения-сжатия, поперечные – процессов сдвига. Помимо объемных волн, на границе с дневной поверхностью возникают **поверхностные волны**: **волны Релея** (частицы колеблются под действием силы в вертикальной плоскости, вызывая одновременно деформации объема и сдвига); **волны Лява** (колебания линейно поляризованы в горизонтальных направлениях).

Продольные и поперечные волны связаны с показателями упругости следующими соотношениями:

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\delta(1+\nu)(1-\nu)}}, \quad V_s = \sqrt{\frac{E}{2\delta(1+\nu)}}, \quad (29)$$

где δ – плотность пород.

Поля упругих деформаций, как и другие геофизические поля, характеризуются параметрами напряженности и потенциала. Кроме того, в сейсморазведке изучают колебательные процессы и их распределение во времени. Пользуются показателями A (амплитуда сигнала) и t (время распространения упругих волн).

Наиболее эффективными источниками сейсмических колебаний являются взрывы, которые производятся в специально пробуренных шпурах или скважинах под покровными отложениями, т. е. ниже зоны малых скоростей (ЗМС), в которой сейсмические волны интенсивно затухают. К другим источникам сейсмического поля относятся удары. Разработаны специальные невзрывные источники, которые позволяют выполнять многократные возбуждения, необходимые для накопления сигналов (рис. 61).



Рис. 61. Источник возбуждения сейсмических колебаний «Геотон-6»

Процесс возникновения сейсмического поля от взрыва, удара и др. протекает посредством образования чередующихся областей уплотнения и разрежения. Граница между зонами, затронутыми и не затронутыми колебаниями, есть фронт, а граница, где волна прошла и колебания затухли, называется тылом волны (рис. 62).

Запись колебаний частиц – основной первичный материал сейсморазведки. Одна из форм записей – график колебаний, который представляет собой величину отклонения U частицы M за время t . Примечательно, что разные по природе происхождения упругие волны имеют свою индивидуальную форму. Поэтому для частиц одноименной среды, находящихся в точках M_1 и M_2 , записи, или, что то же, трассы, одноименных по типу волн будут близки по форме (рис. 63).

Затухание волны описывается формулой

Рис. 62. Области распространения сейсмической волны

Рис. 63. Графики колебаний частиц среды в точках M_1 и M_2 (запись трассы волны)

$$A = A_0 \cdot e^{-\alpha r} \cdot f(r), \quad (30)$$

где A_0 – начальная амплитуда волны; e – основание натурального логарифма; α – коэффициент затухания; r – расстояние между источником волны и приемником колебаний; $f(r)$ – функция распределения волн различного типа $f(r)=1/r$ для V_p и $f(r)=1/r^2$ для V_s .

Вторая форма записи колебаний частиц – график профиля волны, т. е. зависимости величины отклонения U от расстояния r до источника. На этих графиках прослеживается тенденция затухания амплитуды колебаний с увеличением момента времени регистрации (рис. 64).

Промежуток времени, разделяющий два соседних одноименных экстремума (см. рис. 63), называют видимым периодом

колебаний T , а расстояние λ между такими же экстремумами – видимой длиной волны (см. рис. 64). Показатели T и λ связаны соотношением

$$\lambda = V \cdot T = V/f, \quad (31)$$

где V – скорость; f – частота.

В сейсморазведке при изучении особенностей распространения упругих волн пользуются законами геометрической оптики. Наиболее простыми являются кинематические схемы с лучевыми построениями. В их основе лежат два основных принципа: 1) Гюйгенса – Френеля; 2) Ферма.

Рис. 64. Профили волны между точками M_1 и M_2 в моменты времени

t_1 и t_2

точка среды – самостоятельный источник волн. Форма этих волн – вид затухающих синусоид. Вся волновая поверхность является огибающей семейства элементарных волн (сфер малых радиусов). В однородной изотропной среде все лучи распространения волн прямолинейны (рис. 65, *а*), а в неоднородно-слоистой, в силу преломления, эти лучи криволинейны (рис. 65, *б*).

Согласно принципу Гюйгенса – Френеля каждая

Рис. 65. Принцип Гюйгенса для нахождения плоского волнового фронта в однородной (*а*) и неоднородной (*б*) средах

Согласно принципу Ферма распространение волн происходит по кратчайшему расстоянию и, в силу того что в земной коре существуют отражающие и преломляющие границы, наблюдается **рефрагирование волн**, т. е. их выход на поверхность (рис. 66).

Рис. 66. Схема выхода лучей к земной поверхности за счет рефракции

На явлении рефракции основано применение методов сейсморазведки, т. е. методов отраженных (МОВ) и преломленных (МПВ) волн. Их распространение в пространстве описывается типовой формулой

$$r = V(x, y, z) \cdot t, \quad (32)$$

где r – расстояние между источником и приемником упругих волн; $V(x, y, z)$ – пространственная скорость; t – время первого вступления.

Если в геологической среде создать источник упругих (сейсмических) колебаний, то от него по всевозможным направлениям будут расходиться сейсмические волны. Последние принято разделять на волны полезные, к которым относятся **отраженные** и **преломленные (головные)**, и второстепенные: **дифрагированные**, **интерференционные** и **боковые**.

Если выделить распространяющуюся от источника единичную, падающую под углом α продольную волну, то в среде, где есть границы раздела, между которыми находятся слои, отличающиеся по акустической жесткости A (произведение скорости V на плотность δ , т. е. $A = V \cdot \delta$), образуется еще четыре волны: $P_1 S_1$ – отраженная поперечная, $P_1 P_1$ – отраженная продольная, $P_1 P_2$ – проходящая продольная, $P_1 S_2$ – проходящая поперечная (рис. 67).

Волна, не поменявшая свой тип, называется **монотонной**, а поменявшая – **обменной**.

Если в среде существует граница (границы), разделяющая среды, где нижележащий слой име-

Рис. 67. Образование различных типов волн на границе двух твердых сред: α и α' – углы падения и отражения волны

ет скорость V_2 , большую, чем у выпележащих слоев, скорость которых V_1 , то при падении лучей (сейсмических волн) на такую границу создаются головные (преломленные) волны. Они параллельны друг другу и образуются только на определенном удалении от источника (рис. 68), когда возникает скользящая вдоль границы волна при угле падения α , равном некоему критическому углу i :

$$\sin(\alpha=i) = \frac{V_1}{V_2}. \quad (33)$$

Скорость распространения головных волн больше, чем падающих и отраженных, поскольку $V_2 > V_1$. Эти волны имеют и значительно бóльшую амплитуду.

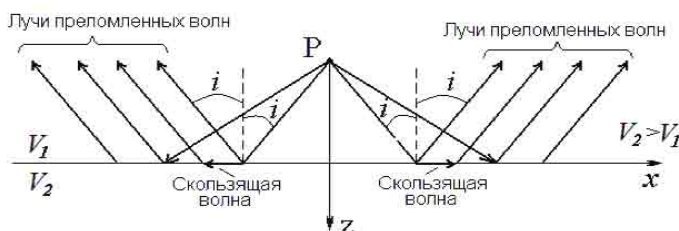


Рис. 68. Схема образования головных волн

Однако приведенная картина не означает, что на рассматриваемой границе нет других волн. Соответственно, присутствуют и отраженные и второстепенные волны.

Для P_1P_1 волн принцип Ферма приводит к закону Снеллиуса, согласно которому луч отраженной волны лежит в плоскости падения, направлен вверх от границы и угол α' между этим углом и нормалью всегда равен углу α (см. рис. 67).

Второстепенные волны возникают, как правило, на сложных геологических границах, которые имеют неровности и характеризуются прерывистостью. В тех случаях, когда размеры «шероховатости» меньше длины волны λ , возможно образование дифрагированных волн, т. е. волн с изгибами фронтов. В результате получается «радужная» картина, которая осложняет общую

картину основных типов сейсмических волн. Другой тип второстепенных волн – это интерференционные волны. Они представляют собой сложение когерентных (совпадающих по фазе) волн. В результате получается картина чередования полос волн большой и малой амплитуд, т. е. обычная интерференционная картина.

Особый вид второстепенных волн – боковые волны, возникающие в пределах границ раздела, где существуют малые отражающие площадки. Создается эффект, аналогичный волновой ряби на поверхности водоема.

К волнам-помехам относят поверхностные волны, особый вид которых связан с границей «свободной поверхности» земля – воздух. Основная из этих волн – волна Релея, которая распространяется вдоль земной поверхности по эллипсоидной траектории, вертикальной к поверхности, и имеет скорость меньшую, чем у поперечных объемных волн.

Краткая характеристика скорости распространения упругих волн

Дифференциация пород геологических разрезов по скорости распространения упругих волн предопределяет способность этих волн к отражению, преломлению, дифракции и т. д. на границах разделов сред.

Твердая фаза

Для основных породообразующих минералов тенденция изменения скорости распространения упругих волн несколько иная, чем у плотности, и определяется удельным весом, физико-механическими характеристиками и строением кристаллической решетки (рис. 69).

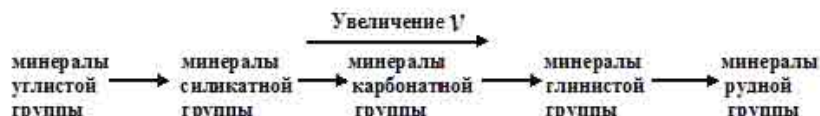


Рис. 69. Тенденция изменения скорости распространения упругих волн в твердой фазе

Жидкая фаза

Вода и нефть имеют относительно малые значения скорости распространения упругих волн:

$$V_{\text{воды}} = 1,5 \text{ км/с}, V_{\text{нефти}} = 1,35 \text{ км/с}.$$

Это значит, что высокопористые породы, заполненные водой или нефтью, будут иметь более низкие значения скорости по отношению к преобразованным (окаменелым и, следовательно, низкопористым) породам.

Газовая фаза

Скорость распространения упругих волн в воздухе и природных газах еще ниже, чем в воде и нефти, и составляет:

$$V_{\text{возд}} < 0,8 \text{ км/с}, V_{\text{метана}} < 0,7 \text{ км/с}.$$

Кристаллические породы

Скорость распространения упругих волн в кристаллических породах увеличивается у магматических от кислых к ультраосновным, а у метаморфических по мере роста степени метаморфизма. Для обеих групп графики изменения однотипны (рис. 70).

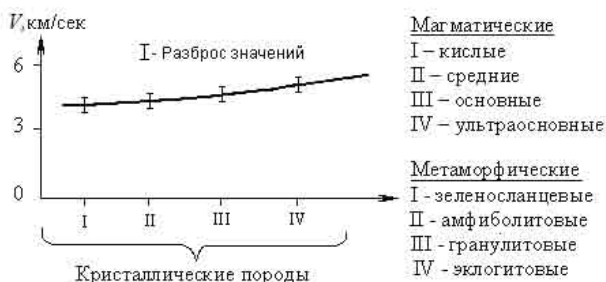


Рис. 70. Тенденция изменения скорости распространения упругих волн у кристаллических пород

Осадочные породы

В одноименных стадиях преобразования тенденция изменения показателя V_p соответствует таковой для твердой фазы. То есть наблюдается последовательное увеличение скорости распростра-

нения упругих волн от пород углистой группы к породам рудной группы.

На различных стадиях эпигенетических преобразований более значительные изменения V_p происходят у терригенных пород (рис. 71).

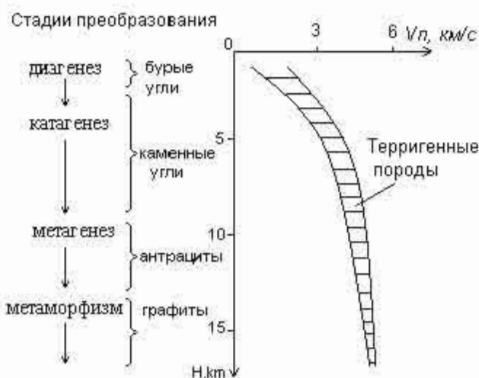


Рис. 71. Тенденция изменения скорости распространения упругих волн в осадочных терригенных породах в зависимости от стадий их преобразования

Графическое изображение полей сейсмических возмущений

При сейсморазведочных работах определяют время прихода волны t в точки x . Зависимость t от x носит название годографа. Построение таких графиков для известных моделей геологической среды составляет прямую задачу сейсмической разведки, а процесс сравнения (подбора) годографов, построенных по наблюдаемым значениям, с таковыми для модельных сред — суть решения обратной задачи сейсморазведки.

Для поверхностной (прямой) волны годограф состоит из двух отрезков прямых линий, проходящих через начало координат, точку 0 (рис. 72, а). Уравнение годографа будет иметь вид

$$V_x = \Delta x / \Delta t, \quad (34)$$

где V_x — кажущаяся скорость.

Для отраженных волн годограф представляет собой совмещенные на отметке взрыва (координата 0 на оси расстояний) две ветви гиперболы, характеризующие зависимости времени пробега волн от точки возбуждения упругих колебаний (пункт взрыва – ПВ) до точек расположения сейсмоприемников (пункты приема – ПП), если они размещены по обе стороны от ПВ (рис. 72, б). Формула годографа

$$V_{\kappa} = \sqrt{2m(\Delta U/\Delta t)}, \quad (35)$$

где $U = t_2^2 - t_1^2$.

Для преломленных волн, как и для поверхностных, годографы являются линейными графиками. Они не пересекаются с осью t , так как образуются на определенном удалении от источника (рис. 72, в и 68).

Рис. 72. Годографы прямой (а), отраженной (б) и преломленной (в) волн

Основные методы сейсморазведки

В сейсморазведке из полезных волн используют отраженные и преломленные, соответственно, методы, основанные на их регистрации, получили название **метод отраженных волн (МОВ)** и **метод преломленных (головных) волн (МПВ)**.

Для эффективного использования МОВ подбирают мощность источника таким образом, чтобы сейсмические волны имели достаточную амплитуду. В таких случаях на фоне многократно от-

раженных волн создаются условия для преимущественного выделения однократных.

В практике полевых работ получил распространение способ, названный методом общей глубинной точки – ОГТ (центр между ПВ и ПП). При этом появляется возможность «привязывать» наблюдения на отражающей горизонтальной границе к каждой конкретной ее точке (рис. 73, а) или к площадке, образуемой по восстанию отражающей наклонной границы (рис. 73, б).

Рис. 73. Схемы размещения ПВ и ПП в методе ОГТ

Замечательная особенность ОГТ – в создании перекрытий. Суть в том, что всю линию источник – приемник последовательно «сдвигают» (перемещают) по профилю с заданным шагом (рис. 74). При этом не охватываются только первые и последние расстановки сейсμοприемников. Преимущества технологии очевидны: осуществляется накапливание и суммирование сигналов и появляется возможность фильтровать полезные сигналы (однократные волны) на фоне волн помех.

Рис. 74. Система наблюдений ОГТ способом перекрытий

Методика работ МПВ учитывает факт возникновения преломленных волн на определенном удалении от источника (см. рис. 68 и 72, *в*). Расстояние x между источником и первым сейсмоприемником оценивают по формуле

$$x \geq h_o \cdot \operatorname{tg} i, \quad (36)$$

где i – критический угол; h_o – толщина слоев до отражающе-преломляющей границы (кратчайшее эхо-расстояние).

Величина x может составлять от первых до нескольких десятков и даже сотен метров, в зависимости от глубины залегания преломляющей границы раздела.

При работах МПВ различают расстановку сейсмоприемников с расположением пунктов возбуждения на двух или одном флангах. По результатам наблюдений в первом случае строятся встречные, а во втором нагоняющие годографы.

Система встречных годографов за счет их увязки во взаимных точках, соответствующих пунктам возбуждения O_1 и O_2 , позволяет уверенно распознавать волны от преломляющих границ

и их прослеживание по площади (рис. 75, *а*).

Система нагоняющих годографов, построенных по данным возбуждений в двух односторонних пунктах, дает возможность проследить

Рис. 75. Системы встречных (*а*) и нагоняющих (*б*) годографов преломленных волн

непрерывность преломляющей границы по признаку параллельного смещения годографов на величину Δt (рис. 75, *б*).

Аппаратура и технология сейсморазведочных работ

Элементарный сейсморазведочный модуль состоит из источника упругих колебаний и их регистратора (приемника). Однако для выделения полезных волн возникает необходимость использования систем накапливания и суммирования сигналов. Предусматриваются разнообразные способы группирования и расстановки сейсмоприемников. С последних сигналы передаются

на усилители и далее регистрируются в цифровом виде. Также предусматривается визуализация результатов на экране дисплея. Функциональная схема сейсморегистрирующего канала приведена на рис. 76.

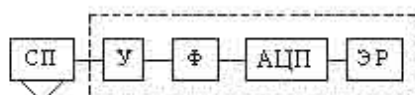


Рис. 76. Функциональная схема сейсморегистрирующего канала:
СП — сейсмоприемник; У — усилитель;
Ф — фильтр; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ЭР — электронный регистратор

Совокупность усилительных каскадов и регистрирующих устройств составляет сейсморегистрирующую станцию (рис. 77).

Рис. 77. Типовая блок-схема цифровой сейсмостанции

Электрические сигналы от сейсмоприемников поступают на входы сейсмических усилителей и далее через коммутирующее устройство на аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Кодирование сигналов начинается лишь с момента поступления сигнала синхронизации с усилитель-формирователем импульса запуска, на вход которого подключается сейсмоприемник, устанавливаемый на землю рядом с пунктом возбуждения.

Технологии сейсморазведочных работ объединяют операции подготовки и производства наблюдений. Это изучение геолого-геофизических условий, оценка местности, разбивка профилей, выбор аппаратуры и технических средств, топографическая привязка, составление и оперативная корректировка последовательности работ и т. д. Технологии существенно отличаются при проведении сейсморазведки на суше, акваториях, в скважинах и горных выработках. Основные отличия заключаются как в специфике самих работ, так и в применяемых аппаратурных модулях и технических средствах. Используются различные сейсмостанции, сейсмические косы (многожильные сейсмические кабели) и присоединяемые к ним сейсмоприемники, буровые станки, передвижные пункты взрыва, установки невзрывного возбуждения, вспомогательный транспорт и т. д. Пример производства сейсморазведочных работ для решения инженерно-геологических и экологических задач приведен на рис. 78.

В морской сейсморазведке применяют специально оснащенные плавсредства (суда), на которых устанавливаются сейсмо-



Рис. 78. Процесс производства сейсморазведочных работ

станция, оборудование для буксирования источников и приемных устройств (кос), навигационная аппаратура и др. Сейсмические косы являются цифровыми (стримеры) и делятся на плавающие и донные (при работах на мелководье и малых водоемах). Сейсмическими источниками служат группы пневмо- и (или) электроискровых (спаркеры) излучателей. Все это, как и в наземной сейсморазведке, предопределяет различные системы наблюдений методами МПВ и МОВ. Сейсморазведка 2D выполняется, как правило, в виде продольного многократного профилирования с одной косой, а сейсморазведка 3D реализуется с помощью буксируемой базы наблюдений (один источник и несколько параллельных кос).

Скважинная сейсморазведка в основном состоит из сеймокаротажа (определение средних и пластовых скоростей распространения упругих волн) и вертикального сейсмического профилирования – ВСП (изучение волновой картины в стратиграфическом разрезе). Исследования выполняются в буровых скважинах по схеме «скважина – поверхность» (рис. 79). Для выполнения работ требуется термостойкая скважинная сейсморегистрирующая аппаратура, устанавливаемая на спецавтомобиле, на котором помимо цифровой сейсмостанции находится лебедка с многожильным каротажным кабелем.

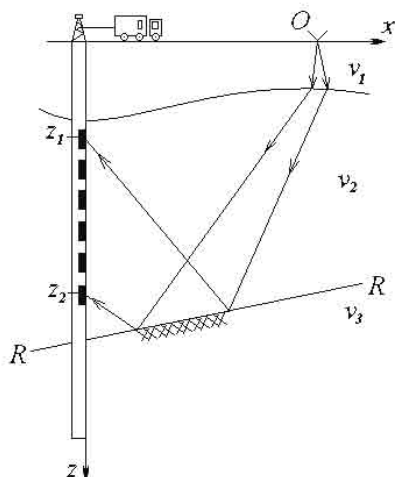


Рис. 79. Схема наблюдений методом ВСП

Интерпретация сейсморазведочных данных

Процесс интерпретации – многоуровневый и, как и для других геофизических разделов, включает два этапа: 1) собственно сейсмическую интерпретацию (интерпретацию сейсмотрасс); 2) геологическую интерпретацию, т. е. решение обратной задачи сейсморазведки.

Сейсмическая интерпретация состоит из визуального воспроизведения записей (на бумажном носителе или на экране дисплея) с их последующим нормированием (выравниванием) и фильтрацией в различных частотных диапазонах по каждой сейсмотрас-се. Правильность ввода данных и качество первичного (полевого) материала оценивается при анализе волновой картины (рис. 80).

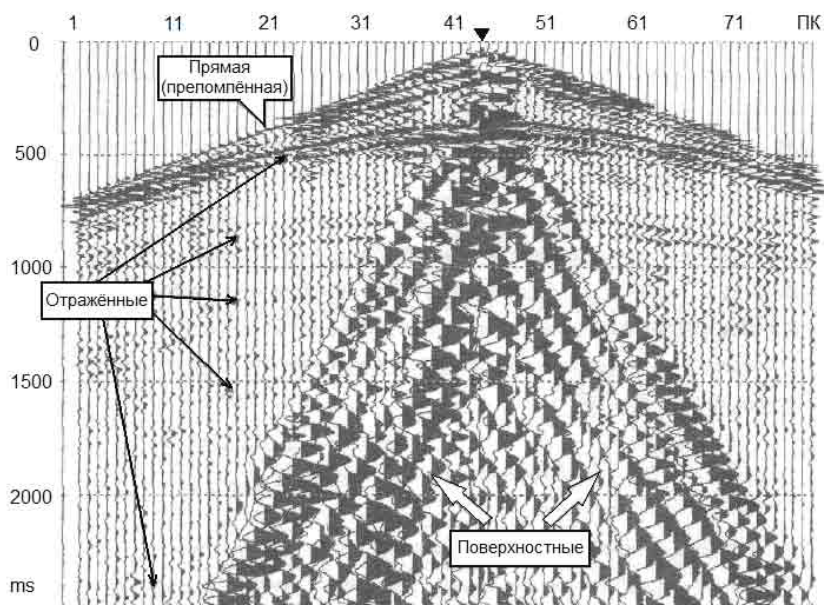


Рис. 80. Сейсмограмма ОПВ при расположении ПВ между ПК-44 и ПК-45

Для этого все введенные данные визуализируются на дисплее ЭВМ (повальный вывод) в том порядке, в каком они были получены в поле, т. е. в сортировке ОПВ без применения процедур обработки.

Волновая картина, вид которой приведен на рис. 80, это сводная сейсмограмма отображения волнового поля конкретного источника (в данном случае взрыв тротилового заряда 0,5 кг в скважине на глубине 10 м). Картина отображает характер регистра-

ции волн на сейсмограммах, их динамические и кинематические параметры, области прослеживаемости на профиле, регулярные и нерегулярные помехи.

Основная задача сейсмической интерпретации – выделить однократные волны, которые несут полезную информацию на фоне многократных волн-помех. Далее производится сопоставление отфильтрованных сейсмотрасс, т. е. их корреляция (рис. 81).

При этом следует отметить, что в процессе фильтрации однократных волн, возникающих от маркирующих горизонтов, последние уверенно выделяются лишь в тех случаях, когда толщина этих маркирующих слоев сопоставима с длиной волны. В противном случае фиксируются

Рис. 81. Корреляция сейсмотрасс отфильтрованных однократных волн: I–IV – сейсмотрассы; А, Б, В – пакеты однократных волн маркирующих горизонтов

отражения от неких промежуточных горизонтов, так как тонкие слои являются «прозрачными».

Последующий процесс многоуровневой интерпретации сводится к анализу годографов, т. е. анализируются годографы по сейсмотрассам в каждой точке приема, и таким образом прослеживается непрерывность той или иной границы. Обязателен учет влияния ЗМС, который позволяет привести сейсмотрассы к некой условной границе (рис. 82).

Рис. 82. Влияние ЗМС на кинематику отраженных волн (а) и приведения годографа к исправленным значениям (б): 1, 2 – годографы экспериментальных (1) и исправленных (2) значений

Конечным результатом сейсмической интерпретации является восстановление волновой картины. Выполняется монтаж сейсмотрасс, который дает качественную картину строения геологического разреза исследуемого участка земной коры. Этот монтаж сейсмотрасс носит название временного разреза (рис. 83).

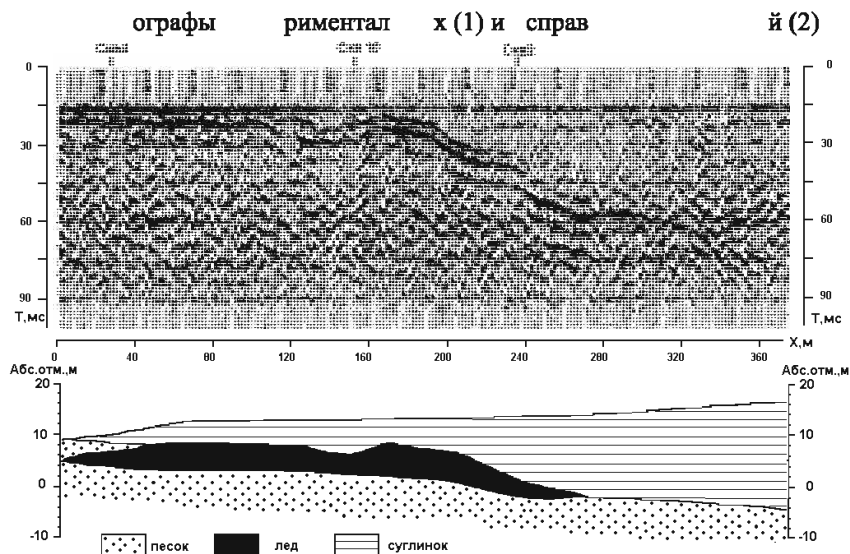


Рис. 83. Временной сейсмический и соответствующий ему геологический разрез на участке распространения пластовых льдов (Ямал, газоконденсатное месторождение)

Следует отметить, что временной разрез не позволяет оценить глубины залегания границ пластов. Поэтому производится перевод временного разреза в глубинный с масштабируемой вертикальной осью, по которой оцениваются толщины пластов. Перевод временного разреза в глубинный требует автоматизированной обработки. Используется формула

$$F_0(t) \cdot t = \Phi_0(t), \quad (37)$$

где $\Phi_0(t)$ – функция глубинного разреза; F_0 – функция сейсмотрасс однократных волн.

При построении глубинных разрезов обязательен учет априорных данных, к которым относятся в первую очередь результаты бурения и других геофизических методов. Пример сопоставления временного и глубинного разрезов приведен на рис. 84.

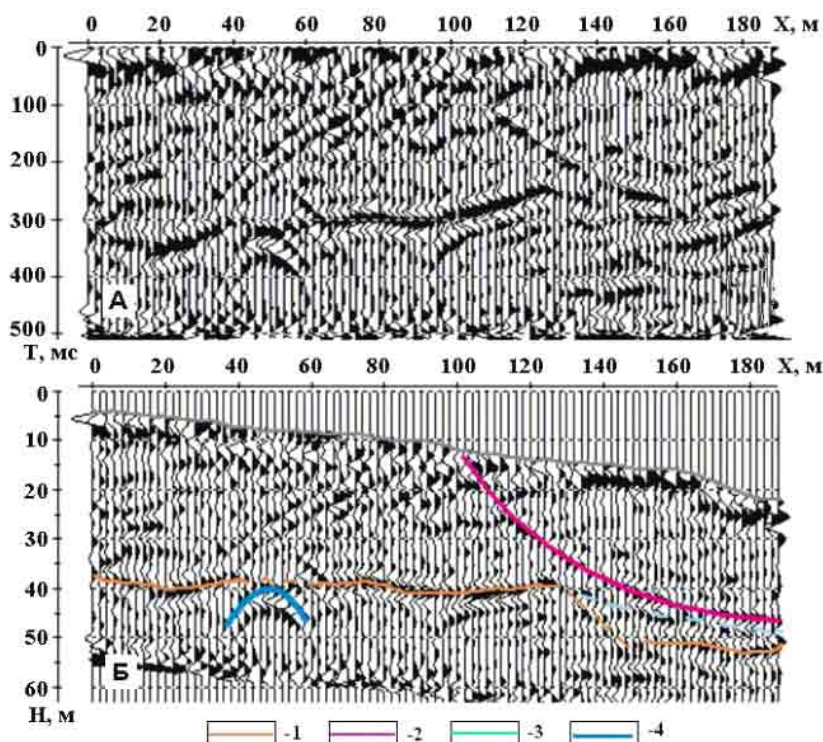


Рис. 84. Временной (А) и глубинный (Б) разрезы ОГТ на оползневом участке:

1 – кровля карбонатных отложений; 2 – поверхность смещения; 3 – кровля глин; 4 – дифракционная волна

Геологическая интерпретация заключается в переводе сейсмогеологического разреза в геологический. Предусматривается определение количественных показателей стратиграфического разреза, т. е. глубины залегания стратиграфических слоев, изме-

нения их мощности (толщины) и строения. Обязательно определение скорости распространения упругих волн для каждого интервала между отражающими границами, сопоставление данных с бурением, электроразведкой и гравиразведкой.

Временные и глубинные разрезы строятся с помощью специальных компьютерных программ. Поэтому современные технологии сейсморазведки предусматривают регистрацию сейсмических данных в специальных форматах, чтобы обрабатывающие системы могли автоматически распознавать и считывать первичную информацию, относящуюся к «описанию» всех необходимых для сейсмических трасс данных (дата, участок, профиль, регистрирующие параметры и т. д.).

Принято представлять системы наблюдений на обобщенной плоскости, где положения ПВ и ПП для каждого отдельного наблюдения отображаются вполне однозначно (рис. 85).

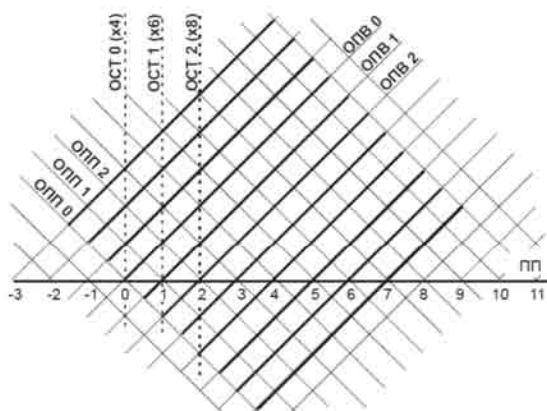


Рис. 85. Изображение системы наблюдений на обобщенной плоскости:

ПП – пункты приема (совмещенные с пунктами возбуждения – ПВ); ОПН – линии общего пункта приема; ОПВ – линии общего пункта возбуждения; ОСТ – линии общей средней (глубинной) точки

Для того чтобы показать, на каком интервале профиля расположены ПП (интервал наблюдений) при возбуждении на том или ином определенном ПВ, на вспомогательной линии, исходя-

щей от этого ПВ под углом 45° , зачерняют тот интервал, на который проецируется линиями под углом -45° интервал расположения ПП. Следовательно, изображение на обобщенной плоскости не только однозначно определяет положение ПВ и ПП на профиле, но в случае многократных перекрытий позволяет легко формировать сейсмограммы общего пункта возбуждения (ОПВ), общего пункта приема (ОПП), общих удалений (ОУ), общей глубинной (ОГТ) или средней (ОСТ) точки.

Как правило, компьютерные программы обработки сейсморазведочных данных включают операции обработки результатов и МПВ, и МОВ.

Процесс обработки данных сейсморазведки МПВ предусматривает: 1) чтение, визуализацию и фильтрацию сейсмограмм; 2) редактирование трасс и ввод поправок; 3) корреляцию первых вступлений волн; 3) построение и редактирование годографов; 4) определение сейсмических скоростей и построение преломляющих границ. Обработка производится в интерактивном (диалоговом) режиме, и при возникновении каких-либо неувязок или сомнений возможен возврат на несколько шагов назад.

Граф обработки (последовательность процедур) МОВ–ОГТ содержит определенную последовательность обязательных процедур, таких как: 1) ввод полевых данных и присвоение им геометрии; 2) сортировка трасс по общим точкам (ОТВ) или пунктам (ОПВ) возбуждения и их накопление; 3) то же по ОГТ с вводом априорных кинематических поправок, частотной и пространственной фильтрацией и последующим суммированием этих трасс (трасс ОГТ). Примеры выполнения основных процедур обработки в системе RadExPro приведены на рис. 86 и 87. Рисунок 86 иллюстрирует возможности существенного улучшения отношения сигнал/помеха посредством полосовой частотной фильтрации. Это достигается при работе в интерактивном режиме путем проб и ошибок, т. е. каждый раз следует визуальнo анализировать результаты работы фильтра. Но можно сделать процесс гораздо более целенаправленным и быстрым, предварительно рассматривая частотные спектры сигнала и помехи в исходных сейсмограммах и далее в суммарном разрезе.

Так, сравнение спектров для сигнала (рис. 86, А) и помехи (рис. 86, Б) показывает, что спектр сигнала сосредоточен в основном в диапазоне частот 25–60 Гц, в то время как спектр помехи

в основном низкочастотный. Исходя из этого, можно ожидать, что применение частотного фильтра с полосой пропускания, подобной спектру сигнала, даст существенное улучшение отношения сигнал/помеха.

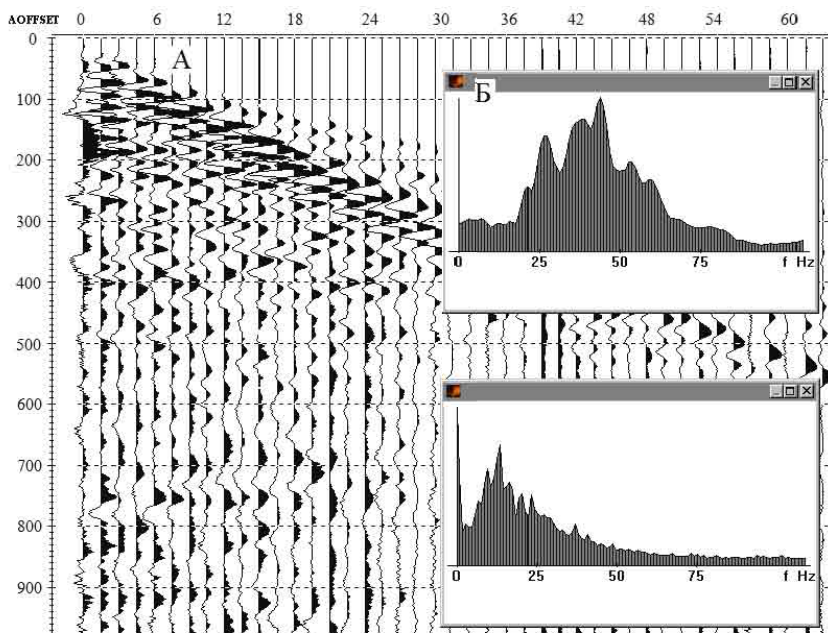


Рис. 86. Сейсмограмма ОГТ и частотные спектры сигнала (А) и помехи (Б)

На рис. 87 приведен пример достижения выигрыша в отношении сигнал/помеха посредством применения пространственной фильтрации, использующей горизонтальную коррелированность сигнала. В таких случаях одним из исходных условий применения метода ОГТ является предположение о плоском характере границ и их незначительном наклоне в пределах общей отражающей площадки.

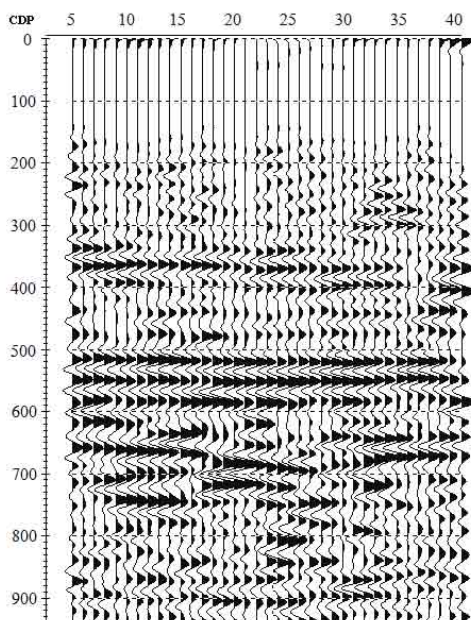


Рис. 87. Временной разрез ОГТ после применения полосовой частотной и пространственной фильтраций

Логично выполнение этого условия и в более широких пределах – для нескольких соседних **ОГТ**. Тогда сигналы, отраженные от этих точек, также можно суммировать с целью еще большего усиления на фоне нерегулярных помех. Фильтр рекомендуется применять в самом конце обработки для улучшения прослеживаемости границ на суммарном временном разрезе **ОГТ**.

Вопросы и задания для контроля самостоятельной работы

1. Объясните, в каких средах распространяются только продольные сейсмические волны и какое значение в сейсморазведке имеет принцип Гюйгенса – Френеля. Раскройте физическую сущность этого принципа.

2. Перечислите основные принципы построения и анализа географов отраженных и преломленных волн. Объясните, какую

роль они играют при анализе полевых сейсморазведочных материалов.

3. Раскройте понимание суммарной сейсмической картины, полученной в полевых условиях. Объясните, какие поправки и с какой целью вводят в записи отраженных волн при получении временного сейсмического разреза.

4. Объясните, почему основным видом регистрации сейсмических колебаний является цифровая запись и какие последовательные преобразования сейсмического колебания происходят в цифровом сейсморегистрирующем канале.

5. Объясните, в чем особенность возбуждения поперечных волн.

6. Дайте определение временного разреза. Объясните принципы его построения и то, какие дополнительные данные необходимо ввести для преобразования временного разреза в глубинный.

7. Какие оценочные характеристики делают сейсморазведку ведущим методом в геологии, инженерной геологии и геоэкологии?

1.5. Ядерная геофизика

Ядерная геофизика – раздел разведочной геофизики, изучающий распределение в земной коре естественных и искусственно созданных радиационных полей, которые исследуются двумя основными группами методов: а) радиометрическими, основанными на измерении естественных α -, β -, γ -излучений горных пород и обусловленными кларковыми или аномальными содержаниями в них радионуклидов или концентрацией изотопов радона в почвенном воздухе; б) ядерно-физическими, предусматривающими поэлементный анализ горных пород путем изучения вызванной радиоактивности.

Поле ионизирующих излучений (**естественной радиоактивности**) присуще Земле как космическому объекту и складывается из: 1) космического излучения; 2) радиоактивного распада элементов земной коры; 3) дегазации радиоактивных газов, выходящих на поверхность (радон Rn, торон Th). В результате на дневной поверхности формируется **радиационный фон**. В этом фоне доля космического излучения около 50 % и составляет 3–6 мкР. С увеличением высоты космический радиационный фон возрастает в среднем на 1,5 мкР на каждый километр отметки рельефа местности. Остальная доля радиационного фона приходится на естественную радиоактивность горных пород. При этом их радиоактивность неодинакова. Средними (нормальными) по радиоактивности считаются природные объекты, в которых кларковое содержание не превышает 2,5 (2,5 г/т). Повышенная радиоактивность обуславливается наличием урана с соответствующим образованием радиоактивных газов (радона и торона). Тысячная доля содержания урана в общей массе создает радиоактивность в 5 мкР/час. Радиоактивный фон повышается и в участках земной коры, содержащих кроме урана и тория калий, концентрация которого в земной коре более чем в 2000 раз превышает концентрацию тория и более чем в 10000 раз – концентрацию урана.

Радиоактивному распаду подвергается достаточно много химических элементов, в основном с порядковым номером в таблице Менделеева большим, чем 82. Известно более 230 радиоактивных изотопов (ядра атомов с различным числом нейтронов). Однако основной вклад в естественную радиоактивность вносят три радиоактивных элемента – уран (U), торий (Th) и калий (K). Они

находятся в горных породах и других природных объектах в виде изоморфных примесей и самостоятельных минералов. Их вклад следующий: $K \approx 60\%$, $U \approx 30\%$, $Th \approx 10\%$. Интенсивность естественного гамма (γ)-излучения (J_γ) наибольшая у K и наименьшая у Th . Излучение происходит при различных энергиях (рис. 88).

Существуют аппаратные решения, согласно которым энергию γ -излучения можно разделить на спектры (выделить окна). Способ получил название гамма-спектрометрии.

Следует отметить, что γ -излучение имеет наибольшее значение при формировании естественной радиоактивности, поскольку α , β -частицы при взаимодействии с веществом испытывают силь-

Рис. 88. Спектр естественного γ -излучения

ное кулоновское взаимодействие и обладают очень малой проникающей способностью: α -частицы задерживаются обычным листом бумаги, β -частицы – тонкой свинцовой пленкой.

Закон радиоактивного распада выражается формулой

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N, \quad (38)$$

где dN – число распадающихся ядер из общего количества N за время dt ; λ – постоянная распада. Она связана с другой единицей – $T_{1/2}$ – периодом полураспада соотношением

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}. \quad (39)$$

Закон радиоактивного распада описывает последовательное превращение одних элементов в другие, которое заканчивается образованием устойчивых нерадиоактивных изотопов. Основны-

ми являются ряды U и Th. Они включают до 15–18 изотопов, конечный продукт – радиогенный свинец.

Родоначалники радиоактивных семейств (U, Th) относятся к долгоживущим элементам. У них $T_{1/2} > 10^8$ лет. В состав семейства урана входят радий (Ra) с $T_{1/2} = 1620$ лет и радиоактивный газ радон (Rn) с $T_{1/2} = 3,82$ суток.

При распаде радиоактивных элементов в радиоактивных рядах возникает состояние радиоактивного равновесия:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots \lambda_n N_n. \quad (40)$$

Калий (^{40}K) относится к одиночным радионуклидам, у которых радиоактивный распад ограничивается одним актом превращений.

Искусственная (наведенная) радиоактивность преимущественно связана с гамма- и нейтронным излучением.

γ -кванты – электронейтральные частицы, имеющие более высокую проникающую способность, нежели заряженные α - и β -частицы. Они представляют собой поток электромагнитного излучения очень высокой частоты ($f > 10^{18}$ Гц). Проникающая способность γ -квантов в воздухе достигает нескольких сотен метров. В природных объектах, в том числе в горных породах, γ -излучение резко ослабляется вследствие процессов фотоэффекта, комптон-эффекта, образования электрон-позитронных пар. Перечисленные процессы происходят при различных энергиях (рис. 89).

Главное значение имеет комптон-эффект. В этом диапазоне энергий интенсивность рассеянного гамма-излучения (J_γ) зависит от плотности среды. Чем больше плотность, тем меньше J_γ .

Рис. 89. Спектр многократно рассеянного γ -излучения

Единицы измерения радиоактивности:

- 1) беккерель (Бк), $1 \text{ Бк} = 1 \text{ расп/с}$ – системная единица;
- 2) кюри (Ки) – внесистемная единица, $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$;
- 3) удельная массовая активность Бк/кг – системная единица;
- 4) удельная объемная активность Бк/м³ – системная единица;
- 5) мощность экспозиционной дозы (А/кг) – системная единица;
- 6) микрорентген в час (мкр/час) – внесистемная единица.

Нейтронное излучение возникает при фотоядерных реакциях в процессе взаимодействия α -частиц с ядрами легких элементов (бериллий, бор и др.).

Нейтроны, как и γ -кванты, являются электронейтральными частицами и из всех видов излучений обладают наибольшей проникающей способностью. Они разделяются по энергетическому спектру в диапазоне энергий $E - 10^7 - 10^{-3} \text{ эВ}$ на быстрые, промежуточные, медленные, резонансные, надтепловые, тепловые, холодные.

При взаимодействии нейтронов с природными объектами имеют место два основных, разделенных во времени, процесса: 1) замедление быстрых нейтронов ($t < 10^{-2} \text{ с}$); 2) диффузия тепловых нейтронов ($t > 1 \text{ с}$). Оба процесса сопровождаются реакциями n - n , n - γ и других типов (рис. 90).

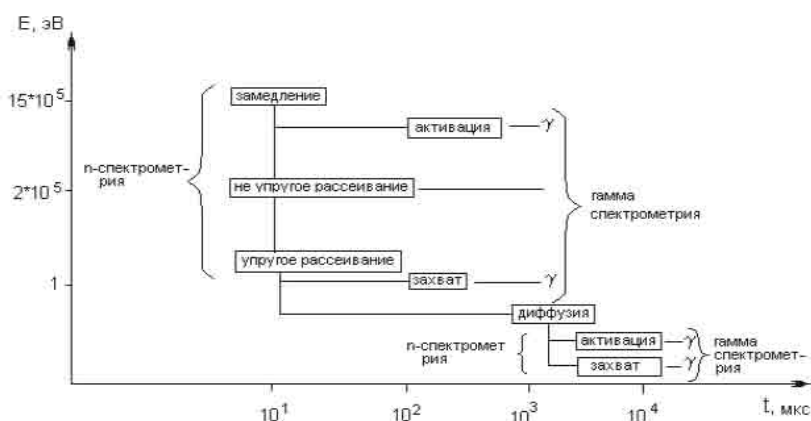


Рис. 90. Диаграмма процессов замедления быстрых и диффузии тепловых нейтронов

Характеристика радиоактивных свойств горных пород

Естественная γ -активность пород — это радиоактивность непосредственно в литосфере (в ее верхних слоях), а также на более глубоких горизонтах. Показания метода естественной γ -активности пород определяются массовыми содержаниями естественно радиоактивных элементов (ЕРЭ).

Твердая фаза

Тенденция изменения естественной γ -активности у минералов групп различной литологической принадлежности показана на рис. 91.



Рис. 91. Тенденция изменения естественной γ -активности у минералов групп различной литологической принадлежности

Жидкая фаза

Нефть и дистиллированная вода не радиоактивны. Исключения составляют подземные воды радиоактивных месторождений, а также воды сульфатно-бариевого и хлористо-кальциевого составов.

Газовая фаза

Воздух и горючие природные газы (метан, пропан, бутан и др.) не радиоактивны. Это не относится к радиоактивным эманициям, которыми являются радон, торон, актинон и продукты их распада.

Магматические породы

Радиоактивность магматических пород главным образом связана с присутствием аксессуарных уран- и торийсодержащих минералов и возрастает от ультраосновных пород к основным, средним и далее к кислым пропорционально увеличению содержания

в них кремнезема и калия (рис. 92). Интрузивные и эффузивные породы с повышенной щелочностью отличаются более значительной радиоактивностью, чем близкие по кислотности породы известково-щелочной серии. Максимальные концентрации радиоактивных элементов приурочиваются к краевым частям крупных интрузивных тел, eU изменяется от 3–9 до 20–30 %.

Рис. 92. Изменение естественной радиоактивности в щелочноземельном ряду магматических пород (eU – урановый эквивалент)

Метаморфические породы

Метаморфические породы в среднем имеют радиоактивность, близкую к магматическим породам среднего, основного и ультраосновного составов ($eU = 2–10\%$). Неодинаковая радиоактивность объясняется различием первоначального химического состава. Чем больше степень метаморфизма массивов, тем меньше средняя концентрация в них урана и тория. В частности, для гнейсов и кристаллических сланцев наблюдается уменьшение содержания урана и тория с ростом метаморфизма. Влияние метаморфизма на концентрацию урана и тория можно проследить от эпидотамфиболитовой до гранулитовой стадий (рис. 93).

Рис. 93. Изменение естественной радиоактивности в зависимости от степени метаморфизма пород

Осадочные породы

Естественная радиоактивность (J_e) осадочных пород изменяется в широких пределах и связана с наличием в их составе урана и торийсодержащих минералов, а также адсорбированных радиоактивных элементов.

Содержание U, Th, K зависит от условий образования пород, в частности, наблюдается зависимость γ -активности от глинистости (рис. 94).

Рис. 94. Зависимость естественной радиоактивности от глинистости осадочных пород

Нейтронные свойства пород

Основную роль в формировании нейтронных свойств горных пород играют: 1) водород и породообразующие минералы различных классов; 2) содержания химически связанной воды.

Показателями нейтронных свойств являются время жизни (τ) и длина замедления (L_p). Эти показатели имеют между собой линейную связь: чем больше τ , тем больше L_p .

Твердая фаза

Тенденция уменьшения длины замедления быстрых и времени жизни тепловых нейтронов у минералов групп различной литологической принадлежности приведена на рис. 95.



Рис. 95. Тенденция уменьшения длины замедления быстрых и времени жизни тепловых нейтронов у минералов групп различной литологической принадлежности

Жидкая фаза

В воде и дегазированной нефти, ввиду высокого содержания в них водорода, происходит интенсивное замедление быстрых и диффузия тепловых нейтронов. При этом наличие солей, особенно хлорсодержащих, существенно изменяет время жизни тепловых нейтронов.

Газовая фаза

Природные газы, представляющие собой смесь углеводородов, являются сильными поглотителями нейтронов. Эти процессы усиливаются при высоких давлениях, так как повышается водородосодержание.

Кристаллические породы

Кристаллические породы относятся к разряду слабых замедлителей, и поэтому время жизни в них нейтронов достаточно велико. У магматических пород в ряду от кислых к ультраосновным и у метаморфических по мере роста метаморфизма имеет место слабо выраженная тенденция увеличения показателей L , и τ , что связано с незначительным уменьшением пористости в этих направлениях (рис. 96).

Рис. 96. Тенденция изменения нейтронных свойств у кристаллических пород

Магматические породы:	Стадии метаморфизма:
I – кислые	I – зеленосланцевая
II – средние	II – амфиболитовая
III – основные	III – гранулитовая
IV – ультраосновные	IV – эклогитовая

Осадочные породы

Самым сильным замедлителем нейтронов в осадочных горных породах является водород, второстепенное значение имеют глинистые и совсем незначительное карбонатные и силикатные минералы. Для однокименных стадий в зависимости от литологического (литологического) состава тенденции изменения показателей τ и L для основных групп пород следующие (рис. 97).



Рис. 97. Тенденция изменения нейтронных показателей для групп осадочных пород различной литологической принадлежности при однокименной стадии их преобразования

Для пород однокименного состава тенденции изменения τ и L в зависимости от стадий преобразования (окаменения) этих пород определяются изменением показателя минеральности и глинистости (рис. 98).



Рис. 98. Тенденция изменения τ и L в зависимости от стадий преобразования (окаменения) терригенных пород

Наличие газа и нефти в поровом пространстве породы увеличивает время жизни нейтронов по сравнению с водоносным пластом (рис. 99). Чистые кварцевые песчаники и доломиты характеризуются наибольшими значениями τ . Минимальные значения τ имеют ангидриты, гипсы и глинистые породы. Уменьшает τ бор, а также К, Мп, Na, Fe и другие элементы. В качестве примера на рис. 100 показана зависимость изменения τ от алюминиево-кремнистого модуля (Al/Si).

Аппаратура для ядерно-геофизических исследований

Приборы для ядерно-геофизических исследований включают датчики из чувствительных элементов (ионизационные камеры,

счетчики Гейгера – Мюллера, полупроводниковые детекторы, спинтилляционные счетчики, термoluminescentные кристаллы и др.). Электронная схема включает усилители тока, индикаторы (для визуального отсчета), регистраторы (для автоматической записи) интенсивности, либо естественного гамма-излучения (J_γ), либо концентрации эманации радона, либо искусственно вызванных излучений (J_γ). Типовая блок-схема устройства радиометров изображена на рис. 101.

Для определения энергетического спектра излучений в приборах устанавливают дискриминаторы и амплитудные анализаторы. С их помощью выделяют импульсы, соответствующие опреде-

Рис. 99. Среднее время жизни нейтронов в водо- и нефтегазонасыщенных пластах

Рис. 100. Тенденция изменения времени жизни тепловых нейтронов (τ) от алюминиево-кремнистого модуля (Al/Si) в терригенных породах



Рис. 101. Типовая блок-схема радиометров, используемых при ядерно-геофизических наблюдениях

ленному диапазону энергий ионизирующих излучений. Далее сигналы подаются в нормализаторы, которые создают импульсы определенной амплитуды и формы для их измерения или регистрации.

Для воздушной и автомобильной гамма-съемок используют различные аэро- и авторadiометры, отличающиеся быстродействием, т. е. малой инерционностью. Они состоят из набора сцинтилляционных счетчиков, а также блоков: усилительного и регистрирующего. Питание приборов осуществляется с бортовой сети самолета (вертолета) или аккумуляторов автомобиля.

Для наземной (пешеходной) гамма-съемки используют разного рода полевые радиометры. Конструктивно прибор состоит из выносного зонда, пульта управления и питания от сухих анодных батарей. Радиометры градуируют. С этой целью используют образцовый излучатель радия, помещаемый в коллиматор для создания узкого пучка гамма-излучения, с помощью которого определяется цена деления шкалы радиометра.

Чтобы определить концентрацию радиоизотопов по энергетическому спектру, используют полевые гамма-спектрометры, а для изучения концентрации радона в почвенном воздухе — эманометры. Выполнение измерений объемной активности радона ^{222}Rn в пробах прибором АВ-07, включающим пробоотборное устройство, иллюстрирует рис. 102.

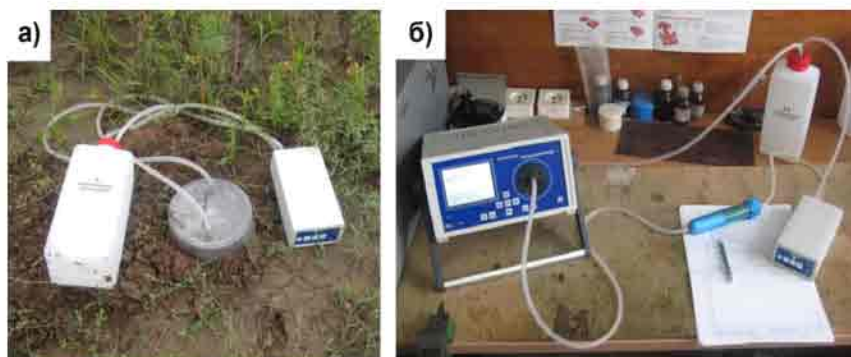


Рис. 102. Отбор проб почвенного воздуха (а) и определение содержания в них радона (б)

Радиометрические методы разведки (радиометрия)

В радиометрии наибольшее применение нашли гамма-съемки, так как гамма-лучи из всех видов радиоактивных излучений обладают наибольшей проникающей способностью. Этими методами изучаются интенсивность естественного гамма-излучения, а чаще – его спектральный энергетический состав. К методам радиометрии относятся воздушная, автомобильная, пешеходная (поверхностная), глубинная (шпуровая) гамма-съемки, радиометрический анализ проб горных пород, эманационная съемка, а также методы опробования, предназначенные для оценки концентрации радиоактивных элементов в обнажениях и горных выработках. В горных выработках изучают также жесткую компоненту космического излучения.

Аэрогамма-съемка является одним из наиболее быстрых и экономичных методов радиометрии, применяется обычно в комплексе с аэромагниторазведкой, а иногда и аэроэлектро-разведкой. Методика аэрогамма-съемки сводится к непрерывной регистрации интенсивности естественного гамма-излучения (J_γ) разных энергий. Работы проводят либо по отдельным маршрутам, либо по системе параллельных маршрутов, равномерно покрывающих разведываемую площадь. Привязку маршрутов проводит штурман по ориентирам или радионавигационным приборам. В результате аэрогамма-спектрометрической съемки рас-

считывают аномалии разных энергий, позволяющие выделить урановую, ториевую и калиевую составляющие радиоактивного поля. Наибольшими значениями энергии гамма-излучения отличаются элементы ториевого ряда, меньшими – уранового, еще меньшими – калиевого. Для повышения надежности выделения аномалий используют статистические приемы обработки с привлечением ЭВМ. Далее строят карты графиков, а иногда карты.

Автогамма-съемка представляет собой скоростную наземную гамма-съемку, выполняемую автоматически во время движения автомобиля с автогамма-спектрометром. Чувствительность автогамма-съемки значительно выше, чем у аэрогамма-съемки, благодаря приближению станции к объекту исследования. С ее помощью проводят как детализацию аэрогамма-аномалий, так и их первичный поиск. Методика автогамма-съемки сводится к профильным и площадным наблюдениям на участках, доступных для автомашин высокой проходимости. После первичной обработки материалов строят карты графиков J_γ . На них визуально (или с помощью ЭВМ) выявляют аномалии. Сравнивая их с геологическими картами и другой информацией, оценивают перспективность территорий на радиоактивные элементы.

Пешеходная (поверхностная) гамма-съемка – один из основных поисковых и разведочных методов радиометрических исследований. Ее проводят с помощью полевых радиометров и спектрометров. В результате наземной гамма-съемки строят планы графиков и карты интенсивности ΔJ_γ , эквивалентные гамма-активности пород $\Delta J_\gamma = J_\gamma - J_{нд}$.

На рис. 103 приведен пример полевой гамма-съемки на участке с хорошей обнаженностью гранитного массива. Путем сопоставления геологической (а) и радиометрической (б) карт можно уточнить контакт гранитов среднего мезозоя активностью 15 мкР/ч (участок А) и дифференцировать гранитный массив с выделением среди гранитоидов (15–18 мкР/ч) пегматитовых жил (21 мкР/ч), перспективных для поисков редкоземельных месторождений.

Глубинная (шпуровая) гамма-съемка является детализационным вариантом пешеходной гамма-съемки. Она выполняется в шпурах (бурках) глубиной до 1 м, а иногда в скважинах глубиной до 25 м с помощью специальных или полевых радиометров.

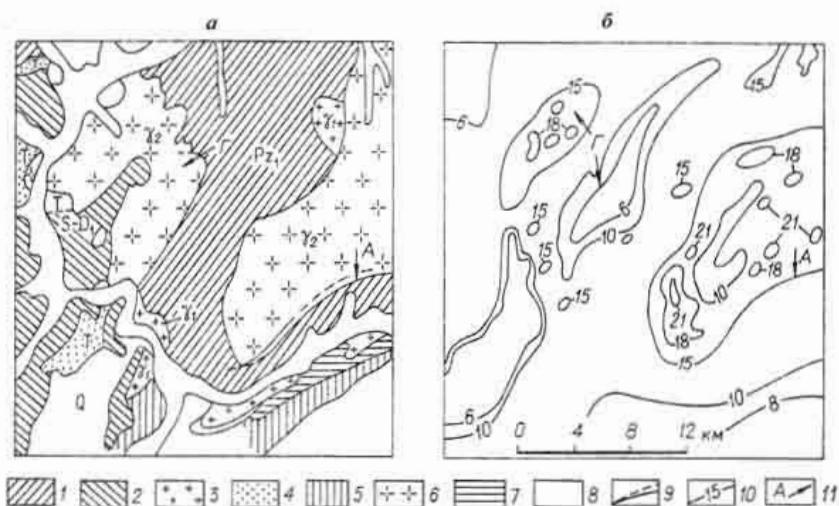


Рис. 103. Геологическая (а) и радиометрическая (б) карты на участке обнажения гранитного массива:

1 – метаморфические сланцы P_2 ; 2 – гнейсы $S-D$; 3 – граниты P_2 ; 4 – песчаники T_1 ; 5 – алевролиты T_{1-2} ; 6 – граниты M_2 ; 7 – угленосная сита Cr_1 ; 8 – четвертичные отложения Q ; 9 – тектонические нарушения; 10 – изолинии интенсивности гамма-поля; 11 – индексы сопоставляемых участков

Спектрометрическая гамма-съемка применяется как для поисков и разведки радиоактивных руд, так и для выявления других металлических и неметаллических полезных ископаемых (бокситы, олово, бериллий). Повышенное содержание тория характерно для месторождений ниобия, тантала, вольфрама, молибдена, меди, урана, а калия-40 – для ряда полиметаллических месторождений.

Эманиационная съемка (ЭС) основана на изучении газообразных продуктов распада радиоактивных веществ, из которых наибольшим периодом полураспада обладает радон (3,82 дня). Методика ЭС сводится к отбору проб подпочвенного воздуха и определению с помощью эманометра концентрации радона в нем.

На рис. 104 приведены результаты ЭС на участке развития скарновой зоны под плащом наносов мощностью 2–3 м. Из рассмотрения рисунка следует, что рудное тело на профилях ЭС четко выделяется резкими максимумами величиной 50–150 ед.

эман, что намного превосходит общий фон, условно принимаемый в 10 ед. эман.

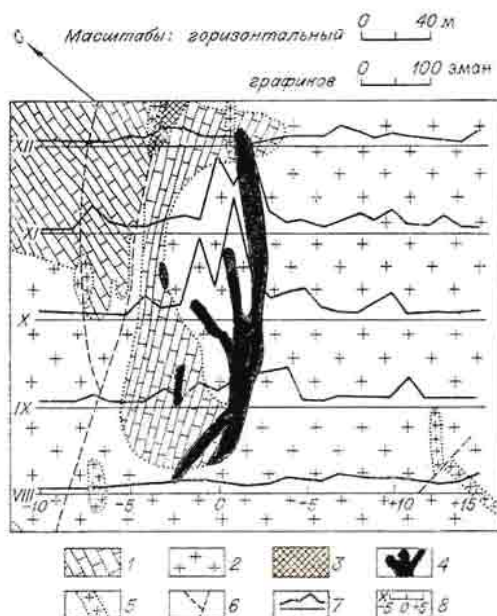


Рис. 104. Графики концентраций радона в почвенном воздухе на участке развития скарновой зоны:
 1 – мраморизированные известняки;
 2 – порфировидные граниты; 3 – кварциты по известнякам; 4 – рудные тела; 5 – графит-порфиры; 6 – тектонические разломы; 7 – графики концентрации радона; 8 – профили и точки отбора проб

Ядерно-физические методы разведки основаны на использовании искусственных радиоактивных источников. Изучению подвергаются образцы горных пород, стенки горных выработок, скважин и обнажений посредством их облучения гамма-квантами или нейтронами. Облучать можно также с помощью специальных генераторов нейтронов. Для получения гамма-квантов или нейтронов разных энергий их источники помещают в экраны-замедлители (свинцовые – для гамма-излучений, кадмиевые или парафиновые – для нейтронов). Изучая разные ядерные реакции источников облучения с электронами и ядрами атомов облучаемых горных пород и руд, можно получить информацию о химическом составе, физико-механических свойствах, степени насыщенности пород разными флюидами (нефть, вода).

Число ядерно-физических методов велико, и каждый из них нацелен на решение определенных геологических задач.

К радиоизотопным гамма-методам относятся методы изучения физико-химических свойств горных пород путем облучения их источниками гамма-квантов разных энергий. В частности, это фотонейтронный анализ, или гамма-нейтронный метод (ГНМ), плотностной гамма-гамма-метод (ГГМ-П), селективный гамма-гамма-метод (ГГМ-С), рентгенорадиометрический метод (РРМ), а также радиоизотопные нейтронные методы, включающие: 1) активационный анализ (НАК), который сводится к облучению образцов руд быстрыми или медленными нейтронами и изучению наведенной искусственной радиоактивности; 2) нейтронный анализ (ННМ и НГМ), основанный на облучении изучаемых объектов медленными нейтронами и определении плотности потока тепловых нейтронов или интенсивности вторичного гамма-излучения; 3) гамма-спектральный нейтронный анализ (ГН-С), заключающийся в изучении спектрального энергетического состава вторичного гамма-излучения радиационного захвата J_{π} .

В заключение следует привести основные ядерно-физические свойства элементов, используемые при геологических, геохимических и геофизических исследованиях (табл. 1).

Таблица 1

Основные ядерно-физические свойства элементов, используемые при геологических, геохимических и геофизических исследованиях

I. Естественные процессы			
а) ионизирующее излучение	α-част. β-част. γ-кванты k-захват	$^{235}_{92}\text{U}$, $^{238}_{92}\text{U}$, $^{232}_{90}\text{Th}$ элементы семейств $^{40}_{19}\text{K}$, $^{87}_{38}\text{Rb}$ и др. $^{40}_{19}\text{K}$, $^{138}_{57}\text{La}$	Поиск и разведка радиоактивных руд, изучение радиологического возраста, определение геохимических элементов, геологическое картирование
б) спонтанное деление		$^{235}_{92}\text{U}$, $^{238}_{92}\text{U}$	Определение радиологического возраста, изучение формы нахождения урана

I. Естественные процессы			
в) наведенная радиоактивность космическими лучами		$^{14}_6\text{C}$	Оценка радиологического возраста новейших образований (радиоуглеродный метод)
г) генерация радиогенного тепла		U, Th, K	Оценка теплового поля земной коры, поиски радиоактивных руд
II. Искусственные процессы			
Использование ядерных реакций		(n, γ) , (n, p) , (α, n) и др.	Определение влажности, пористости, плотности, содержания химических элементов

Вопросы и задания для контроля самостоятельной работы

1. Что собой представляет радиационное поле?
2. Какие существуют методы и технологии в радиометрии и ядерной геофизике?
3. Напишите реферат о нейтронных свойствах природных объектов. Перечислите основные показатели нейтронных и гамма-лучевых свойств пород.
4. Объясните типовую блок-схему аппаратуры для измерения радиоактивности и методику полевых работ с использованием радиометров и эманометров.
5. Как осуществляются наземные (автомобильная, пешеходная), а также аэрогаммарadiометрическая и аэрогаммаспектрометрическая гамма-съемки?
6. Каковы основные требования техники безопасности при работе с радиоактивными источниками?

1.6. Терморазведка

Терморазведка – раздел разведочной геофизики, изучающий распределение в земной коре преимущественно естественных и реже искусственно созданных тепловых полей специальными приборами при проведении аэро-, аква- и наземных геофизических съемок в рамках региональных геотермических исследований и поисково-разведочных геотермических работ.

Тепловое поле, равно как и другие физические поля, связано с материальной средой, в которой возникают и взаимодействуют тепловые потоки. Последние, воздействуя на материальные, в частности природные, объекты, определяют их тепловой режим, обуславливая деформацию теплового поля.

Тепловое поле Земли формируется под действием следующих энергетических процессов:

- 1) солнечная энергия (получаемая и переизлучаемая обратно);
- 2) геотермическая потеря теплоты;
- 3) энергия, теряющаяся при замедлении вращения Земли;
- 4) упругая энергия, высвобождающаяся при землетрясениях.

Одним из главных источников современной тепловой энергии в земной коре является радиоактивный распад долгоживущих изотопов. Источником тепла служит также процесс дифференциации вещества мантии.

В качестве параметра в терморазведке используют тепловой поток. Он обозначается Q , единица измерения – Вт/м², формула – уравнение теплопроводности:

$$Q = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial Z} \right), \quad (41)$$

где λ – коэффициент теплопроводности (Вт/м·К); $\frac{\partial t}{\partial Z}$ – вертикальный градиент изменения температуры К/м. Знак «–» указывает на убывание температуры.

Зональность земных недр по распределению теплового потока изучена недостаточно в силу отсутствия инструментов проникновения вглубь геосфер.

Характеристика тепловых свойств горных пород

К тепловым свойствам природных объектов относятся теплопроводность λ , единица измерения которой Вт/м·К, и удельная теплоемкость C , измеряемая в единицах Дж/кг·К.

1. Теплопроводность (λ) – направленный процесс распределения теплоты, приводящий к выравниванию температуры среды:

$$\lambda = \frac{q}{\text{grad } T}, \quad (42)$$

где q – удельный тепловой поток; $\text{grad } T$ – градиент температуры.

2. Удельная теплоемкость C – величина, характеризующая теплоемкость тела массой m при увеличении температуры на 1° при действии количества теплоты Q . Единица измерения – Дж/кг·К.

$$\lambda = \frac{Q}{m(T_2 - T_1)}, \quad (43)$$

где m – масса тела; Q – количество теплоты; $T_2 - T_1$ – изменение температуры тела.

Твердая фаза

Теплопроводность минералов изменяется в пределах от 0,3 (сера) до 420 (серебро) Вт/м·К и зависит от минерального состава, формы, размеров и пространственных ориентаций кристаллов или зерен, температуры и давления. Примерный ряд убывания λ для минералов показан на рис. 105.

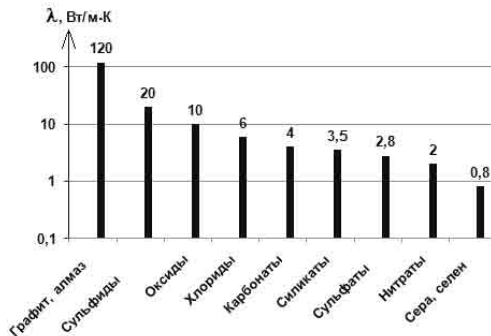


Рис. 105. Ряд убывания теплопроводности минералов

Теплоемкость минералов C изменяется в пределах 0,125–4,0 кДж/кг·К и зависит от их химического состава и структуры. Так как плотность (δ) также определяется составом и структурой, то наблюдается тесная связь C и δ (рис. 106).

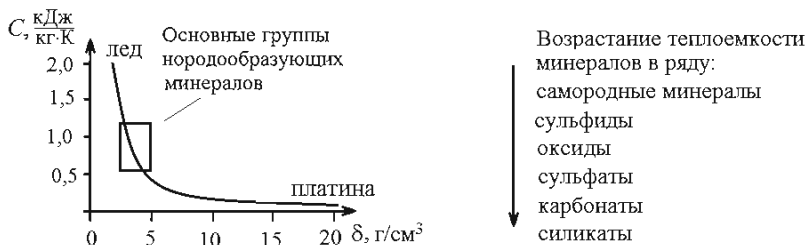


Рис. 106. Взаимозависимость плотности и теплоемкости для основных групп породообразующих минералов

Жидкая фаза

Теплопроводность воды в нормальных атмосферных условиях составляет $\lambda = 0,582$ Вт/м·К. При увеличении температуры t до 100° λ возрастает до $\approx 0,7$, а затем падает, так как уменьшается притяжение между молекулами. При увеличении давления λ возрастает и увеличивается с ростом концентрации солей.

Теплопроводность нефти при $t = 20^\circ$ составляет $\lambda \approx 0,13 + 0,14$ Вт/м·К. λ убывает в породах при увеличении нефтенасыщенности и увеличивается с ростом давления.

Теплоемкость воды и нефти составляет

$$C_{\text{воды}} = 4 \text{ кДж/кг·К}, C_{\text{нефти}} = 1,8 + 2,7 \text{ кДж/кг·К}.$$

Газовая фаза

Средние значения теплопроводности воздуха и природных газов следующие:

$$\lambda_{\text{воздуха}} = 0,02441 \text{ Вт/м·К}, \lambda_{\text{метана}} = 0,034 \text{ Вт/м·К}, \lambda_{\text{этана}} = 0,021 \text{ Вт/м·К}.$$

Эти значения возрастают с ростом температуры и давления.

Теплоемкость воздуха и природных газов характеризуется следующими показателями: $C_{\text{воздуха}} = 1$ кДж/кг·К, $C_{\text{метана и этана}} = 2,6 + 3,6$ кДж/кг·К.

Магматические породы

Теплопроводность магматических пород в щелочноземельном ряду от кислых к ультраосновным вначале несколько уменьшается, а затем увеличивается, что обуславливается не только некоторым уменьшением пористости, но и их разным вещественно-петрографическим составом (рис. 107). Теплопроводность эффузивных пород меньше λ интрузивных в силу структурных особенностей.

Самая низкая λ у щелочных пород: $\approx 2,04$ Вт/м·К, а наибольшая λ у кислых вулканитов (кварцевые порфиры): $\approx 4,5$ Вт/м·К.

Теплоемкость магматических пород в щелочноземельном ряду наибольшая у диоритов ($C=1,23$ кДж/кг·К) и примерно одинаковая у гранитов и пироксенитов ($C=0,93$ кДж/кг·К) (рис. 108).

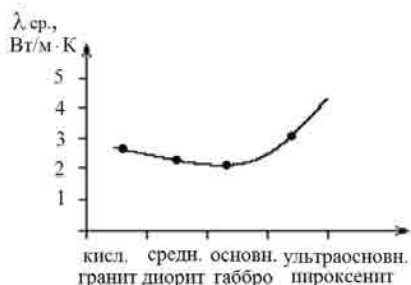


Рис. 107. Изменение теплопроводности в щелочноземельном ряду магматических пород

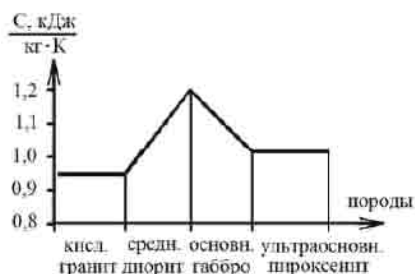


Рис. 108. Изменение теплоемкости в щелочноземельном ряду магматических пород

Метаморфические породы

Теплопроводность этих пород характеризуется более широким диапазоном, чем у магматических пород ($\lambda \sim 0,55-7,6$ Вт/кг·К). В полиминеральных образованиях λ ниже, чем в мономинеральных.

Теплоемкость метаморфических пород несколько ниже, чем у магматических, и изменяется в пределах $0,3-1,72$ кДж/кг·К.

Осадочные породы

Теплопроводность и теплоемкость осадочных пород характеризуются более значительными вариациями, нежели у кристаллических пород, что связано не только с их литологиче-

ским составом, но и влиянием эпигенетических преобразований. Диапазоны этих показателей для λ 0,1–7,5 кДж/кг·К и для C 0,42–4,65 кДж/кг·К. Прослеживается тенденция уменьшения λ и увеличения C для следующих групп осадочных пород: 1) терригенно-глинистых; 2) плотных карбонатно-соленоватых и кварцевых; 3) каустобиолитов (торф, угли, горючие сланцы).

Для литологических разностей одноименных стадий преобразования ряд увеличения λ и уменьшения C следующий:

угли → глины → аргиллиты → пески → алевролиты → известняки → доломиты → каменная соль.

Для одних и тех же литотипов, в частности терригенных пород, с возрастанием степени окаменения теплопроводность увеличивается, а теплоемкость уменьшается, притом что сильно влияет обводненность пород и соленость подземных вод.

К оптическим свойствам пород относятся: *альbedo*, характеризующее отражательные свойства поверхности (%); *коэффициент яркости*, т. е. отношение яркости поверхности в рассматриваемом направлении к яркости белой идеально рассеивающей поверхности; *степень черноты*, показывающая, во сколько раз плотность излучения данного объекта меньше плотности излучения абсолютно черного тела при той же температуре, и др. Эти свойства оказывают влияние на результаты инфракрасной съемки.

Аппаратура для геотермических исследований включает разного рода тепловизоры, термометры, термоградиентометры и тепломеры.

Тепловизоры используются для дистанционных аэрокосмических – радиотепловых и инфракрасных – съемок (РТС и ИКС). Они работают в тех участках спектра длин электромагнитных волн от микрометрового до миллиметрового диапазона, где имеются так называемые окна прозрачности для разной облачности. Фоточувствительными элементами (фотодетекторами) тепловизора служат особые кристаллы, чувствительные к электромагнитному излучению определенных длин электромагнитных волн. Типовая блок-схема тепловизора изображена на рис. 109.

Существуют также портативные переносные тепловизоры, в которых интенсивность инфракрасной съемки (ИКС) определяется визуально по цифровым индикаторам (рис. 110).

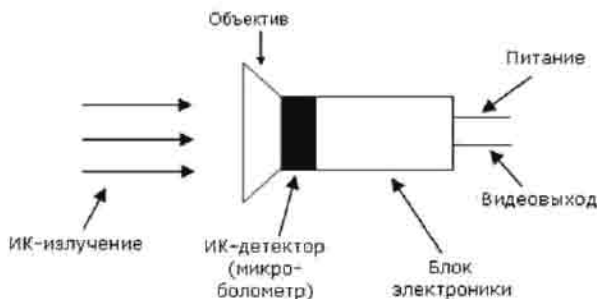


Рис. 109. Типовая блок-схема тепловизора

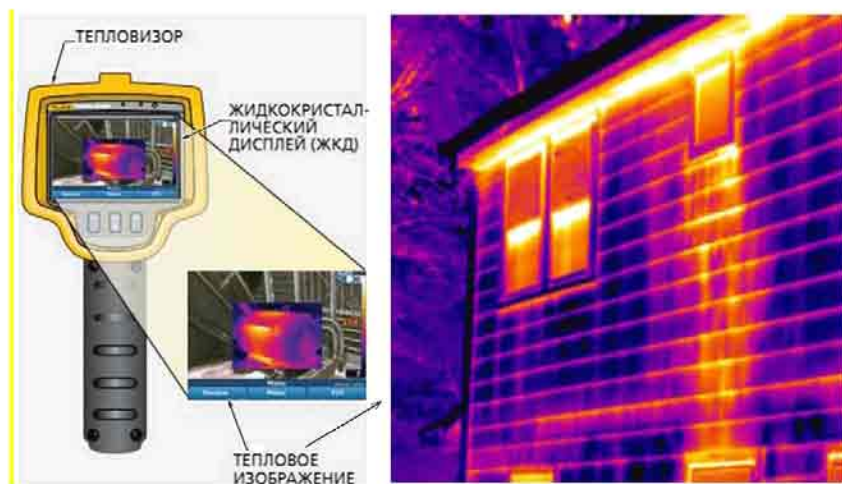


Рис. 110. Тепловизионная диагностика с помощью портативного тепловизора

Тепловизоры-спектрометры содержат устройства для спектрального разделения принятых излучений на разных частотах. В тепловизорах для аэрокосмической съемки имеется сканирующее электронно-механическое устройство для развертки фотодетектора перпендикулярно к направлению полета носителя техники, чтобы осуществить развертку изображения по строкам и кадрам, т. е. провести обзорную площадную съемку. Обработка информации проводится с помощью ЭВМ.

Термометры служат для измерения температуры пород или воды в скважинах (шпурах) или донных осадках. Чувствительным элементом таких термометров являются термочувствительные датчики, в качестве которых используются терморезисторы, полупроводниковые резисторы-термисторы, термочувствительные пьезокристаллы, включаемые в измерительные мостовые схемы с источником тока. Существуют шпуровые, скважинные и донные термометры с разной инерционностью (измерения могут длиться до 25 мин), погрешностью измерений температур (до $\pm 0,02$ °C) и градуировочной точностью (до $\pm 0,01$ °C).

Современные технологии терморазведки

В настоящее время для исследования состояния теплового поля Земли и ее природных ресурсов применяются радиотепловые (РТС) и инфракрасные (ИКС) аэрокосмические съемки. Ценным их преимуществом является возможность проводить измерения в темноте, а при соответствующем выборе длин волн – практически и при любой погоде. На рис. 111 в качестве примера приведены результаты ИКС по изучению локальных аномалий теплового поля осадочного чехла на территории, перспективной с точки зрения содержания углеводородов.

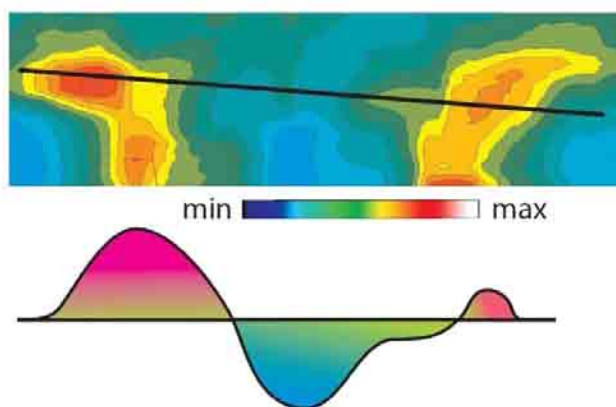


Рис. 111. Изменение локального теплового поля осадочного чехла при ранжировании объектов по относительной перспективности на залежи углеводородов (по К. М. Каримову и др., 2009)

Аномалии на полученных снимках формируются за счет тепловых потоков из недр, отражения солнечной энергии и зависят от оптических, тепловых и в меньшей степени электромагнитных свойств горных пород верхней части геологической среды. Недостатком является то, что радиотепловые и инфракрасные съемки осложняются термическими помехами, связанными с неравномерным тепловым обменом земной поверхности и атмосферы, изменяющимися климатическими и метеорологическими условиями, состоянием атмосферы и другими факторами.

Другой вид исследований носит название **геотермических** и сводится к высокоточному (погрешность не более $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$) измерению температур и их приращений в разведочных скважинах, горных выработках, донных осадках озер, морей и океанов. Для исключения влияния сезонных колебаний температур замеры на суше ведут на глубинах свыше 50–100 м, а на акваториях – при толще воды свыше 100 м. Термические измерения с целью восстановления температур, нарушенных вскрытием недр, проводят через несколько месяцев после бурения глубоких скважин, через несколько недель или дней после бурения неглубоких скважин или через несколько часов после пробивки шпуров. Поскольку в глубоких выработках, скважинах, на дне океанов температуры не меняются, то создаются банки данных температур, по которым строятся региональные термические карты больших территорий континентов и океанов.

Графики и карты распределения температур и градиентов температур служат источником для расчетов тепловых потоков.

Решение прямых задач терморазведки, т. е. расчет аномалий теплового потока над нагретыми телами простой геометрической формы (шар, столб, цилиндр, пласт и др.), осуществляется по формулам типа (41). Для более сложных физико-геологических моделей (ФГМ), например теплового поля над реальными средами, используются программы математического моделирования геотермии (численные расчеты). При этом должны быть известны геометрические параметры и тепловые свойства как объектов поиска, так и вмещающей среды.

Решение обратных задач терморазведки сводится к определению параметров объектов, создавших тепловые аномалии, путем сравнения этих параметров с теоретическими, рассчитанными в ходе математического моделирования. Параметры совпавшей

модели можно перенести на изучаемый объект. При этом, как и в любом геофизическом методе, в геотермии обратная задача решается не однозначно. Поэтому при решении обратных задач может рассматриваться несколько ФГМ. В ходе геологического истолкования результатов из них можно выбрать те (или ту), которые в наибольшей степени отвечают всем известным геолого-геофизическим данным.

Поисково-разведочные геотермические работы

Терморазведка в комплексе с другими геофизическими методами может применяться в процессе поисков и разведки, а также эксплуатации месторождений полезных ископаемых, в инженерной геологии, геоэкологии и др. Чаще всего измерения температур пород проводятся в скважинах наземного и подземного бурения и донных осадках океанов, морей в установившемся (за часы, сутки, месяцы в зависимости от глубины скважин) тепловом поле. Кроме того, температуры можно измерять в шпурах на глубинах 0,5–2 м, где через минуты или первые часы существует неустановившееся тепловое поле.

Интерпретация геотермических графиков и карт обычно качественная и сводится к выделению локальных аномалий термического поля и сопоставлению их с аномалиями других геофизических методов, а также с геологическими данными.

Природа термических аномалий объясняется следующим: 1) на месторождениях нефти и газа миграцией углеводородов (УВ) к земной поверхности, особенно по субвертикальным зонам трещиноватости, окружающим нефтегазовые ловушки (антиклинальные, структурно-тектонические и др.); 2) на рудных полиметаллических месторождениях большей теплопроводностью руд по сравнению с вмещающими породами; 3) над неметаллическими полезными ископаемыми типа кимберлитовых трубок, из которых до 10 % алмазоносны, – видимо, инфильтрацией к кровле трубок поверхностных вод по системам пор и трещин, а также физико-химическими процессами в теле трубок.

Вопросы и задания для контроля самостоятельной работы

1. Опишите региональные тепловые потоки в океанах, рифтах, на континентах и объясните их природу.

2. Найдите в литературе и охарактеризуйте примеры образования и поведения локальных термических аномалий.
3. Что представляет собой тепловизор?
4. Напишите реферат о выполнении воздушной съемки Земли в инфракрасных и ультрафиолетовых лучах и об измерениях температур на дне акваторий и в горных выработках.

1.7. Геофизические методы исследования скважин (ГИС)

ГИС – раздел разведочной (прикладной) геофизики, представляющий собой совокупность геофизических методов, предназначенных для изучения горных пород в разрезах геолого-разведочных скважин и околоскважинном пространстве. К ГИС (ГИРС – геофизические исследования и работы в скважинах) также относят изучение технического состояния скважин и работы в скважинах (отбор проб из стенок скважин, перфорация, торпедирование и др.).

ГИС, согласно принятой терминологии, называют еще каротажем, а в нефтегазовых скважинах – промысловой геофизикой. Методы ГИС, служащие для изучения межскважинного пространства, называются скважинной геофизикой.

Методы ГИС основаны на использовании тех же физических полей, что и методы полевой геофизики, т. е. это поля гравитационное, магнитное, электроволновое (электромагнитное), сейсмическое (сейсмоакустическое), тепловое, радиационное и др. По сравнению с полевыми (наземными) методами специфика ГИС состоит в изучении геологических разрезов геологоразведочных скважин, где скважина выступает в качестве геофизического профиля, преимущественно вертикального по отношению к дневной поверхности, реже круто- и пологонаклонного и еще реже горизонтального. В таких условиях геофизические работы в скважинах приобретают самостоятельное значение. Необходимы знания о технологиях бурения скважин, их устройстве и способах перемещения в них геофизических приборов (скважинных приборов). Следует учитывать, что скважины заполнены буровым раствором и с глубиной в них происходит рост давления и температуры. При спуске и подъеме приборов возникают их механические столкновения со стенками скважин. Все это требует, чтобы приборы были помещены в герметизированные, механически прочные корпуса и не могли бы подвергаться обрыву. С этих приборов измеряемые параметры должны передаваться и регистрироваться на поверхности. Следовательно, необходимы специальные геофизические (каротажные) кабели и спуско-подъемные механизмы. Для регистрации параметров на дневной поверхности предусматриваются измерительные приборы. Схема выполнения ГИС приведена на рис. 112.

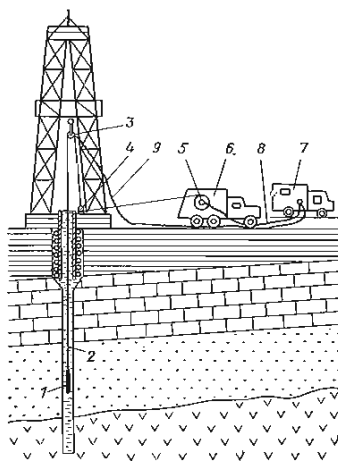


Рис. 112. Схема работ методами ГИС:
1 – скважинный прибор; 2 – каротажный кабель; 3, 4 – подвесной и наземный блок-балансы; 5 – каротажная лебедка; 6 – операторская подъемника; 7 – измерительный блок (модуль); 8 – операторская каротажной станции; 9 – соединительные провода

Для исследования скважин глубиной менее 1 км каротажную лебедку и измерительную аппаратуру комплектуют на одном транспортном средстве. Мелкие (гидрогеологические, инженерно-геологические и геоэкологические) скважины исследуют с помощью переносной аппаратуры, включающей лебедку, блок-баланс, скважинные приборы и наземную регистрирующую аппаратуру.

В скважине геофизические датчики поля, помещенные в скважинные приборы, как нигде (за исключением случаев наземных геофизических съемок на участках коренных невыветрелых пород), приближены к геологическим объектам, т. е. к пластам горных пород. И, казалось бы, регистрируемые параметры должны быть близкими к истинным. Однако это в большинстве случаев не так. Во-первых, влияет буровой раствор, заполняющий скважину. Во-вторых, под воздействием бурового инструмента частично изменяются физико-химические условия естественного залегания пород в прилегающем к стенке скважины пространстве. Изменяются также геостатическое давление и температура. В-третьих, в рыхлых, хрупких и трещиноватых породах под действием бурового инструмента и промывочной жидкости образуются каверны (увеличивается диаметр скважины). В-четвертых, под действием давления, превышающего пластовое, в пористые, проницаемые породы проникает промывочная жидкость, притом

что в силу пор малого размера (от сотен до единиц микрометров) проникает не вся жидкость, а ее фильтрат. Глинистые же частицы оседают на стенке скважины, и образуется глинистая корка, которая препятствует разрушению породы и снижает дальнейшее поступление фильтрата жидкости в пласт. В зоне фильтра физические свойства изменены, так как фильтрат вытесняет в значительной мере первоначальный флюид (воду, нефть, газ). Образуется так называемая промытая зона (рис. 113). В-пятых, размер измерительных датчиков не во всех случаях соответствует толщинам пластов, и в этом случае наблюдается их взаимное воздействие на деформацию используемого при каротаже поля. Наконец, на распределение геофизического поля в скважине влияет наклон слоев, и тем сильнее, чем больше углы падения. Таким образом, в скважине при каротажных исследованиях, как и в наземной геофизике, регистрируют преимущественно кажущиеся параметры. Следовательно, процесс интерпретации, особенно количественной, требует постановки и решения прямых и обратных задач.

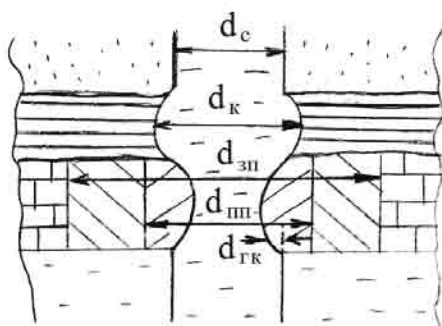


Рис. 113. Разрез околоскважинного пространства в месте пересечения продуктивного пласта:

d_c — диаметр скважины; d_k — диаметр каверны; $d_п$ — диаметр зоны проникновения; $d_гк$ — диаметр промытой зоны; $d_гк$ — толщина глинистой корки

В заключение вводного раздела подчеркнем, что при производстве ГИС требуется применение телеизмерительных систем, причем более сложных и громоздких, чем в полевой (наземной) геофизике. Эти системы включают: 1) датчик поля (скважинный прибор); 2) канал передачи информации, (каротажный кабель); 3) непосредственно телеизмерительную систему, т. е. элек-

трические блоки, в основном кодоимпульсные (цифровой код) и частотно-модулированные (с частотным разделением сигналов) при одновременной регистрации нескольких параметров.

В практике геологоразведочных работ наибольшее применение и, соответственно, разработку получили электромагнитные и радиоактивные методы ГИС, несколько в меньшей степени акустические и еще в меньшей степени собственно магнитные и гравиметрические. Особое место занимают методы контроля технического состояния скважин и сопровождающие работы в скважинах.

Каротаж на основе естественных и искусственно вызванных электромагнитных полей

Как и в электроразведке, электрических методов ГИС очень много, если учитывать детализационные методы и специальные методы при работах в скважинах. Преимущественно это методы электрического профилирования по стволу скважины, притом что в интервалах целевых объектов (нефтегазовые пласты) выполняется боковое электрическое (электромагнитное) зондирование.

Классическим электромагнитным методом, появившимся на заре каротажных работ, является электрический каротаж методом КС (кажущихся сопротивлений). Исследования выполняются с использованием искусственно созданного поля, т. е. должен быть источник поля (генератор). Одновременно с методом КС производится регистрация потенциалов постоянного естественного электрического поля, т. е. потенциалов собственной поляризации — ПС. Последние в наземной электроразведке носят название потенциалов естественного электрического поля — ЕП. Схема электрического каротажа КС и ПС приведена на рис. 114.

Виды каротажа по методу сопротивлений включают: 1) каротаж зондами кажущегося сопротивления (КС); 2) боко-

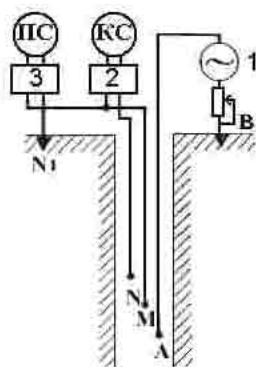


Рис. 114. Схема электрического каротажа КС и ПС:
1 — генератор; 2, 3 — фильтры; А, В — питающие электроды; М, N — измерительные электроды

вой каротаж (БК); 3) индукционный каротаж (ИК); 4) микрокаротаж (МКС). Основными электрическими методами являются КС и БК.

Метод КС выполняется посредством электропрофилирования по стволу скважины с помощью осевых электроразведочных установок. Последние представляют собой зонды КС. Они подразделяются на потенциал- и градиент-зонды (КС-ПЗ и КС-ГЗ) (рис. 115).

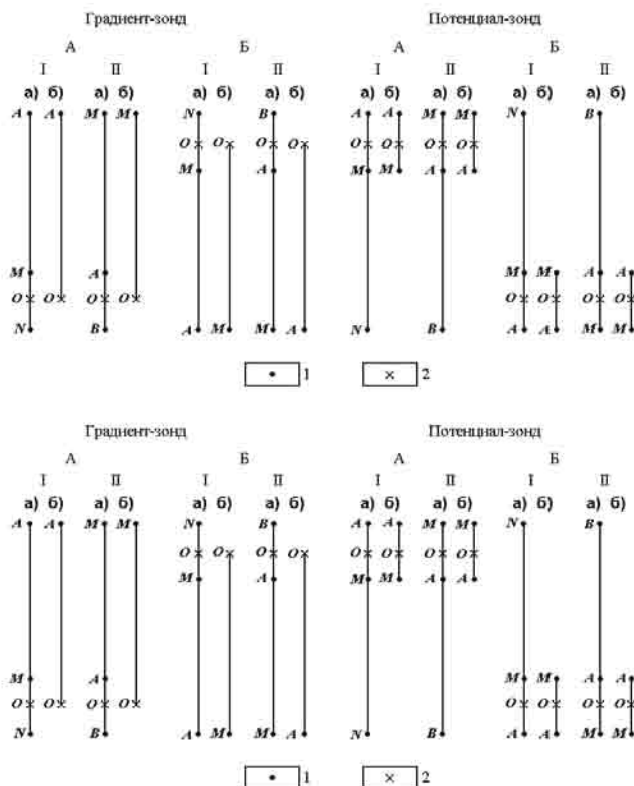
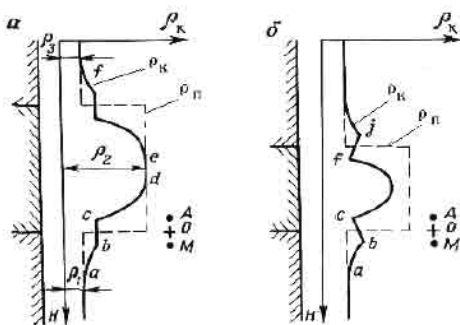


Рис. 115. Схемы последовательного (А) и обращенного (Б) зондов КС:
I, II – однополюсные и двухполюсные, реальные (а) и идеальные (б) зонды;
1 – электроды; 2 – точка записи

На каждом конкретном месторождении при записи кривых КС выбираются оптимальные условия их регистрации, т. е. те, которые в наилучшей степени позволяют выделить границы пластов и охарактеризовать их литологическую принадлежность. Удельное электрическое сопротивление, как и в электроразведке, определяется по формуле (19).

Форма представления данных каротажа на примере теоретических кривых кажущегося удельного электрического сопротивления, полученных потенциал-зондом в пластах высокого сопротивления большой и ограниченной толщины, показана на рис. 116.

Рис. 116. Теоретические кривые кажущегося удельного электрического сопротивления, полученные потенциал-зондом в пластах высокого сопротивления большой (а) и ограниченной (б) мощности



Боковой каротаж — один из основных методов исследований нефтяных, угольных и других скважин. Достоинство метода — в фокусировке тока, что достигается специальной конструкцией зондов (рис. 117). Размер центрального электрода, как правило, первые сантиметры, следовательно, можно выявлять очень тонкие пласты и пропластки, притом что метод глубинный и составляет три длины экранных электродов.

Диаграммы бокового каротажа по своей конфигурации соответствуют кривым потенциал-зондов, что они собой и представляют,

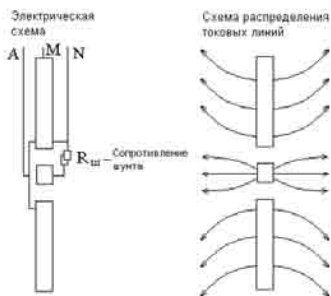


Рис. 117. Схема трехэлектродного зонда БК

но за счет фокусировки более точно отражают в разрезах скважин дифференциацию пород по удельному электрическому сопротивлению. Преимущество ВК еще в том, что одновременно с кривой ρ_k регистрируется кривая удельной электропроводности σ_k (ед. изм. – см/м).

На рис. 118 сопоставлены кривые ρ_k и σ_k . Сопоставление кривых показывает, что тонкие пласты выделяются весьма уверенно.

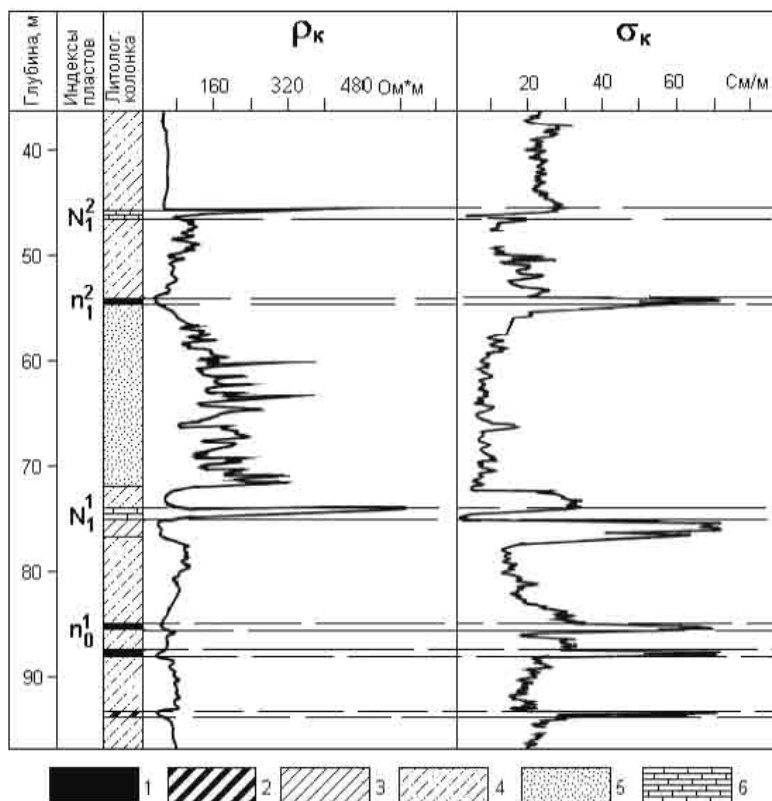


Рис. 118. Сопоставление каротажных диаграмм, зарегистрированных зондом ВК по скважине № 7. Участок Садкинский-Северный (Восточный Донбасс):

1 – уголь; 2 – углистый сланец; 3 – аргиллит; 4 – алевролит; 5 – песчанник; 6 – известняк

Метод бокового каротажного зондирования (БКЗ) основан на измерении ρ_x в заданном интервале скважины зондами КС (градиент- или потенциал-) разной длины L . Цель БКЗ – определение истинных значений удельного электрического сопротивления (ρ_x) и мощности (h) продуктивных пластов. БКЗ в скважинах является квазианалогом метода ВЭЗ в электроразведке. Практика показывает, что наиболее эффективно БКЗ проводить градиент-зондами при $L=1-30 d_c$, где d_c – диаметр скважины. Показатель L зондов увеличивается от зонда к зонду в геометрической прогрессии.

Индукционный каротаж (ИК) – электромагнитный метод, основанный на измерении кажущейся удельной электрической проводимости σ_x , т. е. параметра $\sigma_x = 1/\rho$, который измеряется в единицах Сим/м (сименс – проводимость проводника с сопротивлением $R=1$ Ом). Сущность метода в электромагнитном профилировании (ЭМП) по стволу скважины. Осевая установка ЭМП, состоящая из генераторной (Γ_x) и приемной (I_x) катушек, представляет собой зонд специальной конструкции. Расстояние между катушками составляет длину зонда L . Зонд является составной частью скважинного прибора, содержащего электронную схему (рис. 119). Следует отметить, что в зондах ИК кроме двух главных катушек имеется несколько дополнительных генераторных и измерительных катушек. Они выполняют фокусирующую роль.



Рис. 119. Схема скважинного прибора индукционного каротажа

Высокочастотный индукционный каротаж изопараметрических зондирований (ВИКИЗ) – современный высокотехнологичный метод ГИС, с помощью которого не только выполняется электропрофилерование по стволу скважины, но и электромагнитное зондирование по перпендикуляру к оси скважины (боковое зондирование). Физической основой выступает то, что относительная разность фаз и амплитуд, измеренных в двух близра-

сположенных катушках, очень слабо зависит от параметров скважины даже на частотах в диапазоне 10–15 МГц. Достигается высокий уровень сигналов в среде до 120 Ом·м.

Аппаратура ВИКИЗ включает скважинный прибор, подключаемый к наземной панели, которая обеспечивает питание скважинного прибора, прием и трансформацию сигналов, их обработку и преобразование в аналоговый вид. Скважинный прибор состоит из зондовой части (набор пяти 3-катушечных зондов) и блока электроники. На зондовой части соосно размещено пять генераторных и шесть измерительных катушек (рис. 120).

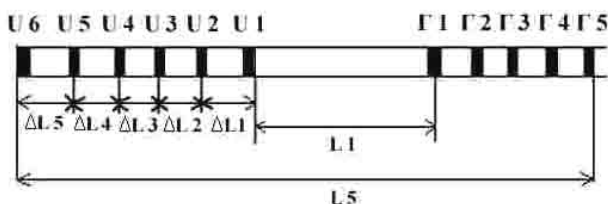


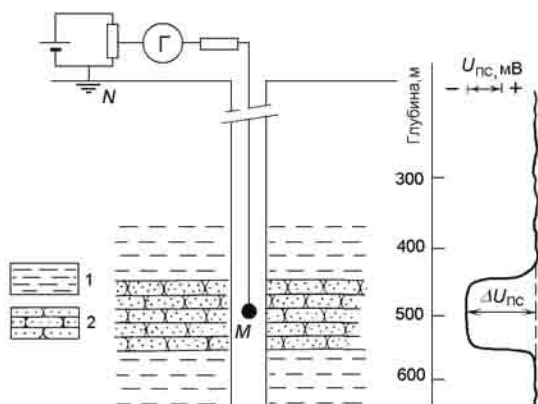
Рис. 120. Схема зонда ВИКИЗ:
 L – длина зонда;
 ΔL – длина базы – расстояние между измерительными катушками

Метод потенциалов самопроизвольной поляризации (ПС или СП) основан на измерении естественного постоянного электрического поля Земли, дополнительно деформированного влиянием скважины. Это поле создается в основном вследствие окислительно-восстановительных фильтрационных и диффузионно-адсорбционных процессов. Последние приводят к существованию на границах разделов сред двойных электрических слоев, суммарный потенциал которых и характеризует интенсивность поля ПС.

В нефтегазовых, гидрогеологических и других скважинах основной интерес представляет диффузионно-адсорбционная активность, проявляющаяся при диффузии ионов электролитов из пластовых вод в промысловую жидкость (буровой раствор) или из бурового раствора в пластовую воду (пласт).

Метод ПС простой, но весьма эффективный, он входит в обязательный комплекс ГИС нефтегазовых и других скважин. Измерение потенциалов естественного поля (U_{en}) сводится к замеру разности потенциалов между подвижным электродом M и неподвижным электродом N , находящимся на поверхности (рис. 121).

Рис. 121. Схема измерений методом ПС:
1 – глина, 2 – песчаник



Радиоактивный каротаж (РК) – совокупность методов, основанных на изучении распространения естественного или наведенного (искусственного) радиоактивного поля в разрезах скважин и околоскважинном пространстве.

На основе поля естественной радиоактивности создан метод гамма-каротажа (ГК), а на основе наведенной радиоактивности – методы гамма-гамма-каротажа (ГГК) и методы нейтронного каротажа (НК).

При каротаже ГК измеряют естественную радиоактивность (J_γ) в скважине с помощью специального скважинного прибора, содержащего электронную схему и индикатор гамма-излучения. Канал ГК также может быть частью любого комплексного прибора ГИС. В качестве индикаторов гамма-излучения используются газоразрядные и сцинтилляционные счетчики. В качестве сцинтилляторов применяют монокристаллы йодистого натрия NaI или йодистого цезия CsI , активированные для увеличения световыхода таллием Tl . Световая вспышка (сцинтилляция) преобразуется в электрический импульс и усиливается в 10^5 – 10^6 раз с помощью фотоэлектронных умножителей. Сигналы со скважинного прибора передаются по кабелю в наземную панель и регистрируются либо в цифровом, либо в аналоговом виде.

ГК является основным методом в стандартном комплексе ГИС и эффективно используется совместно с методами КС и ПС для литологического расчленения разрезов. ГК имеет преимущество перед ПС в случае соленых буровых растворов, а также при ра-

венстве УЭС бурового раствора (ρ_r) и фильтрата глинистого раствора (ρ_f).

Спектрометрическая модификация ГК получила название спектрометрического гамма-каротажа (СГК). Аппаратура СГК, как правило, имеет четыре канала: три дифференциальные для регистрации раздельного содержания урана, тория и калия и один интегральный для регистрации суммарного излучения J_γ (канал ГК).

Приборы СГК, как и приборы ГК, эталонируют в специальных устройствах, выполненных эталонными средами с известной концентрацией U, Th, K. По полученным эталонным значениям формируют шкалу записи каротажных диаграмм. То есть при регистрации диаграмм выбирают оптимальный масштаб напряжений. В пластах с пониженной гамма-активностью скорость подъема скважинного прибора снижают до 20–50 м/час, а в случаях очень низкой гамма-активности выполняют точечные наблюдения.

Метод гамма-гамма-каротажа (ГГК), или плотностной гамма-гамма-метод (ГГК-П), создан на основе комптон-эффекта. Вторым процессом взаимодействия γ -квантов с веществом — фотоэффект — положен в основу метода гамма-гамма селективного каротажа (ГГК-С). При ГГК-П используются «жесткие» источники гамма-квантов Co^{60} , Cs^{137} , а при ГГК-С — мягкие источники гамма-квантов Tl^{200} , Se^{124} .

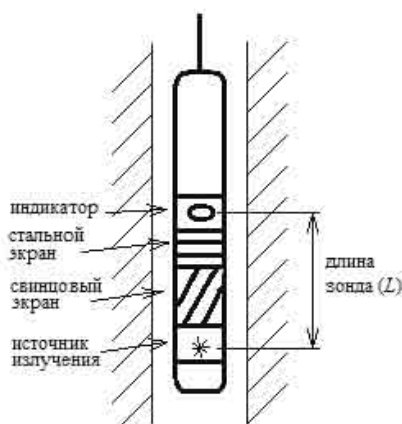


Рис. 122. Схема зонда ГГК

ГГК-П применяют для определения плотности горных пород и оценки качества крепления скважин (гамма-гамма-плотномеры и гамма-гамма-цементомеры).

Скважинный прибор или модуль в комплексном приборе включает зонд ГГК-П, состоящий из источника и индикатора гамма-квантов (рис. 122).

Источник помещается в прибор только в процессе каротажа, а в остальное время перевозится

или хранится в специальном контейнере. Для уменьшения влияния скважины прибор снабжается прижимным устройством. Обязателен свинцовый экран, который, с одной стороны, защищает индикатор от прямого «первичного» гамма-излучения, а с другой – снижает действие гамма-излучения промывочной жидкости.

Нейтронные методы каротажа (НК) включают: 1) нейтронный гамма-каротаж (НГК); 2) нейтрон-нейтронный каротаж по тепловым нейтронам (ННК-Т); 3) нейтрон-нейтронный каротаж по надтепловым нейтроном (ННК-НТ); 4) спектрометрический нейтронный гамма-каротаж (СНГК).

Зондовое устройство скважинных приборов НК имеет такую же конструкцию, как и в методах ГТК и ГТК-С (см. рис. 122), но вместо свинцового экрана помещают экран из парафина.

Источник нейтронов является ампульным и во время каротажа подсоединяется к прибору вместе с хвостовиком. Последний хранится и перевозится в специальном защитном устройстве (как и в методах ГТК, должны соблюдаться меры безопасной работы с радиоактивными веществами).

Модификации НК зависят главным образом от типа детектора и окружающих его фильтров. В ННК-Т детектором служит гелиевый счетчик. Метод чувствителен к содержанию хлора (Cl). Результаты сильно зависят от pH пластовой воды. В ННК-НТ детектор также гелиевый счетчик, но он окружен кадмиевыми фильтрами, поглощающими тепловые нейтроны, поэтому метод более тесно связан с водородосодержанием, нежели метод ННК-Т. В НГК и СНГК детекторами являются сцинтилляционные счетчики, как и в методах ГТК и ГТК. Длина зондов в методе ННК-Т и ННК-НТ выбирается равной 0,4–0,5 м. Глубинность исследования составляет 20–30 см, в то время как в методе НГК и СНГК она достигает 40–60 см.

Каротаж СНГК основан на изучении спектра гамма-излучения радиационного захвата. Определяются преимущественно элементы, имеющие сравнительно жесткий спектр и высокое макроскопическое сечение захвата. Это Fe, Ni, Cr, Ti, Cl, Mn, Cu, S, Hg и др. В нефтегазовых скважинах СНГК имеет ограниченное применение, так как глубинность метода не превышает 20 см.

Многозондовый каротаж НК основан на определении декремента пространственного затухания плотности тепловых нейтро-

нов в скважине с помощью двух или более детекторов, расположенных на различном расстоянии от источника.

Импульсный нейтронный каротаж (ИНК). Физическая основа: а) облучение объекта потоком быстрых нейтронов; б) регистрация тепловых нейтронов, гамма-излучения радиационного захвата (ГИРЗ), а также гамма-излучения неупругого рассеяния (ГИНР). ИНК имеет несколько модификаций, основными из которых являются *импульсный нейтрон-нейтронный каротаж (ИННК)* и *импульсный нейтронный гамма-каротаж (ИНГК)*.

ИНК реализуется путем наличия в скважинном приборе низкочастотного импульсного генератора нейтронов ($f = 10+500$ Гц). При ИННК и ИНГК изучают процесс спада плотности тепловых нейтронов или ГИРЗ во времени от периодически возбуждаемых коротковолновых импульсов генератора нейтронов. После некоторой задержки (t_z) регистрируют число импульсов во временных (Δt) окнах (рис. 123).

Зонды ИНК отличаются от зондов НК наличием импульсного, а не стационарного источника нейтронов. Наземная аппаратура содержит многоканальный временной анализатор. По значениям числа импульсов в нескольких окнах находят параметры временного распределения. При достаточном числе временных окон (8–16) вид распределения удастся восстановить с высокой детальностью. Современная цифровая аппаратура позволяет зафиксировать весь процесс спада, начиная с некоторой задержки. Преимущества методов ИНК в том, что снижается влияние скважины, так как время жизни в ней нейтронов (τ_c) меньше времени их жизни в пласте ($\tau_{\text{пл}}$).

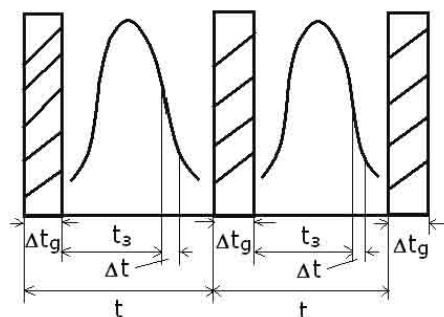


Рис. 123. Схема возбуждения и измерения импульсов в методе ИННК:

t – время следования импульсов нейтронов; Δt_g – длительность нейтронных импульсов; Δt – окно временного анализатора; t_z – время задержки

Современная цифровая аппаратура позволяет зафиксировать весь процесс спада, начиная с некоторой задержки. Преимущества методов ИНК в том, что снижается влияние скважины, так как время жизни в ней нейтронов (τ_c) меньше времени их жизни в пласте ($\tau_{\text{пл}}$).

Методы акустического каротажа (АК) основаны на возбуждении упругих волн в полосе частот $f = 1+10$ кГц. Существует несколько модификаций зон-

дов АК. Наибольшее распространение получили трехэлементные зонды. Они состоят из одного излучателя и двух приемников или, в силу принципа взаимности, наоборот – одного приемника и двух излучателей (рис. 124).

Трехэлектродным зондом регистрируют параметры: 1) t_{p1} – время первого вступления первого приемника; 2) t_{p2} – время первого вступления второго приемника; 3) Δt – интервальное время – разница времен прихода головной волны на второй и первый приемники; 4) A_1 – амплитуда сигнала на первом приемнике в заданной точке; 5) A_2 – амплитуда сигнала на втором приемнике в заданной точке; 6) α – коэффициент поглощения.

Параметры Δt и α вычисляются по формулам

$$\Delta t = \Delta L / V \text{ и } \alpha = \lambda \lambda (A_1 / A_2) / \Delta L, \quad (44)$$

где $\Delta L = L_{2-2} - L_{2-1}$ – база зонда.

Наиболее информативной в АК является кривая Δt . Базу выбирают в соответствии с требуемой разрешающей способностью. Чем меньше ΔL , тем более тонкие пласты могут быть выделены.

Многоэлементный зонд АК содержит минимум два излучателя и более 10 приемников (16, 24, 48 и т. д.). Такие зонды называют матричными. Блок волновых картин имеет вид сейсмограмм (рис. 125).

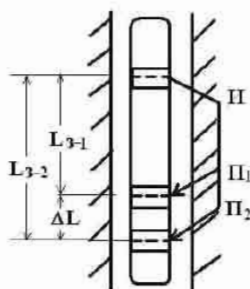


Рис. 124. Схема трехэлементного зонда АК:
 L_{2-1} , L_{2-2} – длины зондов;
 ΔL – база зонда;
П1, П2 – приемники;
И – излучатель

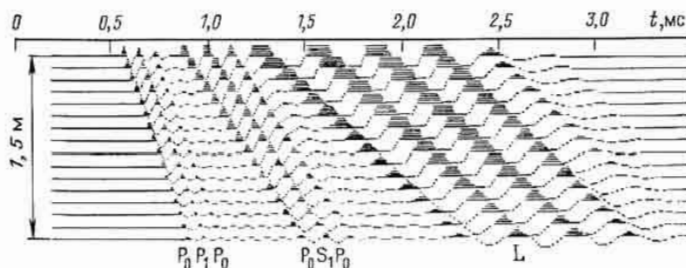


Рис. 125. Типовая картина многоэлементного зонда АК

Посредством корреляции удается идентифицировать различные типы волн и затем оценить их кинематические и динамические параметры не только во времени, но и вдоль оси скважины.

Скважинное акустическое телевидение (САТ) – специальный вид АК, предназначенный для детального исследования стенок обсаженных и необсаженных скважин. Сканирование осуществляется с помощью вращающегося преобразователя. Амплитуда сигналов определяется отношением волновых сопротивлений стенки скважины и бурового раствора. Разрешающая способность САТ зависит от длины волны λ . Поэтому для увеличения детальности используют достаточно высокую частоту $f = 1-2$ МГц.

В то же время это вызывает большое затухание волн в буровом растворе, поэтому наиболее эффективны исследования в скважинах, заполненных водой.

САТ эффективен для выявления в разрезах скважин тектонически-нарушенных и трещиноватых зон, а также проницаемых коллекторов, где коэффициент отражения имеет пониженные значения (рис. 126).

Акустические профилометрия и кавернометрия, как и САТ, основаны на законах отраженных волн. Используется принцип импульсной эхолокации. Результаты каротажных исследований представляют в виде кривых акустической жесткости и круговых диаграмм, отображающих форму ствола скважины по его диаметру (рис. 127).

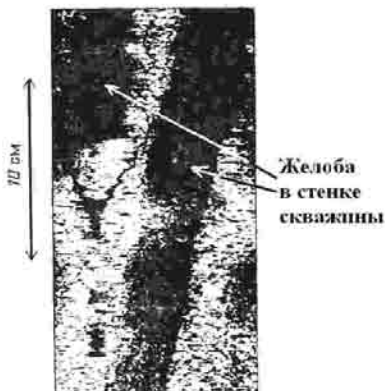


Рис. 126. Пример «фотографирования» стенок скважины по результатам САТ

Интерпретация методов ГИС состоит в следующем: 1) обработке диаграмм; 2) геофизической интерпретации; 3) геологической интерпретации.

Обработка диаграмм включает: а) приведение результатов к определенным глубинам и системе отсчетов; б) учет и устранение аппаратных и других помех; в) нахождение границ пластов и их толщин (мощности); г) снятие показаний. Далее, с целью проведения последующей количественной интерпре-

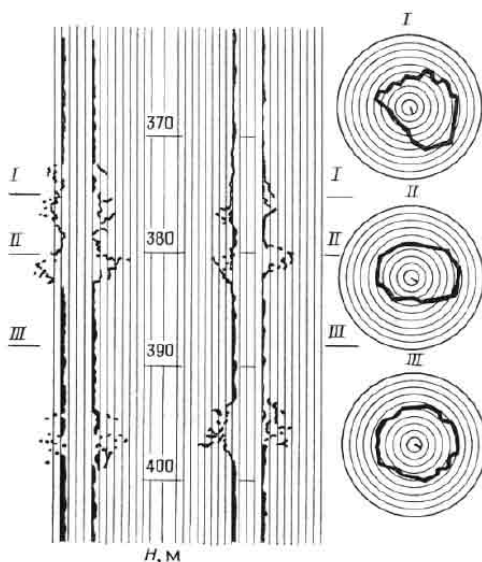


Рис. 127. Пример обработки и представления диаграмм акустической профилометрии:
I, II, III – интервалы сечения

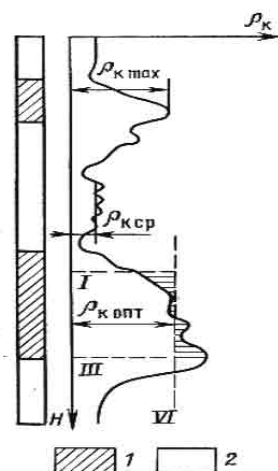


Рис. 128. Определение существенных значений ρ_k на примере кривых КС, зарегистрированных градиент-зондом:
1 – исследуемый пласт;
2 – вмещающие породы

тации, снимают (определяют) «существенные значения». Например, для кривых ρ_k это либо средние ($\rho_k^{ср}$), либо максимальные (ρ_k^{max}), либо оптимальные ($\rho_k^{опт}$) значения (рис. 128).

Геофизическая интерпретация проводится с целью определения истинных параметров, например ρ_k , на основе решения обратной задачи, т. е. методом подбора наблюдаемой кривой с одной из теоретических и привлечением априорных данных.

Геологическая интерпретация заключается в определении геологических характеристик разреза. В частности, при истолковании электрических методов ГИС используются обе модификации КС – электропрофилирование одиночными зондами и боковое каротажное зондирование (БКЗ). Электропрофилирование применяют для нахождения границ пластов, а также в благоприятных условиях для литологического расчленения разрезов, выявления целевых объектов (нефте-, газо-, водоколлекторов, пластов угля,

руд и т. д.). ВКЗ используют для определения количественных характеристик (коэффициентов пористости, нефтегазонасыщенности, зольности и т. д.).

Основные требования к проведению качественной интерпретации таковы: 1) определение границ пластов, глубин их залегания, толщин (мощности); 2) литологическое расчленение разрезов скважин; 3) выработка рабочей гипотезы о геологической

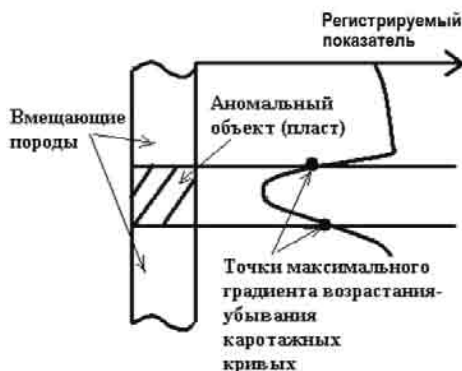


Рис. 129. Пример определения границ пластов на каротажных диаграммах

природе аномальных объектов; 4) принятие решений о необходимости проведения количественной интерпретации и дополнительных геолого-геофизических исследований.

Определения границ пластов в большинстве случаев сводится к нахождению точек, соответствующих градиентам максимального возрастания (убывания) кривых (рис. 129).

Вопросы и задания для контроля самостоятельной работы

1. Раскройте смысл каротажа скважин и специфику скважинных геофизических методов при решении геологических задач.
2. Каковы физико-геологические предпосылки применения ГИС в геологоразведочных скважинах?
3. На чем основан выбор оптимальных зондов КС на месторождениях различного типа?
4. Объясните основы геологической интерпретации кривых каротажа.
5. Раскройте сущность методов радиоактивного каротажа.
6. Как производится качественная и количественная интерпретация каротажных кривых?
7. Составьте реферат по обеспечению технических работ в скважинах и оперативному контролю их состояния.

ЧАСТЬ 2.

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ

ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

И КОМПЛЕКСНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

РЕЗУЛЬТАТОВ

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ

ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ РЕШЕНИИ

ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ИНЖЕНЕРНО-

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

2.1. Основные положения комплексирования геофизических методов

Причиной возникновения и становления дисциплины «Комплексирование геофизических методов» является тот факт, что решение обратных геофизических задач в каждом отдельно взятом методе в большинстве случаев неоднозначно. Отсюда вытекает необходимость исследований разными геофизическими методами в сочетании с геологическими, геохимическими, геоэкологическими. Причиной комплексирования является и косвенный характер геофизической информации, получаемой не в прямом (вещественном), а в косвенном представлении – в виде значений того или иного физического поля на дневной поверхности или в скважине.

Структура и общие принципы комплексирования геофизических методов исследований едины в нефтегазовой, рудной, угольной, инженерной, экологической и других отраслях, и созданные в каждой из этих отраслей на основе многолетней практики современные комплексы геофизических исследований представляют собой стройную иерархическую систему. Отличия заключаются в выборе и условиях применения тех или иных методов и способов для решения поставленных конкретных задач.

На этапе полевых работ основной предпосылкой комплексирования геофизических методов является то обстоятельство, что любой геологический объект влияет на особенности распределения в окружающем пространстве нескольких физических полей, и поэтому можно получить многостороннюю совокупную физическую картину, а именно: один из методов позволит более достоверно найти местоположение этого объекта в плане, другой – глубину залегания, третий – размеры и т. д.

Основная цель проведения комплексных экогеофизических исследований – получить дополнительные к геоэкологическим и геохимическим качественные и количественные показатели с целью повышения полноты и достоверности сведений об изучаемых объектах. Это вытекает из объективных достоинств геофизических методов:

- 1) объемность получаемой информации;

- 2) возможность опосредованного изучения геоэкологических объектов, в том числе не выходящих на дневную поверхность;
- 3) объективность информации о физических полях;
- 4) относительно низкая стоимость и высокая производительность геофизических работ.

Обобщенная схема составления комплексов геофизических методов приведена на рис. 130.



Рис. 130. Типовая схема составления комплексов геофизических методов

Согласно приведенной схеме формирование комплекса геофизических методов включает систему взаимозависимых модульных решений, связанных с определением объекта исследований, сбором априорных сведений о нем, постановкой экологических задач, и на основе этих сведений создание представлений о физико-геологической модели (ФГМ), т. е. о форме, размерах, глубине залегания и физических свойствах объекта и вмещающих его геологических и геоэкологических образований. Формирование геофизического комплекса последовательно реализуется с учетом:

- 1) построения априорной физико-геологической модели на основе поставленной геологической задачи и имеющейся ин-

формации об объекте исследования. Источниками геологической априорной информации являются: тектоника района, геоморфологические условия района (степень закрытости местности, развитие рыхлого покрова и кор выветривания), рельеф местности, состав вмещающей среды, проявления метаморфизма и др. Источниками геофизической информации служат физические свойства пород и руд, измеренные физические поля, результаты физического и математического моделирования;

2) **изучения условий применимости геофизических методов** для решения поставленной задачи. К таким условиям относятся: а) заметная дифференциация физических свойств пород и руд; б) благоприятные геометрические параметры объекта исследований (форма, размеры, глубина и элементы залегания); в) достаточно низкий уровень помех;

3) **выяснения неоднозначности решения задачи** отдельными геофизическими методами как по определению геологической природы выявляемых аномалий, так и по оценке количественных параметров объектов: формы, размеров, глубины и элементов залегания;

4) **расчета сети наблюдений и необходимой точности измерений** посредством использования параметров ФГМ, масштаба исследований, результатов решения прямых задач, расчета экономических показателей съемки;

5) **комплексного анализа и комплексной интерпретации геофизических данных** на базе различных методов и компьютерных технологий распознавания образов и классификации изучаемой территории на однородные области;

6) **оценки геологической информативности геофизических методов** и их сочетаний на базе различных количественных приемов без учета экономических показателей;

7) **оценки экономической эффективности методов** и их комплекса путем сравнения затрат при одинаковой геологической информативности двух и более методов.

Геофизический комплекс включает следующие его виды:

1. **Типовой комплекс**, создаваемый для достаточно обобщенных и в то же время наиболее типичных условий проведения работ и содержащий избыточное число геофизических методов, поскольку в него включают все методы, в той или иной мере способствующие решению поставленной задачи.

2. Рациональный комплекс, представляющий геологически и экономически обоснованное сочетание геофизических методов и сопровождающих их геологических и геохимических видов исследований с целью эффективного решения поставленной задачи. Рациональный комплекс создается на основе типового комплекса при наличии достаточного объема априорной информации, позволяющей оценить информативность отдельных методов и их различных сочетаний. При недостаточной априорной информации или ее отсутствии оптимальным решением является проведение опытно-методических работ. Особенностью рационального комплекса является его привязка к определенным, а не к типовым геологическим, геоморфологическим, геоэкологическим и геолого-экономическим условиям конкретного объекта.

3. Оптимальный комплекс, который составляется на основе критериев оптимальности, т. е. наличия весьма существенных (достоверных) априорных сведений об объекте исследований, и который может быть реализован лишь в хорошо изученных регионах и при наличии достаточного статистического материала по выявлению ложных аномалий и связанных с ними экономических затрат.

В рамках перечисленных геофизических комплексов применяются:

1. Внутриметодное комплексирование, при котором для решения поставленной задачи используются методы и способы в рамках одной геофизической модификации, например электропрофилирования с использованием двух электроразведочных установок или сейсмопрофилирования методом преломленных волн (МПВ) с регистрацией на одних и тех же пикетах продольных и поперечных волн и т. д.

2. Внешнее комплексирование, представляющее собой сочетание геофизических методов с геохимическими и горно-геологическими исследованиями.

3. Технологический комплекс, в качестве которого выступают: а) *спутниковая геофизика*, включающая измерения магнитного поля Земли, альтиметрию над океанами по измерениям обусловленного гравитирующими массами отклонения спутников от сферической орбиты, инфракрасную тепловую съемку в различных диапазонах спектра; б) *аэрогеофизика* с измерениями магнитного, гравитационного полей, сверхдлинноволновым ра-

диопротифилированием, гамма-спектрометрическими измерениями (U, Th, K и общего канала), а также высотомером; в) *геофизические исследования скважин (каротаж)* с измерениями электрических полей потенциал- и градиент-зондами, измерениями магнитной восприимчивости, волнового поля (акустический каротаж) и различных полей естественной и искусственной радиоактивности; г) *морская геофизика*, также представляющая собой технологический комплекс, поскольку на судне обычно одновременно проводятся измерения нескольких физических полей: магнитного, гравитационного, волнового; д) *подземная (или шахтно-рудничная) геофизика* – измерения физических полей в горных выработках и скважинах.

Следует отметить возможность изменения геофизических комплексов в пространстве на площадях с неодинаковым геологическим строением, хотя при этом может решаться одна и та же задача на одной и той же стадии работ. Последние классифицируются нормативными документами таким образом:

- 1) региональные исследования (масштаб 1:1 500 000–1:50 000);
- 2) поисковые работы (1:200 000–1:150 000);
- 3) оценочные работы (1:2 500 000–1:1000);
- 4) разведка месторождений (<1:1000);
- 5) эксплуатационная разведка на стадии добычи полезных ископаемых.

Оценка разрешающей способности геофизических методов выполняется путем анализа физико-геологических моделей. При этом в основу должны быть положены представления о способности к деформированию в области изучаемых объектов тех или иных геофизических полей. Например, в гравиразведке оценка производится по модулю Δg , где Δg – приращение силы тяжести, а в магниторазведке по параметру T (суммарный вектор магнитного поля). В электроразведке методом ВЭЗ достоверное выявление литологических пластов достигается при соотношении $h/H > 3$, где h – толщина каждого отдельного предыдущего пласта, а H – суммарная глубина до границы или кромки каждого последующего пласта.

Анализ степени деформации того или иного геофизического поля удобно выполнять сравнением вариационных кривых, позволяющих оценить степень отличия изучаемого объекта от других объектов или вмещающих пород (рис. 131).

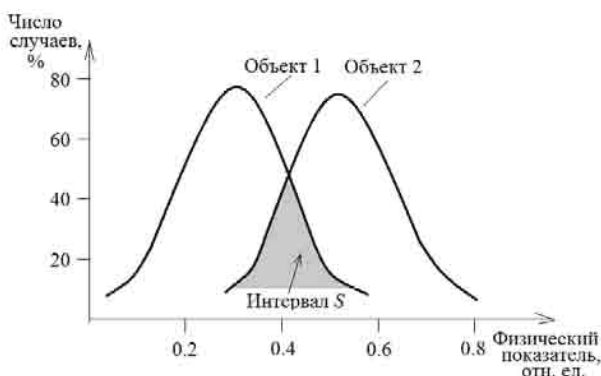


Рис. 131. Сопоставление вариационных кривых по физическим показателям объектов геофизических исследований (интервал S характеризует область неоднозначности геофизических решений)

Выбор типового и рационального комплексов

Типовой комплекс геофизических методов и технологий, как выше подчеркивалось, складывается путем набора всех известных методов и технологий, которые в той или иной мере могут решить поставленную задачу. Выбор производится на основе анализа многолетней практики тех или иных видов геологических или геоэкологических исследований. Априори количество выбираемых методов избыточно, притом что в их числе, как правило, имеются равноценные по своей разрешающей способности.

На основе типового комплекса выполняется разработка **рационального комплекса**. Это многоуровневый процесс, требующий в ряде случаев проведения опытно-методических работ. В результате оставляются наиболее информативные и малозатратные геофизические методы и технологии, оснащенные современной аппаратурой и программами компьютеризированной записи полевых наблюдений с последующей их первичной обработкой и интерпретацией в рамках 1D-, 2D- и 3D-инверсий. То есть условия разработки рационального комплекса определяются технологиями получения полевых данных в режиме реального времени за счет компьютерной регистрации и оперативной обработки с мгновенной выдачей на экран дисплея графиков аномальных значений.

При рассмотрении комплексных данных рекомендуется применять аппарат теории вероятностей и математической статистики, в частности использовать известную теорему сложения вероятностей совместных событий. Суть последней в том, что, если, например, взять два метода (1 и 2) с гарантийными вероятностями соответственно P_1 и P_2 , то их совместное использование увеличивает достоверность вывода до величины

$$P_{1,2} = P_1 + P_2 - P_1 P_2. \quad (45)$$

При этом теорема может быть применена только в случае, когда каждая из величин $P_1, P_2, \dots, P_n$ удовлетворяет условию $0,5 < P_i \leq 1$, поскольку если положить $P_1 = P_2 = 0,5$, то окажется, что вероятность как правильности вывода, так и его ошибочности составит $P_{1,2} = 0,75$, что явно нелепо. При соблюдении же условия равенства (45) вероятность правильности ответа больше вероятности ответа ложного.

Применение комплекса нескольких методов вместо одного обычно не сопровождается пропорциональным возрастанием расходов; общими являются: организация работ, транспорт, бытовое и топографическое обеспечение, а также некоторые услуги со стороны. Особенно в большой степени это положение касается аэрогеофизических съемок, где использование даже нескольких дополнительных каналов почти не влечет за собой увеличения производственных затрат.

Выбору рационального комплекса геофизических методов для решения конкретной задачи помогает создание **физико-геологической модели (моделей)**, как абстрактного возмущающего тела, размеры, форма и физические свойства которого с той или иной степенью приближения аппроксимируют изучаемые объекты. Сформированная модель или их множество служат основой для дальнейшего математического моделирования, расчета оптимальных размеров поисковой и детальной сетей геофизических съемок, а также для выделения полезных сигналов с последующей интерпретацией и решения вопросов о сравнительной эффективности отдельных методов, проведения комплексной количественной интерпретации с взаимным учетом результатов съемок различных геофизических полей.

На основании изложенного представляется возможным сформулировать следующие не зависящие от исследователя условия, необходимые и достаточные для успешного использования геофизических комплексов:

- заметная дифференциация (контрастность) физических свойств пород и руд района работ;
- благоприятные геометрические параметры аномалиеобразующих объектов (формы и элементы залегания, достаточно большие размеры искомого объекта);
- относительно малое экранирующее влияние перекрывающих толщ;
- низкий уровень помех.

Применительно к конкретным задачам и отдельным методам эти условия в количественном отношении, а иногда даже и в качественном будут довольно резко различаться, но надо учитывать, что ожидаемая аномалия геофизического поля от исследуемого объекта должна, по крайней мере, в 2–3 раза превышать сумму возможных ошибок наблюдений и уровня помех σ . Исключением являются случаи, когда аномалия отмечается на профиле в нескольких точках m , и тогда это условие несколько смягчается:

$$\Delta I_a \geq 3\sigma/\sqrt{m}, \quad (46)$$

где число точек m может изменяться от 2 до 9, поскольку при $\Delta I_a > \sigma$ это выражение уже теряет смысл. Следовательно, использование статистических методов выделения сигналов позволяет в некоторых случаях выделять аномалии интенсивностью $\Delta I_a \geq 0,5-0,6\sigma$, и это обстоятельство в той или иной мере необходимо учитывать, в частности, при определении принципиальной применимости какого-либо метода для решения поставленной задачи в целом или частично.

Вопросы и задания для контроля самостоятельной работы

1. Что представляет собой предмет «Комплексирование геофизических методов»?
2. Обоснуйте структуру дисциплины «Комплексирование геофизических методов для решения геологических задач».
3. Перечислите и раскройте задачи, подлежащие решению комплексом геофизических методов.
4. Что такое внутриметодное и внешнее комплексирование?
5. Как производится выбор типового и рационального комплексов?
6. Обоснуйте принципы построения и сущность технологических и целевых комплексов геофизических методов.

2.2. Формирование целевого комплекса экогеофизических исследований для решения геоэкологических задач. Физико-геологическое моделирование

Детальную структуру комплексных экогеофизических наблюдений целесообразно разрабатывать на основе типовой схемы составления комплексов геофизических методов (см. рис. 130). Планирование работ начинается с постановки геоэкологической задачи и заканчивается контрольной проверкой результатов (рис. 132).

Постановка геоэкологической задачи предопределяет сбор и проработку результатов предшествующих исследований на площади проектируемых работ, а именно изучение всех имеющихся фондовых материалов (атласы, карты, описание полевых наблюдений, качественные и количественные характеристики объектов, показатели загрязнения атмосферы, литосферы, гидросферы, данные о приуроченности участков исследований к аномальным зонам, геологические и геоэкологические разрезы, их измененность в результате техногенных воздействий). По итогам сбора и проработки предшествующих исследований должна быть определена необходимость геофизических исследований, т. е. наличие в системе геоэкологических работ геофизического модуля. Это прежде всего относится к крупным промышленным объектам: регионам нефтепромыслов, подземной разработки месторождений (угольные, рудные, соляные и др.), перерабатывающим предприятиям, гидро-, тепловым и атомным электростанциям и т. д.

Целесообразность выполнения геофизических наблюдений в первую очередь предопределяется тем, что геофизические исследования относятся к объемным, в отличие от дискретных, например связанных с проведением буровых работ или отбором проб на дорогостоящие геохимические анализы. В то же время должны быть оценены и основные геофизические показатели верхней части разреза, их соотношения для слоев пород, составляющих геологический разрез, и находящихся в них локальных природных и техногенных объектов. Полученные сведения являются основой для составления физико-геологической модели (ФГМ).



Рис. 132. Детальная структура комплексных экогеофизических наблюдений

Физико-геологическое моделирование служит основой при выборе типовых, рациональных и оптимальных комплексов геофизических методов. Его разделы включают приемы формирования и классификацию ФГМ, условия применимости отдельных геофизических методов, расчет сети и точности наблюдений, не-

посредственно связанных с построением ФГМ, а также возможные оценки адекватности ФГМ реальным объектам.

Формирование ФГМ какого-либо геологического объекта, процесса или явления предусматривает несколько последовательных операций:

- постановку геоэкологической или геологической задачи;
- выбор объекта моделирования (земная кора, конкретный блок земной коры, геоэкологическая провинция, отдельные структуры, техногенные объекты и т. д.) с построением априорной геологической модели;
- расчет аномальных петрофизических показателей (физических свойств) моделируемого объекта и его вмещающей среды;
- построение петрофизической модели и выделение на ее основе структурно-вещественных комплексов;
- решение прямых задач геофизики для каждого метода, т. е. построение модели физических полей;
- оценку адекватности сформированной ФГМ реальному объекту на эталонах, т. е. на объектах, аналогичных исследуемому, но с известным геологическим строением.

В процессе исследования ФГМ и выбора на ее основе комплекса геофизических методов выделяются три фазы.

Первая фаза – отсутствует опыт работ. Используется принцип аналогии (сходное геологическое строение, литературные источники, справочники, отчеты). Формируется априорная ФГМ.

Вторая фаза – используются результаты опытно-методических исследований, реализуется заведомо избыточный комплекс геофизических методов.

Третья фаза – накоплен объем предшествующих исследований (сбор и анализ), априорной информации, проведены опытно-методические работы, оценены их результаты, выполняется количественная оценка информативности геофизических методов на предмет выбора рационального комплекса.

Требования к ФГМ зависят от стадийности геологоразведочного процесса (принцип последовательных приближений). Так, например, задача поисков объекта сводится к выявлению перспективных аномалий с заданной вероятностью минимальным числом точек наблюдений (обычно три). Густоту сети при этом рассчитывают по моделям физических полей. На стадии детализации подробно изучаются факторы, обуславливающие мак-

симальную изменчивость физического поля. Особую роль играют комплексный анализ и комплексная интерпретация геофизических данных.

По характеру геоэкологических и геологических задач различают ФГМ:

1) *двуальтернативные* – для решения задач типа «локальный объект – вмещающая порода»;

2) *многоальтернативные* – для решения задач, геокартирования, проведения геоэкологических мониторинговых наблюдений по различным видам загрязнения окружающей среды.

По описанию физических полей выделяют ФГМ:

1) *детерминированные* – на основе расчета с помощью уравнений математической физики при жестко заданных значениях параметров модели;

2) *вероятностно-статистические* (слабоконтрастные геологические объекты) – на основе учета вероятностных распределений жестко заданных значений параметров модели. В свою очередь, разделяются на *статистические*, основанные на методах корреляционно-регрессионного и факторного анализов, распознавания образов, проверки статистических гипотез, и *стохастические* – на базе вероятностных распределений самих параметров изучаемых моделей (расчет математических ожиданий, дисперсий и корреляционных функций, описывающих возможный диапазон изменения состояний модели объекта).

По фактору временных геологических процессов различают ФГМ:

1) *статические*, фиксирующие состояние геологического объекта в определенный (исторический) момент времени;

2) *динамические*, отражающие изменение физических полей на разных стадиях развития геологических и геоэкологических процессов, включая мониторинг окружающей среды.

На рис. 133 представлена схема, суммирующая многообразие ФГМ.

Пример *двуальтернативной* ФГМ (решение задачи «локальный объект – вмещающая порода») приведен на рис. 134. Модель представляет собой визуализацию результатов измерений частотных сейсмических спектров, трансформированных в глубинные разрезы по параметрам отношения скоростей продольных и поперечных волн (V_p/V_s), коэффициенту Пуассона (ν) и спек-



Рис. 133. Формирование и классификация ФГМ

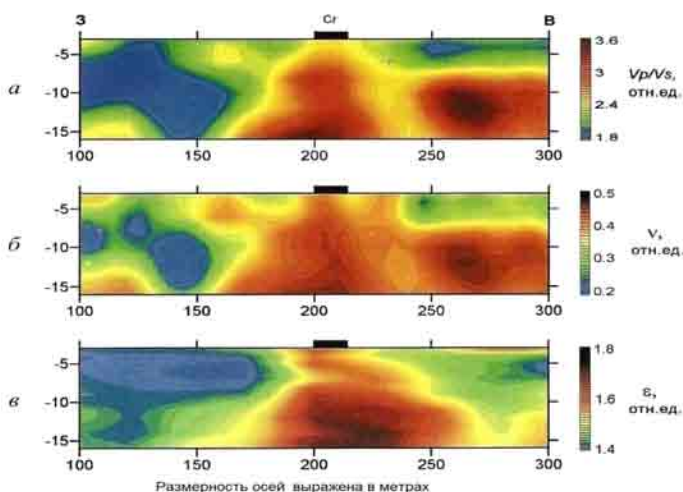


Рис. 134. Физико-геологическая модель в форме сейсмических разрезов, отражающих выход рудного тела по признаку распределения различных сейсмических параметров:

а) по отношению продольных и поперечных волн (V_p/V_s); б) коэффициенту Пуассона (ν); в) спектральному отношению вертикальных и горизонтальных компонент смещений микросейсм ($V/H=\sigma$)

тральных V/H -отношений (ϵ). Данные получены традиционной сейсморазведкой методом преломленных волн (МПВ) в комбинации с многоканальным анализом поверхностных волн на профиле в районе выхода хромитовой руды на поверхность ультраосновного массива Рай-Из на Полярном Урале (В. А. Давыдов, 2013). Все разрезы согласуются между собой. Положение рудного тела приурочено к достаточно высоким значениям упругих сейсмических параметров вблизи градиентных участков. Вмещающие породы массива представлены офиолитовой серией дунит-гарцбургитовой формации.

Примером многоальтернативной ФГМ может являться изученный бурением и методами каротажа разрез покровных отложений, содержащий водоносные горизонты с различной минерализацией вод (рис. 135).

Скважинные исследования (каротаж) проведены при гидрогеологических изысканиях в Ростовской области на участке водораздела в долинах рек Дон и Сал. Отложения представлены чередованием глин, песков и промежуточных между ними разностей, которые в разрезе не выдержаны ни по площади, ни по глубине. Мощности варьируют от 3 до 40 м. Минерализация подземных вод колеблется в больших пределах. Наряду с пресными водами встречаются солоноватые и соленые. В таких сложных геологических условиях комплекс методов каротажа кажущихся удельных сопротивлений КС-ПЗ (кривая ρ_k), потенциалов собственной поляризации ПС (кривая $U_{ПС}$), естественной радиоактивности ГК (кривая J_γ) и вызванной поляризации ВП (кривая $\Delta U_{ВП}$) дает возможность однозначно произвести литологическое расчленение разреза. Метод ГК позволяет разделить глинистые (повышенные значения J_γ) и песчаные (пониженные значения J_γ) отложения. По поведению кривой $U_{ПС}$ прослеживается нарастание с глубиной степени «засолонения» разреза и наличие в нем относительно маломощных суглинисто-глинистых пластов внутри толщи песков. По соотношению кривых ρ_k и $U_{ПС}$, которые хорошо коррелируются между собой, можно выделить водупорные пласты глин, а также линзы песков, залегающих в интервалах разреза с различной минерализацией подземных вод.

Примечательно, что данные ГИС подтверждены гидрогеологическим опробованием. Установлено, что в скважине имеются

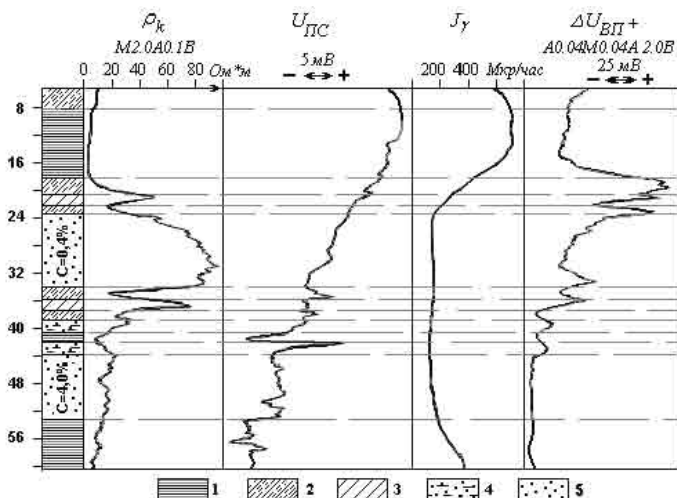


Рис. 135. Форма кривых ГИС, зарегистрированных методами КС-ГЗ, ПС, ГК и ВП в толще осадков, содержащей водоносные горизонты с различной минерализацией вод:

1 – глины; 2 – суглинки; 3 – супеси; 4, 5 – пески с прослоями глин и чистые

два разобщенных водоносных горизонта. В верхнем горизонте (24,2–33,2 м) минерализация воды равна 0,4 г/л, в нижнем (40,8–52,7 м) – 4 г/л. Соответственно этому при переходе от верхнего горизонта к нижнему $\Delta U_{ВП}$ падает с 60 до 10 мВ и становится практически равной величине $\Delta U_{ВП}$, наблюдаемой против глин.

Следует также отметить, что наличие линз песков с различной минерализацией вод фиксируется по данным наземной электроразведки методом ВЭЗ. В качестве примера можно привести результаты исследований на участке разведки под строительный песок в пойме р. Дон (г. Ростов-на-Дону), где диагностика пойменных отложений производилась по сети 50×200 м. В таких случаях представление результатов ВЭЗ удобно в форме объемных диаграмм по каждому профилю, на которых в точках ВЭЗ отмечаются числовые значения, соответствующие разностям питающих электродов (рис. 136, а). Это позволяет оперативно в режиме реального времени определять деструктивные зоны и производить их диагностику при количественной интерпретации (рис. 136, б).

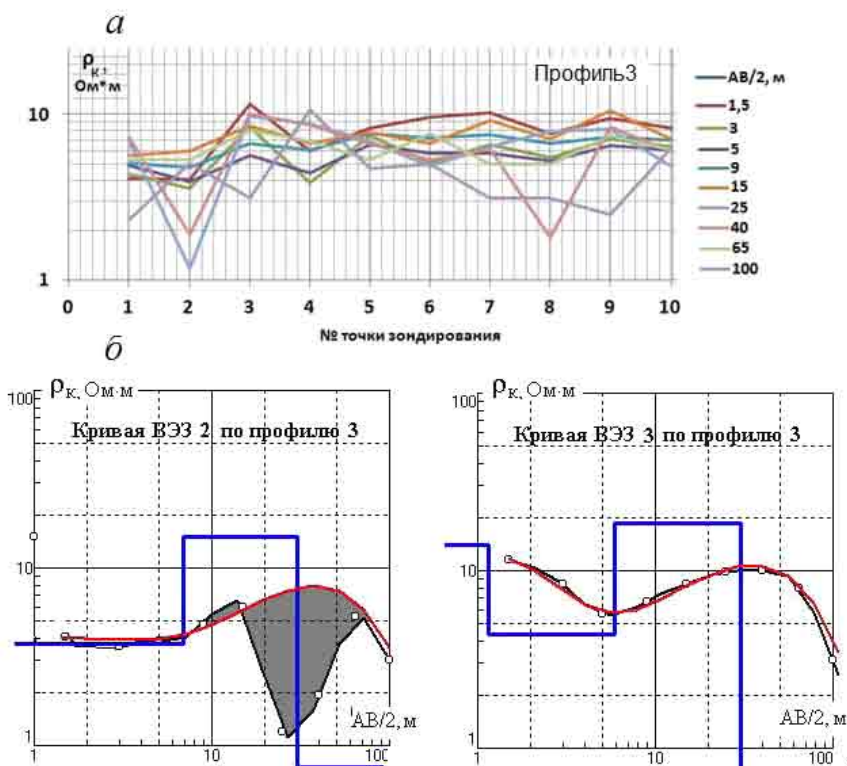


Рис. 136. Сопоставление графиков значений ρ_k , полученных на одноименных полуразносах питающих линий АВ в точках ВЭЗ (а) и форма кривых ВЭЗ в пойменных отложениях с линзами солончаков (закрашено серым цветом) и вне этих участков (б)

Пример детерминированной ФГМ приведен на рис. 137. Модель представлена магнитным шарообразным телом, помещенным в однородную изотропную среду. С помощью программы MagModel2D выполнен расчет горизонтальной (H_x), вертикальной (H_z) компонент и суммарного вектора (T) магнитного поля. Алгоритм программы соответствует условиям детерминации (ограничению), и таким образом решается прямая задача магниторазведки, т. е. посредством расчетов по заданным уравнениям математической физики и жестким значениям параметров модели.

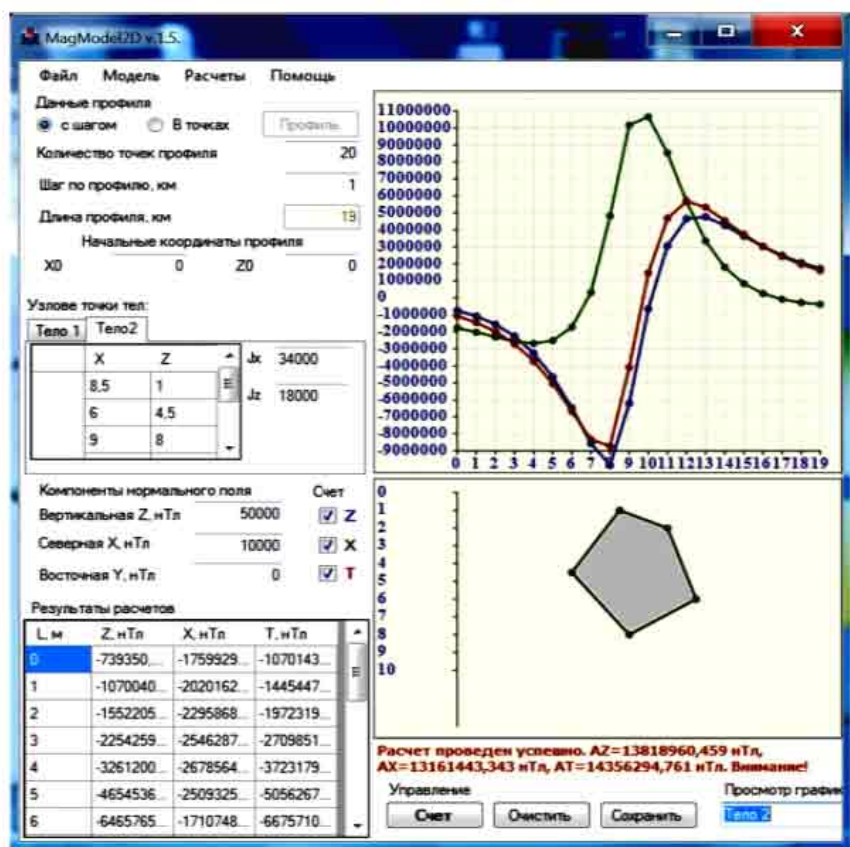


Рис. 137. Решение прямой задачи магниторазведки с помощью детерминированной модели

Пример статистической ФГМ иллюстрируется табл. 2 и рис. 138, где приведены средние показатели физических свойств участка сосредоточения редкометалльных пегматитов, рудное поле которых расположено в грабене, выполненном метаморфическими породами.

Аномальные эффекты геофизических полей на участке соизмеримы с уровнем помех и даже ниже такого уровня, следовательно, решение прямых задач по моделированию физических

полей не эффективно. Особенность рассматриваемой ФГМ и в том, что отдельные пегматитовые тела характеризуются малыми размерами и наличием большого числа аномалий-помех от непродуктивных пегматитов. Кроме того, метаморфические породы

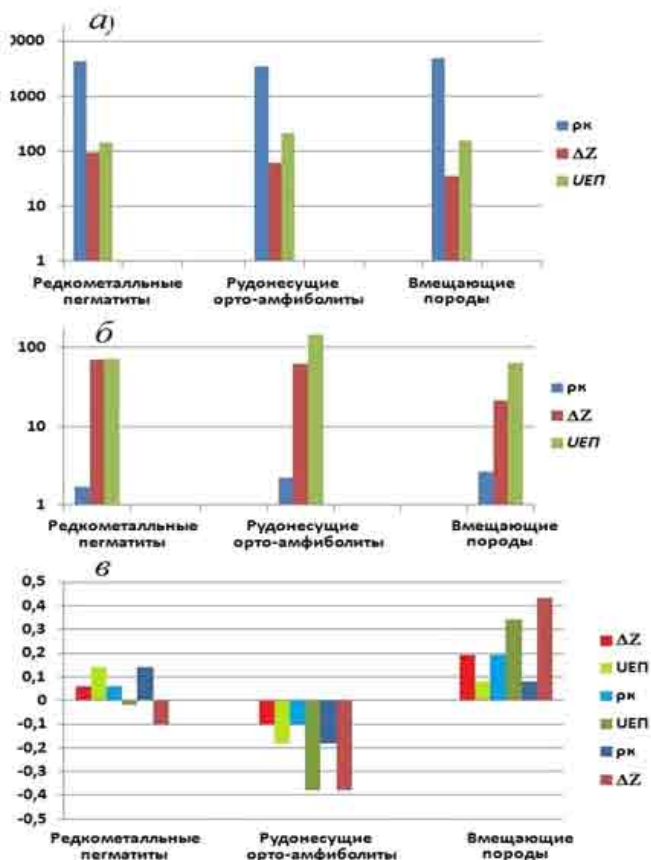


Рис. 138. Гистограммы параметров статистической ФГМ серии пегматитовых жил:

а – средние значения физических показателей эталонной выборки объемом в 80–130 определений по каждому из трех выделенных объектов; б – стандарты отклонений по результатам статистической обработки; в – значения корреляционных матриц, полученных по F-критерию Фишера

Таблица 2

Параметры статистической ФГМ серии пегматитовых жил

Моделируемые геологические объекты (геометрическая аппроксимация)	Физические поля	Статистики				
		Средние значения	Стандарты	Корреляционные матрицы		
				ρ_k	ΔZ	U_{EP}
Жильные серии редкометалльных пегматитов (система параллельных тонких крутопадающих пластов)	ρ_k	4200	1,70	1,00	0,06	0,14
	ΔZ	94	70	0,06	1,00	-0,02
	U_{EP}	-144	72	0,14	-0,02	1,0
Рудонесущие ортоамфиболиты (мощный пласт крутого падения)	ρ_k	3500	2,24	1,00	-0,10	-0,18
	ΔZ	61	61	-0,10	1,00	-0,38
	U_{EP}	-214	145	-0,18	-0,38	1,00
Вмещающие кварцбиотитовые породы (полупространство)	ρ_k	4900	2,63	1,00	0,19	0,08
	ΔZ	36	21	0,19	1,00	0,34
	U_{EP}	-154	63	0,08	0,34	1,00

Примечание. Для ρ_k даны средние геометрические значения и стандартные множители. Единицы измерений: ρ_k – Ом·м; ΔZ – нТл; U_{EP} – мВ.

различного вещественно-петрографического состава здесь слабо различаются в физических полях, поскольку имеет место существенное перекрытие диапазонов изменения физических свойств над тремя выделенными типами объектов (см. в табл. 2 столбец «Средние значения» и рис. 138, а). Поэтому для таких моделей с целью обнаружения слабых аномалий (сигналов) и комплексного анализа геополей прибегают к использованию математической либо физической фильтрации.

Для рассматриваемой модели выполнена **математическая фильтрация**. Применены статистические способы. В результате нетрудно увидеть, что для трех типов выделенных объектов, несмотря на существенные перекрытия диапазонов изменений средних значений физических полей, имеют место статистически значимые различия дисперсии (стандарта) и корреляционных матриц (в табл. 2 столбцы «Стандарты» и «Корреляционные матрицы», рис. 138, б, в).

На рис. 139 приведены результаты физической фильтрации электрического поля. Рассмотрен случай выявления тектонических нарушений в наклонно-слоистой угленосной толще. Физической фильтрацией здесь служит аппарат разнонаправленного возбуждения первичного и приема вторичного полей в системе «геологический объект – геофизическая полевая установка». В рамках этого аппарата разрабатана технология метода пространственной электрической фильтрации (МПЭФ) на основе электропрофилирования в варианте срединного градиента (СГ), когда измерительная установка располагается не только

вкрест, но и вдоль простирания пород, т. е. дополнительно к профилированию СГ производится профилирование продольным срединным градиентом (ПСГ).

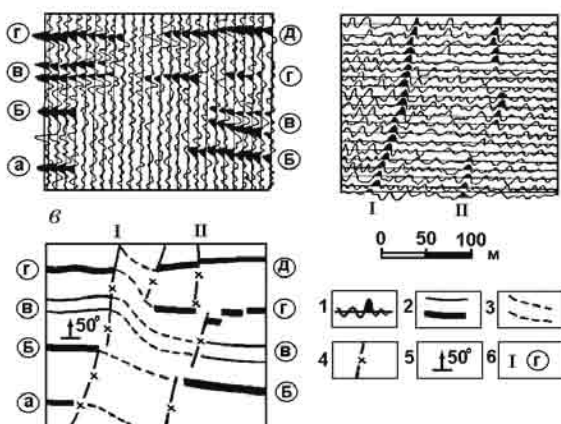


Рис. 139. План графиков СГ (а) и ПСГ (б) на участке наклонного залегания угленосных и подверженных тектоническим разрывам пород (в):

1 – графики ΔU ; 2 – пласты угленосных пород; 3 – линии корреляции в тектонически нарушенной зоне; 4 – тектонические нарушения; 5 – элементы залегания геологических тел; 6 – маркеры пластов и разрывных нарушений

Сопоставление фрагментов а и б на рис. 139 показывает, что на плане графиков съемки СГ (фрагмент а) отмечаются только отдельные признаки нарушенности в виде неоднозначности прослеживаемости «знаковых» аномалий от угольных пластов и их поинтервального отсутствия. В то же время на плане графиков съемки ПСГ (фрагмент б) аномалии от угольных пластов не проявляются, так как силовые линии поля направлены вдоль сло-

истости, но однозначно прослеживаются другие аномалии, которые связаны с зонами дробления разрывных нарушений. Это связано с тем, что электрическое поле здесь направлено уже вкост простирания разрывных нарушений. Последние, как известно, представляют собой обособленные крутопадающие пласты в форме заполненных брекчией тектонических трещин.

Пример стохастической ФГМ приведен на рис. 140. Построение базируется на представлении о множестве случайных состояний модели объ-

екта, т. е. случайных состояний параметров его модели. Одним из вариантов является описание среды в виде модели ячеистого беспорядка, где геосреда аппроксимируется совокупностью ячеек, каждая из которых в геоэкологической терминологии принимает два состояния – например, «загрязненное» и «не загрязненное».

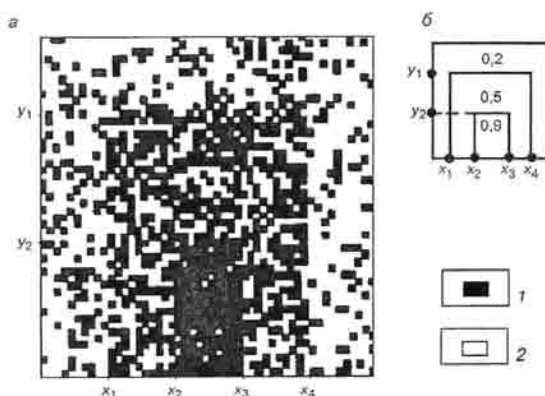


Рис. 140. Случайная реализация сечения экологически загрязненного объекта (а), полученная при заданном распределении вероятностей в сечении модели (б):

1 и 2 – соответственно «загрязненное» и «не загрязненное» состояния ячейки модели

Примером динамической ФГМ могут служить исследования технологий метода заряженного тела (МЗТ) в Восточном Донбассе, при которых во временном диапазоне изучалось распределение электрического поля солевого электрода, помещенного в скважину ниже границы уровня подземных вод (рис. 141, а). Первый цикл измерений значений потенциала поля, создаваемого погруженным в скважину питающим электродом А, проводился до ее засолонения с помощью перемещения по азимутальным линиям измерительного электрода М (рис. 141, а, б). Последующие циклы наблюдений состояли в повторных многократных измерениях при

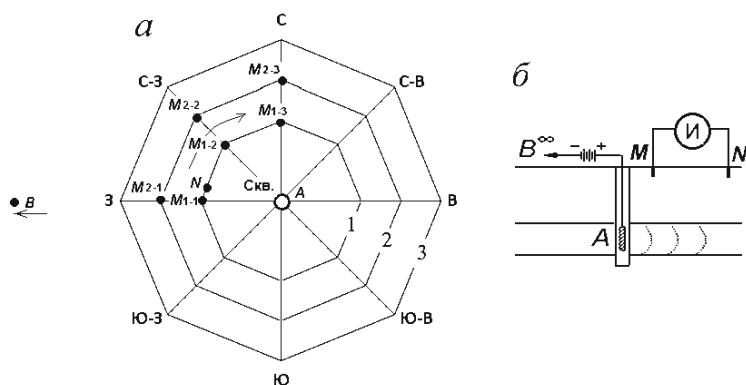


Рис. 141. Схема работ технологий МЗТ (а) и положение солевого электрода в водоносном горизонте (б):
 А, В – питающие электроды; М, N – измерительные электроды; 1, 2, 3 – линии азимутальных измерений

внесении в водоносный пласт электролита через каждые 0,5 часа. Электролитом выступала поваренная соль NaCl.

Картина распределения напряженности электрического поля, создаваемого скважинным питающим электродом А до и в процессе засолонения, представлена на рис. 142.

Из рисунка следует, что смещение изолиний потенциалов электрического поля носит синусоидальный характер, т. е., выражаясь терминами радиоэлектроники, в виде «биений». На основании этого был сделан предварительный вывод, что в высокопреобразованных, малопористых породах угленосной толщи Восточного Донбасса время циклов засолонения подземных вод опережает движение этих вод. Предположение подтвердилось в ходе повторных исследований на участке через 4,6 месяца после первого цикла наблюдений. Данные первого и второго периодов измерений сопоставлены на предмет идентичности по одноименно-совпадающим временным циклам исследований (6-часовой интервал с момента засолонения) (рис. 143). Сопоставление данных первого и второго периодов измерений в скважине № 5 подтвердили первоначальный вывод о квазизастойном состоянии подземных вод в высокопреобразованных породах угленосной толщи.

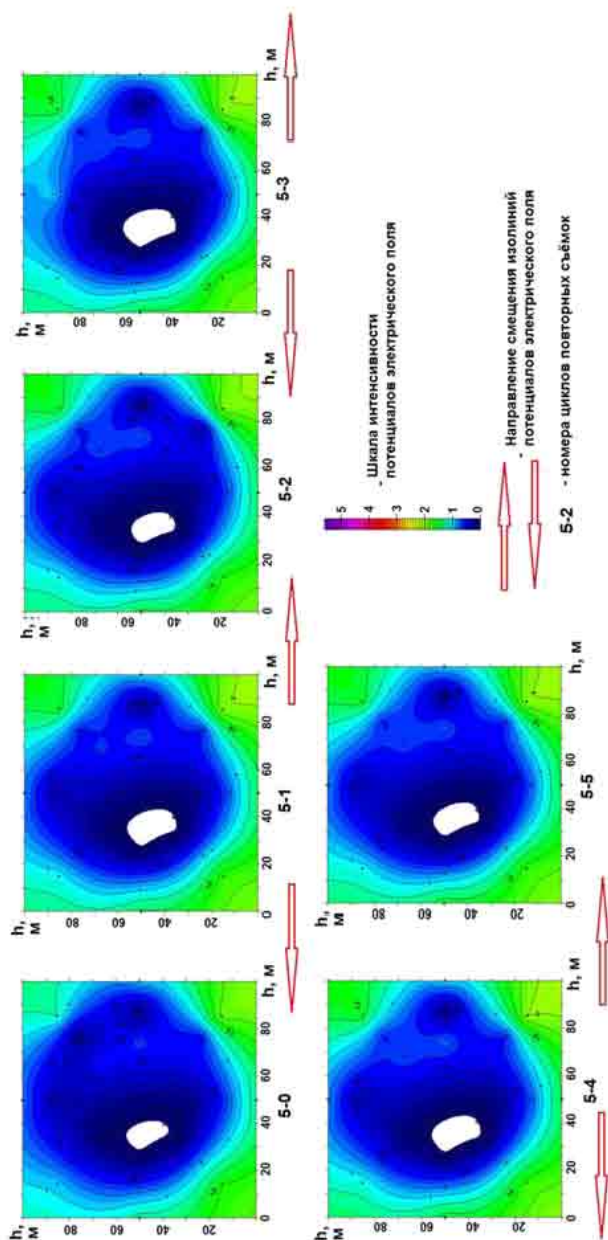


Рис. 142. Смещение во времени изолиний потенциала электрического поля по результатам МЗТ

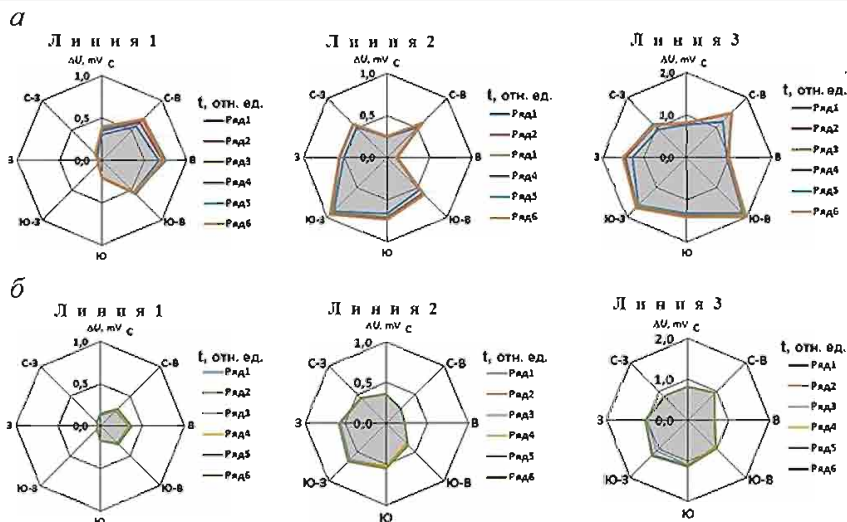


Рис. 143. Круговые диаграммы изменения напряженности электрического поля солевого ореола за 6-часовой период наблюдений в скважине № 5 в октябре 2014 г. (а) и в мае 2015 г. (б) (Восточный Донбасс)

Петрофизическое моделирование предусматривает изучение физических свойств пород для создания петрофизических моделей (ПФМ) как составной части ФГМ изучаемых объектов. Основой получения необходимой информации о физических свойствах горных пород является опробование, которое проводится как в лабораторных условиях на отобранных образцах, так и в естественном залегании пород (на обнажениях, в горных выработках и скважинах). Изменчивость физических свойств пород обуславливает всестороннее использование статистических методов обработки, прежде всего для компактного представления данных о физических свойствах, выявления в общей совокупности самостоятельных групп пород, определения доверительных границ изменения параметра в соответствии с законом его распределения и др. Важнейшим вопросом при изучении физических свойств пород является оценка необходимого и достаточного числа образцов или параметрических измерений. Распространенное мнение о необходимости иметь не менее 50–60 опре-

делений для выполнения статистического анализа недостаточно обосновано. Обычно стремятся получить большое количество измерений, не учитывая качественную и экономическую стороны этих исследований. Простой и наглядный способ выяснения необходимого количества лабораторных или полевых определений того или иного физического показателя – использование точечных диаграмм. Эти диаграммы строят одновременно с измерениями, нанося вновь полученное значение параметра на график, что позволяет непрерывно следить за превращением хаотического расположения точек в закономерное их распределение, после чего измерения прекращают. При одинаковой разнице средних значений физических свойств, представленных для двух типов пород, те породы, у которых меньшая дисперсия, выделяются более надежно. Удобной количественной мерой различия каких-нибудь признаков является надежность их разделения (γ) путем анализа вариационных кривых (см. рис. 131). Они строятся во многих случаях при анализе дифференциации физических показателей горных пород на том или ином объекте геофизических работ. Если имеет место наличие перекрытия, то по его площади $S_{\text{пер}}$ находится вероятность ошибки разделения пород q :

$$\gamma = 1 - q, \quad (47)$$

где q – отношение площади перекрытия вариационных кривых ($S_{\text{общ}}$) к сумме полных площадей под вариационными кривыми ($S_1 + S_2$), т. е.

$$q = S_{\text{общ}} / (S_1 + S_2). \quad (48)$$

Надежными для различия свойств считают значения γ от 75 до 100 %.

Распределение физических показателей пород могут подчиняться как нормальному, так и более сложным законам. Для проверки гипотез о нормальности распределения предложен ряд способов, из которых чаще всего используются критерии Пирсона (критерий χ^2) и Колмогорова (рис. 144). Из приведенных на рисунке построений с использованием вероятностного бланка (сочетание арифметического и билогарифмического масштабов) следует, что при числе наблюдений $n=551$ и максимальном расхождении $D=0,02$ между кривыми накопления теоретических

$\Phi_0(x)$ и экспериментальных $\Phi_3(x)$ частностей показатель надежности $P(\lambda)=0,96$ и $\lambda=0,47$.

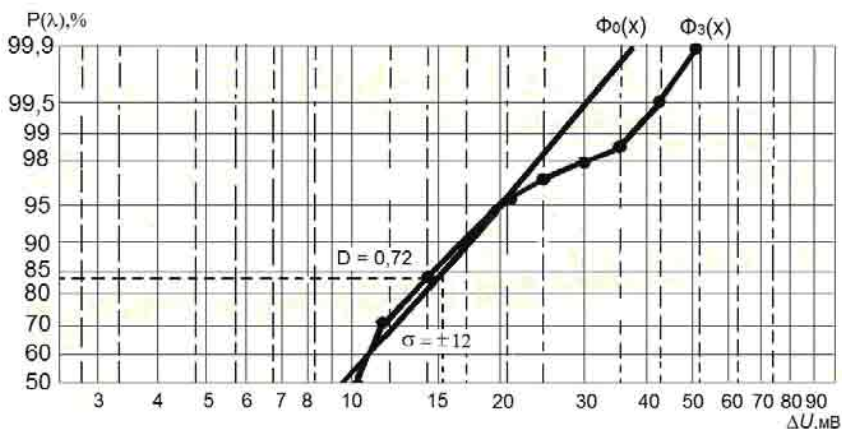


Рис. 144. Оценка надежности аппроксимации распределения параметров нормальным законом по критерию Колмогорова с использованием вероятностного бланка: вертикальные сплошные линии соответствуют логарифмическому масштабу, пунктирные — равномерному

Существуют также опосредствованные связи, т. е. через общность условий формирования горных пород, как, например, в формуле, по которой определяется скорость распространения продольных упругих волн:

$$V_P = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\delta(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \sqrt{\frac{E}{\delta}} = k \sqrt{\frac{E}{\delta}}, \quad (49)$$

где δ — плотность пород; E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона.

Из приведенной формулы следует, что скорость определяется величиной $\sqrt{\frac{E}{\delta}}$, т. е., казалось бы, она прямо зависит от $\sqrt{E}$ и обратно от $\sqrt{\delta}$. Однако если величина E горных пород изменяется в десятки раз, то их δ может изменяться всего в 2–3 раза. Поэ-

тому зависимость $V_p = F(E)$ проявляется гораздо очевиднее, чем $V_p = f(\delta)$. С другой стороны, если величина δ увеличивается, то величина E резко возрастает. Поэтому практически наблюдается прямая, а не обратная связь между плотностью δ и скоростью V_p .

Рядом преимуществ перед лабораторными исследованиями обладают *параметрические измерения in situ*, так как интерес представляют не мелкие вариации физических показателей, а средние, устойчивые параметры того или иного массива осадочных, магматических и других пород, экологического объекта и т. д.

Основные виды параметрических измерений включают плотностные, магнитные, электрические, упругие, радиоактивные и тепловые свойства.

Намагниченность. Показатель J_z может быть вычислен по результатам измерений аномального поля, когда размеры тела по трем координатным осям существенно больше расстояния от верхней поверхности намагниченного тела до плоскости измерений. В этом случае вертикальная составляющая вектора намагниченности (J_z) оценивается по формуле

$$J_z \approx \Delta Z / 2\pi, \quad (50)$$

где ΔZ – расстояние до верхней кромки намагниченного тела.

Плотность. Показатель δ может быть определен по гравиметрическим данным и гамма-методами.

– *Определение плотности при гравиметрических наблюдениях* производится расчетным путем, например по результатам измерений значений приращения силы тяжести в шахте между двумя горизонтами (Δg_1 и Δg_2), находящимися на глубинах h_1 и h_2 :

$$\Delta g_2 - \Delta g_1 = 4\pi\delta(h_2 - h_1). \quad (51)$$

Это же выражение применимо и для гравитационного поля в скважинах.

– *Определение плотности по результатам гамма-гамма-каротажа* основано на том, что логарифм показателя δ линейно зависит от интенсивности гамма-гамма-излучения (I_γ) (рис. 145). Измерения I_γ выполняются скважинным прибором гамма-гамма-каротажа. Используются источники γ -излучения: Co^{60} , Cs^{137} и др.

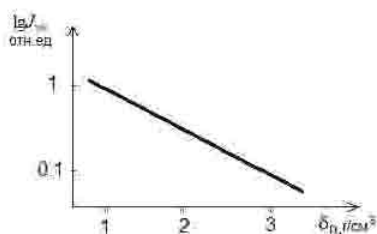


Рис. 145. График зависимости интенсивности рассеянного гамма-излучения от плотности

Электрические свойства. Для определения удельного электрического сопротивления горных пород используются каротажные диаграммы кажущегося сопротивления (КС) градиент-и потенциал-зондов, бокового каротажного зондирования (БКЗ) и микрозондов. Если встречены пласт или свита пластов с сопротивлением в десятки или сотни ом-метров, они выделяются в отдельный комплекс. Наряду с данными каротажа используют также результаты интерпретации параметрических кривых ВЭЗ и дипольного электрического зондирования (ДЭЗ), проведенного вблизи скважин. На обнажениях обычно выполняется профилирование с установками на малых разносах – от единиц до десятков метров.

Скорости распространения упругих колебаний определяют по данным полевых сейсморазведочных работ, а также сейсмокаротажа и акустического каротажа. Первый основан на точечной регистрации вдоль оси скважины упругих волн низких и средних частот, возбуждаемых взрывами на поверхности Земли, а второй – на использовании ультразвуковых (более 10 кГц) частот посредством непрерывной регистрации каротажных диаграмм трехкомпонентным зондом. Для изучения закономерностей распределения скоростей распространения упругих колебаний в разрезе используют годографы различных типов волн, например прямых и встречных.

Тепловые свойства пород надежно определяются, если имеются данные о плотности теплового потока и геотермическом градиенте, полученные в условиях их естественного залегания. Разработаны способы измерения температуры, а также теплоемкости (C) и теплопроводности (λ) горных пород в скважинах. Тепловые свойства характеризуются также инфракрасным излуче-

нием (ИКИ), которое занимает спектральную область между видимым светом и коротковолновым радиоизлучением при длинах волн λ от 0,74 мкм до 1–2 мм.

Радиоактивность горных пород (J_γ) преимущественно определяется по результатам детальных радиометрических съемок на хорошо обнаженных и детально изученных в геологическом плане участках. Кроме этого, используют данные гамма-каротажа и проводят специальные радиометрические наблюдения аппаратурой с щелевыми экранами в горных выработках.

Геометрические параметры источников геофизических аномалий, т. е. геометрические параметры изучаемых геофизическими методами объектов, – это их форма, элементы залегания и взаимное пространственное расположение. Сочетание названных показателей, как известно, влияет не только на интенсивность (амплитуду) геофизических аномалий, но и на однозначность выделения изучаемых геологических образований (пласты горных пород, интрузивные тела, карстовые полости и др.). Ниже приведены примеры влияния различных по геометрическим показателям геологических образований на изменение интенсивности геофизических полей.

На рис. 146 показаны особенности распределения электрического поля в форме кривых ρ_k при проведении работ методом ВЭЗ. С помощью этого метода, как известно из теории и многолетней практики, все слои геологического разреза могут быть однозначно выделены и изучены, когда по мере увеличения глубины залегания каждый последующий слой по толщине h больше суммы толщин предыдущих слоев. Однако такие случаи крайне редки. Поэтому процесс изучения геологических разрезов на глубину по данным электрического зондирования в большинстве случаев весьма сложен.

Неоднозначность при интерпретации кривых проявляется, если в разрезе имеется промежуточный тонкий слой или несколько таких слоев. Надежное определение слоя возможно, если отношение его мощности (h) к глубине залегания (H) удовлетворяет условию $h/H > 2+10$. Слой практически не выделяется, если $h/H < 0,1$. На рис. 146, а показан результат количественной интерпретации кривой ВЭЗ в программе IPI2win для случая «идеального» геоэлектрического разреза, т. е. когда мощность каждого последующего слоя больше суммы

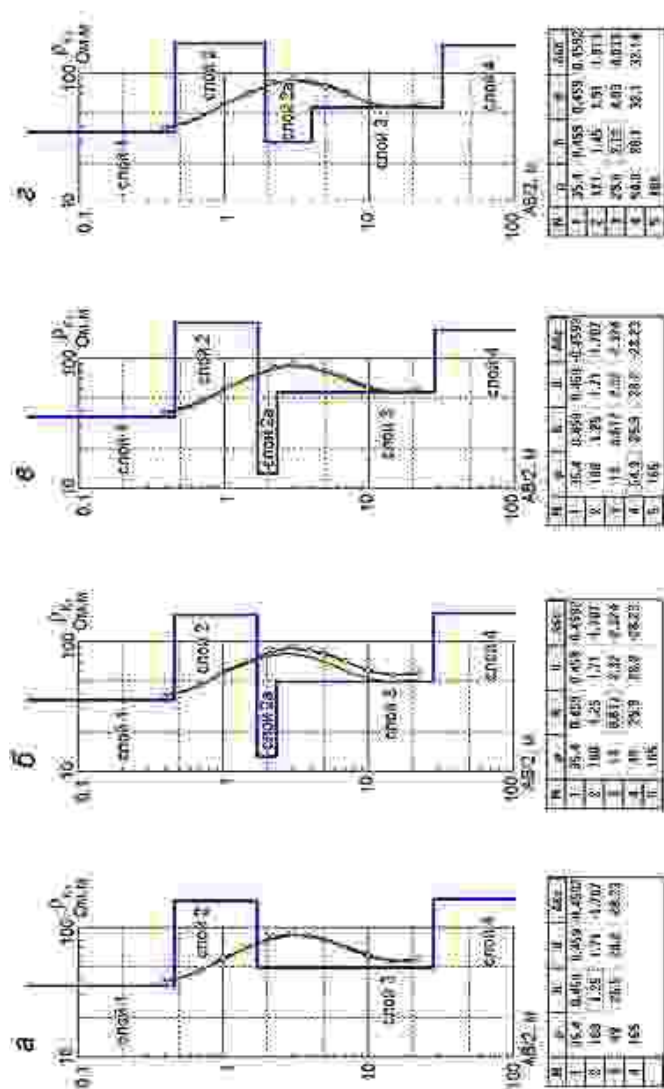


Рис. 146. Форма кривых В88 и их количественная интерпретация в геосекционных разрезах без (а) и с наличием тонкого листа (б, в, г)

мощностей предыдущих слоев. Если же в разрезе имеется тонкий пласт, то он на кривой ρ_k (кривая черного цвета, обозначенная точками на рис. 146, б) визуальнo не фиксируется. При этом за счет пониженного или же повышенного удельного электрического сопротивления (УЭС) этого пласта кривая его истинного сопротивления не соответствует наблюдаемой кривой. Это несоответствие и определяет *неоднозначность решения обратной задачи*, и если не использовать дополнительную информацию, например данные бурения, то результаты интерпретации будут неверными (рис. 146, в, г).

На рис. 147 приведен пример отображения изометричных тел в форме шара с заданными радиусом R и глубиной залегания h в геофизических полях (гравитационном, магнитном и естественном постоянном электрическом).

Для таких изометричных объектов амплитуда (интенсивность) аномалий, зарегистрированная геофизическими методами, зависит от радиуса тела и глубины его залегания. При этом измеренные аномальные значения для разных геофизических полей при одних и тех же геометрических показателях будут отличаться, что является важ-

ным диагностическим признаком при комплексировании геофизических методов и их комплексной интерпретации. В приведенном примере величины аномалий над сферой для параметра гравитационного поля Δg пропорциональны величине R^3/h^2 , для параметра магнитного поля T — величине R^3/h^3 и для параметра естественного постоянного электрического поля $U_{\text{ЕП}}$ — величине R^2/h^2 . Таким образом, скорость убывания поля с удалением от источника, т. е. изучаемого объекта, при его ис-

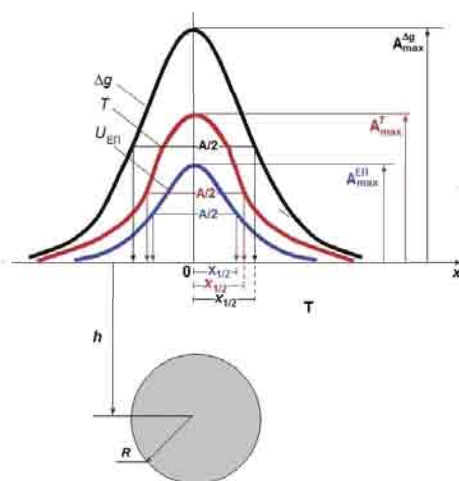


Рис. 147. Аномалии гравитационного, магнитного и естественного постоянного электрического полей от модели изометричной фигуры в форме шара

следовании разными методами неодинакова. Глубина залегания оценивается по формуле

$$h = 1,31[X_{1/2}]. \quad (52)$$

На рис. 148 и 149 представлены примеры разделения аномалиеобразующих объектов по графикам Δg и dg/dz в гравиразведке (рис. 148) и по коротажным кривым КС и ПС при исследовании

углеразведочных и нефтегазразведочных скважин методами ГИС (рис. 149).

Пример на рис. 148 показывает различие в разрешающей способности гравиметрических методов (проведение измерений с помощью гравиметров и градиентометров) на профиле, проложенном через Лебединское железорудное месторождение Курской магнитной аномалии.

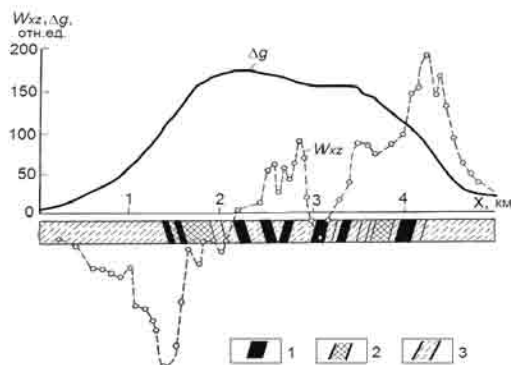


Рис. 148. Геолого-гравиметрический разрез на месторождении рудного проявления:

1 – гематит-магнетитовая руда; 2 – железистые кварциты; 3 – глинистые сланцы

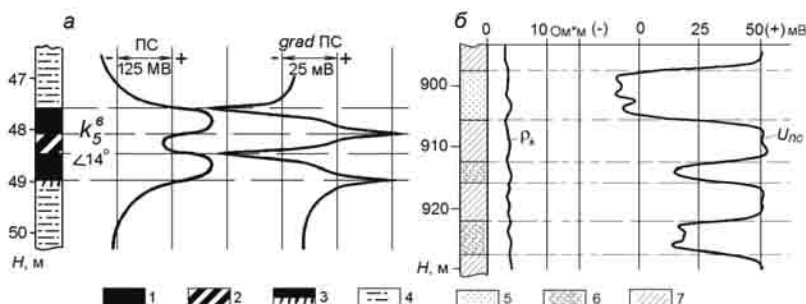


Рис. 149. Сопоставление кривых методом электрического коротажа в интервалах:

а – пласта сложного строения на месторождениях антрацитов в Восточном Донбассе; б – терригенной осадочной толщи; 1 – уголь; 2 – углистый сланец; 3 – перемятый уголь болотной фации; 4 – алевролит; 5 – песок; 6 – суглинок; 7 – глина

Из рассмотрения рисунка следует, что кривая силы тяжести Δg в средней части профиля осложнена аномалиеобразующим объектом, который представлен серией субвертикальных пластов гематит-магнетитовой руды с плотностью $\delta = 3,7 + 3,9$ г/см³ и железистых кварцитов с плотностью $\delta = 3,2 + 3,4$ г/см³. Вмещающими породами являются глинистые сланцы, плотность которых составляет $\delta = 2,7$ г/см³. Неоднородное строение железорудной залежи фиксируется по градиентной кривой W_x , так как аномалии вертикальных градиентов силы тяжести $dg/dz - W_x$ имеют повышенную чувствительность.

Пример, приведенный на рис. 149, а, дает представление о повышении точности определения мощности и строения антрацитового угольного пласта в скважине за счет дополнительного применения наряду с каротажным методом собственной поляризации (ПС) его градиентной модификации (grad ПС). Другой пример (рис. 149, б) позволяет оценить высокую разрешающую способность метода ПС при литологическом расчленении слабодифференцированной по удельному электрическому сопротивлению терригенной толщи, вскрытой нефтегазоразведочной скважиной.

Различают «сильные» аномалии, выделенные визуально, и «слабые» аномалии, соизмеримые с уровнем помех и ниже этого уровня. При этом интенсивность и характер аномальных физических полей в значительной степени зависят от взаимного пространственного расположения нескольких аномалиеобразующих объектов. В качестве примеров можно привести результаты

модельных и натурных исследований методами электроразведки над двумя сферами с различным взаимным расположением.

Пример на рис. 150 отображает результаты изучения потенциала естественного электрического поля вдоль профиля, проходящего через эпицентры двух сфер, при расстоянии между ними $\lambda = 3R$ (R — радиус сферы). Из рисунка следует, что когда обе сферы залегают на глубинах $H = 2R$ и $H = 5R$, при

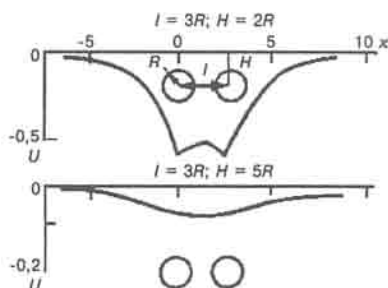
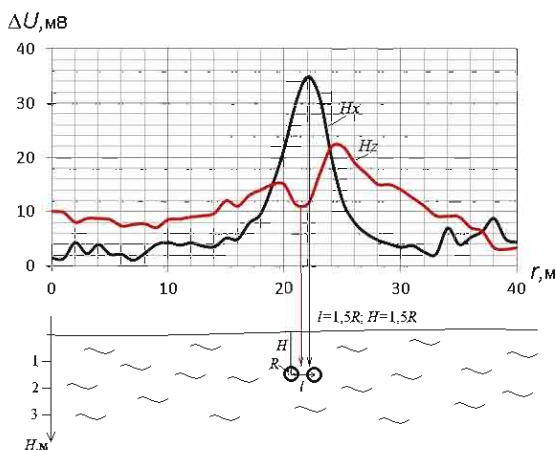


Рис. 150. Кривые потенциала над двумя однородно-поляризованными сферами

их изучении методом постоянного естественного электрического поля (ЕП) они создают общий минимум потенциала. Этот минимум для меньшей глубины $H=2R$ осложнен дополнительными экстремумами за счет индивидуального влияния каждой сферы, а при большей глубине залегания $H=5R$ на графике потенциала U отмечается лишь суммарное влияние обеих сфер.

Подобная картина имеет место и при электромагнитном профилировании методом заряженного тела. Пример на рис. 151 показывает, что две трубы магистральной теплотрассы, расположенные в одной плоскости, при расстоянии между ними меньшем, чем $0,5\lambda$ (λ — длина волны), отображаются на графиках горизонтальной (H_x) и вертикальной (H_z) составляющих напряженности электромагнитного поля единой аномалией. Однако регистрация двух составляющих позволяет выявить смещение экстремумов, являющееся диагностическим признаком наличия в изучаемой толще не одной, а минимум двух труб.

Рис. 151. Результаты изучения труб магистральной теплотрассы методом заряда (гальваническое заземление — индуктивный прием) на частоте 625 Гц



В число геометрических параметров источников геофизических аномалий входит влияние перекрывающих пород. Так, при электроразведочных работах в рыхлых отложениях высокого сопротивления осложняется устройство заземлений. При рабо-

тах на постоянном токе широко известно экранирующее влияние высокоомных пород, залегающих выше опорного горизонта, а для электроразведки переменным током, наоборот, экранами обычно являются низкоомные слои. Покровные рыхлые отложения, кроме того, искажают наблюдаемые поля (резкое отличие по физическим свойствам, колебания мощности, неоднородность за счет включений обломков и глыб, непостоянство увлажнения и т. д.). Поэтому в электроразведке рыхлый покров может выступать не только экраном, но и одним из источников помех.

При *сейсморазведочных работах* рыхлые отложения являются зоной малых скоростей, которая влияет на поглощение высокочастотной части спектра упругих колебаний и запаздывание прихода волн. Особенно сильные влияния оказывают залежи торфа, талики среди мерзлых пород, погребенные речные долины, выполненные рыхлым материалом и находящиеся среди плотных пород. Влияние рыхлых отложений относительно возрастает при изучении неглубоких структур с малыми амплитудами. При *гравиразведочных работах* наличие рыхлых отложений создает ошибки, обусловленные прежде всего изменением глубины залегания кровли коренных пород. Величина этих ошибок может составлять десятые доли миллигала, так как обычно рыхлые отложения имеют существенно меньшую плотность по сравнению с коренными породами. При *магниторазведочных работах* влияние рыхлых отложений на результаты измерений геомагнитного поля зависит от двух основных факторов: от различий в степени намагниченности рыхлых отложений и коренных пород и от размеров и формы кровли последних. В качестве примера на рис. 152 показаны результаты микромагнитной съемки в пределах развития слабомагнитных мергелевых отложений, перекрытых галечником. Галечник состоит в основном из обломков изверженных пород и поэтому характеризуется повышенными магнитными свойствами. Повышенные значения магнитного поля над отложениями галечников выделены на карте изодинам ΔZ серым цветом. Нетрудно также оценить области увеличенной мощности слоя галечников и их пространственное распределение.

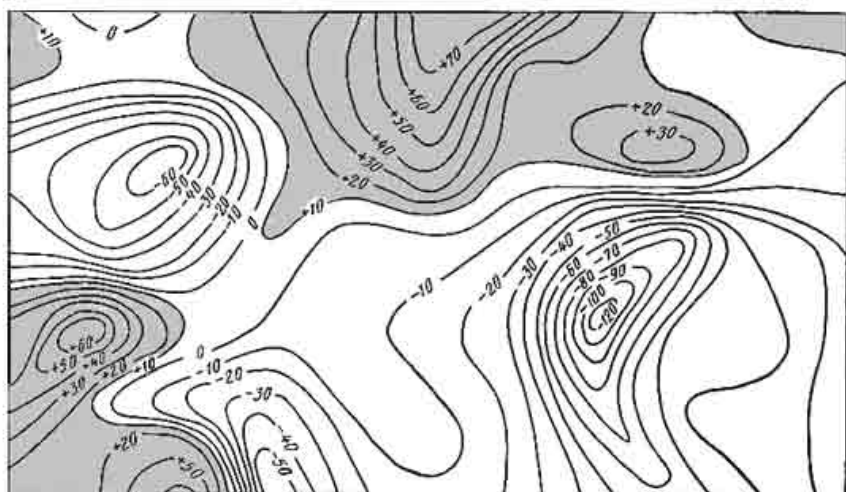


Рис. 162. Изодинамы ΔZ магнитного поля (в гаусах) на участке развития мергелей, перекрытых галечниковыми отложениями

При *радиометрических наблюдениях* влияние рыхлых отложений проявляется по сравнению с другими геофизическими методами наиболее резко, так как гамма-излучение практически на 99 % поглощается слоем вещества мощностью 100 г/см², т. е. примерно полуметровым слоем. При этом глубинность эманиционной съемки в зависимости от газопроницаемости рыхлых пород может изменяться от 1–2 до 10 м. На заболоченных участках, в районах развития длительномерзлых горных пород и при расположении источника радона ниже уровня грунтовых вод метод применим только при наличии особо благоприятных условий, например в тектонических зонах.

Помехи (шум) наряду с полезными сигналами присутствуют во всех наблюдаемых геофизических полях, и под ними понимаются все факторы, которые осложняют производство измерений геофизического поля и интерпретацию получаемых данных. Различают *активные помехи* (блуждающие токи, микросейсмы, временные вариации поля и др.) и *пассивные помехи* (неоднородность перекрывающих пород, рельеф, влияние посторонних объектов, как естественных, так и искусственных, и т. п.). Первые

обуславливают ошибки в измерениях. Вторые приводят к искажению поля искомого объекта.

Случайные помехи в *гравиразведке* и *магниторазведке* весьма разнообразны. Это прежде всего помехи естественного происхождения:

- неоднородность и изменение физических свойств пород верхней части разреза;
- неровности рельефа;
- короткопериодные возмущения измеряемого поля;
- неточность плановой и высотной привязки сети наблюдений и т. п.

В *сейсморазведке* наблюдается много различных случайных помех: микросейсмы, возникающие от ряда неконтролируемых причин (ветер, производственная деятельность человека и т. п.), рассеяния энергии колебаний вблизи поверхности, геологические неоднородности, изменения в зоне малых скоростей. В подземной сейсморазведке помехи возникают за счет реверберации при наличии по соседству отработанных камер большого объема, волноводных свойств выработок и т. д.

В *электроразведке* помехи часто обусловлены изменениями сопротивлений пород как по площади, так и по глубине за счет незначительных вариаций в их литологическом и фациальном составе, степени обводненности и минерализации подземных вод, неоднородности рыхлых отложений и т. п. Кроме того, на результаты изменений в методах электроразведки оказывают влияние токи в Земле естественного и искусственного происхождения (теллурические, промышленные и др.).

На рис. 153 приведен пример гармонической помехи в методе вызванной поляризации (ВП) на двух разностях (E_x – вдоль профиля, E_y – перпендикулярно профилю), где имеет место наличие сигнала частотой 50 Гц, усложненного гармониками 150 Гц и низкочастотной помехой E_y .

Определенный уровень помех при геофизических работах создают непосредственно элементы геолого-геофизического разреза (рыхлые отложения, экранирующие пласты, а также вмещающие породы, близкие по своим физическим характеристикам к исследуемым объектам). Этот уровень может быть существенно снижен, например, путем выбора оптимальной частоты в методах электроразведки, использующих гармонически изменяю-

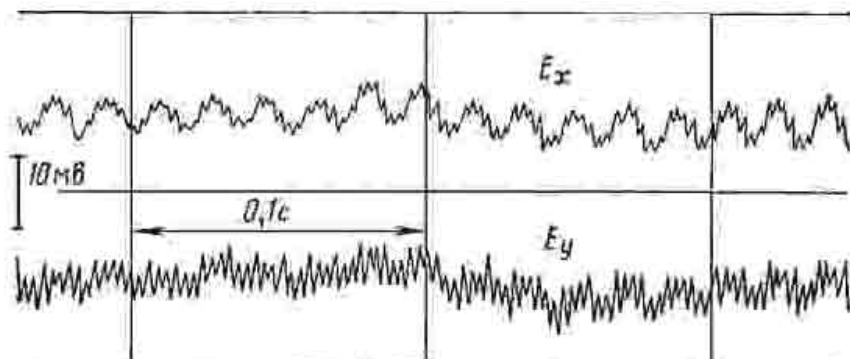


Рис. 153. Осциллограмма гармонической помехи в методе вызванной поляризации

щиеся поля, или надлежащих стадий переходного процесса в методах, использующих нестационарные поля, а также посредством применения оптимальных установок при работе на постоянном токе, в частности установок пространственной электрической фильтрации (см. рис. 142).

Когда помехи связаны с наличием посторонних физических полей (блуждающие токи, микросейсмы и др.), их уровень может быть снижен применением таких технических средств, как аппаратурная фильтрация в измерительном тракте, повышение мощности источника поля, использование приемов накопления сигналов, например в методах общей глубинной точки в сейсморазведке или в методах становления поля в ближней и дальней зонах в электроразведке и т. д. Однако не исключено, что после проведения соответствующих мероприятий по подавлению помех выделение полезной аномалии не всегда достигается. В некоторых случаях установить влияние исследуемого объекта вообще не удастся. Поэтому наиболее эффективным приемом является применение комплекса геофизических методов, прежде всего с учетом того, что значения отношений сигнала к помехе в разных методах различные.

Ниже приведены примеры наиболее значимых помех при геофизических работах:

— помехи геологического происхождения — влияние перекрывающих и подстилающих пород, рельефа местности, неоднородности свойств вмещающих пород и т. д.;

— помехи негеологического происхождения — временные вариации геофизических полей;

— помехи, порождаемые деятельностью человека, — сейсмическая вибрация, блуждающие токи, подземные горные выработки и т. д.;

— помехи от искусственных объектов и обусловленные погрешностями измерений — горные выработки, подземные коммуникации, линии электропередач, а также погрешности систематические, случайные и грубые (промахи).

Примеры помех геологического происхождения проиллюстрированы на рис. 154–159.

Так, на рис. 154 приведены графики магнитного и гравитационного полей, полученные по результатам моделирования над изометричными объектами в среде, поверхность которой выражена антиклинальным рельефом. Рассмотрение графиков показывает, что *аномалии от рельефа местности* осложнены влиянием поля искомых геологических объектов.

На рис. 155 приведен пример *влияния рельефа* на результаты аэромагнитной съемки, выполняемой для картирования интрузивных пород. График поля, обусловленный рельефом, получен на основе корреляционной связи между магнитным полем Земли

на той или иной высоте полета вертолета и абсолютными отметками местности. Аномалии от рельефа не превышают значений $1-1,5 \cdot 10^5$ нТл. График поля, обусловленный рельефом, необходим для получения исправленной кривой сум-

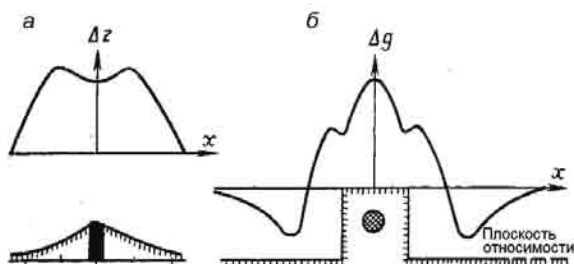


Рис. 154. Графики магнитного и гравитационного полей над изометричными объектами в среде с антиклинальным рельефом:

а — магнитное поле над бесконечным по глубине вертикальным пластом; *б* — гравитационное поле над залежью кругового сечения

марного вектора напряженности магнитного поля ΔT , которая является результатом вычитания из значений наблюдаемого поля.

Пример на рис. 156 показывает влияние рельефа на результаты метода сопротивлений. Это влияние в наибольшей степени проявляется при производстве профилирования вкост простирания горизонталей рельефа, который часто совпадает с простиранием структур.

При этом поднятия (хребты) отражаются на графиках пониженными, а впадины (долины) — повышенными значениями ρ_k .

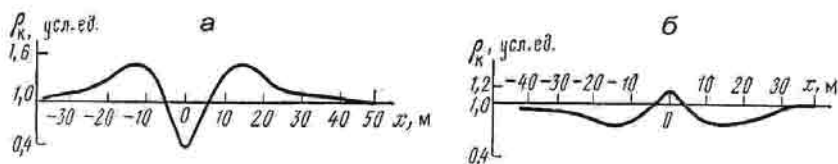


Рис. 156. Кривые ρ_k симметричного профилирования над хребтом (а) и долиной (б)

Рисунок 157 отображает влияние рельефа на аномальность поля вызванной поляризации (ВП) по результатам модельных работ. Измерения произведены над вертикальным проводящим пластом, помещенным в однородную поляризующую среду, в которой поверхность выражена ровной линией, хребтом и долиной.

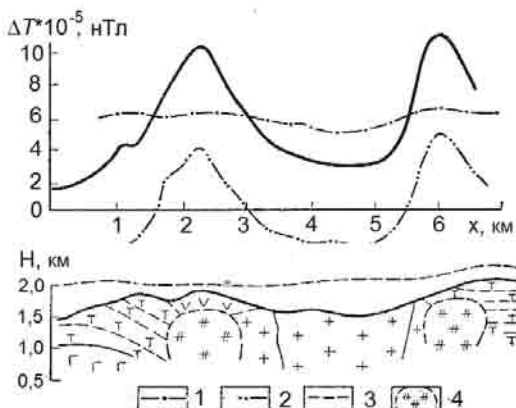


Рис. 155. Результаты профильной аэромагнитной съемки при картировании интрузивных пород:

1 — поле ΔT , обусловленное рельефом; 2 — исправленная кривая ΔT ; 3 — линия полета вертолета; 4 — контуры интрузивных пород

Из рассмотрения рисунка следует, что в отличие от методов сопротивления аномалии параметра кажущейся поляризуемости

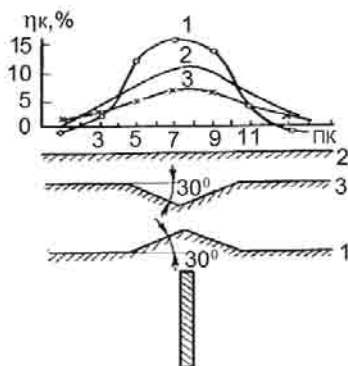


Рис. 157. Результаты модельных работ, иллюстрирующие влияние рельефа на данные метода ВП (вертикальная модель).

Кривые η_k :

1 – под хребтом; 2 – под горизонтальной поверхностью;
3 – под долиной

η_k при любых колебаниях рельефа положительные. Наибольшая интенсивность поля ВП наблюдается над хребтом, а наименьшая – над долиной, т. е. рельеф в одних случаях усиливает интенсивность поля, а в других ослабляет.

На рис. 158 показано влияние рельефа на форму кривых индуктивных методов электропрофилирования. Исследования выполнены на профиле, пересекающем хребет в средневолновом ($f=16$ кГц) и высокочастотном ($f=270$ кГц) диапазонах частот, с измерением вертикальной (H_z) и горизонтальной (H_x) составляющих электромагнитного поля. Обнаженный по склону хребта проводящий слой кварцита-серицитовых пород создает типо-

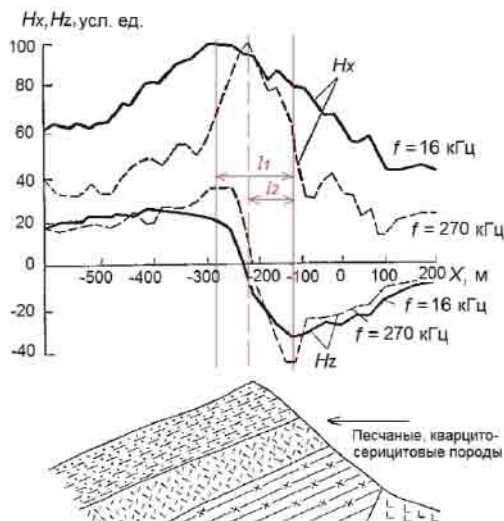


Рис. 158. Графики составляющих H_x и H_z магнитного поля по профилю, пересекающему хребет, сложенный песчаными и кварцит-серицитовыми породами

вые, характерные для линейного проводника положительную H_x и отрицательную H_z аномалии. Влияние рельефа проявляется по признаку смещения экстремумов этих аномалий, притом что величины смещений пропорциональны длинам волн, т. е. большие по ширине на кривых длинноволнового диапазона.

На рис. 159 приведен пример учета поправок за рельеф в сейсморазведке, где скорости $V_{сдф}$, рассчитанные по синтетическим сейсмограммам, скорректированы за рельеф с помощью формулы

$$V_{сдф}^{cor} = V_{сдф} \sqrt{1 - \frac{V_1^2 \cdot t_{st}}{V_{сдф}^2 \cdot T_0}}, \quad (53)$$

где $V_{сдф}$ – оценки предельных эффективных параметров; t_{st} – поправка за рельеф в трассы сейсмограмм.

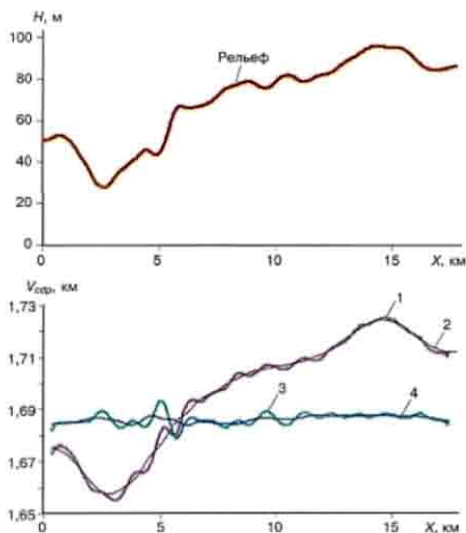


Рис. 159. Учет искажающего влияния рельефа в сейсморазведке методом ОГТ на базе 1,5 км (по В. С. Черняк, 2005): 1–4 – графики скоростей $V_{сдф}$: рассчитанной (1), рассчитанной сглаженной (2), исправленной (3), исправленной сглаженной (4)

Следует отметить, что в приведенной формуле $V_{сдф}$ представляет собой «точную» предельную эффективную скорость годографа, если бы он наблюдался на линии приведения, точную – в смысле свободную от ошибок. При менее сложном рельефе для введения поправок можно пользоваться следующей формулой:

$$\Delta t_p = h/V, \quad (54)$$

где h – расстояние по вертикали от действительной точки стояния сейсмоприемника до линии приведения средней линии рельефа; Δt_p – время, приводящее к искажению годографов в местах неровностей рельефа; V – скорость распространения упругих колебаний в породах. Знак Δt_p отрицательный, если сейсмоприемник расположен выше линии приведения, и положительный, если сейсмоприемник находится ниже этой линии.

Примеры помех негеологического происхождения иллюстрируются рис. 160–162. К этим помехам прежде всего относится влияние временных вариаций, которые присущи как естественным, так и искусственным геофизическим полям.

На рис. 160 показан ход *суточных магнитных вариаций* вертикальной ΔZ и горизонтальной ΔH составляющих напряженности магнитного поля, осредненных по многолетним наблюдениям. Известно, что их интенсивность возрастает в летние месяцы и в дневные часы, а также по мере приближения к магнитным полюсам.

Влияние вариаций магнитного поля, включая короткопериодные (за счет теллурических токов), учитывается при магнито-разведочных работах путем наблюдений на вариационных станциях или же посредством установки одного из полевых магнитометров в вариационный режим на территории базирования геофизического отряда. Таким же способом учитывается *влияние*

теллурических токов (естественные электрические токи нестационарного режима), которые отличаются широким частотным спектром и изменяются во времени как по величине (от 0,1 мВ/км до 1 В/км и более в периоды магнитных бурь), так и по направлению поляризации вектора IT . Эти вариации охватывают широкий спектр частот – от вековых до вариаций с периодом в доли секунд – и представляют собой серьезную помеху естественного

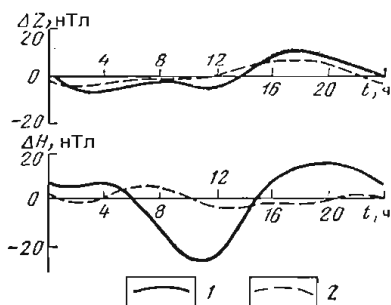


Рис. 160. Среднесуточные вариации геомагнитного поля за июнь (1) и декабрь (2)

происхождения для проведения измерений по методам сопротивлений и ВП.

На рис. 161 приведены графики временных вариаций поля навигационных радиостанций (метод РадиоКип – СДВР). Из рассмотрения графиков следует, что ночью уровень поля сверхдлинных волн значительно увеличивается, и этот факт надо учитывать при геофизических работах, равно как и в случае со среднесуточными вариациями геомагнитного поля (см. рис. 160).

На рис. 162 представлен график вариаций гравитационного поля вследствие лунно-солнечного притяжения. Периодические колебания происходят в соответствии с изменением зенитных углов Луны и Солнца. Максимальная величина вариаций может достигать 0,15 мГал, что уже соизмеримо с гравитационными аномалиями от рудных тел. Однако при работах с астазированными гравиметрами учет лунно-суточных вариаций происходит автоматически путем введения поправок за сползание нуля-пункта прибора.

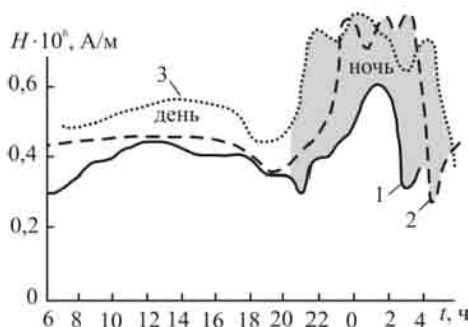


Рис. 161. Напряженность поля сверхдлинноволновых радиостанций при наблюдениях в июне (1), августе (2) и сентябре (3)

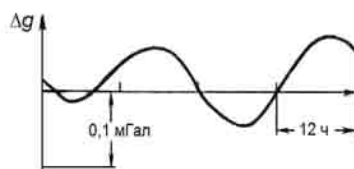


Рис. 162. Вариации гравитационного поля за счет действия Луны и Солнца

Пример помех, порождаемых деятельностью человека, иллюстрируется рис. 163. Показана временная осциллограмма блуждающих токов промышленного происхождения.

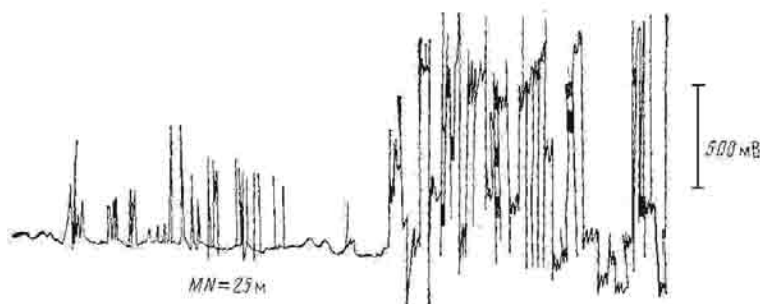


Рис. 163. Разность потенциалов промышленных электрических помех в подземной горной выработке, записанная за 4 мин

Такие помехи (электрофицированные железные дороги, сварочные агрегаты и другие промышленные установки) особенно интенсивны на действующих рудниках, где они обусловлены работой электровозов и моторов лебедок. Для исключения влияния указанных помех во время проведения геофизических наблюдений производственные работы приостанавливают. В других случаях геофизической службе для выполнения исследований предоставляется производственный график, — например, на железных дорогах с отметкой временных окон движения поездов.

Примеры помех от искусственных объектов иллюстрируют-

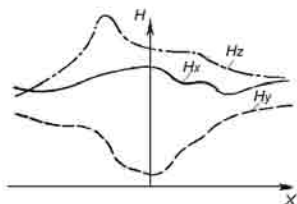


Рис. 164. Графики поля радиовещательной станции, зарегистрированные при проведении работ на железорудном месторождении методом РадиоКип-СДВР по профилю, секущему высоко-

вольтную линию. Помехи в гравиразведке создают находящиеся поблизости от пунктов наблюдений пустые камеры, горные выработки и зоны обрушения пород, в электроразведке — трубопроводы и кабели, электрические и телефонные сети, в магниторазведке — наземные и подземные железосодержащие сооружения и т. д. В качестве примера можно привести влияние высоковольтной линии на результаты электромагнитного профилирования на железорудном месторождении Среднего Урала методом РадиоКип-СДВР (рис. 164). Здесь интерпретация графиков магнитных составляющих электромагнитного

поля от картируемого проводящего объекта затрудняется искажениями от поля высоковольтной линии, а также возникающим сдвигом фаз.

При рассмотрении приведенных выше примеров влияния помех на аномальность геофизических полей следует иметь в виду двойственный характер понятия «сигнал/помеха». Например, известно, что блуждающие токи индустриального происхождения при электроразведочных работах методом сопротивлений осложняют проведение наблюдений и снижают их точность. С другой стороны, эти же токи могут быть использованы для локализации зон повышенной электропроводности (тектонические разломы, рудные тела). Это же относится и к теллурическим токам, которые необходимо учитывать в методах потенциальных полей магниторазведки и электроразведки, но также можно эффективно использовать при магнитотеллурическом профилировании и зондировании. Кроме того, стоит отметить, что на основе промышленных и индустриальных помех в геоэкологии разработаны технологии изучения электромагнитной, радиационной, сейсмической и других видов загрязненности окружающей среды.

Выделение слабых аномалий при геофизических съемках

Методика проведения геофизических работ, как известно, предусматривает расчет пунктов сети наблюдений и учет точности измерений в их взаимосвязи. Исходными параметрами при расчете сетей являются геометрические параметры объекта и сумма в наблюдаемом поле аномалий и помех. Особенно это важно, когда при незначительной дифференциации физических свойств объекта и вмещающих пород аномалии становятся слабыми, соизмеримыми с уровнем помех. Для выделения таких слабых аномалий используют методы математической и физической фильтрации (см. рис. 138 и 139). Большое значение имеет наличие априорной информации о параметрах подлежащей обнаружению аномалии и статистических свойствах помех. В методах математической фильтрации одним из эффективных является способ обратных вероятностей, который основан на вычислении функций правдоподобия. Пример применения этого способа приведен на рис. 165. Обработка проводится путем: а) исключения регионального фона и приведения к нулевому среднему исходных данных по профилям; б) оценки дисперсии помех δ^2 в слу-

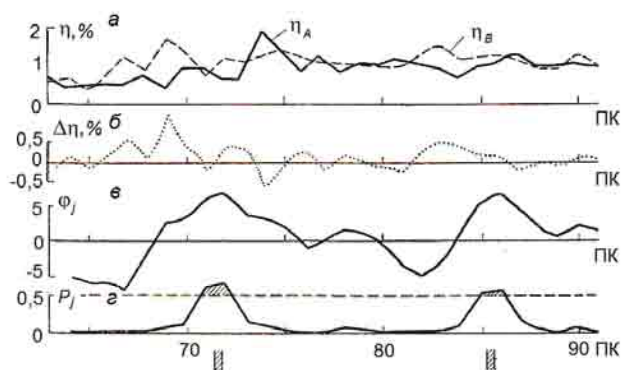


Рис. 165. Обработка данных метода ВП по способу обратных вероятностей:

а – исходные данные; б – разностная кривая $\Delta\eta = \eta_B - \eta_A$; в – кривая корреляционной суммы; г – кривая наличия вероятности аномалии

чае их некоррелируемости, а в противном случае оценки формы автокорреляционной функции помех $R_n(m)$; в) выбора на основе решения прямой задачи геометрии аномалии, подлежащей выделению $a_0(x_1), \dots, a_0(x_n)$, либо по известным аномалиям над сходными в геологическом отношении объектами; г) задания требуемой величины надежности обнаружения аномалии ($\gamma = 95; 99\%$ и т. д. по критерию Котельникова) и нахождения соответствующего этой величине энергетического отношения аномалия/помеха; е) расчета вероятности наличия аномалии p_i и принятия решения о наличии аномалии при $p_i > 0,5$.

Эффективным в методах математической фильтрации геофизических полей является также способ межпрофильной корреляции. Этот способ позволяет производить разделение интерферирующих аномалий для сложно интерпретируемых обычными, визуальными приемами геофизических полей. Применяется статистическая обработка при наличии лишь ограниченной априорной информации об аномалиях и помехах. Порядок действий следующий: а) исключается региональный фон по площади съемки; б) оценивается некоррелированность помех путем расчета автокорреляционной (АКФ) и двумерной автокорреляционной (ДАКФ) функций на безаномальных участках; в) вычисляется взаимно-корреляционные функции (ВКФ) для соседних пар

профилей с целью оценки смещения осей аномалий (устанавливаемого по экстремумам ВКФ) от профиля к профилю; г) производится выбор наиболее вероятных аномальных осей; д) выполняется скользящее суммирование исходных данных по N профилям вдоль выбранных осей, результаты суммирования делятся на число профилей и относятся к среднему из них; е) принимается решение о наличии аномалии по коррелируемым особенностям суммарных графиков.

Применение способа межпрофильной корреляции показано на данных магнитной съемки (рис. 166).

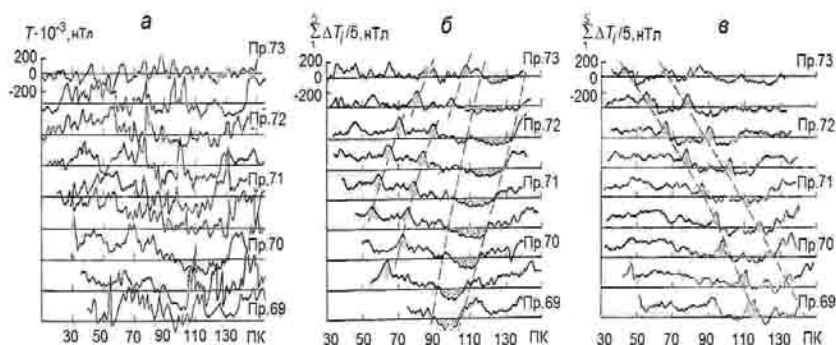


Рис. 166. Обработка данных магнитной съемки способом межпрофильной корреляции:

а – исходные графики магнитного поля; *б, в* – графики взаимно-корреляционной функции по направлениям северо-западного и северо-восточного простираний

Графики суммарного вектора магнитного поля T (рис. 166, *а*) свидетельствуют о сложном характере магнитного поля, обусловленном наложением аномалий от контактов пород северо-восточного простирания на эффекты, связанные с тектоническими нарушениями северо-западного простирания. Суммирование наблюдений по пяти профилям при смещении осей аномалий, определяемых максимумами ВКФ, позволяет уверенно выделить аномальные зоны северо-восточного (рис. 166, *б*) и северо-западного (рис. 166, *в*) простираний, увязываемые с геологическими данными. Следует отметить, что эффективность обработ-

ки по способу межпрофильной корреляции в значительной мере определяется надежностью значений максимумов ВКФ, поэтому при выделении слабых, одиночных и коротких аномалий способ межпрофильной корреляции неэффективен.

Вопросы и задания для контроля самостоятельной работы

1. Составьте обобщенную схему формирования комплексов геофизических методов.

2. Обоснуйте применение статистических методов выделения полезных сигналов на фоне помех при комплексной интерпретации геофизических наблюдений.

3. Какие основные факторы определяют плотность, магнитную восприимчивость, скорость распространения упругих волн и электропроводность горных пород?

4. Раскройте сущность физико-геологического моделирования как основы при выборе типовых, рациональных и оптимальных комплексов геофизических методов.

5. Как осуществляется формирование физико-геологических моделей (ФГМ) и их классификация?

6. Что подразумевает характеристика фаз при формировании физико-геологических моделей (ФГМ)?

7. Каковы основные типы физико-геологических моделей (ФГМ)?

8. Охарактеризуйте петрофизические модели и петрофизическое моделирование.

9. Укажите основные типы помех при регистрации геофизических полей.

10. Приведите примеры помех геологического происхождения.

11. Что собой представляют помехи, вызываемые деятельностью человека?

12. Какие существуют математические способы фильтрации при обнаружении слабых аномалий?

13. Опишите способы пространственной геофизической фильтрации при картировании целевых объектов.

14. Как выполнить пространственную электрическую фильтрацию при скважинных измерениях?

15. Что относится к помехам негеологического происхождения, как их ослабить при комплексной интерпретации?

2.3. Неоднозначность решения обратных задач в геофизике

При интерпретации геофизических материалов возникает целый ряд сложностей, основная из которых заключается в неоднозначности решения обратной задачи. С этих позиций проявляются и две стороны неоднозначности: качественная и количественная. При этом в обоих случаях факт наличия неоднозначности в процессе истолкования (интерпретации) геофизических данных вызывает необходимость поисков путей и способов снижения этой неоднозначности.

Возникновение неоднозначности обусловлено прежде всего тем, что практически никогда не известны геометрические показатели изучаемой геологической среды, в том числе и по причине ее непрозрачности. Поэтому очевидно, что не отличающиеся (одинаковые) по физическим свойствам объекты, в то же время различающиеся по геометрическим размерам, но находящиеся на разных глубинах, создают одинаковые по форме и амплитуде аномалии. Это легко показать на примерах моделей с объектами простой геометрической формы, когда одинаковые по амплитуде и форме аномалии могут возникать как минимум в трех случаях.

Случай первый (рис. 167):

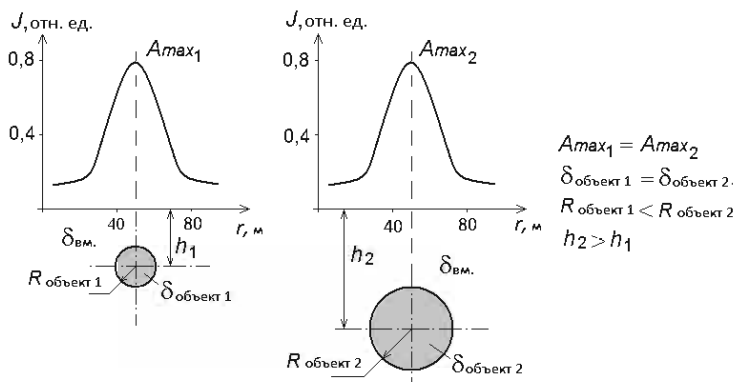


Рис. 167. Пример идентичности геофизических аномалий над объектами различных размеров (R), расположенными на разных глубинах (h) и при одинаковой контрастности по физическим свойствам (δ)

Случай второй (рис. 168):

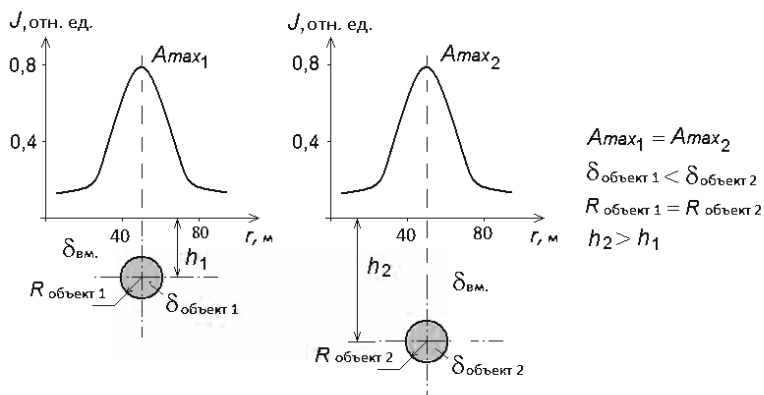


Рис. 168. Пример идентичности геофизических аномалий над объектами, расположенными на разных глубинах (h), отличающимися по контрастности физических свойств (δ) и при одинаковых геометрических размерах (R)

Случай третий (рис. 169):

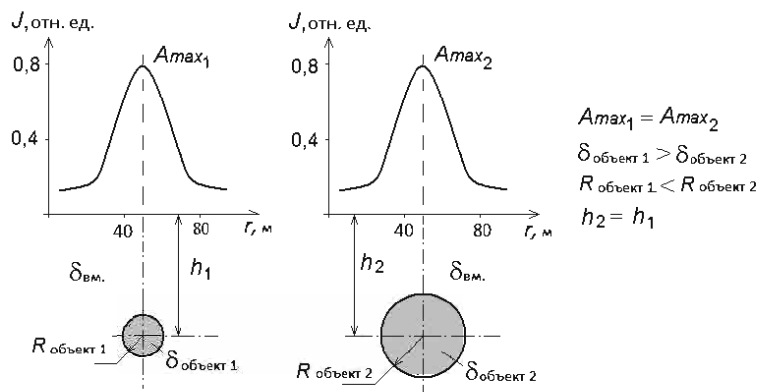


Рис. 169. Пример идентичности геофизических аномалий над объектами различных размеров (R), отличающимися по контрастности физических свойств (δ) и расположенными на одинаковых глубинах (h)

Качественная неоднозначность формулируется как неопределенность в истолковании геологической природы аномалий, т. е. неопределенность представлений о качественных (геологических) показателях объекта исследования.

Ниже даны примеры анализа результатов комплексных геофизических измерений, применение которых позволяет **снижать уровень качественной неоднозначности**.

На рис. 170 сопоставлены аппроксимированные графики электро- и магниторазведочных наблюдений, выполненных на профиле, ориентированном вкрест проложения подземных коммуникаций. Последние представлены трубами теплосети, водопровода, канализации и силовым кабелем. Электроразведка проведена методом заряженного тела (МЗ) посредством гальванического заземления и индуктивного приема на частотах 0,625 и 26,78 кГц. Рассмотрение представленных на рисунке графиков показывает, что магниторазведочные измерения позволяют получить информацию о наличии в покровных отложениях металлических объектов. Далее, проводя качественную интерпретацию и располагая априорной информацией, нетрудно заключить, что наибольшая по интенсивности положительная аномалия магнитного поля вызвана двумя трубами (прямой и обратной) теплосети, которые по существующим нормативным требованиям размещаются на малых глубинах порядка 1,5–1,6 м. Вторая по степени убывания аномалия магнитного поля проявляется над трубой водовода, которая имеет в 1,5 раза меньший диаметр, чем трубы теплосети, и закладывается глубже (1,8–2,0 м). Еще меньшей по амплитуде аномалией отмечается силовой кабель, а канализационная ветвь из чугуновой и поэтому диамагнитной трубы в магнитном поле совсем не проявляется. Дополнительно проведенные электроразведочные измерения методом заряда позволяют существенно снизить уровень неоднозначности при диагностике подземных коммуникаций. На графиках МЗ над «заряженной» трубой фиксируются интенсивные индуктивные аномалии. При этом разрешающая способность МЗ зависит от используемой частоты, и, следовательно, при увеличении частоты и соответствующем уменьшении длины волны можно картировать не только «заряженную» трубу, но и соседние коммуникации.

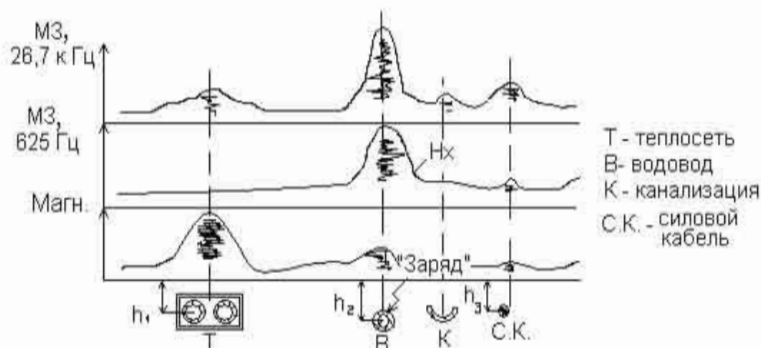


Рис. 170. Результаты электро- и магниторазведочных наблюдений на территории размещения подземных коммуникаций

На рис. 171 приведен пример качественного истолкования комплексных геофизических исследований методами георадио- и ВЭЗ

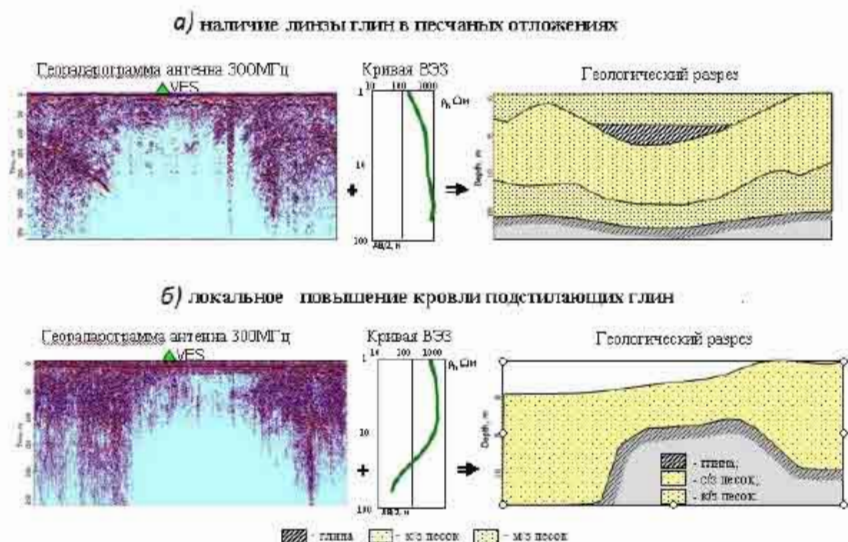


Рис. 171. Пример качественной интерпретации результатов РЛП и ВЭЗ на участках инженерно-геологических разрезов, отличающихся по литологическому строению

локационного профилирования (РЛП) и вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Работы выполнены для решения инженерно-геологической задачи по литологическому расчленению покровных отложений. На фрагментах *а* и *б* георадиолокационные картины аналогичны при неодинаковом поведении кривых ВЭЗ. Это дает основание по кривой ρ_k составить модели геоэлектрических разрезов, согласно которым в центрах георадиолокационных профилей зона затухания электромагнитных волн на фрагменте *а* обусловлена приповерхностной линзой глин, а на фрагменте *б* – горстообразным рельефом подстилающего слоя глин.

На рис. 172 представлен еще один пример качественной интерпретации результатов РЛП и ВЭЗ, где комплексный анализ геофизических данных позволяет детализировать строение терригенной осадочной толщи. В частности, не трудно установить, что на юго-западе геофизического профиля толща песков в верхней части разреза загрязнена нефтепродуктами, о чем свидетельствуют пониженные значения ρ_k вследствие процессов окисления нефти под действием атмосферных факторов. Ниже по разрезу эта толща песков по мощности значительно превышает таковую

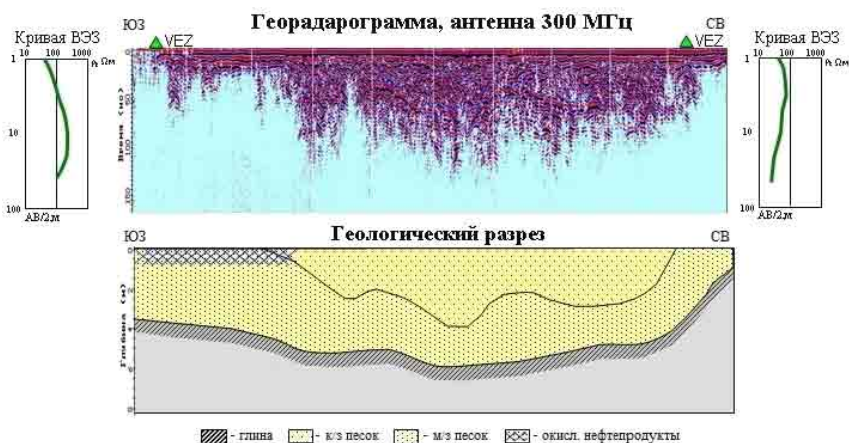


Рис. 172. Результаты РЛП и ВЭЗ на участке с наличием загрязненной нефтепродуктами площади

на северо-востоке данного профиля. Здесь с глубиной ρ_k уменьшается, что является признаком смены высокоомных песков низкоомными глинами.

Значимым приемом решения проблемы качественной неоднозначности является оценка природы геофизических аномалий с учетом механизма образования поля. Характерными примерами могут быть наблюдения методом постоянного естественного электрического поля (ЕП), скажем, разный знак аномалий потенциалов ЕП в зонах разгрузки и инфильтрации подземных вод (рис. 173).

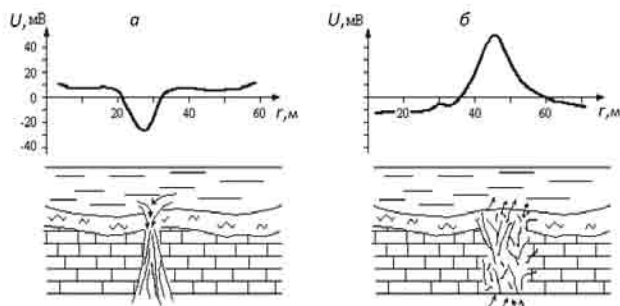


Рис. 173. Аномалии поля естественных потенциалов на участках инфильтрации (а) и разгрузки (б) грунтовых вод

Перемена знака аномалии происходит и при изменении состава вод, например в геологоразведочных скважинах при разной концентрации бурового раствора (промывочной жидкости) и пластовых вод (рис. 174).

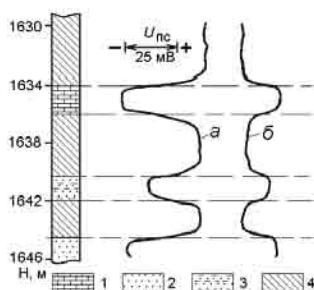


Рис. 174. Кривые ПС (ЕП) при различных соотношениях сопротивлений промывочной жидкости ρ_* и пластовой воды ρ_p :
 $a - \rho_* > \rho_p$; $b - \rho_* < \rho_p$; 1 - известняк;
 2 - песчаник; 3 - песчаник алевритистый;
 4 - аргиллит

Весьма эффективно «снимать» качественную неоднозначность способами разнонаправленного возбуждения и приема. На рис. 175 приведены картины распределения электрического поля в методах сопротивлений с трехэлектродными AMN - MNB и четырехэлектродными $AMNB$ электроразведочными установками, которые широко применяются в методах сопротивлений.

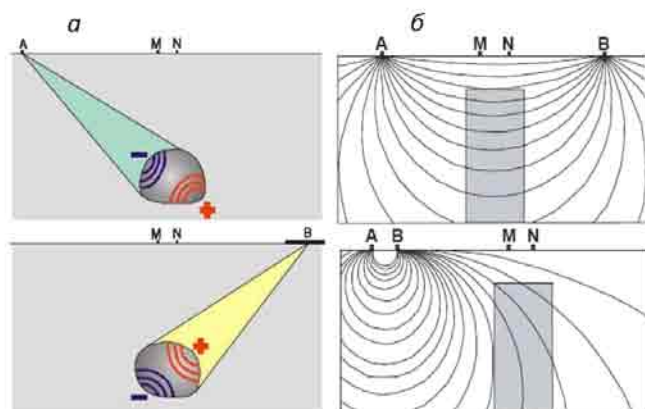


Рис. 175. Схемы формирования вторичных зарядов на границах разделов геологических сред при использовании трехэлектродных установок (а) и распределение токовых линий в массивах горных пород при использовании осевой симметричной и дипольной четырехэлектродных установок (б)

Перечисленные установки в определенном сочетании питающих и приемных линий можно использовать для согласования геофизических полей с геологическими структурами и, следовательно, высвечивать одни объекты и снижать влияние других. Это так называемые методы пространственной физической фильтрации (МПФ), а в электроразведке – методы пространственной электрической фильтрации (МПЭФ). Их применение позволяет значительно снизить уровень качественной неоднозначности.

Примером может служить метод комбинированного электропрофилирования (КЭП), в котором диагностическим признаком

наличия электропроводящих и электронепроводящих объектов является характерное пересечение кривых (рис. 176).

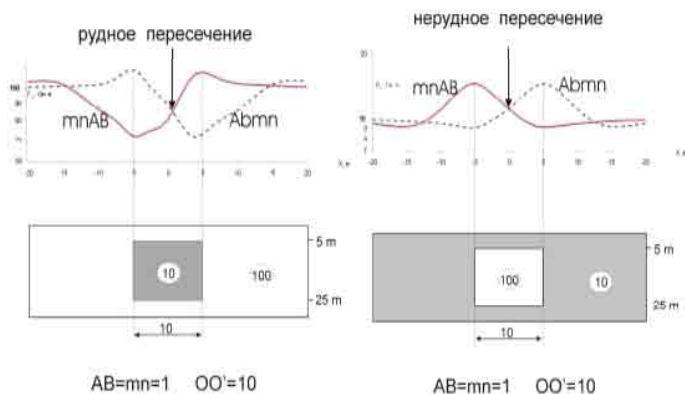


Рис. 176. Форма кривых метода КЭП над моделями объектов различного удельного сопротивления

На рис. 177 показаны схемы установок электроразведочных фильтров направленного приема (ФНП) и возбуждения (ФНВ).

В варианте ФНП установка наиболее чувствительна к приповерхностным неоднородностям и наименее к глубинным, поскольку изменяется удельное электрическое сопротивление измерительной линии ρ_{MN} .

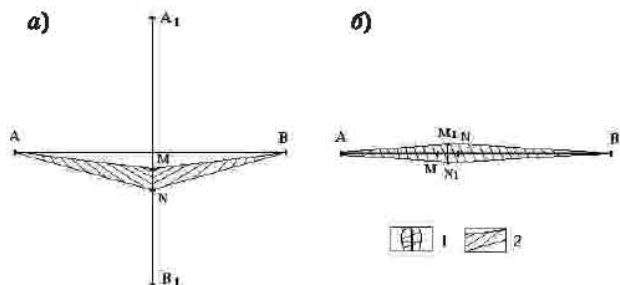


Рис. 177. Схемы объемных электроразведочных фильтров направленного приема (а) и направленного возбуждения (б): AB, MN – питающие и измерительные линии; 1, 2 – секторы сканирования при направленном приеме и возбуждении электрического поля

В варианте ФНВ сопротивление ρ_{MN} остается постоянным при изменении направления первичного поля. В этом случае эффекты перераспределения тока будут отмечаться в области как приповерхностных, так и глубинных неоднородностей, причем в большей мере глубинных.

МПЭФ весьма эффективен в условиях, когда на изучаемом участке заранее неизвестна пространственная ориентация разрывных нарушений или других локальных неоднородностей слоистой толщи. Геологические образования выявляются со стопроцентной вероятностью, так как сектор сканирования ФНВ охватывает 360° . Характерный пример приведен на рис. 178. В этом

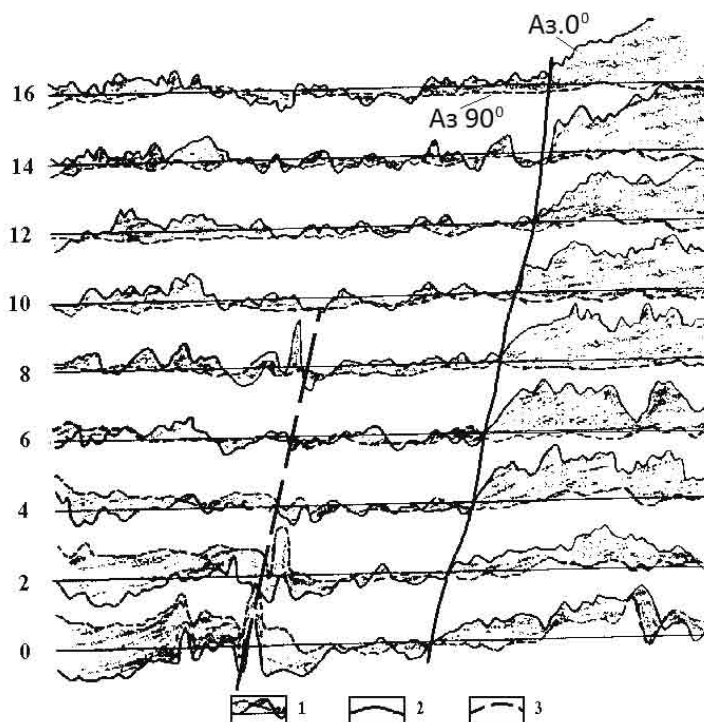


Рис. 178. План графиков МПЭФ на участке развития разрывной тектоники:

1 – кривые ΔU при ориентации питающей линии AB в двух взаимно ортогональных направлениях; 2, 3 – основной и сопутствующий тектонические разрывы

примере несовпадение кривых МПЭФ, зарегистрированных при ориентации питающей линии AB в двух взаимно ортогональных направлениях, является диагностическим признаком наличия неоднородностей. Так, анализ соотношения графиков показывает, что питающая линия, ориентированная по $Az\ 0^\circ$, оказалась направленной почти вкрест простирания тектонического разрывного нарушения, которое отчетливо прослеживается посредством корреляции областей интенсивного рассогласования кривых МПЭФ. Параллельно основному разрыву от профиля 8 к профилю 0 прослеживается менее яркая аномальная зона, связанная с малоамплитудным тектоническим разрывом, по всей вероятности, являющимся ступенью более крупного. Все остальные области рассогласования имеют неустойчивый характер и корреляционно не увязываются. Их следует относить к локальным неоднородностям покровных отложений. Степень их выдержанности более устойчива в направлении простирания разрывных нарушений.

Востребованной при качественной интерпретации геофизических данных технологией, наряду с МПЭФ, является электропотенциальное томографическое зондирование (ЭПТЗ). Используется четырехэлектродная орто-осевая установка, в которой в соответствии с направлением зондирования один из питающих электродов, A или B , является на первоначальном этапе удаленным по отношению к измерительной линии MN , и зондирование по своей физической сущности соответствует таковому с трехэлектродными установками (рис. 179, a).

Центр зондирований относят к ближнему питающему электроду. Размер AB выбирается в пределах 50–300 м. Расстояние между электродами MN составляет от 2 до 10 м. Питающая линия AB закрепляется неподвижно, и зондирование осуществляется путем перемещения MN в двух противоположных направлениях от A и от B вдоль или ортогонально, с арифметическим шагом, равным размеру MN . Это позволяет проектировать точки зондирования (переносить питающую линию AB) по профилю с таким расчетом, чтобы достигалось перекрытие интервалов AO или BO предыдущего зондирования не менее чем на $2/3$ с требованием перемещения электродов MN по тем же точкам. Следовательно, достигается принцип объемного сканирования, сочетающего элементы профилирования и зондирования с вариативно-

стью устройства электродов, необходимого при работе на пересеченной местности. Интерпретация данных ЭПТЗ осуществляется в рамках 1D- и 2D-моделей. Объемное истолкование результатов ЭПТЗ первоначально сводится к детальному анализу локальных одиночных аномалий, если они подтверждаются сопоставлением кривых ЭПТЗ, построенных в полулогарифмическом масштабе, т. е. в форме электропрофилирования. Достаточно сопоставления двух, максимум трех кривых, полученных технологией ЭПТЗ в соседних точках, поскольку арифметический шаг зондирования предопределяет идентичность повторных измерений на большей части интервала разносов измерительных электродов предшествующего зондирования и позволяет однозначно фиксировать и диагностировать те или иные неоднородности (рис. 179, б).



Рис. 179. Схемы полевых измерений ортосековыми установками ЭПТЗ (а), форма этих кривых, сопоставленных по соседним точкам в полулогарифмическом масштабе на предмет выявления и изучения неоднородностей (б)

Количественная неоднозначность – это неопределенность в получении количественных показателей (физических и геометрических) объекта геофизических исследований. Количественная неоднозначность, как правило, проявляется одновременно с качественной. В большинстве случаев количественная неоднозначность возникает ввиду эквивалентности графиков или, что то же самое, кривых геофизических параметров. Поэтому различают теоретическую и практическую эквивалентности.

Теоретическая эквивалентность проявляется в одинаковых по форме, интенсивности и знаку аномалиях над объектами, отли-

чающимися по размерам, глубине залегания и физическим свойствам. Это вытекает, например, из известной формулы гравиразведки, определяющей параметр приращения силы тяжести Δg :

$$\Delta g = 2 \pi f \delta \cdot h, \quad (55)$$

где f – гравитационная постоянная.

Примеры теоретической эквивалентности приведены выше, на рис. 167–169.

Практическая эквивалентность выражается в неустойчивости решения обратных задач геофизики, в частности, по признаку квазисовпадения аномалий (в пределах погрешностей измерений) от неодинаковых по размерам объектов. Классические примеры – кривые вторых производных гравитационного потенциала W_{Δ} от треугольных призм различной плотности и формы при одинаковой глубине залегания и бесконечном простирании (рис. 180, а) или графики суммарного вектора магнитного поля T от шаровых объектов различных радиусов (рис. 180, б).

В электроразведке практическая эквивалентность проявляется наиболее наглядно, особенно в методе ВЭЗ. Здесь она определяется реальной погрешностью полевых измерений ρ_k (около $\pm 5\%$) и погрешностями при сравнении полевых кривых ВЭЗ с теоретическими. Как показывает опыт, по кривым вертикального элек-

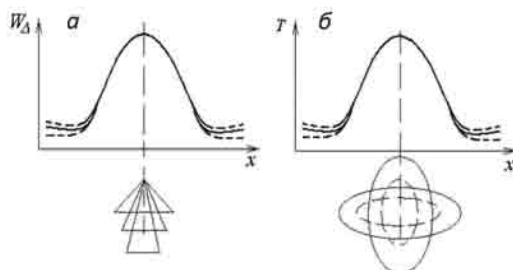


Рис. 180. Примеры практической эквивалентности по признаку квазисовпадения аномалий:

а – кривые вторых производных гравитационного поля над моделью бесконечных по простиранию треугольных призм разной плотности; б – кривые суммарного вектора магнитного поля от шаровых объектов различных радиусов

трического зондирования обычно можно найти лишь отношение мощности i -го слоя (h_i), входящего в геоэлектрический разрез, к его сопротивлению ρ_i (продольная проводимость $S_i = h_i/\rho_i$), либо их произведение (поперечное сопротивление $T_i = h_i \rho_i$), а не сами величины h_i и ρ_i раздельно. Таким образом, для изменяющихся в некоторых пределах значений h_i и ρ_i кривые ВЭЗ

практически неразличимы, если (в зависимости от типа кривой) соблюдается одно из условий: $S_i = \text{const}$ или $T_i = \text{const}$.

Возможности достижения однозначного решения обратной задачи в методах электроразведки переменным током значительно выше, чем у метода сопротивления вообще и у ВЭЗ в частности. Действительно, помимо изменения геометрической конфигурации поля (взаимного расположения заземлений и расстояний между ними), производимого при ВЭЗ, в методах переменного тока имеется возможность варьировать частотой поля и наряду с измерением интенсивности (или потенциала в постоянном поле) исследовать фазовые сдвиги, измерять не только электрическую, но и магнитную составляющую, импеданс поля и т. д. Если, например, проводить зондирование на разных частотах и расстояниях между питающими заземлениями, то можно получить сколь угодно много уравнений, а с их помощью найти раздельно любое число неизвестных параметров – мощностей и сопротивлений всех горизонтов, входящих в исследуемый геоэлектрический разрез. Но это пока лишь теоретическое предположение, а реальная обстановка оказывается существенно иной.

В сейсморазведке практическая эквивалентность проявляется в значительно меньшей степени, нежели в грави-, магнито- и электроразведке. Этот метод, как известно, характеризуется многообразием источников полезной информации: амплитуды и времена прихода, фазы продольных и поперечных волн, которые могут быть измерены в любом пункте как земной поверхности, так и под землей, для любого положения взрыв-пункта, на разных частотах и в различные моменты времени после взрыва. Благодаря этому достигается принципиальная возможность получения *однозначного решения*. Однако практически реализовать ее можно лишь с помощью некоторых упрощающих предположений: отражающие границы, как правило, принимаются за плоские, скорость – за постоянную (в пределах одного горизонта) и др. Обычно эти условия в той или иной степени соблюдаются и данные сейсморазведки о глубинах залегания и мощности слоев служат опорными для других геофизических методов. Тем не менее надо иметь в виду, что и этому методу свойственна практическая эквивалентность, с которой связаны погрешности построения отражающих и преломляющих границ. Эти погрешности обусловлены *неточностью определения скоро-*

стей распространения упругих волн в исследуемом районе. Существенное влияние оказывают различные геологические, технические и прочие помехи. Введение поправок за зону малых скоростей, за момент взрыва, за рельеф приводит к дополнительным погрешностям и т. д. Возможности сейсморазведки могут быть ограничены погрешностью определения эффективных скоростей V . Если, например, относительную погрешность определения скорости обозначить $\Delta V/V$, а глубины залегания интересующего горизонта — $\Delta H/H$, то можно записать:

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta V}{V + \Delta V} \approx \frac{\Delta V}{V}. \quad (56)$$

Таким образом, даже в благоприятных условиях при относительно малой погрешности оценки скорости ($\Delta V/V \approx 1\%$ и $H=3000$ м) $\Delta H=30$ м. Следовательно, структуры или неровности рельефа меньшей амплитуды не могут быть обнаружены.

Необходимо подчеркнуть, что качественная и количественная неоднозначности при решении обратных задач геофизики проявляются обычно одновременно, и другого способа, кроме комплексирования геофизических методов, для сужения пределов неоднозначности пока не создано. Примеры сужения неоднозначности можно взять из электроразведки, характеризующейся большим набором способов и технологий.

В частности, рассмотрим пример определения антиклинальной структуры посредством симметричного электропрофилирования установкой с двойными разностями (рис. 181).

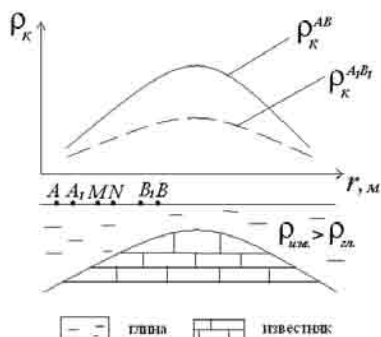


Рис. 181. Пример определения антиклинальной структуры посредством симметричного электропрофилирования установкой с двойными разностями

В электроразведке переменным током разная глубинность достигается наблюдениями на разных частотах: чем выше частота, тем меньше глубинность исследований (*скин-эффект*). Преимущества электроразведки переменным током на высоких частотах и в том, что в высокочастотных полях породы различаются

не только по электропроводности, но и по диэлектрической проницаемости.

В электроразведочном методе ЕП ложные аномалии фильтрационного происхождения выделяются по признаку их изменчивости во времени. Разновременные съемки дают в этих случаях графики потенциала, сходные по характеру, но различающиеся по абсолютным значениям. Последнее объясняется тем, что интенсивность фильтрации подземных вод зависит от времени года, в частности от количества выпадающих осадков. Другим отличием этих графиков является их обратная связь с рельефом: график потенциала U представляет собой как бы зеркальное отображение рельефа земной поверхности вдоль профиля наблюдений.

Следует отметить, что, несмотря на эффективность в ряде случаев внутриметодного комплексирования, для более полного решения обратных задач, как показывает опыт, необходимо использовать несколько геофизических, геологических, геохимических методов и бурение. При классификации аномалий большую роль могут сыграть такие новые методы, как пьезоэлектрический (на кварцосодержащих объектах), контактный метод поляризационных кривых и частичного извлечения металлов (на рудах) и др. Весьма перспективно также совместное применение методов, схожих по подходу к решению тех или иных задач. Например, радиоволновое и сейсмическое просвечивание, электроразведочный способ заряда и его сейсморазведочный аналог и т. д.

Иногда полагают, что применительно к конкретным геологическим задачам достаточно использовать какой-то один метод, и, следовательно, необходимость комплексирования как бы отпадает. Например, универсальным и единственно применимым методом для поисков месторождений нефти и газа считают сейсморазведку. Выше уже было показано, что это далеко не так. В частности, прямые поиски таких месторождений, а также выявление малоамплитудных поднятий и стратиграфических ловушек возможно лишь на основе широкого комплексирования всех средств геологической разведки, в том числе геофизических методов. Надо учитывать и экономические соображения: по крайней мере, на первых этапах проведение сейсморазведки на всей площади исследований нецелесообразно, а иногда и просто невозможно. Совершенно необходимым оказывается предварительное

изучение обширных территорий для выделения наиболее перспективных участков. С этой целью как раз и следует применять более дешевые и мобильные методы: магниторазведку, гравиразведку, электроразведку.

До недавнего времени основным методом поисков железорудных месторождений считалась магниторазведка. В действительности оказалось, что электроразведка с большей точностью, чем магниторазведка, позволяет определить мощность рыхлых отложений и глубину залегания объекта, а гравиразведка – размеры, форму, элементы залегания рудных тел. Высокая точность интерпретации данных гравиразведки определяется тем, что эффективная плотность руд является более устойчивым параметром, чем их магнитные свойства. Из-за резкой изменчивости последних (даже в пределах одного и того же месторождения) количественные расчеты по данным магниторазведки обычно весьма затруднены. К тому же далеко не всегда железные руды сильномагнитны. На месторождениях осадочного, инфильтрационного происхождения, а также в случае коренных руд существенно гематитового состава роль магниторазведки довольно скромна и, наоборот, резко возрастает поисковое значение электроразведки и гравиразведки. Необходимо учитывать все еще недостаточно используемые большие возможности радиометрии при геологическом картировании. Так, естественная радиоактивность закономерно возрастает при переходе от ультраосновных пород к кислым; среди осадочных пород наиболее активны глины и сланцы, а в наименьшей степени – известняки. Спектральная гамма-съемка позволяет определять весьма информативные отношения содержания радиоактивных элементов: радия, тория, калия и др. Уже установлена перспективность гамма-метода при поисках бокситов и некоторых других видов минерального сырья. Хорошо известно, что нередко ослабленные тектонические зоны, обладающие повышенной эманулирующей способностью, одновременно являются как бы естественными каналами, по которым газообразные продукты распада глубинных пород поднимаются к земной поверхности. Это служит основанием для применения эманационной съемки, возможности которой представляются весьма широкими, вплоть до картирования новейших тектонических движений, предсказания землетрясений и т. д. Что касается ядер-

ной геофизики, то она может найти применение не только при каротаже и экспресс-анализе, но и при самих поисках.

На сужение пределов количественной неоднозначности направлены исследования по изучению связей между аномальными полями разных методов и пересчету одного поля в другое. Несмотря на то что формально существуют математические зависимости для значительного числа различных полей между собой, практическое использование этих зависимостей осложнено двумя основными причинами: 1) коэффициенты для пересчета одного поля в другое не имеют, как правило, четкого физического смысла, и, следовательно, их оценка для реальных геологических тел невозможна; 2) неоднородность горных пород в отношении разных физических свойств и процессов различна; например, выщелачивание вызывает уменьшение плотности пород на 10–20 %, а магнитной восприимчивости и остаточной намагниченности (за счет перехода магнитных минералов в немагнитные разности) – в десятки и сотни раз. Достоверно оценить степень этих изменений обычно невозможно, что приводит к ложному истолкованию результатов теоретического пересчета полей. В настоящее время практическое применение имеет лишь пересчет магнитного поля в псевдогравитационное для сильномагнитных железных руд при условии, что абсолютная величина интенсивности намагничения I пропорциональна плотности пород δ_H : $|I| = f \cdot \delta_H$ (f – гравитационная постоянная).

Вопросы и задания для контроля самостоятельной работы

1. Раскройте понятие неоднозначности решения обратных задач в геофизике.
2. Каковы причины возникновения неоднозначного решения обратной задачи при интерпретации геофизических данных?
3. Что подразумевает качественная неоднозначность при решении обратных задач в геофизике?
4. Что понимается под количественной неоднозначностью при решении обратных задач в геофизике?
5. Приведите примеры возможных неоднозначных решений обратных задач в геофизике.
6. Раскройте сущность теоретической эквивалентности при решении обратных задач в геофизике.

7. В чем сущность практической эквивалентности при решении обратных задач в геофизике?

8. Опишите примеры сужения неоднозначности при решении обратных задач в методах электропрофилирования.

9. Приведите примеры сужения неоднозначности при решении обратных задач методом пространственной электрической фильтрации.

10. Назовите примеры сужения неоднозначности при решении обратных задач при скважинных наблюдениях.

2.4. Комплексный анализ и комплексная интерпретация результатов инженерно-геофизических исследований при решении практических задач

Под комплексным анализом понимается разделение комплекса различных признаков для решения задач геокартирования и районирования исследуемой площади (или разреза) на несколько классов.

Комплексная интерпретация состоит в построении согласованной по всем полям комплексной физико-геологической модели.

Комплексный анализ, как правило, обеспечивает качественную интерпретацию по оценке природы источников, а комплексная интерпретация – количественную оценку физических и геометрических параметров этих источников. Грани между анализом и интерпретацией часто стираются.

При комплексном анализе первоначально ставятся геологические задачи и производится выбор моделей комплексной интерпретации, оценивается информативность геофизических методов и их комплекса, выполняются комплексный анализ для случаев наличия или отсутствия эталонных объектов и комплексная количественная интерпретация, оцениваются возможности построения согласованных комплексных физико-геологических моделей и в завершение выполняется геологическая интерпретация геофизических данных.

Можно установить общие закономерности геологического толкования геофизических аномалий. Так, оценка **морфологии объектов** производится по форме и простиранию магнитных, гравитационных и других геофизических аномалий: простирания гравимагнитных аномалий характеризуют простирание складчатых зон, тектонических нарушений и линейных блоков; изометрические в плане аномалии отображают массивы магматических пород, кольцевые структуры, отдельные рудные тела и т. д.; аномалии полигональной формы отображают блоковые структуры, единая цепочка аномалий – разлом; чередование линейно вытянутых полос максимумов и минимумов характеризует складчатую систему.

Строение горизонтально-слоистых сред (объектов) определяется сейсмическими и электроразведочными (различные виды зондирований) методами. При этом среды с углами наклона $25-30^\circ$ и более рассматриваются как вертикально-слоистые, и для их изучения применяют электроразведочные методы профилирования и магниторазведку; опорные сейсмические и электрические границы раздела характеризуют поверхности напластования, размылов и несогласий, опорные границы – начало или конец какой-либо тектонической стадии района; изометричность региональных аномалий свидетельствует либо о дугообразном расположении структурных элементов (примерно вдоль изоаномал), либо о секущем радиальном положении структур по отношению к контурам аномалий (почти перпендикулярно к изоаномалам). Эти же выводы относятся к периклиналям линейных аномальных зон, т. е. к местам резкого изгиба изоаномал.

Структурные перестройки в глубокозалегающих комплексах пород выявляются по признакам несовпадения местоположения и простирания аномалий в результатах различных методов; структурные планы толщ, к которым приурочены сейсмические и электрические горизонты, оцениваются по их поведению непосредственно, а структуры пород, залегающих глубже, – по гравитационным и магнитным аномалиям. Степень унаследованности тектонических структур выявляется посредством коррелируемости геофизических аномалий.

Оценка мощности и глубины залегания объектов производится по интенсивности магнитных и гравитационных аномалий и наиболее точно по материалам сейсморазведки, которые являются опорными данными для других методов, а данные электроразведки (ВЭЗ, ДЭЗ) позволяют оценивать глубину залегания опорных горизонтов благодаря действию принципа эквивалентности в широком диапазоне значений, сужающемся в благоприятных геологических условиях.

Оценка вещественного состава пород фундамента и надфундаментного разреза возможна, как правило, при использовании пластовых и граничных скоростей, электрического сопротивления, избыточной плотности и магнитных свойств. По геофизическим данным обычно удается расчленить породы на типы (магматические, метаморфические, хемогенные, осадочные) и выяснить состав магматических комплексов и разрезов осадочных пород.

Оценка возраста объектов производится по характеру взаимного положения сейсмических и электрических горизонтов при неопрокинутом их залегании как функция глубины этих горизонтов; относительная оценка возраста источников гравитационных и магнитных аномалий возможна в следующих случаях: а) когда из двух пересекающихся систем аномалий моложе та, которая прослеживается непрерывно; б) линейные аномалии, окаймляющие область мозаичных, а также область изометрических аномалий или рассекающие эту область, более молодые; в) по палеомагнитным данным при сопоставлении с уверенно датировемыми объектами, отличающимися специфическим характером полей; г) по изменению угла наклона вектора намагничения; д) при использовании гипотезы Г. И. Каратаева о соответствии относительного уменьшения значений региональных аномалий силы тяжести и магнитных аномалий более молодым структурам и относительного увеличения интенсивности аномалий при переходе от молодых структур к более древним.

Указанные выше положения не конкретизируют природу той или иной аномалии. Для геологической интерпретации аномалий в пространстве и во времени необходимо: 1) изучение физических свойств пород; 2) сопоставление с аномалиями, установленными другими методами; 3) использование различных способов распознавания образов и количественных методов интерпретации, углубленное изучение геологического строения близлежащих районов. Именно такой комплексный подход к геологическому истолкованию геофизических данных обеспечивает успешное решение задачи. Ниже приведены некоторые примеры.

На угольных месторождениях постановка задачи по анализу состояния методов наземной геофизики при проведении геологоразведочных работ предусматривает функцию группирования этих методов по характеру и целевому назначению исследований с дальнейшим выбором типовых и рациональных комплексов. При этом геофизические методы в составе этих комплексов увязываются в определенную иерархию, учитывающую уровень разработок и круг поставленных и решаемых задач. К последним относятся:

- определение мощности покровных отложений;

– выявление и прослеживание угольных пластов и контактов отдельных литологических разностей пород при полого- и крутонаклонном залегании угленосных отложений;

– обнаружение и картирование магматических интрузий, а также других геологических тел и тектонических структур на закрытых участках и на глубине;

– выявление линз и массивов мерзлых пород, таликов, крупных залежей подземных льдов в криолитозоне.

Усредненные физические свойства углей, вмещающих их пород, формационных и геоструктурных комплексов приведены для обобщенных физико-геологических моделей двух типов – складчатого и платформенного (рис. 182).

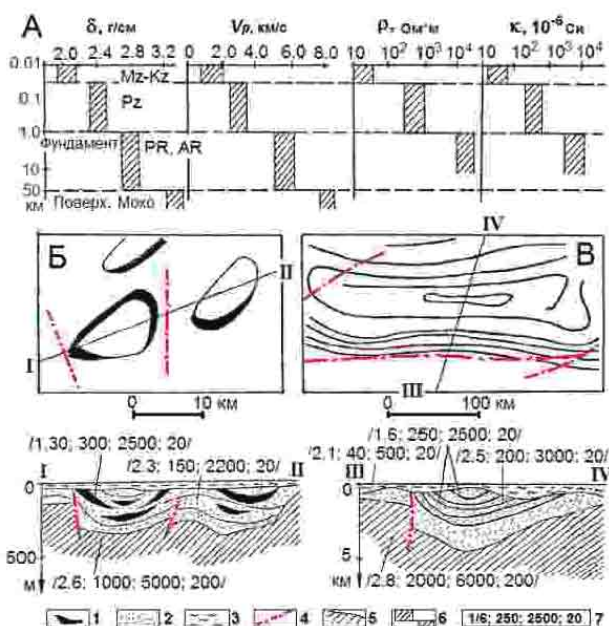


Рис. 182. Обобщенные физико-геологические модели земной коры (А) и месторождений платформенного (Б) и складчатого (В) типов:

1 – угольные пласты; 2, 3 – покровные и углевмещающие породы;

4 – разрывные нарушения; 5 – породы основания; 6 – гистограммы

физических показателей; 7 – числовые значения плотности (г/см³), удельного электрического сопротивления (Ом·м), скорости продольных сейсмических волн (м/с), магнитной восприимчивости (10^{-6} ед. СИ)

В приведенных моделях отражены основные границы раздела земной коры между слоем Мохоровичича, фундаментом, угленосными и покровными отложениями. Перепады плотности на каждой из границ составляют 300–500 кг/м³, скорости продольных волн – 2000–3000 м/с. Средние значения магнитной восприимчивости и удельного электрического сопротивления возрастают при переходе к каждой последующей границе примерно на порядок. С учетом приведенных показателей физических свойств и в зависимости от поставленных геологических задач выбирается типовой комплекс методов наземной (полевой) геофизики из числа электромагнитных, сейсмических, грави-, магнито-, радиометрических, атмогеохимических и др. Выбор этого комплекса осуществляется в соответствии с нормативными документами на основании анализа материалов опережающих геофизических работ (сведения о точности исследований, данные о физических свойствах пород, схемы качественной интерпретации геофизических полей, результаты количественной интерпретации наиболее интересных аномалий аэромагнитной, аэрогамма-спектрометрической и гравиметрической съемок масштаба 1:200 000, 1:50 000 или 1:25 000, различные виды сейсморазведки и электроразведки, выполненные на опорных профилях или в площадном варианте и т. п.). Области и условия применения методов наземной геофизики неодинаковы на угольных месторождениях, отличающихся по структурно-тектоническим признакам, стадиям преобразования и другим геолого-геофизическим показателям. Поэтому поставленные геологические задачи могут быть решаемы полностью или частично.

Пример группирования дистанционных и наземных геофизических методов на угольных месторождениях с учетом характера работ, целевого назначения и видов исследований приведен в табл. 3. Это служит структурно-геологической основой выбора и применения методов дистанционных и наземных геофизических исследований для площадных съемок с опорными профилями. Априори предполагается, что скважины, пробуренные на этих профилях, изучаются полным комплексом геофизических исследований скважин (ГИС), а выход керна по угольным пластам составляет не ниже 90 %.

Таблица 3

Группирование дистанционных и наземных геофизических методов на угольных месторождениях

Наименование групп методов	Характер работ, целевое назначение и виды исследований
Дистанционные исследования	Дистанционное (космическое) зондирование Земли, аэросъемки (магнито-, грави-, радиометрическая, электромагнитная и геодезическая) с целью оконтуривания площадей с предполагаемой промышленной угленосностью
Наземные съемки	Наземные геофизические исследования методами электро-, грави-, магнито-, сейсморазведки и эманационной съемки, проводимые комплексно, с преимущественным использованием методов, обладающих наибольшей разрешающей способностью для решения задач: – установления мощности покровных отложений, картирования рельефа и структурных особенностей залегания угленосной толщи (электронзондирование, сейсморазведка методом преломленных и отраженных поперечных <i>SH</i>-волн по методике общей глубинной точки); – картирования и прослеживания угольных пластов и маркирующих горизонтов при крутом и наклонном их залегании под покровными отложениями толщиной до 50 м (электропрофилирование, селективная грави-, магниторазведка и атомгеохимическая съемка); – прогнозирования и оконтуривания площадей с угленасыщенностью более 10 %, а также выявления и прослеживания структурных форм и разрывных нарушений (грави-, электро- и сейсморазведка методом отраженных волн); – выявления и оконтуривания тел изверженных пород, выгоревших углей и оплавленных литологических разностей (электро- и магниторазведка); – выявления и прослеживания выходящих на поверхность тектонических разрывных нарушений (электропрофилирование, гравиразведка, сейсморазведка методом преломленных волн, эманационная съемка).

Сводные данные о типовых комплексах геолого-геофизических методов для угольных месторождений платформенного и складчатого типов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Типовые комплексы геолого-геофизических методов на угольных месторождениях

1-й этап – создание структурно-геологической основы 1. Космофотоструктурное картирование (КФСК) масштаба 1:100 000, аэрофотоструктурное картирование (АФСК) масштаба 1:50 000 (в открытых районах) 2. Аэрогеофизический комплекс масштаба 1:50 000–1:25 000 (аэромагнитная съемка с точностью $\pm 0,1$–1 нТл, аэроэлектроразведка) 3. Геологическое картирование, горные работы (в открытых районах) 4. Гравиразведка (съемки по сети 500×500 м или 1000×250 м в зависимости от геолого-структурных особенностей с точностью $\pm 0,1$ мГал)
2-й этап – опорные пересечения 1. Сейсморазведка КМПВ – 2–3 опорных профиля с комплексом магнито-, грави-, электроразведочных работ, шаг 50–100 м 2. Сейсморазведочные профили МОВ-ОГТ в среднем через 5 км с комплексом магниторазведочных работ (шаг 50 м) 3. Бурение 2–3 параметрических скважин на опорных геолого-геофизических профилях
3-й этап – оценочные работы 1. Профильные и площадные геофизические работы методами электро-, грави-, магнито-, сейсморазведки и эманиционной и атмогеохимической съемок, проводимые комплексно, с преимущественным использованием методов, обладающих наибольшей разрешающей способностью на участках сложного геологического строения (наличие интрузий, тектонических нарушений, изменение мощности покровных отложений и др.) 2. Бурение на исследуемой площади 2–5 скважин на 100 км² с учетом дистанционных и геофизических данных 3. Керновое опробование углей и вмещающих пород, каротаж в разведочных и параметрических скважинах

Построение рациональных комплексов основывается на интерактивном выборе методов и видов работ с использованием полного перечня физико-геологических факторов. При этом выбирается начальный типовой комплекс методов, который для каж-

дой площади доводится до уровня рационального. Это достигается путем использования новых, более прогрессивных методов, а также оптимизации объемов работ, с учетом таких характеристик, как петрофизические особенности углей и угленосных пород, количество, мощность, изменчивость угольных пластов в разрезе, характеристики ландшафтов, тип, характер и уровень помех и др. (табл. 5).

Таблица 5

Факторы, влияющие на выбор рациональных комплексов и видов исследований на угольных месторождениях

№ п/п	Фактор
1	Структурно-генетический тип месторождения (платформенный, складчатый)
2	Глубина фундамента (сейсморазведка)
3	Глубина разведки нижнего угольного пласта (бурение)
4	Мощность и выдержанность отложений покровного чехла (сейсморазведка МПВ, бурение)
5	Площадь участка с мощностью покровных отложений до 2 м (геологическая съемка, горные работы)
6	Площадь участка с мощностью покровных отложений < 10 м (дешифрирование аэро- и космоснимков)
7	Площадь участка с мощностью покровных отложений > 40 м (электропрофилирование, сейсморазведка методом отраженных поперечных SH-волн по методике общей глубинной точки)
8	Углы падения пород, их выдержанность по площади (оптимальный комплекс наземных геофизических методов, бурение)
9	Сложность тектонического строения (оптимальный комплекс наземных геофизических методов, бурение)
10	Ожидаемое количество угольных пластов (при наклонном залегании – оптимальный комплекс наземных геофизических методов, при горизонтальном залегании – поисковый комплекс ГИС, бурение)
11	Мощность рабочих угольных пластов (бурение, поисковый и детализационный комплексы ГИС)
12	Марка углей (опробование, лабораторные работы)
13	Строение угольных пластов (детализационный комплекс ГИС)
14	Процентный состав основных литотипов угленосных пород (поисковый комплекс ГИС, бурение)

С целью оптимизации методов и объемов работ применяются специальные методики. Например, при выборе характеристик электропрофилирования для картирования выходов угленосных пород и углей под наносы целесообразно использовать сведения о мощности, изменчивости покровных отложений, углах падения пород, тектонической сложности (п. 4, 8, 9 в табл. 5).

Интерпретация результатов наземных геофизических исследований представляет собой многоуровневый процесс, состоящий из предварительной обработки полевых наблюдений, последующих графических построений, анализа аномальных значений с вариантами до- и переинтерпретации и конечным представлением материалов в формах геолого-геофизических разрезов, планов графиков и карт в заданных масштабах. При этом предпочтительно использовать специальные компьютерные программы, позволяющие на начальных этапах выполнять разбраковку и сортировку полевых наблюдений, оценивать их информативность путем сравнения с контрольными измерениями и далее выполнять требуемые построения посредством решения обратных геофизических задач в 1D-, 2D- и 3D-инверсиях. Достоверность построений оценивается по соответствию геолого-геофизических построений действительным параметрам, полученным посредством контрольного бурения или методом аналогии. Конечная продукция представляется в виде качественной и количественной информации, содержащейся в отчетах, методических рекомендациях и других документах.

Пример решения задачи по оконтуриванию площадей с предполагаемой промышленной угленосностью методами грави-, магнито- и сейсморазведки приведен на рис. 183. Здесь угленосная толща, приуроченная к Белгородской депрессии Павлодар-Семипалатинского Прииртышья, проявляется знаковой гравитационной аномалией пониженных значений силы тяжести. Эта аномалия хорошо коррелируется с аномалией значений суммарного вектора магнитного поля, являющейся типовой для осадочных толщ.

На рис. 184 показан пример прослеживания выходов антрацитовых угольных пластов по результатам электропрофилирования методом постоянного естественного электрического поля (ЕП) совместно с газовой съемкой. Измерения выполнены на опорном

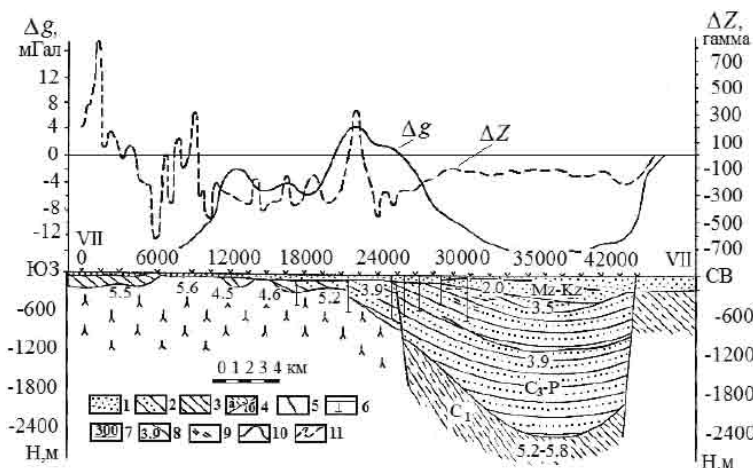


Рис. 183. Геолого-геофизический разрез Белгородской депрессии Павлодар-Семипалатинского Прииртышья:

1, 2, 3, 4 – осадочные образования мезо-кайнозойского (Mz – Kz), пермокарбонного (C_2 –P), карбонного C_{2-3} и C_1 возраста; 5 – тектонические нарушения; 6 – буровые скважины; 7 – сейсмические пикеты; 8 – преломляющие границы и значения граничных скоростей в км/с; 9 – отражающие площадки; 10 – график значений Δg ; 11 – график значений геомагнитного поля ΔZ

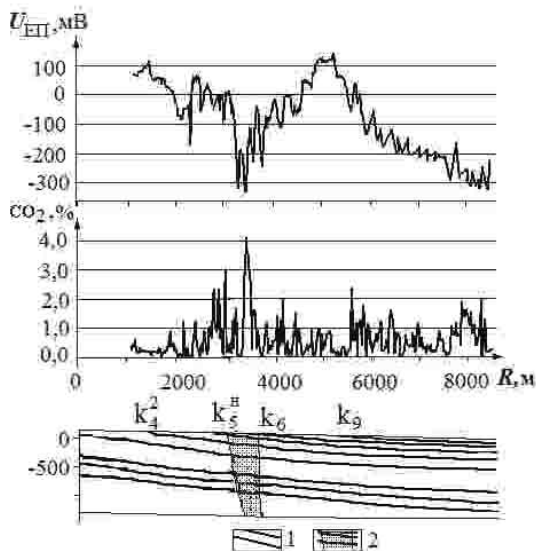


Рис. 184. Сопоставление графиков электропрофилеирования методом ЕП и газовой съемки в условиях полого-наклонного залегания электропроводящих пластов антрацита в Шахтинско-Несветаевском угленосном районе Восточного Донбасса:

1, 2 – угольные пласты и область их выхода под наносы

профиле, ориентированном вкост Шахтинской синклинали в Восточном Донбассе. Группа пологозалегающих и выходящих под наносы электропроводящих пластов антрацита достаточно четко выделяется отрицательной аномалией значений потенциалов естественного электрического поля. По результатам газовой съемки в этой же области отмечаются повышенные концентрации содержания в почвенном слое углекислого газа CO_2 .

Следующий пример (рис. 185) иллюстрирует возможности электроразведочных методов дипольного электропрофилирова-

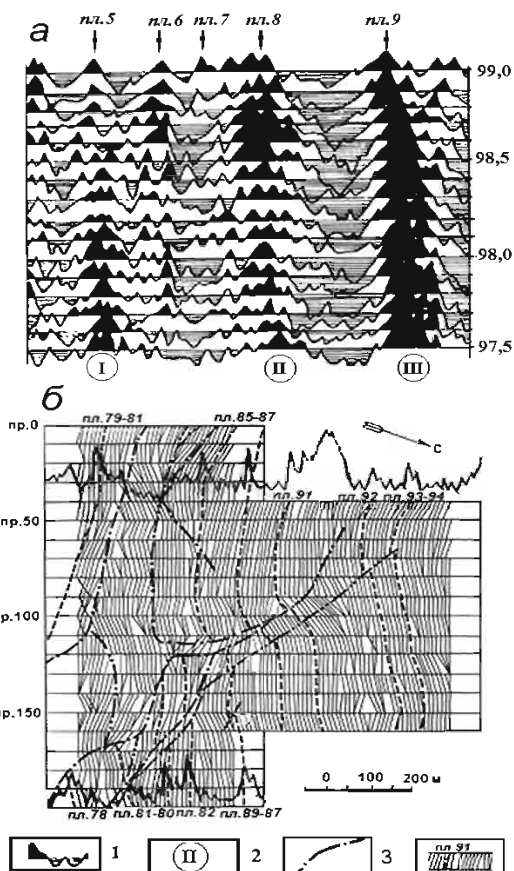


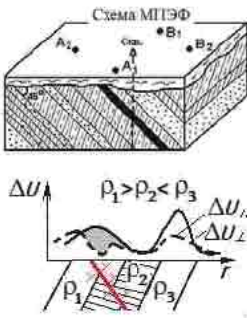
Рис. 185. Примеры выявления и картирования угольных пластов в Кузнецком бассейне по данным дипольного электропрофилирования (а) и тектонических разрывных нарушений с помощью автоматизированной корреляции графиков (б):
1 – графики ρ_z ; 2 – номера коррелируемых областей;
3 – тектонические разрывные нарушения;
4 – угольные пласты и соответствующие им сегменты ориентации корреляционных осей

ния (ДЭП) по изучению изменения толщин и направления простираия угольных пластов и выявлению тектонических разрывных нарушений с использованием технологии автоматизированной корреляции «Кортек» на участках геологоразведочных работ в Кузнецком бассейне.

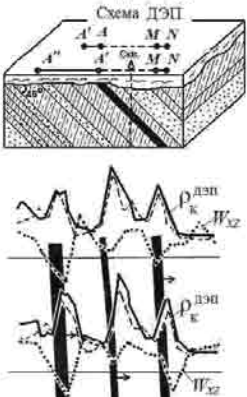
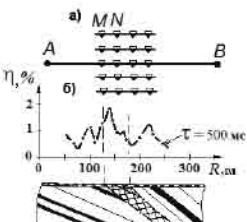
Современные методы и технологии, которые могут использоваться на угольных месторождениях, сведены в табл. 6.

Таблица 6

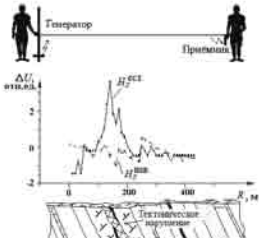
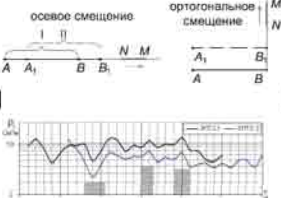
Современные методы наземной геофизики, применяемые на угольных месторождениях

Наименование и сущность метода	Решаемые геологические задачи	Ограничения и помехи
1. Электропрофилирование технологией пространственной электрической фильтрации (МПЭФ) путем измерения составляющих электромагнитного поля в каждой точке профиля при разнонаправленном возбуждении этого поля по отношению к простираию угольных пластов или же тектонических разрывных нарушений 	Выявление и картирование под наносами выходов угольных пластов, тектонических нарушений и магматических интрузий при любых тектонических условиях, включая согласные структуры	Наличие на месторождениях с бурыми и тощими углями пород, сходных с этими углями по электрическим свойствам. Сложный рельеф для устройства питающих линий. Мощность покровных отложений > 50 м

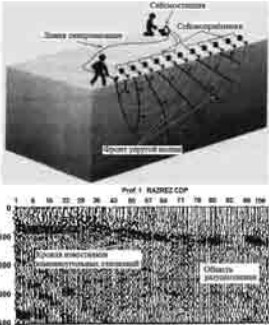
Продолжение табл. 6

Наименование и сущность метода	Решаемые геологические задачи	Ограничения и помехи
2. Дипольное электропрофилирование (ДЭП), выполняемое преимущественно детализационной двухразностной установкой в комплексе с селективной гравиметрической разведкой 	Выявление и картирование под наносами выходов наклонно- и крутопадающих угольных пластов и их «горельников», тектонических нарушений, магматических интрузий и других неоднородностей в покровных отложениях	Наличие на месторождениях с бурыми и тощими углями пород, сходных с этими углями по электрическим свойствам. Согласно залегание разрывных нарушений
3. Метод ВП, в котором могут быть использованы все модификации электропрофилирования и электровзондирования, в частности метод срединного градиента ВП-СГ 	Выявление и картирование под наносами субсогласных тектонических разрывных нарушений и выходов наклонно- и крутопадающих угольных пластов	При наличии на исследуемой территории сложного рельефа использование метода ДЭП-ВП вместо метода СГ-ВП

Продолжение табл. 6

Наименование и сущность метода	Решаемые геологические задачи	Ограничения и помехи
4. Технология ЭМП, в которой эффективным приемом является применение автоматического режима периодического отключения генератора. Это дает возможность на каждой точке профиля измерять два параметра – $H_{\text{ост}}$ и $H_{\text{пов}}$ 	—	Сложный рельеф. Мощность покровных отложений > 50 м
5. Технология электропотенциального томографического зондирования (ЭПТЗ), в которой реализован принцип объемного сканирования, сочетающий элементы зондирования и профилирования 	Изучение угленосных разрезов на глубину более 70–100 м с одновременным выделением приповерхностных и глубинных неоднородностей типа тектонических разрывов	—

Окончание табл. 6

Наименование и сущность метода	Решаемые геологические задачи	Ограничения и помехи
6. Сейсморазведка технологией использования отраженных поперечных <i>SH</i>-волн по методике общей глубинной точки (ОГТ) с <i>n</i>-кратным перекрытием 	Изучение структуры угленосных разрезов, определение границы коренных пород	Ограниченные возможности выделения в угленосной толще отдельных угольных пластов

В современных экономических условиях при проведении геологоразведочных работ на уголь геофизические методы являются одними из основных, используемых на всех стадиях. Новые подходы к использованию геофизических методов определяются, с одной стороны, коммерческой целесообразностью поисков, разведки и последующей эксплуатации угольных месторождений на известных и вновь вовлекаемых в разведку площадях, когда применение этих методов, как опережающих бурение или проводимых одновременно с ним, дает дополнительный информационный материал, а с другой – появившимися на рынке научно-технической продукции высокоразрешающими геофизическими технологиями дистанционных (аэро-), наземных (в первую очередь электро- и сейсморазведочных) и скважинных исследований, а также постановкой ранее не стоявших задач, относящихся, в частности, к геоэкологическим и экогеофизическим мониторинговым наблюдениям.

Цели геофизических исследований и постановка геологических и геоэкологических задач определяются в соответствии с этапами работ. Основными критериями здесь являются информативность и затраты, свободные от монополизма и администрирования.

Научно обоснованное применение геофизических методов на угольных месторождениях (дистанционных, наземных и скважинных) базируется на их группировании с учетом характера работ, целевого назначения и видов исследований. Это служит структурно-геологической основой их использования для формирования типового комплекса геофизических исследований, начальный из которых доводится до уровня рационального путем использования новых, более прогрессивных методов, а также для оптимизации объемов работ, с учетом первоначально имеющихся геолого-геофизических характеристик.

Интерпретация результатов наземных геофизических исследований представляет собой многоуровневый процесс с использованием специальных компьютерных программ. Достоверность геофизических данных оценивается их соответствием результатам контрольного бурения.

Наиболее востребованными геофизическими методами при проведении геологоразведочных работ на угольных месторождениях являются технологии электропотенциального томографического зондирования, пространственной электрической фильтрации и сейсморазведки с использованием отраженных поперечных *SH*-волн по методике общей глубинной точки.

Комплексные геофизические исследования для обследования насыпей железных дорог (ж. д.) эффективно применяются в нашей стране с конца 50-х – начала 60-х гг. прошедшего столетия. За это время опубликовано несколько сотен научных статей, составлены десятки методических рекомендаций, что свидетельствует об актуальности и перманентной значимости постановки и решения инженерно-геологических и геотехнических задач на ж. д. Эти задачи и применяемые методы геофизических исследований весьма подробно изложены в нормативных документах. В настоящее время методологические основы решения проблемы существенно не изменились, но претерпело перевооружение техническое и методическое обеспечение геофизических методов. Разработаны и созданы новые прогрессивные технологии

применения георадиолокации, электропотенциальной томографии, сейсморазведки. Основная проблема состоит в определении положения и мест деформаций железнодорожной насыпи. Причинами образования последних могут быть процессы, происходящие как в теле насыпи, так и в коренных отложениях. К ним прежде всего можно отнести карстово-суффозионные, эрозионные и оползневые процессы, в особенности если насыпь проходит по участкам склонов. Образование в теле насыпи балластных корыт, водяных мешков и других неоднородных зон в ряде случаев может приводить к усилению динамического воздействия на грунты насыпи и ее основания, тем самым увеличивая деформации в насыпи и скорость протекания суффозионных и склоновых процессов.

Целевым назначением комплексных геофизических работ являлась оценка однородности литологического состава железнодорожной насыпи и степени ее обводненности в интервале наблюдаемых просадок грунта под рельсово-шпальной решеткой на участке Горьковской ж. д. Геофизические работы на объекте выполнялись в составе инженерно-геологических изысканий технологиями: 1) вертикального электрического зондирования (ВЭЗ); 2) электропотенциального томографического зондирования (ЭПТЗ); 3) электропрофилирования способами срединного градиента (СГ) и постоянного естественного электрического поля (ЕП); 4) георадиолокационного зондирования (РЛЗ); 5) сейсмической разведки (МПВ).

В геологическом строении участка работ до глубины 30,0 м принимают участие отложения четвертичной системы (tQ_{IV} и pdQ_{IV}) и породы пермской системы (P_2t). Отложения P_2t имеют повсеместное распространение и представлены дисперсными связными глинистыми, несвязными песчаными и дресвяными отложениями, а также полускальными аргиллитами и известняками. Техногенные отложения слагают ядро насыпи ж. д. из песка различной крупности с прослоями супесей. Балластная призма представлена щебнем, гравийным грунтом и песком различной крупности.

Геофизические исследования выполнены на семи профилях, ориентированных вдоль железнодорожной линии (рис. 186).



Рис. 186. Расположения геофизических профилей на разъезде 408 км – Арзамас I, ПЧ-16 Горьковской ж. д.

Первый профиль проложен ниже основания по обочине грунтовой дороги, второй и седьмой – вдоль подножья насыпи; третий и шестой – по обочинам, а четвертый и пятый – по между-путью. Начало профилей соответствует пикету ПК 1+50, а конец – пикету ПК 4+25. Длины профилей 300–350 м при расстоянии между ними от 10 до 30 м.

Работы технологией ВЭЗ проведены на профилях 2–7, технологией ЭПТЗ на профилях 1–3 и 6, технологией ЕП на профилях 1, 2 и 7, технологией СГ на профилях 1–7, технологией РЛЗ на профилях 3–6. Сейсморазведка МПВ выполнена на профиле 1. Выбор профилей для применения перечисленных методов определялся постановкой инженерно-геологических задач.

Технология ВЭЗ применялась в комплексе с бурением для изучения земляного полотна и его основания до глубин 20–30 м. Точ-

ки ВЭЗ на профилях по левой и правой обочинам располагались с шагом 25 м, а на профилях вдоль оснований и в междупутье – с шагом 50 м. Полуразносы питающей линии ($AB/2$) составляли 0,4; 0,75; 1,5; 2, 3, 4, 6, 9, 11, 15, 20, 25, 30, 40 и 60 м. Длина приемной линии MN при $AB/2$ до 6 м равнялась 0,25 м, а при разносах $AB/2$ более 6 м составляла 0,5 м. Во всех случаях разносы питающих и приемных линий ориентировались вдоль железнодорожного полотна (насыпи).

Технология ЭПТЗ использовалась с целью детализации верхней и средней частей разреза земляного полотна. Методика работ включает многократные измерения параметров электрического поля в одних и тех же точках, при последовательном смещении питающей линии AB . Это дает возможность в процессе интерпретации кривых зондирования выявлять и разделять приповерхностные и глубинные неоднородности. Исследования осуществлялись при длинах питающей линии $AB=50$ м и измерительной линии $MN=5$ м. Линия MN перемещалась с шагом, кратным ее длине, т. е. 5 м.

Технология ЕП применялась с целью выявления зон инфильтрации и разгрузки поверхностных и грунтовых вод. Полевые наблюдения состояли в измерениях потенциала (U_{EP}). Новый методический прием заключался в обертке неполяризующихся электродов мокрыми тряпичными чехлами. Такие электроды перемещались по лункам, одновременно заливаемым водой из пластиковых бутылок. Шаг съемки составлял 5 м.

Электропрофилирование способом СГ выполнялось для оценки степени неоднородности грунтовой толщи железнодорожной насыпи и ее основания. Наблюдения выполнялись отрезками по 100 м при длинах питающей и измерительной линий $AB=300$ м и $MN=10$ м. Шаг перемещения измерительной установки MN по профилю составлял 5 м.

Георадиолокационные наблюдения проводились с целью диагностики верхних слоев земляного полотна. Исследования выполнены вдоль правой и левой обочин и в междупутьях. Применялся аппаратный комплекс «ОКО-2» с антенным блоком частотой 400 МГц путем его непрерывного перемещения по профилям с записью и одновременным представлением информации в форме радарограмм на дисплее ноутбука. Настройки пара-

метров зондирования задавались в соответствии с инструкциями и технической литературой по эксплуатации георадаров.

Технология МПВ применялась с целью выявления структурных особенностей пород основания железнодорожной насыпи. Сейсморазведочные работы удалось выполнить только на профиле 1 (вдоль дороги). Условия производства сейсморазведочных работ на других профилях были неустойчивыми (шумы, создаваемые «звоном рельс», транспортом на дороге, порывами ветра и др.). Работы выполнялись по методике продольного непрерывного профилирования по схеме Z-Z (регистрация продольных волн).

Обработка и интерпретация результатов геофизических исследований производились с использованием стандартных и специальных компьютерных программ. Выполнялась систематизация полевых данных по каждому отдельному методу с последующей многоуровневой интерпретацией, включающей привлечение всей имеющейся геолого-геофизической информации по объекту инженерных изысканий.

Материалы ВЭЗ первоначально анализировались в форме совокупных диаграмм соотношений ρ_k , полученных на одноименных разносах на каждом профиле в точках зондирования. Анализ таких диаграмм позволяет оценивать интервалы деструктивных зон и производить составление стартовых моделей для количественной интерпретации результатов ВЭЗ. На фоне последних интервалы незакономерного изменения кривых ВЭЗ подвергались детальному рассмотрению на предмет наличия в теле насыпи локальных приповерхностных и глубинных неоднородностей.

Результаты ЭПТЗ исследовались по двум направлениям: 1) «по вертикали», путем сведения всех кривых электроразведки в общепринятом билогарифмическом масштабе; 2) «по горизонтали», т. е. посредством рассмотрения совмещенных графиков электропрофилирования, когда совмещение кривых ЭПТЗ производится при их построении в полулогарифмическом масштабе со смещением, равным расстоянию между точками зондирования. При таком способе сопоставления кривых ЭПТЗ, т. е. построенных в полулогарифмическом масштабе (по оси абсцисс арифметический шаг), повторные аномалии в одних и тех же точках измерения, полученные при пошагово смещенных ли-

ниях возбуждения, позволяют однозначно идентифицировать приповерхностные и глубинные неоднородности.

Результаты ЕП и СГ представлялись в форме планов графиков потенциалов естественного постоянного электрического поля (U_{EP}) и графиков наведенного (искусственного) электрического поля (ΔU_{CG}) на предмет изучения направления фильтрации поверхностных и грунтовых вод и степени неоднородности грунтовой толщи насыпи и пород ее основания.

Данные РЛЗ обрабатывались в программах GeoScan32 и «Анализ» (разработка группы компаний «Логис-Геотех»). Интерпретация георадиолокационной информации состояла в выявлении на радарограммах участков деформаций балластной и подбалластной зон и переувлажненных участков земляного полотна.

Данные МПВ подвергались обработке с использованием программы RadExPro Plus 3.65.

Итогом геофизических работ на участке инженерных изысканий являлось составление и анализ: 1) геоэлектрических и сейсмического разрезов; 2) графиков соотношений кажущихся удельных электрических сопротивлений, полученных на одноименных разнотах при работах технологиями ВЭЗ и ЭПТЗ; 3) радарограмм; 4) отдельных кривых электротондирования; 5) планов графиков результатов ЕП и СГ.

На рис. 187 сопоставлены геоэлектрические разрезы, построенные по данным ЭПТЗ с помощью томографической программы Res2DInv.

Разрезы по профилям 1 и 2 отображают строение грунтовой толщи основания насыпи с правой стороны (профиль 1 проложен вдоль автомобильной дороги на удалении порядка 50–70 м от нижней кромки, а профиль 2 – непосредственно в основании насыпи). Разрезы по профилям 3 и 6 характеризуют насыпь по ее бортам. Качественная оценка всех четырех разрезов показывает их относительную схожесть. Прослеживается общее повышение удельного сопротивления разрезов в направлении от профиля 1 к профилю 6. При этом в разрезах профилей 3 и 6 верхние слои, состоящие из гравийной подушки, выражены цепочкой линз с повышенными на несколько порядков значениями ρ_k по отношению к ρ_k нижележающих слоев.

Более полное представление об инженерно-геологическом состоянии исследуемого участка ж. д. насыпи достигается путем

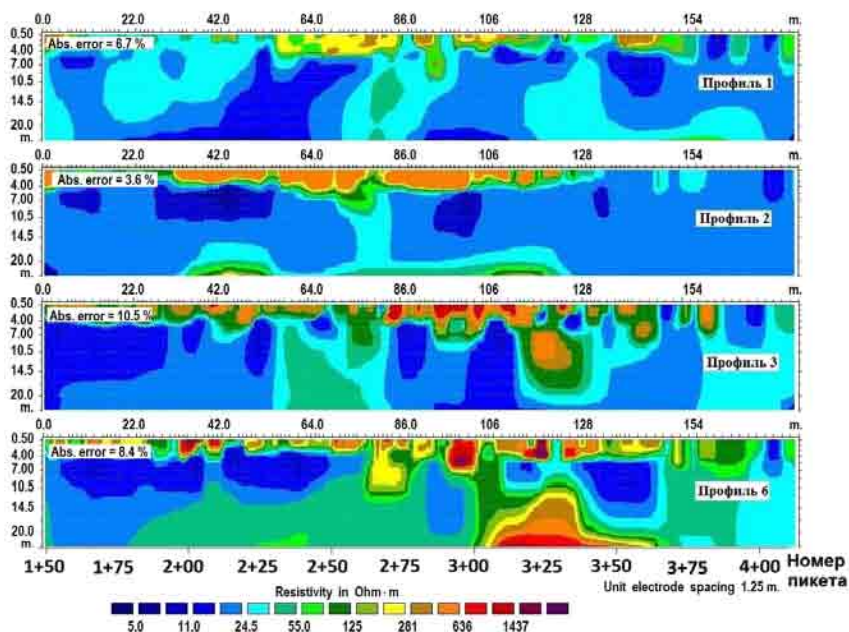


Рис. 187. Геоэлектрические разрезы по профилям ЭПТЗ

сравнения значений ρ_k на одноименных разнотах в точках ВЭЗ (рис. 188).

Такое сопоставление крайне полезно с позиций оценки общей картины вариаций ρ_k в разрезе ж. д. насыпи по глубине и простиранию, т. е. геоэлектрической картины насыпи в ее ядре, на бортах и в основании. Нетрудно заметить, что вариации ρ_k наиболее существенны на профилях 3 и 6, т. е. в разрезах по обочинам насыпи, где в течение многих лет производились подсыпки в местах просадок ж. д. полотна. Наибольшие вариации ρ_k наблюдаются на профиле 3 между ПК 2+00 и ПК 3+60 и на профиле 6 между ПК 1+60 и ПК 3+25. Эти участки приурочены к изгибу ж. д. путей над участком засыпного оврага, структура которого отображается по данным МПВ (рис. 189).

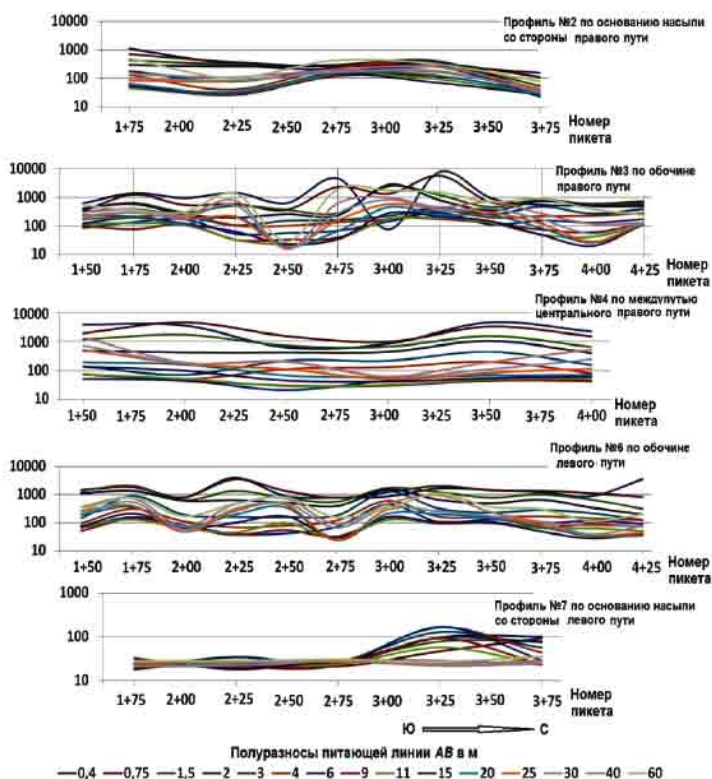


Рис. 188. Сопоставление графиков значений p_r , полученных на одноименных полуразносах питающих линий АВ в точках ВЭЗ

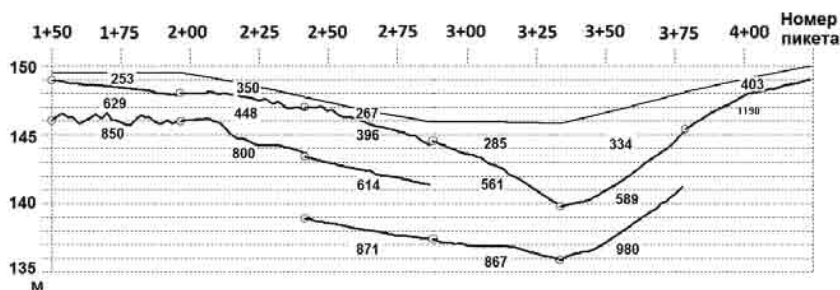


Рис. 189. Геосейсмический разрез по профилю 1

На рис. 190 представлены в одномерной интерпретации осредненные кривые ВЭЗ. Эти кривые на профилях 3, 4, 6, которые проложены на поверхности земляного полотна, близки по форме, а на профилях 2 и 7, проложенных в основании насыпи с левой и правой сторон, форма кривых не одинакова.

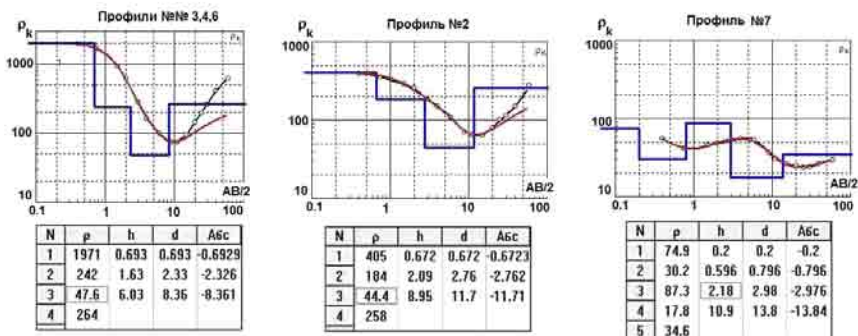


Рис. 190. Стартовые модели для количественной интерпретации полевых кривых ВЭЗ

Кривая ВЭЗ по профилю 2 имеет тот же тип, что и на профилях 3, 4, 6. Это объясняется подобием геологических разрезов ж. д. насыпи и ее основания с правой стороны в полосе профиля 7, где в породах основания насыпных грунтов практически нет, достигается полное соответствие теоретических и наблюдаемых кривых. Это является диагностическим признаком горизонтально-слоистого разреза. В моделях же земляного полотна и автомобильной дороги картина несколько иная. Здесь имеет место эффект «мнимого экранирования», когда правая ветвь кривых ρ_k приобретает незакономерную крутизну, превышающую 45° . Отмеченная особенность является диагностическим признаком границы между ж. д. насыпью и ее основанием.

Общая картина исследованного участка земляного полотна приведена на геоэлектрических разрезах (рис. 191).

В разрезах выделены слой: 1 – щебеночного балласта с сопротивлением более тысячи Ом·м; 2 – песчано-гравийной подушки с диапазоном ρ от 200 до 700 Ом·м, в зависимости от состава

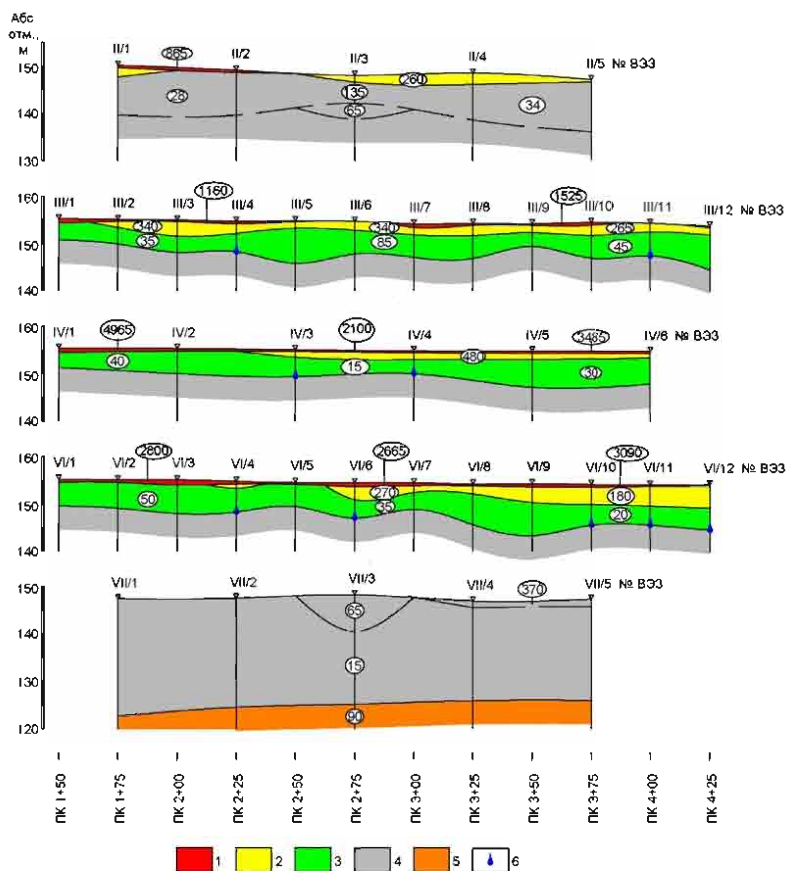


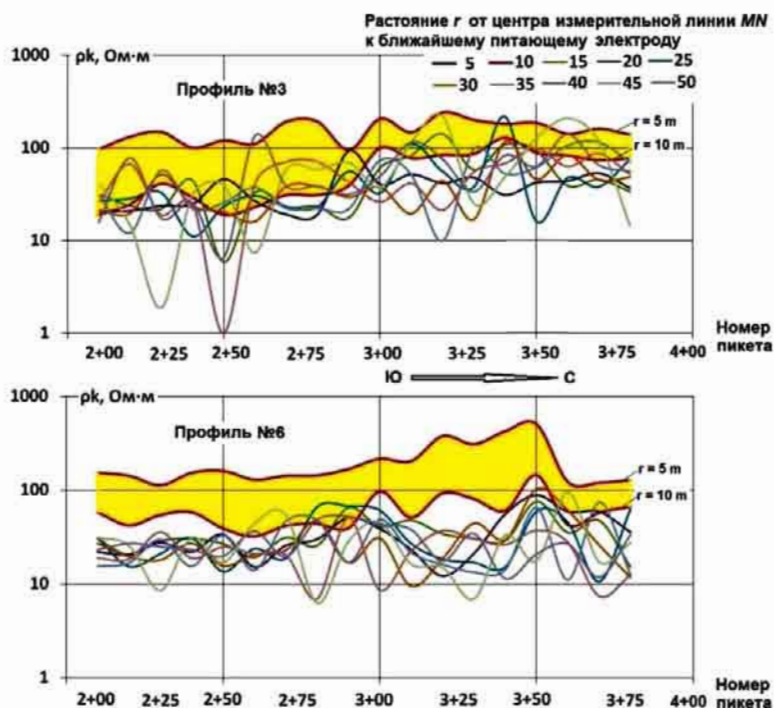
Рис. 191. Геоэлектрические разрезы по профилям ВЭЗ

песка, содержания щебня, глинистости и степени увлажненности; 3 – насыпных глинисто-суглинистых грунтов (ρ от 10 до 50 Ом·м); 4 – суглинков разной степени увлажненности (ρ от 15 до 65 Ом·м); 5 – песчано-суглинистых отложений со значениями ρ от 90 до 500 Ом·м, в зависимости от состава песка, глинистости и увлажненности грунтов; 6 – предельной водонасыщенности. Разрез по оси центра призмы, т. е. по междупутью, горизонтально наиболее выдержан. В геоэлектрических разрезах

обочин морфология слоев ж. д. насыпи более сложная: в одноименных по составу породах наблюдаются значительные изменения удельного электрического сопротивления, что предполагает неодинаковую влаго-, водонасыщенность этих пород. Эти места в разрезах на рис. 191 обозначены специальным знаком.

Результаты ВЭЗ определенным образом согласуются с данными ЭПТЗ, которые для профилей 3 и 6 представлены на рис. 192 в форме сопоставлений значений ρ_e , полученных на одноименных расстояниях r от центра измерительной линии MN к ближайшему питающему электроду, а на рис. 189 в виде графиков электропрофилирования с многократным перекрытием.

На графиках, приведенных на рис. 192, кривые начальных разностей $r=5$ м и $r=10$ м отличаются от других повышенными



значениями ρ_k . Эта область закрашена желтым цветом. Прослеживается повышение увлажненности песчано-гравийной подушки с глубиной и в южном направлении. В нижезалегающей толще имеют место существенные вариации ρ_k на одноименных разнотах r . Вариации обусловлены невыдержанностью слоев ж. д. насыпи по литологическому составу и степени увлажнения, что уже подчеркивалось при рассмотрении рис. 187, 188, 191.

На рис. 193 показан пример определения мест нахождения приповерхностных неоднородностей по признаку повторения аномальных значений на графиках ρ_k (черные стрелки) и глубинных неоднородностей по признаку незакономерного горизонтального смещения аномалий ρ_k (красные стрелки).

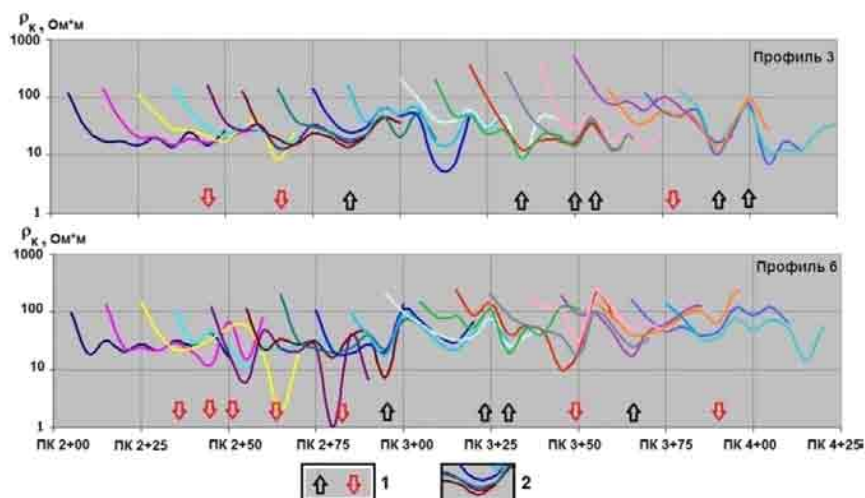


Рис. 193. Сопоставление кривых ЭПТЗ в форме электропрофилирования на профилях обочин ж. д. насыпи

На рис. 194 приведено сопоставление планов графиков $U_{\text{эл}}$ на профилях, размещенных вдоль правой и левой сторон основания ж. д. насыпи. Стрелками показано направление инфильтрации вод: на участках размещения профилей 1 и 2 движение

вод происходит с двух противоположных сторон в направлении ко дну оврага, причем наиболее интенсивно на участке профиля 1, проложенном непосредственно вдоль автомобильной дороги. На профиле 7 направление движения вод наблюдается в южном направлении, в сторону водоема.

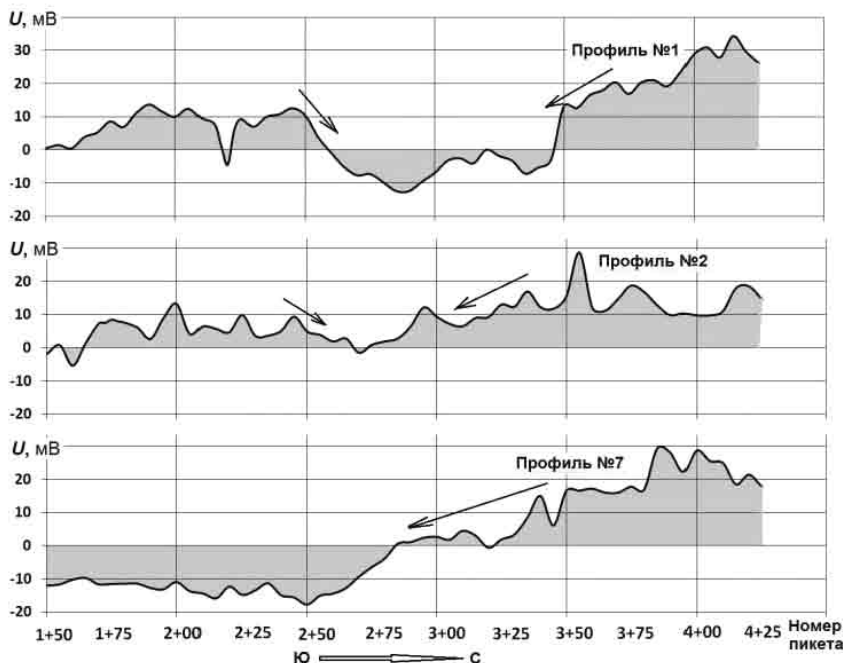


Рис. 194. Планы графиков ЕП

На рис. 195 произведено сопоставление графиков СТ по всем семи профилям. Значения ΔU_{cr} на всех профилях характеризуются достаточно сильной изменчивостью, что связано с мозаичностью грунтовой толщи, обусловленной литологическим составом и степенью влагонасыщенности (см. рис. 187, 188, 190–193). Четких корреляционных признаков поэтому не прослеживается.

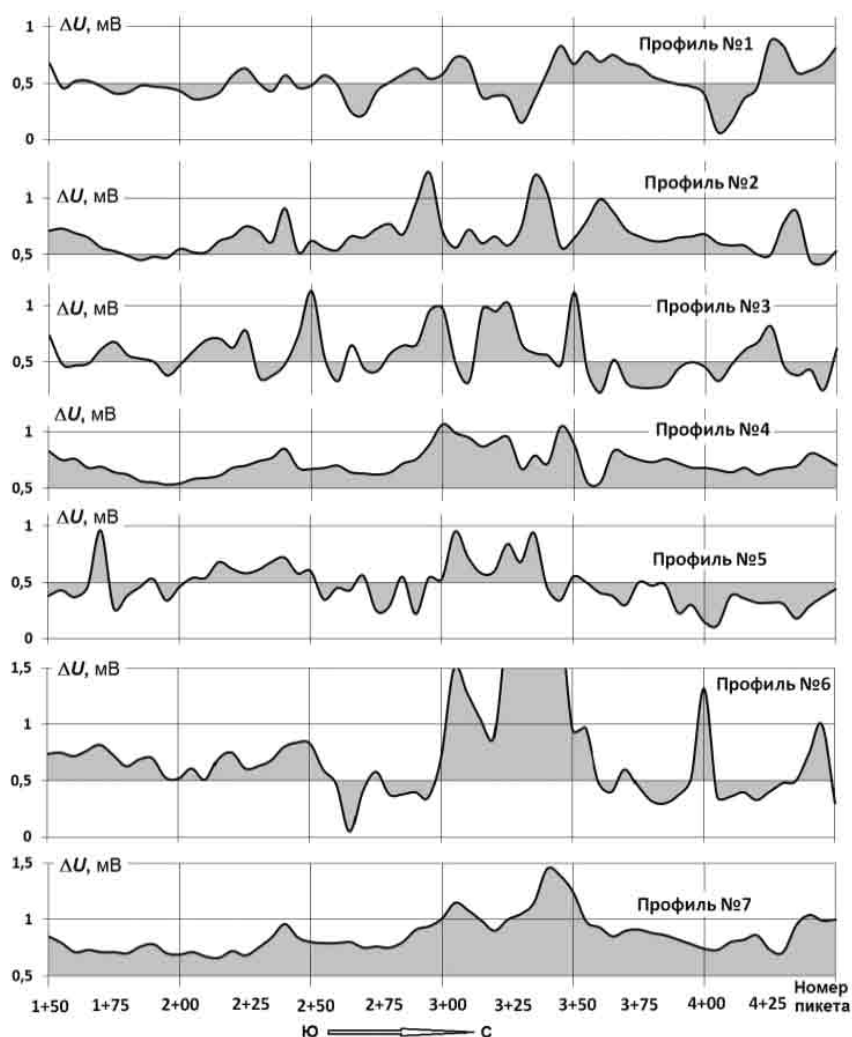


Рис. 195. Сопоставление графиков электропрофилирования методом СТ

На рис. 196 сопоставлены радарограммы, зарегистрированные на поверхностных профилях ж. д. полотна. Их обработка в программах GeoScan32 и «Анализ» позволила выделить границы слоев и области повышенной амплитуды отраженного сигнала.

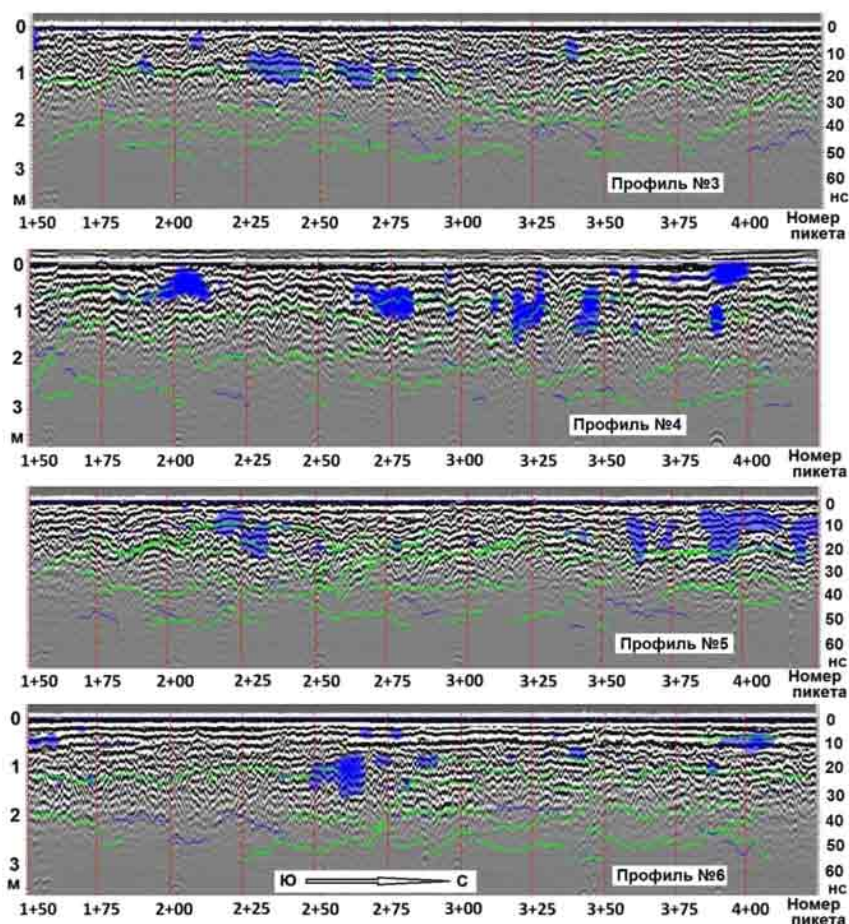


Рис. 196. Сопоставление радарограмм, зарегистрированных на обочинах путей и в междупутье

На радарограммах зеленые и синие линии соответствуют границам слоев, а синие пятна – участкам высокой амплитуды отраженного сигнала. Последние могут соответствовать увлажненным участкам или участкам повышенной глинистости. Следует подчеркнуть, что границы верхнего щебеночного слоя и нижележащей песчано-гравийной подушки строго горизонталь-

но не выдержаны. Наличие волнистости и прерывистости осей синфазности, подчеркиваемое в отдельных случаях смещениями, свидетельствует о многочисленных осложнениях в слоистости земляной насыпи и присутствии в балластном слое локальных включений. Другим значимым диагностическим признаком является изменение контрастности осей синфазности в местах повышенной глинистости или повышенной увлажненности грунтов. Последняя может быть следствием гидравлической связи с нижезалегающими отложениями. Объяснение этому факту находится при рассмотрении геоморфологической обстановки местности, которую пересекает железная дорога. В частности, из анализа космоснимка (см. рис. 185) следует, что в случае «забугоривания» продольной к насыпи искусственной дренажной канавы, служащей для перепуска озерно-овражной воды в направлении естественного стока в юго-западном направлении, насыпь становится естественной плотиной и воспринимает уже неконтролируемый сток на себя. Дополнительно «срабатывает» тенденция к естественному дренажу в северо-западном направлении, в сторону второго озерного водоема. Все это вызывает постепенное заболачивание, приводящее к повышению водонасыщенности грунтов основания насыпи с северо-восточной стороны.

Особенностью проведенных комплексных геофизических исследований явилась возможность получения целостной картины состояния земляного полотна. Показаны способы последовательного многоуровневого анализа данных электроразведочных методов, который позволяет производить расшифровку деструктивных зон ж. д. насыпи, включая изменчивость морфологии, литологической характеристики и влагонасыщенности грунтовых слоев. Это достигается тем, что результаты 2D-инверсии данных ЭПТЗ дополняются данными анализа кривых ВЭЗ и ЭПТЗ в их совокупном виде и в отдельности, благодаря чему на фоне стартовых моделей, отражающих строение ненарушенной ж. д. насыпи, можно выделить конкретные приповерхностные и глубинные неоднородности. Последующий детальный анализ предусматривает георадиолокационную диагностику состояния балластного слоя и толщи насыпных грунтов в подбалластной зоне. Конечным результатом является оценка гидрогеологических процессов, преимущественно влияющих на образование просадок ж. д. полотна.

Исследование локальных техногенных загрязнений покровных отложений относится к числу приоритетных задач охраны окружающей среды, включая места размещения бытовых и промышленных отходов. Ниже приведены результаты изучения технологией электропотенциального томографического зондирования (ЭПТЗ) полигона твердых отходов производства и потребления (ТОПП) в г. Ростове-на-Дону и Головатовского месторождения суглинков вблизи поселка Пешково в Азовском районе Ростовской области. Основная цель исследований сводилась к определению пространственной изменчивости: 1) свалочных грунтов на полигоне ТОПП и особенно в местах скопления фильтрата; 2) продуктивных глинистых слоев на Головатовском месторождении.

Полигон ТОПП включал два последовательно заполненных отходами котлована, сооруженных по проекту на месте карьера по добыче кирпичных глин (рис. 197).

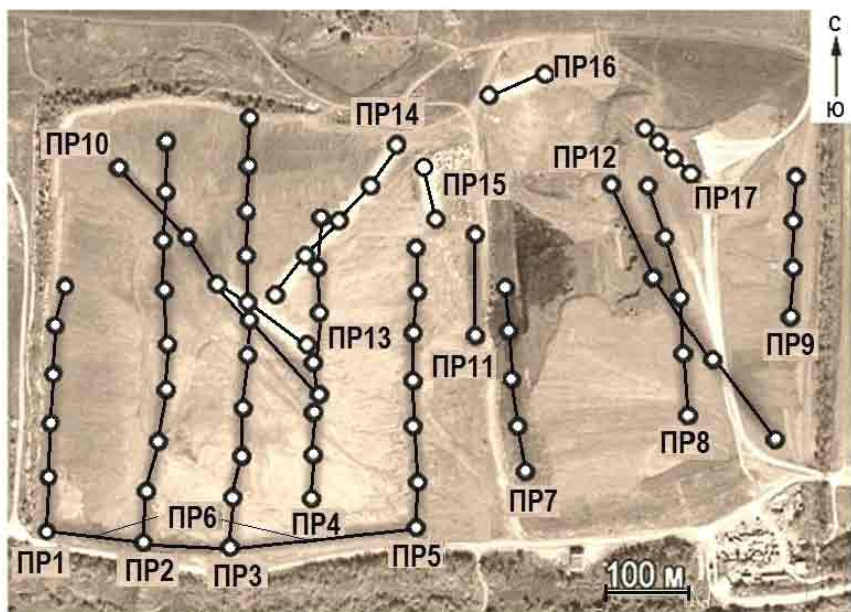


Рис. 197. Схема расположения профилей ЭПТЗ на полигоне ТОПП (нумерация точек на профилях от места их обозначения)

Борта котлованов на участках полигона до глубины 10 м слагают четвертичные суглинки, а ниже до отметки 15 м – скифские глины, которые, обладая большой мощностью (до 30 м), являются местным водоупором. Ниже по разрезу залегают водоносные пески и известняки-ракушечники верхнесарматского возраста. Непосредственно свалочное тело полигона представляет собой чередование слоев отходов, которые складываются и механически распределяются по мере поступления специальными укладчиками, и слоев суглинков. Мощности первых порядка 5 м, а вторых 0,3–0,5 м. С поверхности отходы перекрыты суглинистым грунтом, варьирующим по толщине от 0,5 до 1,5–2 м. Площадь первого котлована 9,6 га, второго – 20 га.

Головатоевское месторождение суглинков ограничено десятью разведочными скважинами и расположено в пределах водораздела на ровной площадке, представляющей собой пахотное поле (рис. 198). Его ширина 305 м, длина 340 м. Поверхность участка месторождения ровная. Максимальная абсолютная отметка месторождения на северо-западе +11,23 м, минимальная +8,17 м на юго-востоке.

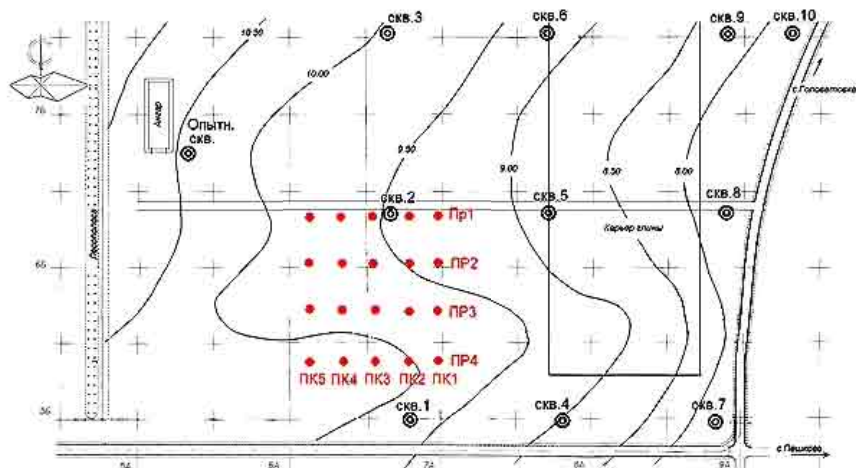


Рис. 198. План участка геофизических работ на Головатоевском месторождении глинистого сырья в Ростовской области

Полезное ископаемое сложено покровными ниже-верхне-плейстоценовыми отложениями водоразделов и склонов. По минеральному составу основная масса гидрослюдисто-монтмориллонитовая со значительной примесью минералов оксидов и гидрооксидов железа, количество которых возрастает по глубине. Нижний контакт с подстилающими породами на большей части месторождения не вскрыт ввиду большой мощности полезной пачки. Почвенно-растительный слой мощностью 0,5 м прослежен на всей территории месторождения.

В качестве основного метода изучения вышеохарактеризованных техногенных и природных геологических объектов была выбрана технология ЭПТЗ, которая отличается высокой мобильностью и простотой выполнения полевых наблюдений, позволяет анализировать результаты исследований как в форме электротомографии, так и в форме электропрофилирования и представляет собой объемный электрический фильтр, обеспечивающий решение основных экологических задач в сложных и ограниченных по площади природно-техногенных системах.

На рис. 199 приведен пример изучения геоэкологической обстановки технологией ЭПТЗ на полигоне ТООП. Геоэлектрический разрез построен в томографической программе Res2DInv по данным измерений на 12-м профиле (см. рис. 196).

Рассмотрение результатов 2D-инверсии показывает, что техногенная толща разделяется на слой сухих отходов с удельным электрическим сопротивлением $\rho_n = 10+40 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и отходов, содержащих фильтрат с $\rho_n = 1+3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Загрязнение отложений фильтрата

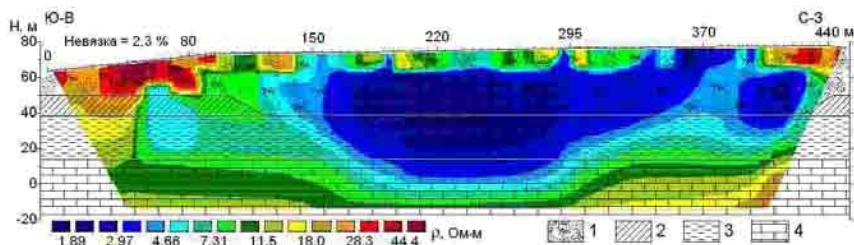


Рис. 199. Геоэлектрический разрез 2D-инверсии по данным ЭПТЗ (полигон ТООП, профиль 12):

1 – техногенная толща; 2 – суглинки; 3 – глины; 4 – известняки

том в наибольшей мере происходит в центральной части разреза. Удельное электрическое сопротивление (УЭС) глин здесь составляет 1–3 Ом·м, а известняков не превышает 15–20 Ом·м. Вне полигона скифские глины имеют значения ρ_k порядка 6–8 Ом·м, а сарматские известняки – более 50 Ом·м. Понижение УЭС глин связано с их потенциальной проницаемостью, поскольку коэффициент фильтрации в некоторых местах в 6,5 и более раз превосходит допустимые значения (не более 0,0086 м/сут). Этот факт свидетельствует о том, что нельзя исключать гидравлическую связь фильтрующихся вод с нижележащими горизонтами.

Вдоль западной границы полигона в слое глин во всех точках профиля 1, кроме первой, отмечается повышенное содержание фильтрата. Еще более повышенное содержание фильтрата прогнозируется в центре полигона. Значения кажущихся УЭС здесь уменьшаются до 1,5–1,8 Ом·м. Об этом свидетельствуют результаты ЭПТЗ по диагональному профилю, пересекающему полигон с северо-востока на юго-запад (рис. 200, а). Графики сопоставлены в форме электропрофилирования на предмет выявле-

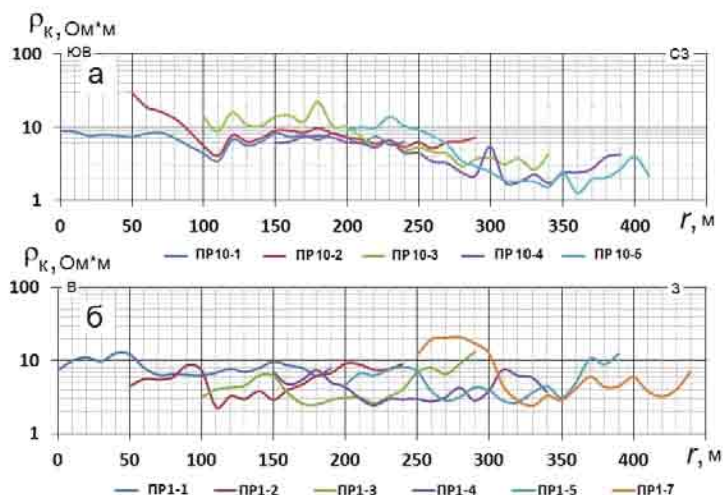


Рис. 200. Сопоставление кривых ЭПТЗ на предмет выявления приповерхностных и глубинных неоднородностей в форме графиков электропрофилирования по диагональному профилю 10 (а) и по профилю 1, проложенному вдоль северной границы полигона (б)

ния приповерхностных неоднородностей. На диагональном профиле 10 (см. рис. 197) приповерхностные неоднородности фиксируются в интервале 100–150 м (рис. 200, а). В то же время на профиле 1 приповерхностных неоднородностей не обнаруживается (рис. 200, б). Здесь вдоль профиля, за исключением графика ПР1–1 (первая точка зондирования), наблюдаются относительно устойчивые значения кажущихся УЭС, свидетельствующие о равномерном распределении фильтра с объемом скопления меньшим, чем в центре полигона.

На рис. 201 произведено сопоставление кривых ЭПТЗ по продольным профилям на Головатовском месторождении глинистого

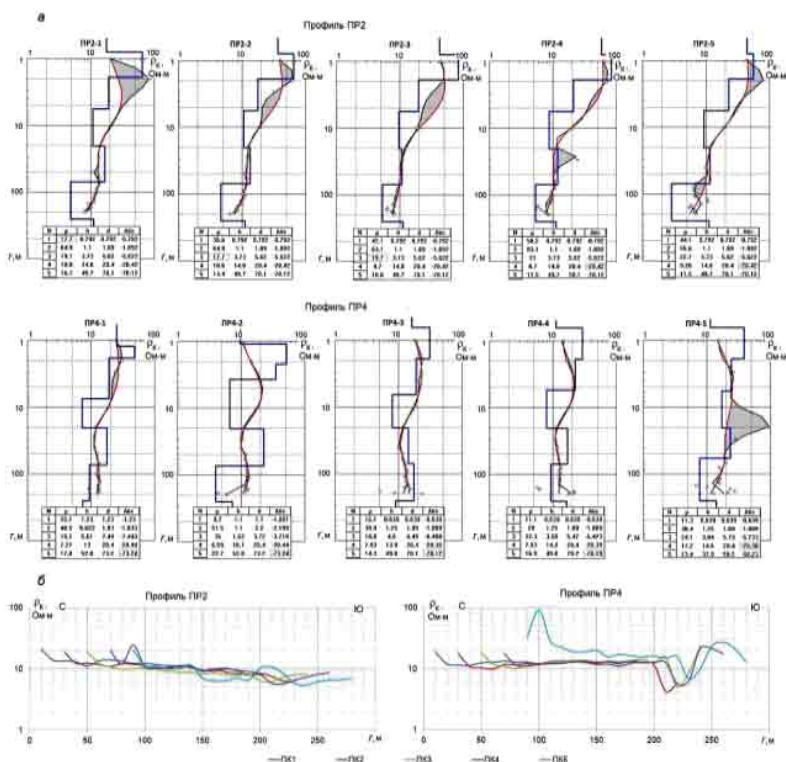


Рис. 201. Сопоставление кривых ЭПТЗ по продольным профилям площадки геофизических исследований на Головатовском месторождении суглинков в форме электрозондирования (а) и электропрофилирования (б)

сырья по принципу объемного сканирования. Сопоставление показывает, что локальных (обособленных по электрическим свойствам) приповерхностных неоднородностей в пределах площадки геофизических исследований не обнаруживается.

Имеющие место аномалии характеризуют глубинные неоднородности в слое грубо- и крупнозернистого песка. Наибольший интерес представляет область концентрации аномалий пониженных УЭС в интервале 200–250 м на профиле ПР4. Можно заключить, что аномальный объект является протяженной линзой соленых вод, которые типичны в пойменных отложениях Придонья.

Схематические карты изменчивости УЭС каждого выделенного по результатам количественной интерпретации пласта в разрезе Головатовского месторождения суглинков приведены на рис. 202, а. Объемное отображение распределения УЭС показано на рис. 202, б. Наиболее однородным по составу является слой легких суглинков (слой 4), мощность которого колеблется в пределах 14–15 м.

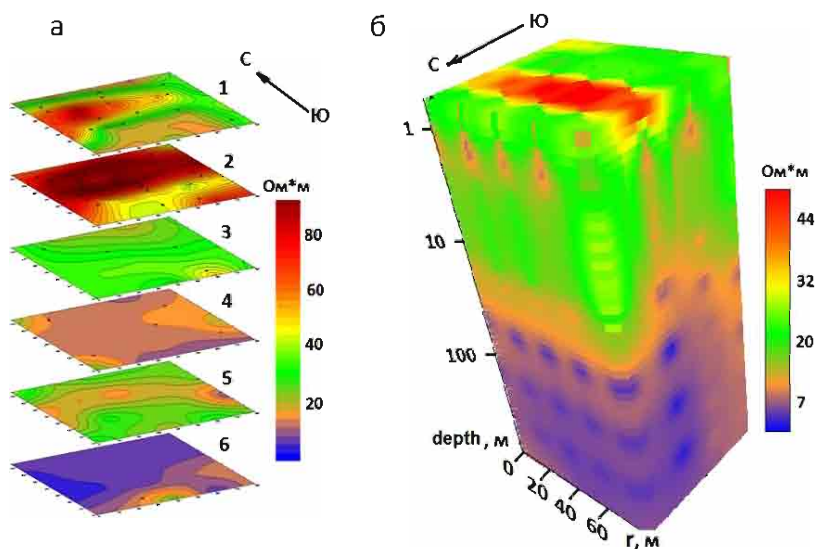


Рис. 202. Объемное отображение распределения УЭС на площадке геофизических исследований Головатовского месторождения суглинков

Данные ЭПТЗ, полученные на Головатовском месторождении, коррелируют с результатами анализа химического и механического составов: по результатам опробования с глубиной уменьшается количество алюмосиликатов и увеличивается содержание кварца, что является одной из причин различия значений УЭС в верхних «тяжелых» и нижних «легких» суглинках. Прослеживается тенденция увеличения с глубиной содержания обломочной фракции (интервал от 0,03 до 0,08 мм), т. е. по мере смены «тяжелых» суглинков на «легкие». Также имеют место колебания количественного состава обломочных фракций в толще суглинков, что находит отражение в изменении УЭС, как одного из самых чувствительных индикаторов горных пород.

Вопросы и задания для контроля самостоятельной работы

1. Сформулируйте основные положения методики наземных геофизических съемок.
2. Что включает в себя расчет сетей геофизических наблюдений?
3. Какие можно привести примеры межметодного комплексирования?
4. Найдите в сети Интернет информацию о современных геофизических технологиях решения геологических задач.
5. В каком виде представляются результаты комплексов ГИС и как выполняется их комплексная интерпретация?
6. Раскройте сущность геологической интерпретации комплексных геофизических данных.
7. Как оценивается мощность и глубина залегания объектов по комплексу геофизических методов?
8. Какие геофизические методы применяются для оценки возраста геологических объектов?
9. По каким основным геолого-геофизическим и экономическим показателям электроразведочные методы эффективно используются при решении геологических и геоэкологических задач?
10. В каких случаях есть необходимость использовать методы георадиолокации и сейсморазведки в комплексе и отдельно?
11. Каковы основные приемы комплексной интерпретации геофизических данных?

12. Расскажите о комплексировании геофизических методов при решении геоэкологических задач на угольных месторождениях.

13. В чем состоит комплексирование геофизических методов при решении геоэкологических задач на рудных месторождениях?

14. Опишите комплексирование геофизических методов при решении геоэкологических задач на нефтегазовых месторождениях.

15. Что предполагает комплексирование геофизических методов при решении задач поисков и разведки строительных материалов?

2.5. Особенности исследования геологической среды в задачах инженерной и экологической геофизики

Объектом исследований инженерной (инженерно-гидрогеологической) геофизики преимущественно является верхняя часть геологических разрезов (ВЧР) мощностью в десятки, реже первые сотни метров. ВЧР еще называют 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. Инженерная геофизика в широком смысле может быть подразделена на гидрогеологическую, почвенно-мелиоративную, инженерно-геологическую, мерзлотную, гляциологическую, а также техническую и археологическую. К ней можно отнести и экологическую геофизику. Однако возрастающее значение для человечества экологических проблем приводит к целесообразности выделения ее в отдельный научно-прикладной раздел.

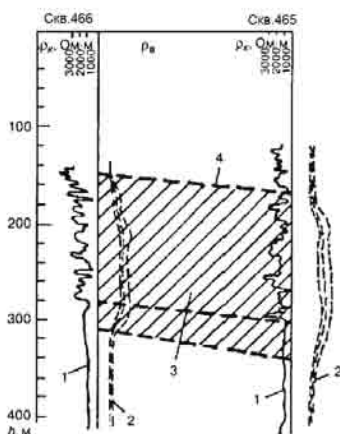
В инженерной гидрогеологии геофизические методы с успехом используют для решения следующих задач:

- 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 иногда объединяют в гидрогеологическую геофизику, выделяя в ней почвенно-мелиоративное направление.

На рис. 203 приведен один из примеров решения гидрогеологических задач по выделению и оконтуриванию зоны активной циркуляции подземных вод скважинными методами кажущегося сопротивления и резистивиметрии. Диагностическими признаками имеющей место циркуляции здесь являются характер-

Рис. 203. Результаты скважинных геофизических исследований по выделению и оконтуриванию зоны активной циркуляции подземных вод: 1, 2 – кривые каротажа КС (1) и резистивиметрии (2); 3 – зона активной циркуляции подземных вод; 4 – границы слоев



ная «иззубренность» кривых ρ_k и повышенные значения удельного электрического сопротивления подземных вод.

В следующем примере дано решение задачи по изучению состояния гидротехнических сооружений (ГТС) малого порядка на искусственных водоемах. Применение на этих водоемах геофизических, в данном случае электроразведочных, технологий обусловливается тем, что геофизические методы являются экспрессными, позволяют, в отличие от дискретного точечного бурения, производить непрерывные площадные наблюдения при их относительно низкой стоимости и неразрушающем воздействии.

Объектом проведения геофизических работ была выбрана Краснокрымская грунтовая плотина, расположенная в Мясниковском районе Ростовской области в 2,5 км на юго-запад от с. Красный Крым на балке Чалтырьская. Последняя является притоком р. Мертвый Донец. Гидроузел пруда относится к IV классу сооружений и состоит из грунтовой плотины и водосброса, выполненного в виде обходного канала и быстротока на нем (рис. 204). Основная цель постановки и проведения геофизических исследований состояла в изучении современного состояния плотины и определении ее влагонасыщения и протечности.

В геоморфологическом отношении территория района располагается на континентальной равнине аллювиального происхождения в пределах второй надпойменной террасы р. Дон. Инженерно-геологический разрез изучен до глубины 10 м и состоит

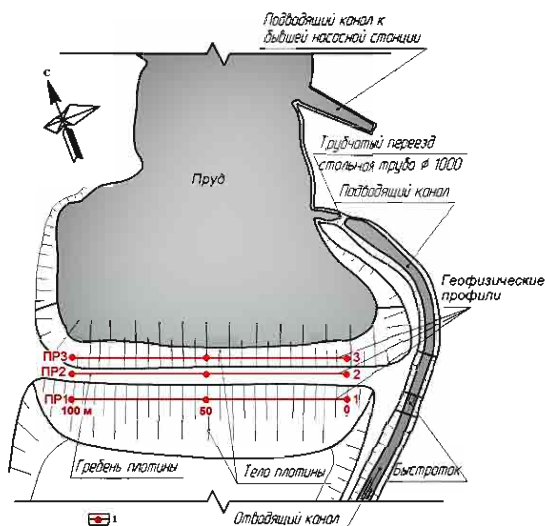


Рис. 204. Схема Краснокрымской грунтовой плотины:
1 – точки ЭПТЗ

из тугопластичных и полутвердых суглинков с включениями карбонатов и редкими линзами супесей и глин протяженностью 3,0–5,0 м.

Для решения поставленной задачи на гребне и откосах плотины были разбиты три профиля длиной по 100 м: профиль 1–1 на «сухом» откосе, профиль 2–2 на гребне и профиль 3–3 на «мокром» откосе (см. рис. 203). Гео-

физические исследования проведены электроразведочными технологиями электропотенциального томографического зондирования (ЭПТЗ), пространственной электрической фильтрации (МПЭФ), подповерхностного георадиолокационного зондирования (РЛЗ) и постоянного естественного электрического поля (ЕП).

Изменение удельного электрического сопротивления грунтовой толщи до глубин более 50–60 м прослежено по кривым ЭПТЗ. Детальное строение инженерно-геологических разрезов на глубину до 5–6 м характеризуют радарограммы. Динамика увлажненности пород отображается на кривых ЕП и СГ. Следовательно, имеется возможность комплексной оценки состояния плотины путем сопоставления результатов измерений, выполненных непосредственно в центре насыпи и на ее откосах – мокрым, примыкающем к воде и покрытом железобетонными плитами, и сухом, переходящем в полузаболоченный овраг.

Данные ЭПТЗ первоначально проанализированы в совокупном виде (рис. 205). Исследовались кривые ρ_k путем сведения их в форме электроразведки, т. е. в билогарифмическом масштабе (верхний фрагмент) и в форме послойного электропрофи-

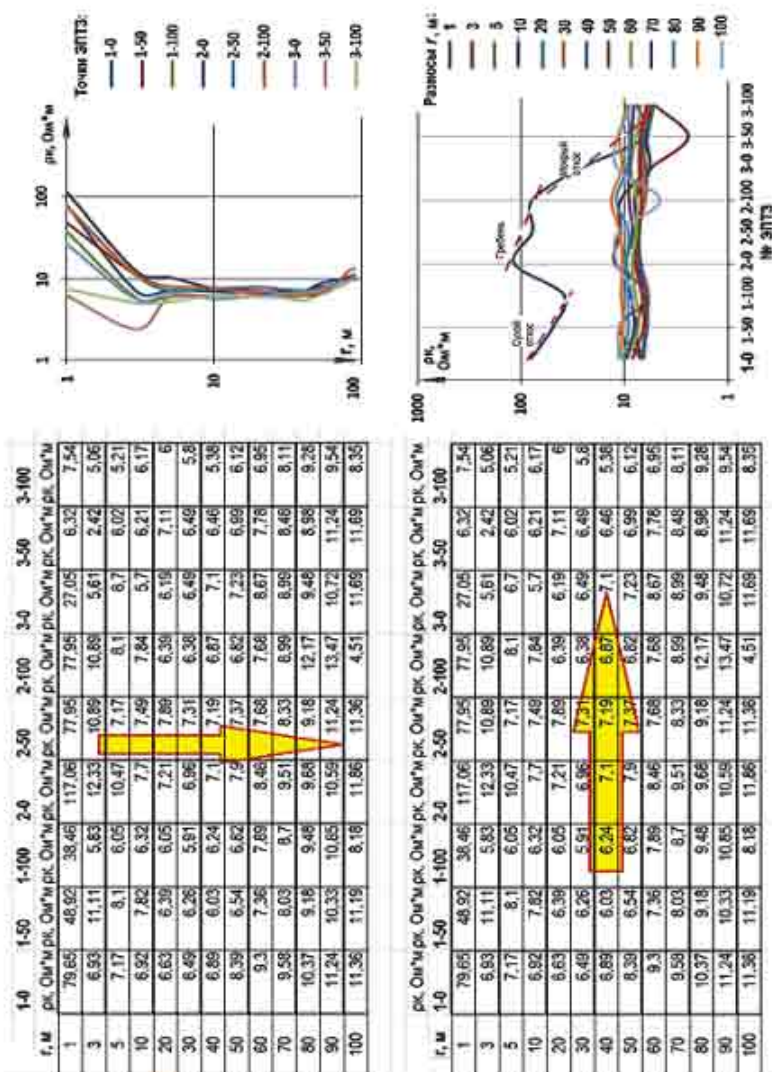


Рис. 205. Представленные графики ЗПТЗ и формы электрозондирования и полного электропрофиля

лирования в полулогарифмическом масштабе, когда кривая каждого ряда соответствует разному между питающим и измерительным диполями (нижний фрагмент).

Рассмотрение графиков, построенных в форме электроразведки, показывает, что наблюдается резкое возрастание с глубиной увлажненности насыпных грунтов плотины, причем в разной степени на ее откосах и гребне. Породы основания имеют присущие водонасыщенным супесно-глинистым грунтам показатели $\rho_k = 6-8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Ниже залегают более высокоомные слои со значениями $\rho_k = 10-15 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Они представлены типичными для разрезов исследуемой территории известняками-ракушечниками. На графиках послойного электропрофилирования обособленно выделяется кривая, соответствующая разному 1 м. На разностях более 3 м показатели ρ_k снижаются уже почти на порядок. По степени этого снижения наибольшая степень водонасыщения наблюдается, соответственно, на мокром откосе. Сопоставление графиков в форме электропрофилирования, выполненного с шагом 10 м, показывает,

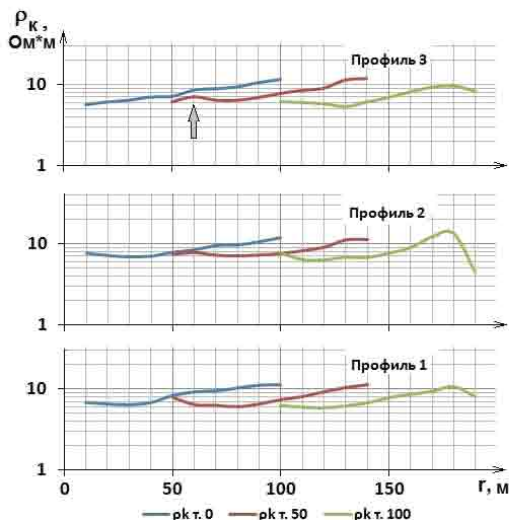


Рис. 206. Совмещенные в форме перекрытий графики ЭПТЗ на мокром откосе (профиль 3), гребне плотины (2) и сухом откосе (1): стрелкой отмечено место слабонагруженной локальной неоднородности

что в суглинистой толще основания плотины локальных объектов не обнаруживается, за исключением слабо выраженной линзы несколько повышенного ρ_k в интервале 50–70 м на профиле, проложенном на мокром откосе (рис. 206).

На рис. 207 приведено сопоставление результатов ЕП, СГ и РЛЗ, полученных на откосах и гребне плотины.

Распределение степени водонасыщенности грунтов и направление этого распределения можно оценить по гра-

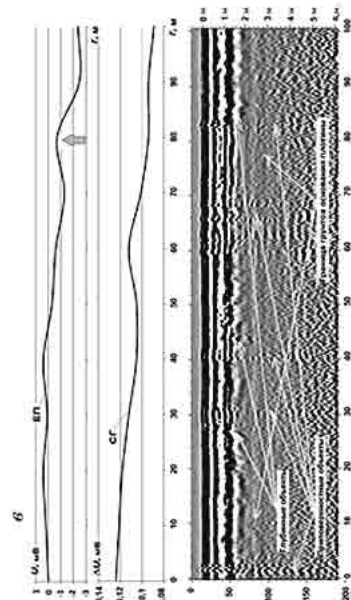
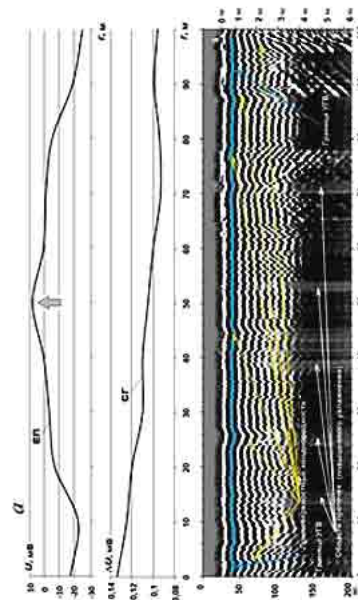
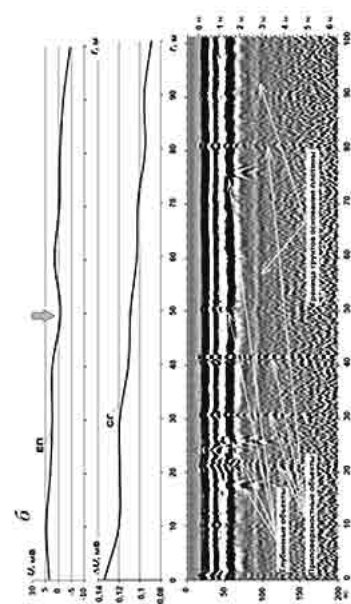


Рисунок 207 - Сопоставление данных ЕП, СГ и РЛЗ на откосах и гребне плотин: стрелками на откосах ЕП отмечены места разгрузки и инфильтрации прудовой воды

Рис. 207. Сопоставление данных ЕП, СГ и РЛЗ на откосах и гребне плотин: стрелками на графиках ЕП отмечены места разгрузки и инфильтрации прудовой воды

фикам МПЭФ продольного СГ. Прослеживается тенденция увеличения водонасыщенности грунтов в северо-западном направлении от «быстротока», что отчетливо видно на всех трех графиках по уменьшению значений градиента потенциала электрического поля от 0,13 до 0,09 мВ.

Для более детальной оценки распределения водонасыщенности произведено сопоставление графиков продольного СГ (положение питающей линии вдоль дамбы) и ортогонального СГ (положение питающей линии вкрест дамбы). Сравнение значений ΔU на графиках произведено в относительных единицах (рис. 208).

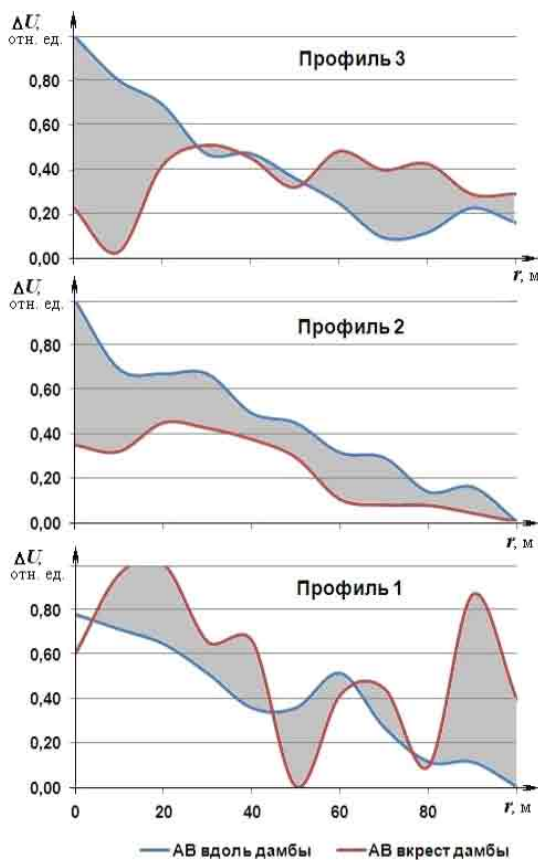


Рис. 208. Сопоставление графиков продольного и ортогонального СГ на откосах и гребне плотины для оценки распределения водонасыщенности грунтов и направления фильтрации прудовой воды

Инженерно-геофизическое истолкование совокупной картины следующее: неравномерность в распределении увлажненности оценивается «размахом рассогласования» (разностью амплитуд) кривых ΔU , который имеет наибольшую амплитуду на откосах. Анализ графиков потенциалов постоянного естественного электрического поля U_{EP} позволяет получить дополнительные данные, относящиеся к динамике и степени водонасыщения грунтовой толщи плотины. В частности, нетрудно увидеть, что перепад значений U_{EP} на сухом откосе составляет 3 мВ (на уровне погрешностей измерений), на гребне плотины 10 мВ, а на мокром откосе 35 мВ, т. е. степень водонасыщенности пород закономерно уменьшается от мокрого откоса к сухому. Наблюдается аналогия в поведении графиков U_{EP} и ΔU_{CT} на сухом откосе и гребне, выражающаяся в уменьшении значений U_{EP} и ΔU_{CT} в северо-западном направлении от «быстротока» плотины, что объясняется инфильтрацией поверхностных вод в указанном направлении. На мокром же откосе картина поля ЕП несколько иная. Здесь инфильтрация прудовой воды происходит в двух направлениях: от центра плотины к ее краям. Области инфильтрации характеризуются пониженными значениями потенциалов поля на графиках U_{EP} . При этом следует подчеркнуть, что положительные аномалии U_{EP} обусловлены разгрузкой вод. Наиболее ярко область разгрузки проявляется в центре мокрого откоса, поскольку здесь имеет место наибольший напор прудовой воды. Примечательно, что этот процесс отображается и на кривых ЭПТЗ в форме незакономерного их отклонения от стартовой (теоретической) кривой в процессе количественной интерпретации по программе IPI2Win (рис. 209). Интересно, что, за исключением случаев аномального проявления процессов разгрузки и инфильтрации прудовой воды, все наблюдаемые кривые практически идеально сопоставляются с теоретическими, и этим дополнительно подчеркивается квазиоднородный состав в подстилающей толще плотины.

Возвращаясь к рассмотрению графиков U_{EP} , следует отметить, что на них фиксируются места разгрузки грунтовых вод, в частности на сухом откосе в интервале 75–90 м. Такие зоны желательно подвергать мониторинговым наблюдениям, особенно в периоды снеготаяния и обильных дождевых осадков.

Состав и строение грунтовой толщи плотины с наибольшей детальностью отображается на радарограммах, зарегистрированных

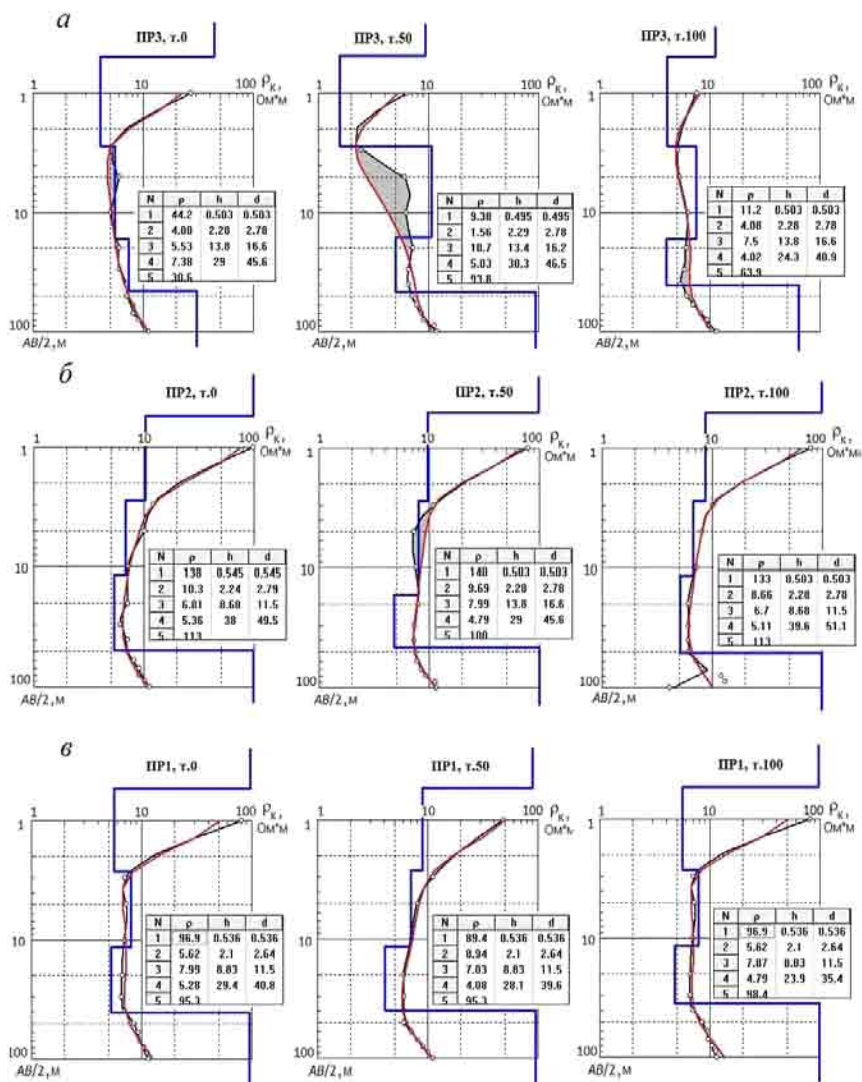


Рис. 209. Картограмма результатов количественной интерпретации кривых ЭПТЗ на мокром откосе (а), гребне плотины (б) и сухом откосе (в)

на откосах и гребне плотины (см. рис. 207). Их сопоставление показывает, что разрез по профилю 3 (мокрый откос) контрастно отличается от разрезов по профилям 1 и 2 (сухой откос и гребень). Контрастность разреза мокрого откоса соответствует типу радарограмм, на которых появляется «звучащий» тип волновой картины ниже уровня грунтовых вод.

Вторым диагностическим признаком, проявляющимся на анализируемой радарограмме, служат участки с низкочастотной записью, что свидетельствует о значительном локальном увлажнении разреза и появлении протечек в данных местах. Картины радарограмм, зарегистрированных на сухом откосе и гребне, являются типовыми для песчано-супесно-глинистых разрезов, т. е. для лёссовых отложений. На радарограммах слабоконтрастно выделяется граница грунтового основания, а также места расположения приповерхностных и глубинных неоднородностей, каковыми могут быть скопления бутового камня, куски бетонных облицовочных плит, попавших в состав насыпного грунта при строительстве плотины, и др.

Таким образом, проведенные геофизические исследования на Краснокрымской прудовой плотине показали, что электроразведочными технологиями решаются задачи диагностики состояния гидросооружений малых форм. А именно:

- применением ЭПТЗ и РЛЗ достигается возможность изучения в вертикальном разрезе степени неоднородности и увлажненности насыпных грунтов плотины и нижезалегающих отложений, что служит основанием для оценки устойчивости последней к появлению протечек;
- методами ЕП и СГ способом МПЭФ определяются места инфильтрации и разгрузки прудовой воды, а также направления движения фильтрационных потоков.

Предложенный комплекс электроразведочных методов целесообразно использовать при мониторинговых наблюдениях с дополнительным привлечением методов малоглубинной сейсмо- и индуктивной электроразведки.

Примером совместного применения наземного электропрофилирования (ЭП) и речных резистивиметрических наблюдений (определение электропроводности воды в реке) для изучения интенсивности карстовых явлений в хорошо растворимых поро-

дах могут служить исследования, выполненные вблизи одного из крупных химических заводов (рис. 210).

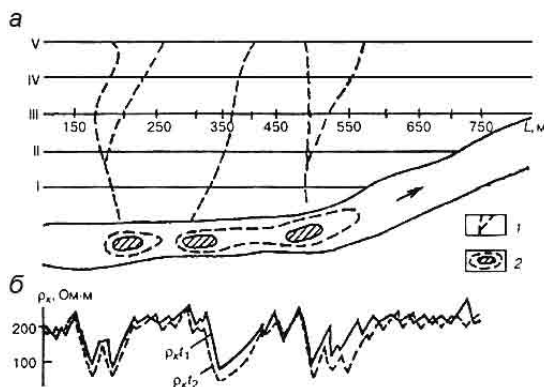


Рис. 210. Результаты наземного электропрофилирования и речной резистивиметрии для изучения техногенных карстовых явлений:
а – план; **б** – графики ρ_x по профилю III в моменты времени t_1 и t_2 ; I–IV – профили наблюдений; 1 – водотоки; 2 – зоны разгрузки (повышенная проводимость воды) в реке

На этом заводе производство серной кислоты привело к непредвиденному привносу 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_x) методом ЭП и измерений электропроводности воды в реке позволили выявить положение основных водотоков и оценить развитие карстового процесса во времени.

Объектом инженерно-геологических исследований является верхняя ВЧР. 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 геоло-

гических 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 электропрофилирование методами естественного поля (ЕП), кажущихся сопротивлений (ЭП), радиоволновые (РВП), вертикальные электрические зондирования методом сопротивления или вызванной поляризации (ВЭЗ или ВЭЗ-ВП), частотные зондирования (ЧЗ), зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) и радиоволновые (РВЗ), гравимагнитные, ядерные и скважинные методы.

В задачи геофизических методов входит изучение напряженного состояния коренных пород, определение геодинамических явлений и сейсмичности (карст, суффозия, оползни, обвалы, просадки и др.), представляющих опасность для будущего строительства, проведение мониторинга за работой ответственных сооружений и анализ их влияния на геологическую среду. 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, эманацционной, гамма-съемками. Применяют также сейсмоакустическое и электромагнитное межскважинные просвечивания. В качестве примера на рис. 211 приведены результаты комплексных геофизических исследований для изучения рыхлых и скальных пород.

Следующим примером решения инженерно-геологической задачи являются геофизические работы методом георадиолокационного зондирования (РЛЗ) в цехе сборки тракторов на территории ООО «Комбайновый завод «Ростсельмаш» в г. Ростове-на-Дону. Цель работ заключалась в решении поставленных инженерно-геологических задач по обследованию состояния грунтов под бетонным покрытием пола, выявлению их разуплотнения и наличия пустот для получения заключения о допустимых нагрузках на полы из фибробетона.

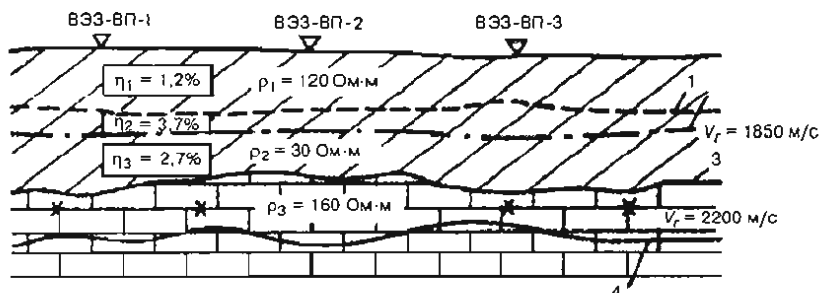


Рис. 211. Пример определения условий залегания скальных пород под рыхлыми образованиями по данным методов ВЭЗ, ВЭЗ-ВП и МПВ:

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_r – граничная скорость)

Георадиолокационные наблюдения проводились аппаратурным комплексом «ОКО-2» с антенным блоком частотой 400 МГц. Использовался непрерывный способ перемещения последнего по профилям с записью и одновременным представлением информации в виде радарограмм на дисплее ноутбука (рис. 212).

Достоверность наличия разуплотненных зон балластного слоя, выявленных методом РЛЗ, оценивалась по результатам колонкового бурения, включающего описание кернового материала и последующий лабораторный анализ проб грунта.

На рис. 213 показан пример получения разреза по атрибуту

ε. Представлен результат автоматической обработки по программе «ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ» фрагмента радарограммы рекогносцировочного профиля «Сельмаш 1_1» (площадка детальных рекогносцировочных работ). Выделена граница между плотными и относительно разуплотненными грунтами (рис. 213, б).



Рис. 212. Процесс георадарной съемки

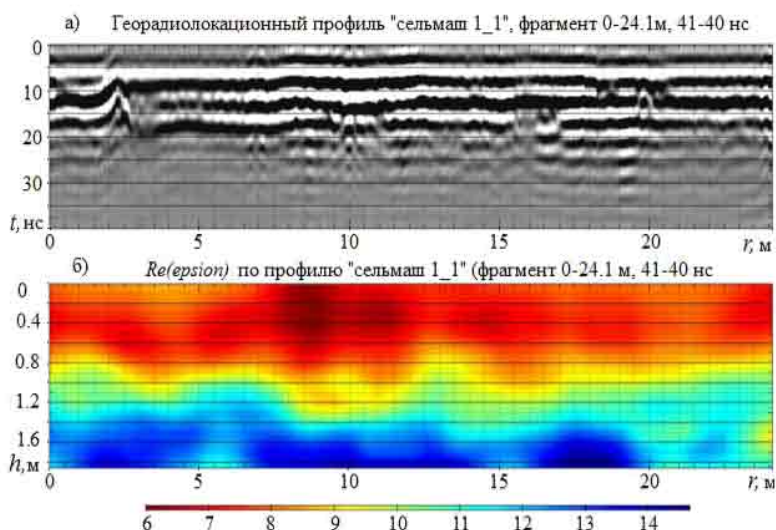


Рис. 213. Фрагмент радарограммы (а) и разрез атрибута ϵ (б) по рекогносцировочному профилю «Сельмаш 1_1». Количество опорных точек 1315 (29 точек на 1 м²); $r_{\varphi} = 90,184$; $\text{Re}(\epsilon)_{\varphi} = 9,54$

Данные автоматической обработки всех радарограмм площадки детальных рекогносцировочных работ отображены на карте горизонтального сечения ϵ (рис. 214). Синий цвет соответствует плотному грунту, желтый и красный – относительно разуплотненным грунтам.

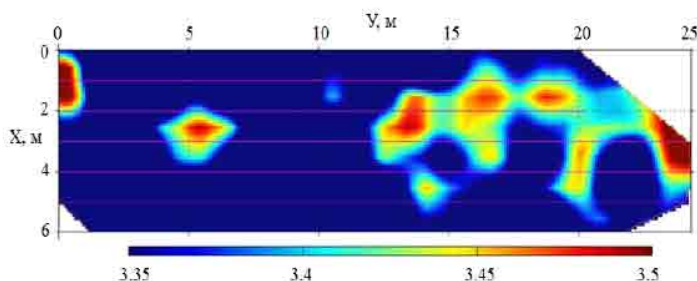


Рис. 214. Карта горизонтального сечения осредненного интервала глубин 0,5–1,5 м (атрибут Q-factor) площадки детальных рекогносцировочных работ РЛЗ в цехе тракторов ООО «Комбайновый завод «Ростсельмаш»

В результате инженерно-изыскательских геофизических работ технологией РЛЗ в комплексе с контрольным бурением получены следующие результаты:

1. Выявлены и о контурены области разуплотненного грунта под основанием двухуровневого пола, распределение которых по площади цеха имеет мозаичный характер.

2. Литологический состав грунтов в пределах выявленных аномалий весьма разнородный за счет присутствия строительного мусора из щебня и перегнившей древесины. Плотность в воздушно-сухом состоянии таких грунтов имеет диапазон значений $0,88\text{--}0,96\text{ г/см}^3$, в то время как за пределами выявленных аномалий плотность балластного слоя (песок или щебень с песком) непосредственно под конструкциями первого пола составляет $1,56\text{ г/см}^3$.

3. В процессе бурения контрольных скважин грунтовые воды до глубины 4,0 м не встречены.

4. Локальные участки разуплотненных грунтов в основании полов могут быть «залечены» с помощью инъекционных методов усиления грунтов оснований.

В качестве второго примера решения инженерных задач на строительных объектах можно привести исследования площади закрепления грунтов основания ленточного фундамента здания МУЗ «Городская поликлиника № 2» объекта культурного наследия регионального значения «Мемориальное здание Б. дом Алафузова, 1880 г.» по адресу: ул. Греческая, 104, в г. Таганроге Ростовской области. Цель работ состояла в решении инженерно-технической задачи по контролю георадиолокационным и сейсморазведочными методами закрепления грунтов основания фундаментов.

Схема (ситуационный план) расположения геофизических профилей, заснятых РЛЗ на исследуемом объекте, приведена на рис. 215.

Обработка данных РЛЗ осуществлялась при помощи программы автоматизированной обработки георадиолокационных данных «ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ».

Сейсморазведочные наблюдения выполнялись с использованием 24-канальной компьютеризированной сейсмостанции «Лакколит-24 М2». Размещение геофизических профилей приведено на рис. 216. Сейсморазведочные профили сопряжены с профи-

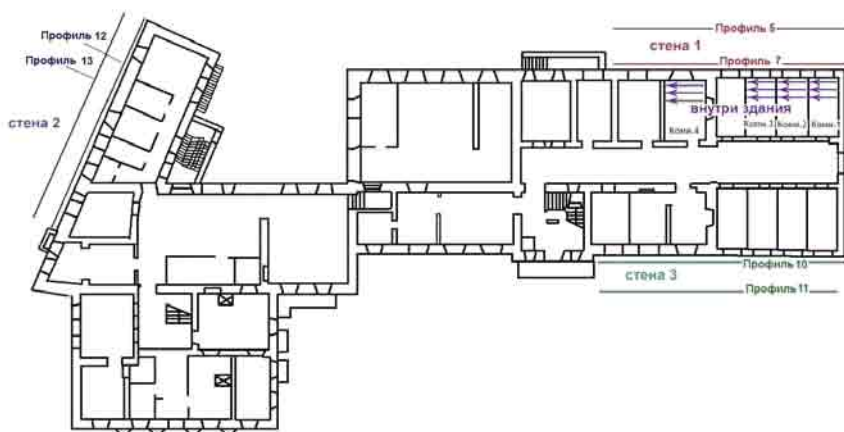


Рис. 215. Схема расположения профилей РЛЗ на исследуемом объекте

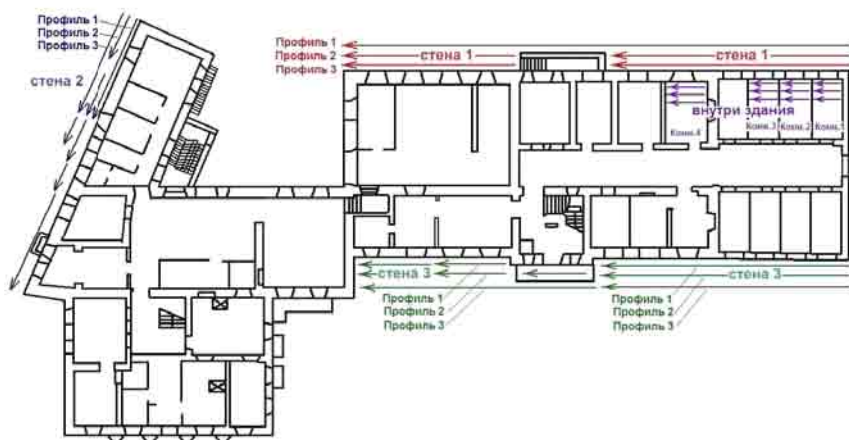


Рис. 216. Схема расположения сейсмических профилей на исследуемом объекте

лями РЛЗ. Первый профиль прокладывался в непосредственной близости от стен, а второй на расстоянии 2,5 м от них. Профили отработаны по методикам продольного профилирования и сейсмопросвечивания. Применена многоточечная система наблюдений (пункты удара (ПУ) возле каждого сейсмоприемника кувал-

дой весом 5 кг по металлической плите). Шаг между пунктами приема колебаний (ПП) составлял 1 м.

На рис. 217 показаны сечения 3D-сборки георадиолокационного обследования по профилям у стены 2. Для наглядности разрезы сегментированы.

Анализ приведенных на рис. 217 разрезов Q-фактора позволяет сделать следующие выводы: 1) чем темнее сегмент, тем выше

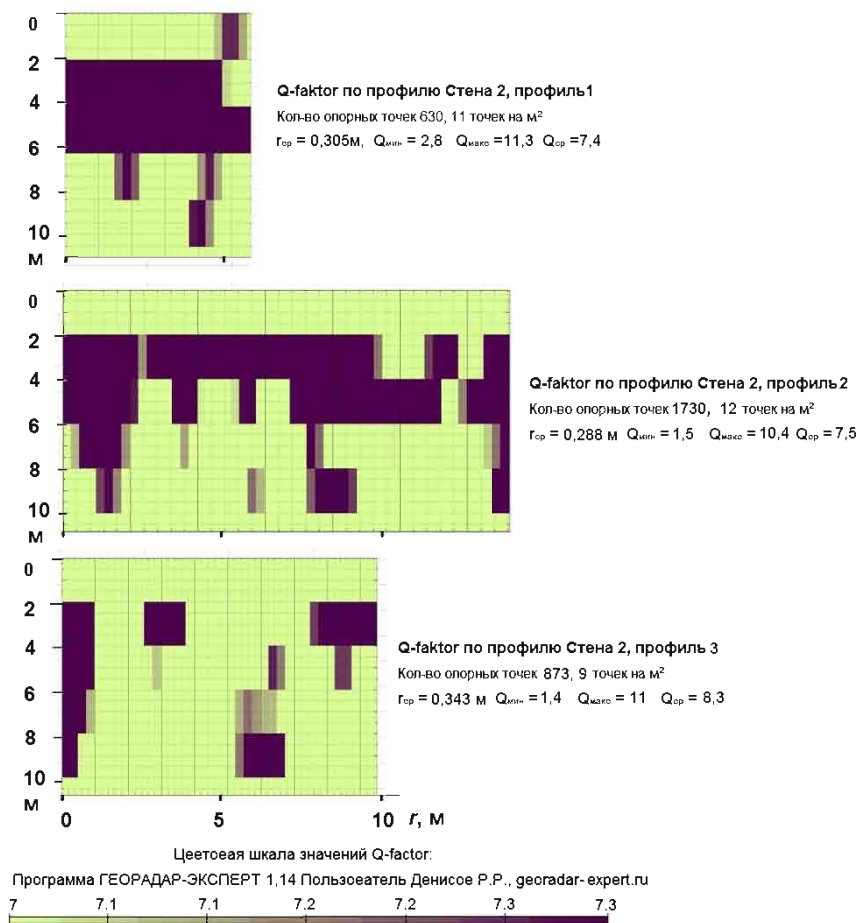


Рис. 217. Сечение 3D-сборки (Q-фактор) по стене 2

значение атрибута, т. е. темный цвет соответствует наиболее укрепленным участкам; 2) чем ближе к фундаменту располагается георадиолокационный профиль, по результатам обработки которого построен разрез, тем больше в этом разрезе сегментов, которые имеют повышенные значения атрибута и положение которых соответствует грунтам ниже уровня фундамента.

На рис. 218 сопоставлены сейсмогеологические разрезы в изолиниях скоростей распространения упругих волн. Сравниваются

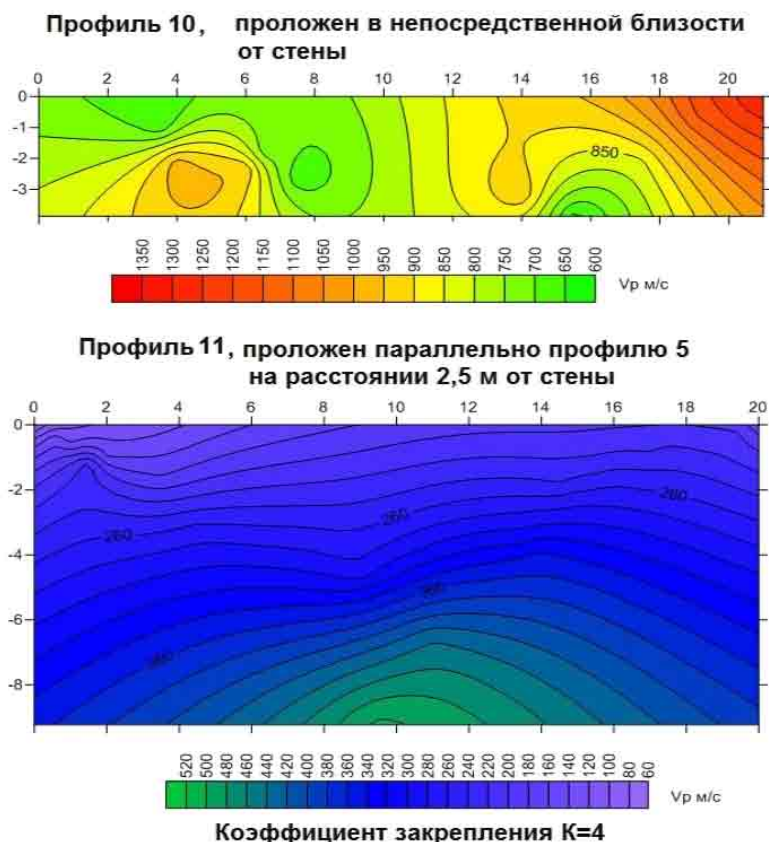


Рис. 218. Сопоставление сейсмогеологических разрезов по параллельным профилям, проложенным в непосредственной близости от стены 2 и на удалении от нее на расстоянии 2,5 м

скоростные характеристики грунтов непосредственно возле стены и на удалении 2,5 м от нее. Отношение скоростей распространения упругих волн вблизи и на удалении от стен выражается показателем упрочения грунтов K .

На рис. 219 показана томограмма горизонтального среза укрепленного основания фундамента стены 1. Представленная картина свидетельствует о квазиоднородном внедрении песчано-цементной смеси в подфундаментный грунт. Преобладающие значения скоростей распространения упругих волн в закрепленном грунте составляют 400–800 м/с, что характерно для относительно прочных грунтов. Положительная, большой амплитуды аномалия скорости, наблюдаемая в нижнем правом углу, не типична для исследуемых грунтов и, по всей видимости, связана с большим шагом дискретизации и неточностями пикировок первых вступлений.

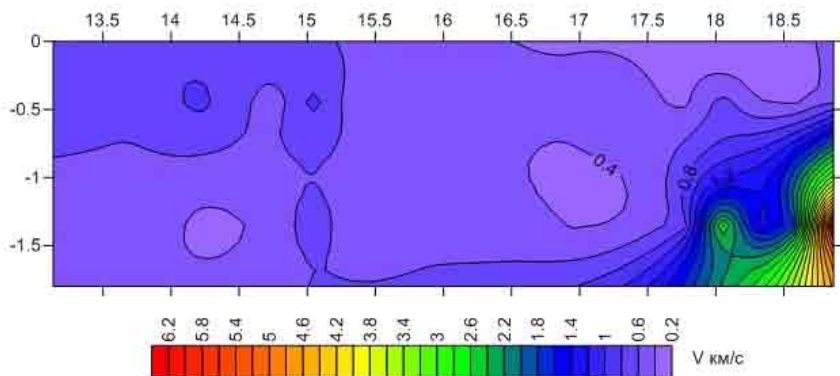


Рис. 219. Результаты сейсмодосвещения грунтов основания ленточного фундамента у стены 1.

Таким образом, на площади закрепления грунтов ленточного фундамента решены следующие задачи:

1. Георадарной съемкой подтвержден факт наличия под основанием фундаментов грунтов повышенной прочности, что прослеживается на разрезах Q -фактора. Установлено, что чем ближе

к фундаменту располагается георадиолокационный профиль, тем больше в этом разрезе сегментов, которые имеют повышенные значения атрибута и положение которых соответствует грунтам ниже уровня фундамента. Темный цвет соответствует наиболее укрепленным участкам.

2. Сейсморазведкой МПВ выполнен анализ степени укрепления грунтов посредством сопоставления скоростей распространения упругих волн в разрезах непосредственно возле фундамента и на удалении от него на расстоянии 2,5 м. Отношения скоростей распространения упругих волн вблизи и на удалении от стен выражены показателем закрепления грунтов K . Среднее значение этого коэффициента равно 4, что характеризует надежную степень закрепления.

3. Сейсмопросвечиванием изучено распределение скоростей распространения упругих волн в закрепленном грунте в горизонтальном сечении под подошвой фундамента, что реализовано путем построения томограммы по алгоритму лучевого приближения. Значения скоростей распространения упругих волн в закрепленном грунте составили 400–800 м/с, что характерно для относительно прочных грунтов.

Предметом исследования геофизической экологии (экологической геофизики) являются физическое состояние и свойства, изменение в пространстве и во времени естественных (космических и земных), искусственных (антропогенно-техногенных) физических полей окружающей человека и биоту среды. Объектами ее исследования выступают:

- 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 (фаии, урочища, наборы урочищ, ландшафты), взаимосвязанные в пространственно-временной организации материи на уровне ландшафтной среды Земли);
- поверхностная гидросфера (акватории рек, озер, шельфы морей и океанов);
- биосфера и техносфера (биотехносфера);
- социосфера.

Выделяют три основных направления экогеофизики, связанных со структурными (геодинамическими) нарушениями, вещественными (геохимическими) и энергетическими (полевыми и физическими) видами загрязнения окружающей среды.

В результате изучения геологической среды (ГС) с помощью геофизических методов выявляются статические и динамические (изменяющиеся во времени) геофизические аномалии над источниками загрязнения. Основными видами загрязнения ГС являются радиоактивное и геохимическое.

Экорациометрия предназначена для выявления и изучения радиоактивных аномалий природного и техногенного происхождения. Наибольшую опасность представляют радиоактивные заражения разными радионуклидами после аварий и катастроф. Для изучения распределения естественных и искусственных радионуклидов используются радиометрические методы, а главное – осуществляется проведение радиационного мониторинга. Основными методами экорациометрии являются аэро- и автогамма-спектрометрические съемки, предназначенные для измерения не только суммарного гамма-излучения (I_γ) и его составляющих по урану-радию, торию и калию-40, как при геологических поисках, но и по цезию-137, кобальту-60. Это повышает надежность выявления и мониторинга техногенных радиоактивных аномалий.

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

Аэрогамма-спектрометрические съемки выполняются в масштабе 1:25 000 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 1:25 000 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 $I_{\gamma} < 20$ мкР/ч и $I_{\text{рад}} < 0,1$ Ек/ч.

Загрязнение почв, грунтов, подземных вод нефтепродуктами становится особенно частым в результате непрерывных или залповых утечек нефтепродуктов. 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. При заполнении сухих пород или вытеснении из них застойных вод 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 электролит, 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 η ;
- 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, приспособляя 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.

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 т. д., 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 детальные исследования 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, пробы 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 геофизи-

ки. 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. Они обеспечивают картирование по параметру концентраций химических элементов, осуществляемое дистанционными (бесконтактными) способами, достаточно точно и экономически эффективно.

Как и во всех областях применения геофизики, в геоэкологии эффективны преимущественно комплексы из нескольких методов (гравиметрические, магнитометрические, электромагнитные, сейсмоакустические, термические, ядерные с использованием четырехуровневых технологий: космической и воздушной, наземной и акваториальной, скважинной и подземной). 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 геометрической 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 (4D) (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 гео-

физических 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 с целью нахождения источников загрязнения (аэрокосмические и наземные), другие – для изучения выявленных источников с составлением возможных прогнозов воздействия на биосферу, т. е. в целях мониторинга (наземно-аквальные и скважино-подземные методы). В качестве примера (см. рис. 210) 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 информации;

- установление одномерных или многомерных связей между геофизическими и другими, например геохимическими, параметрами и свойствами объектов исследования на основе параметрических совместных наблюдений на ключевых участках с получением эмпирических, логических, эвристических количественных соотношений для определения через физические параметры статических и динамических геохимических и прочих характеристик.

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). На этом объекте скопившиеся отходы насыщены метаном, значительно прогреты вследствие частых возгораний, отличаются высокими концентрациями ряда тяжелых металлов, которые во много раз превосходят содержание в земной коре и фоновой почве (рис. 220).

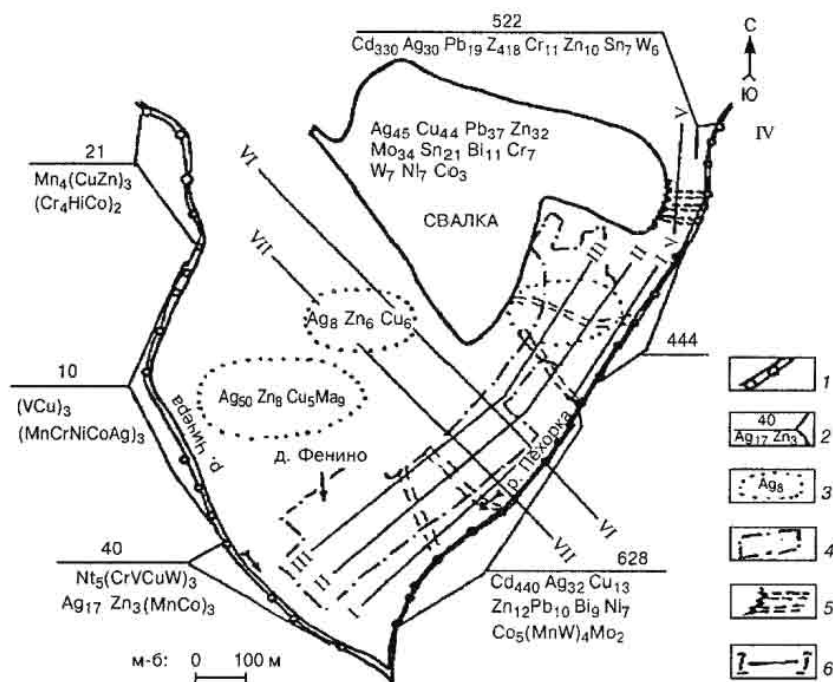


Рис. 220. Загрязнение тяжелыми металлами техногенных грунтов свалки, почв и донных отложений в районе ПЗТВО «Кучино»:

1 – точки отбора проб донных отложений; 2 – параметры загрязнения (в числителе – суммарный показатель загрязнения, в знаменателе – элемент загрязнения с коэффициентами относительно фоновых значений); 3 – зоны загрязнения почв с коэффициентами элементов-загрязнителей относительно фоновых значений; 4 – границы д. Фенино; 5 – зона отекания свалочного фильтрата в р. Пехорке; 6 – профили наземных геофизических наблюдений

Свалочный фильтрат на исследуемом объекте, насыщающий массив отходов, представляет собой темно-коричневую жидкость с минерализацией 10–12 г/д 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. 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.

Геофизические наблюдения выполнялись вдоль периметра свалки в окрестностях д. Фенино. Использовались наземные методы электропрофилирования (ЭП) и зондирования (ВЭЗ), а также 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 (русловой) геофизики было установление мест разгрузок подземных вод в руслах рек, и в частности картирование зоны разгрузки свалочного фильтрата в р. Пехорке. Геофизические работы дополнялись данными почвенной геохимической съемки и гидрохимического опробования подземных и поверхностных вод (см. рис. 219). Геофизические наблюдения позволили 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.

Одним из основных видов исследований в экологической геофизике является техногенное загрязнение, которое представляет собой присутствие в окружающей среде (литосфере, атмосфере и гидросфере) физических полей, создаваемых человеком в процессе реализации современных технологий. Техногенное физическое загрязнение наиболее характерно для территорий крупных городов, промышленных районов и других интенсивно используемых территорий. На рис. 221 представлена схема формирования общего техногенного загрязнения, одним из компонентов которого является физическое загрязнение.

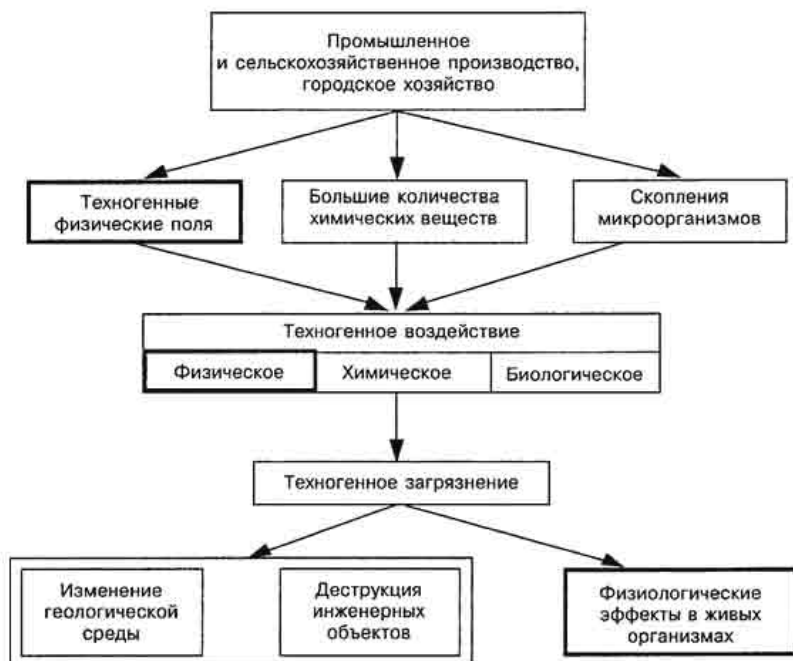


Рис. 221. Формирование и последствия техногенного загрязнения среды

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.

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. 7).

Таблица 7

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	0,02–1,0	0,12	0,20–0,40
Температурное	°С	от -2 до +1	от -160 до +1500	16–24	–
Электрическое: блуждающие токи	мВ/м	5–10	10–1600	–	3–5
атм. электричество	+ион/ –ион	1,15–1,2	1,0–1,5	–	–
Электромагнитное	кВ/м	10^{-6}	–	5,0	–
Радиационное	мЗв/ч	$(3-5) \cdot 10^{-5}$	$18 \cdot 10^{-5}$	$24 \cdot 10^{-6}$	–

Шумовое, или акустическое, загрязнение среды относится к категории чисто экологических факторов (прямого экологического воздействия), поскольку оказывает непосредственное 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.

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. 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. 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. Из табл. 7 видно, что как фоновый, так и техногенный уровень вибрации может превышать допустимый санитарный предел.

Тепловое загрязнение среды представляет собой серьезную геологическую проблему, так как уровень ежегодного прироста тепловой энергии в больших городах может достигать величины 10^{10} Дж/м². Источниками теплового загрязнения служат 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. В пределах территорий крупных городов на небольших глубинах (10–30 м) формируются обширные геотермические аномалии с превышением температуры над фоновой на 6–10 °С. 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.

Электрическое загрязнение среды проявляется в формировании электрического поля блуждающих токов и в перенасыщении приземного слоя атмосферы ионами (аэроионами) разной полярности, в первую очередь положительными ионами тяжелых элементов. Источниками электрического загрязнения служат промышленные предприятия, электрифицированные железные дороги, станции катодной противокоррозионной защиты (см. табл. 7).

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. 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 прямого воздействия на живые организмы и на человека не оказывает, но способно вызывать негативные изменения коррозионной обстановки, что, в свою очередь, увеличивает вероятность повреждения и выхода 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. В естественных условиях ионизация воздуха происходит под действием радиоактивного излучения Земли, космического и ультрафиолетового солнечного излучения. 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 $q < 1,20$. Превышение этой величины свидетельствует о неблагоприятности экологического состояния приземного слоя атмосферы.

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). Параметры, характеризующие электромагнитное загрязнение, приведены в табл. 7. 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 – весьма опасный с экологических позиций фактор прямого воздействия на живые организмы.

В условиях промышленно-городских агломераций суммарная, естественная и техногенная, мощность дозы излучения, как правило, не превышает в обычной обстановке (если не происходит аварийных выбросов или утечек радиоактивных материалов) санитарных норм (см. табл. 7). Однако 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. Человеческий организм отличается особой чувствительностью к радиационному воздействию. Безопасной считается мощность эквивалентной дозы облучения $(8-24) \cdot 10^5$ мЗв/ч (или 0,7–1 мЗв/год).

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. Число измеряемых параметров может варьировать в зависимости от вида создаваемого источниками поля. 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. Примером, иллюстрирующим возможный характер изменения

техногенного физического поля по мере удаления от его источника, могут служить графики изменения уровня вибрационного

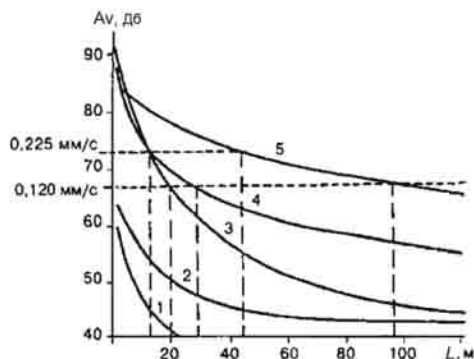


Рис. 222. Изменение поля вибрации, создаваемого различными источниками, при увеличении расстояния до источника:

1 — вентиляционная шахта; 2 — автомобильный транспорт; 3 — железнодорожный транспорт; 4 — трамвай; 5 — механический копёр

поля, создаваемого различными источниками, в зависимости от расстояния до них. Эти графики приведены на рис. 222.

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 физи-

ческих 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, уровни воздействия (загрязнения) можно отображать изолиниями соответствующих параметров (уровень шума, виброскорость или виброускорение, температура, напряженность электрического поля, коэффициент униполярности, мощность 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 экологи-

ческую обстановку 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*. Наглядно такое деление приведено в табл. 8, где также показана градация вызываемых физическим загрязнением изменений состояния человеческого организма от безусловного здоровья до патологии (болезни), коррелирующая с соответствующими оценочными геоэкологическими категориями.

Таблица 8

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

В качестве граничных значений при разделении уровня воздействия или степени загрязнения окружающей среды на указанные четыре категории выбираются количественные показатели. Они регламентируются действующими санитарными и техническими нормативными документами или устанавливаются опытным путем и отвечают определенному состоянию среды, совокупности условий существования живых организмов, и в пер-

вую 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 65 дБ – умеренному воздействию (средней степени шумового загрязнения, области экологического риска и дискомфортным условиям жизнедеятельности людей), интервал от 65 до 100 дБ – сильному воздействию, высокой степени шумового загрязнения, области экологического кризиса и очень дискомфортным условиям существования для человека, а интервал за пределами 100 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 вида загрязнения (так называемые аналитические карты, планы или схемы) либо 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.

Таким образом, как вещественное (химическое), так и энергетическое (физическое) загрязнение определяет экологическое состояние среды обитания живых организмов и жизнедеятельности людей. Отсюда возникает необходимость создания *медицинской геофизики, как важнейшего раздела экологической геофизики.*

Результаты эколого-геофизического обследования электромагнитного загрязнения городских территорий, включая участки размещения подземных коммуникаций, можно рассмотреть на примере измерений в Советском районе г. Ростова-на-Дону. Применен малогабаритный прибор электромагнитного излучения (ЭМИ). Обработка и представление геофизических материалов произведены посредством информационной технологии многофакторного моделирования-прогнозирования, основанной

на использовании программных средств-комплексов ПК ОКАР и PC Viewer (ВНИГРИуголь), а также ПС общего назначения (MS Office, Surfer и др.).

Диапазон частот, в котором достигается наибольший уровень суммарной электромагнитной активности, занимает полосу от 2 до 45 кГц (рис. 223, а). В этом диапазоне для различных соотношений удельного электрического сопротивления (ρ) и диэлектрической проницаемости (ϵ) различаются волновая (диэлектрики), промежуточная (полупроводники) и индукционная (проводники) зоны. Этим зонам соответствуют определенные зависимости изменения длин волн (λ). Для частот 10 и 100 кГц длины волн изменяются от 3 до 300 м (рис. 223, б). Это значит, что возможно изучать локальные объекты, размер которых в каком-либо одном направлении превышает длину волны. Кроме того, в области расположения таких объектов могут наблюдаться эффекты, связанные с явлениями дифракции, интерференции, преломления, отражения, преизлучения и т. д.

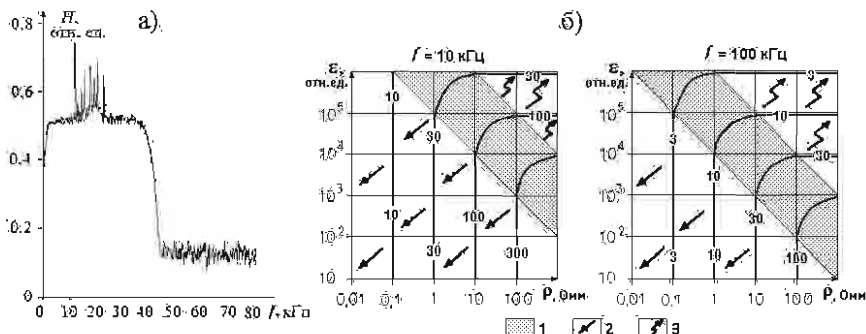


Рис. 223. Интенсивность ЕМП на различных частотах (а) и графики изменения длин волн (λ) в зависимости от удельного электрического сопротивления (ρ) и диэлектрической проницаемости (ϵ) в проводящей поляризуемой среде при различной частоте (f) электромагнитного поля (б):

шифр – длина волны в м; 1, 2, 3 – промежуточная, индукционная и волновая зоны

Для регистрации ЕМП разработан и реализован в виде макета малогабаритный прибор электромагнитных измерений (ЭМИ). Аппаратура построена по модульному принципу из отдельных функционально и физически независимых блоков, включающих электронную записную книжку. Датчик поля трехкомпонентный, инвариантный, состоит из трех взаимно перпендикулярных магнитных антенн. Блок-схема измерителя изображена на рис. 224.

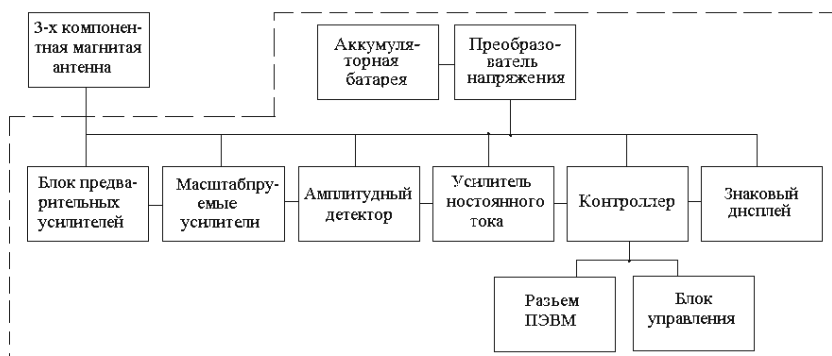


Рис. 224. Блок-схема ЭМИ

Работа ЭМИ осуществляется путем приема сигналов датчиками трехкомпонентной магнитной антенны H_x , H_y и H_z . Сигналы усиливаются с помощью предварительных усилителей и подаются на масштабируемые усилители. Последние сопряжены с амплитудным детектором и усилителем постоянного тока. Далее включается блок контроллера и производится вычисление параметра $H_{инв} = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}$. Регистрация значений $H_{инв}$ производится в условных единицах (отсчетах автоматического цифрового преобразователя – АЦП), а после ввода в персональный компьютер (ПК) при необходимости производится пересчет в абсолютные единицы (мкВ или А/м). Зарегистрированная информация сохраняется в запоминающем устройстве (ЗУ) независимо от повторных включений и выключений прибора.

Режим стирания позволяет очистить ЗУ при начале новой серии измерений, а также при ошибках в нумерации точек или регистрации отсчетов. При пешеходных работах измерения и регистрация производятся по командам с пульта (нажатие кнопки) либо по командам от таймера через 1, 2...10 с.

На рис. 225 выполнено сопоставление графиков $H_{инв}$ по профилям, ориентированным вдоль просп. Стачки в г. Ростове-на-Дону. Попокетное рассмотрение графиков показывает, что интенсивность поля в дворово-парковой зоне характеризуется аномальными «всплесками», приуроченными к подъездам многоквартирных домов.

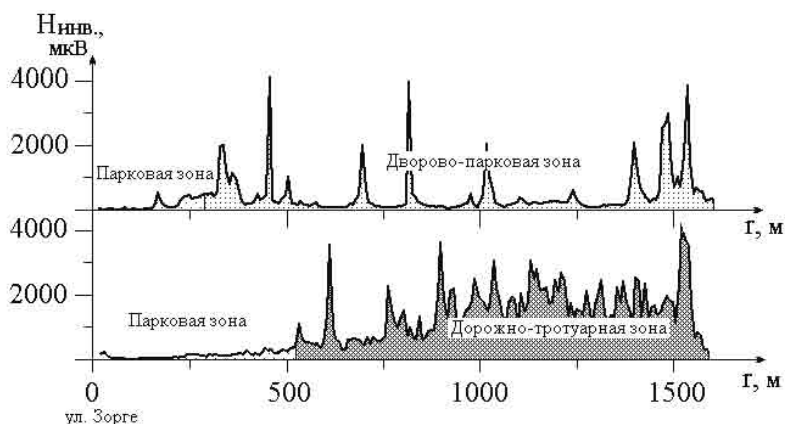


Рис. 225. Сопоставление графиков $H_{инв}$ по профилям, ориентированным вдоль просп. Стачки в г. Ростове-на-Дону

Амплитуды аномалий устойчивы, с 90 %-ной повторяемостью при повторных наблюдениях. Их интенсивность зависит от этажности зданий. Аномальные «всплески» осложняются в случае пересечения профиля линиями наземных и подземных коммуникаций. Соответственно в дорожно-тротуарной зоне (борт проезжей части) аномальное поле повышено вследствие скопления наземных и подземных линий электропередач и насыщенности транспортом. Наибольшие по интенсивности аномалии, которые

на порядок выше аномальных значений в дорожно-тротуарной зоне, регистрируются в толщах прохождения высоковольтных линий электропередач (ЛЭП) и железных дорог. Радиус их действия распространяется на 0,5–0,7 км. Вблизи и нулевой интенсивности ЭМП регистрируется вдоль русел ручьев и рек.

Результатом профильных пешеходных и автомобильных съемок являются квартальные, районные и в целом городские карты электромагнитной загрязненности, которые строятся с помощью специальных программ типа Arcinfo (рис. 226).

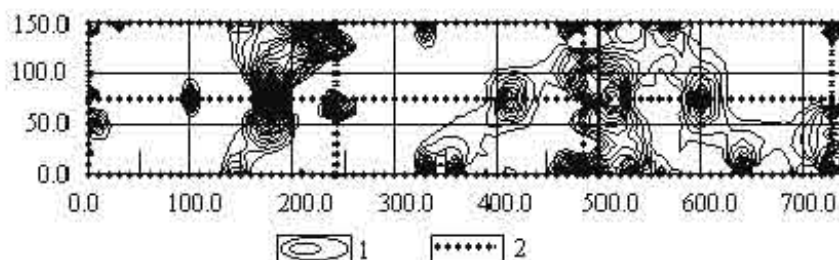


Рис. 226. Фрагмент карты электромагнитной загрязненности в квартале муниципальной застройки в Советском районе г. Ростова-на-Дону:

1 – изолинии H_m , мВ; 2 – профили и пункты наблюдений

Малонвученым является вопрос электромагнитной загрязненности в местах размещения трубопроводов. Эти подземные коммуникации, в особенности магистральные, как известно, располагаются параллельно кабельным линиям, создающим электромагнитные поля различной степени интенсивности, имеют многочисленные врезки и в совокупности их можно рассматривать в качестве сопутствующих излучателей. На рис. 227, I и 227, II приведены графики H_m , полученные посредством мониторинговых наблюдений на профиле, сечущем серию колодцев подводящих подземных коммуникаций возле здания института ВНИГРИУтоль в г. Ростове-на-Дону (фрагмент а) и на профиле за чертой города (фрагмент б).

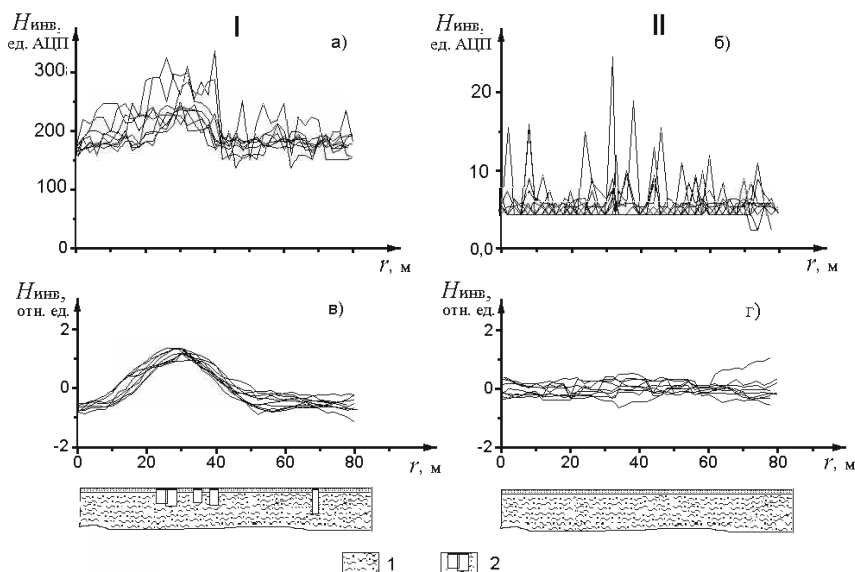


Рис. 227. Графики значений $H_{инв}$, полученные посредством многократных наблюдений в условиях городских агломераций (I) и за чертой города (II):

а-г – форма графиков в абсолютных (а, б) и нормированных (в, г) значениях;
 1 – покровные отложения; 2 – колодцы подземных коммуникаций

Нетрудно увидеть, что поле в месте скопления колодцев подводящих коммуникаций отмечается значениями порядка 100–300 ед. АЭП, это на порядок ниже значений в тротуарно-дорожной зоне и на участках расположения магистральных коммуникаций. За чертой города электромагнитная загрязненность не превышает 30 ед. АЭП. При этом нормирование кривых, т. е. их приведение к относительным единицам, позволяет устранить разницу в значениях, вызванную аппаратными причинами, погодными условиями и т. д. (фрагменты I в и II г).

Городские уличные (магистральные) подземные коммуникации, включающие трубы теплотрассы, водопровода, канализации, «ливневки», силовых и телефонных кабелей, изучались на газонной территории по ул. Зорге. Одновременно с измерениями ЭМП выполнялись магниторазведочные и радиометрические наблюде-

ния. Обработка и представление геофизических материалов произведены с помощью программных средств-комплексов ПК OKAP и ПС Viewer, а также ПС общего назначения (MS Office, Surfer и др.). Сущность технологии многофакторного моделирования-прогнозирования – в аппроксимации измеренных параметров геофизических полей в программе OKAP_28_Large с возможностью анализа распределения этих параметров по любым произвольным направлениям как в пределах, так и за пределами участка исследований с последующим отображением деформации экогеофизических полей в программе Viewer_9.

На рис. 228, а и 229, а приведена схема участка геофизических работ размером 40×40 м. Выполнено сеточное покрытие 5×10 м с регуляризацией сети. Сформированы трансформированные сеточные файлы:

1) магниторазведочных данных (Mag, Mag1 и Mag2 – разность и значения поля при вертикальном положении датчика суммарного вектора магнитного поля T непосредственно у дневной поверхности и на высоте 1,5 м);

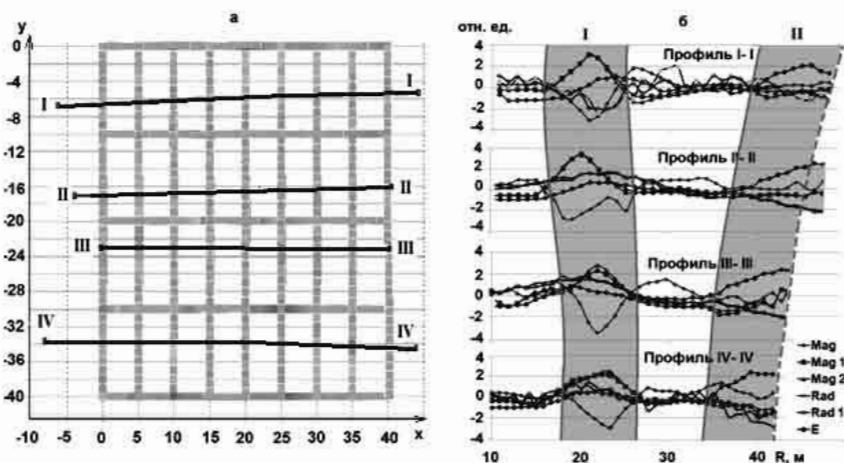


Рис. 228. Схема участка и положение произвольно заданных на ней профилей (а) и сопоставление совокупных графиков измеренных параметров экогеофизических полей (б)

2) показателей естественной радиоактивности J_γ (Rad и Rad1 – J_γ у дневной поверхности и на высоте 1,5 м);

3) значений ЭМП, зарегистрированных прибором ЭМИ.

Заключительным этапом произведен анализ интенсивности распространения геофизических полей по произвольно заданным направлениям вкост трасс подземных коммуникаций (рис. 228, а) и в диагональных направлениях к ним (рис. 229, а).

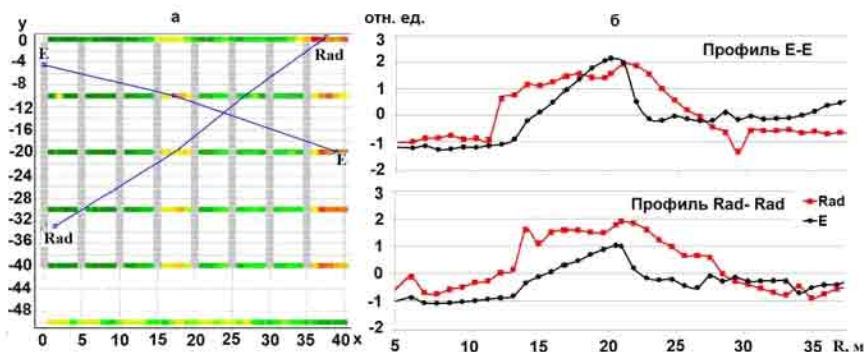


Рис. 229. Схема диагональных профилей (а) и сопоставление графиков электромагнитной $H_{\text{эм}}$ и радиационной J_γ загрязненности на участке работ (б)

На профилях, ориентированных ортогонально трассам подземных коммуникаций, прослеживаются две зоны аномальных экогеофизических полей (рис. 228, б). Зона I выделяет полосу нахождения труб теплотрассы и характеризуется аномальными значениями магнитного и радиационного полей, а зона II – полосу местонахождения труб водопровода, канализации, силовых и телефонных кабелей и характеризуется высокими значениями ЭМП. На рис. 229, б отображена ситуация электромагнитной (профиль E-E) и радиационной (профиль Rad-Rad) загрязненности по линиям диагонально заданных профилей. Наблюдается естественное расширение зоны.

Вопросы и задания для контроля самостоятельной работы

1. Что собой представляет геолого-геофизическая среда как объект изучения геофизическими методами?
2. В чем состоят основные задачи и методы гидрогеологической геофизики?
3. Какие методы геофизики применяются для изучения обводненности и минерализации подземных вод?
4. Каковы основные задачи и методы инженерной геофизики?
5. Какими методами геофизики изучаются физико-механические и деформационно-прочностные свойства грунтов?
6. Как исследуются подземные коммуникации геофизическими методами?
7. В чем отличие и специфика методов экологической геофизики?
8. Что означают понятия «геоэкология», «экогеофизика» и «геофизическая экология»?
9. Какие основные задачи решает экологическая геофизика?
10. Найдите в сети Интернет описание методов геофизики, с помощью которых изучается геохимическое загрязнение почв, грунтов, подземных вод.
11. В чем заключается геоэкологическая опасность мест размещения твердых бытовых отходов и какие геофизические методы применяются для их изучения?
12. Какие бывают виды электромагнитной загрязненности и как ее изучать геофизическими методами?
13. Что собой представляет шумовая загрязненность и какие геофизические приборы применяются для ее изучения?
14. Как изучается природная и техногенная вибрация в экологической геофизике?
15. Составьте таблицу оценочных характеристик физического загрязнения окружающей среды по геофизическим параметрам и показателям.

Заключение

Знакомство с настоящим учебником показывает, что практическая реализация комплексирования геофизических методов весьма многогранна, поскольку при решении геологических и экологических задач они используются совместно на базе экономически обоснованных решений. Возможности геофизики значительно расширяются при проведении работ не только на поверхности Земли, но и под землей и в верхнем полупространстве вплоть до космоса; рациональный геологоразведочный комплекс включает геофизические, геологические, геохимические и технико-механические средства исследований.

В настоящее время установились специальности геологов, гидрогеологов, геофизиков, геохимиков, геоэкологов и т. д. Каждая из них имеет ряд специализаций, т. е. существует более дробная, узкая специализация уже внутри какого-то одного метода. Кроме того, выделяют теоретиков, методистов, аппаратурщиков и т. п. Без подготовки таких специалистов, в совершенстве владеющих сравнительно узким кругом вопросов, нельзя развивать существующие геофизические методы и тем более создавать новые. Поэтому современная геологическая служба, базирующаяся на комплексировании, качественно отличается от таковой в прошлом. Вместо одного специалиста-универсала сегодня над решением проблем работают коллективы специалистов самых различных профилей. В этом и проявляется развитие «по спирали», но на гораздо более высоком уровне. Типичным примером такого развития может служить появление новой науки «Экологическая геофизика».

Важнейшей тенденцией дальнейшего развития экологической геофизики является совершенствование имеющихся рациональных комплексов и разработка новых, которые обусловлены возникновением ранее не существовавших проблем и развиваются в тесной связи с общим научно-техническим прогрессом, а затем, соответственно, замещаются более передовыми методами и технологиями.

Таким образом, общая геофизика и ее ветвь – экологическая геофизика – развиваются в соответствии с основными закономерностями научно-технического прогресса при широком использовании новейших достижений в области физики, математики, информатики, техники.

Основные термины и определения

Аквагеофизика (морская, озерная, речная) – технологии изучения естественных и искусственно созданных геофизических полей при помощи плавсредств. основные термины и определения

Анизотропия удельного электрического сопротивления – зависимость удельного сопротивления от направления пропускания постоянного тока через гетерогенную среду.

Аэрогеофизика – технологии изучения естественных и искусственно созданных геофизических полей при помощи летательных аппаратов.

Волны обменные – тип волн, когда с одной стороны границы падает продольная волна, а с другой стороны границы, после отражения, эта волна входит в среду как поперечная.

Волны объемные – продольные и поперечные волны, распространяющиеся по всему объему упругой среды.

Волны плоские неоднородные – волны, амплитуда которых в процессе их распространения не остается постоянной, а быстро затухает с глубиной.

Волны плоские однородные – волны, амплитуда которых в процессе их распространения остается постоянной.

Волны поверхностные – волны, существующие вблизи поверхности раздела земля–воздух, т. е. на границе сред с разными физическими свойствами.

Волны рефрагированные – волны с искривленными сейсмическими лучами, обусловленными слоистостью среды.

Геотермическая ступень – величина, обратная геотермическому градиенту и выражаемая изменением глубины на один градус температуры.

Геотермический градиент – величина нарастания температуры горных пород на один метр глубины.

Геофизика – фундаментальная наука, ориентированная на изучение влияния физических полей Земли.

Геофизические исследования и работы в скважинах (ГИРС) – технологии изучения естественных и искусственно созданных геофизических полей в скважинах, основанные на различии горных пород по физическим свойствам и выполняемые путем перемещения в скважинах посредством одно- или многожильного кабеля приборов специальной конструкции.

Геофизический мониторинг – слежение, оценка и прогнозирование природно-техногенных процессов по изменениям связанных с ними физических полей.

Гравитационная постоянная – физическая константа в формуле закона Ньютона ($f = 66,7 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$).

Гравитационное поле – материальная среда взаимодействия механических масс, описываемого законом Ньютона.

Динамический диапазон – отношение максимальных амплитуд регистрируемых колебаний к минимальным.

Дисперсия скорости аномальная – зависимость скорости от частоты, когда скорость уменьшается с увеличением длины волны.

Диэлектрическая проницаемость – коэффициент пропорциональности между электрической индукцией и напряженностью электрического поля, показывающий, во сколько раз уменьшается сила взаимодействия электрических зарядов при переносе их из вакуума в исследуемую среду.

Закон Гука – прямо пропорциональная связь между упругими напряжениями и деформациями.

Земной сфероид – однородный сфероид, сплюснутый у полюсов с полярным радиусом 6357 км и экваториальным – 6378 км, коэффициент сжатия – 1/298,25.

Зоны Френеля – кольцевые области, на которые разбивается фронт волны в поле смещений (возмущений) среды.

Изодинамы, изогоны, изоклины – линии равных значений напряженности магнитного поля, углов магнитного склонения и наклонения.

Инверсия геомагнитных полюсов – изменение направления геомагнитного поля на обратное с интервалами от 0,5 до 50 млн лет.

Кажущееся удельное электрическое сопротивление – удельное электрическое сопротивление (УЭС) в неоднородных геологических разрезах, представляющее собой некоторую расчетную величину, зависящую от различия по УЭС и занимаемым объемам неоднородностей, слагающих тот или иной разрез (слоев, включений и т. д.), и величин измеренных параметров при заданном пространственном размещении электроразведочной установки.

Коэффициент Пуассона – отношение относительного сжатия к относительному растяжению.

Коэффициент четырехэлектродной установки $AMNB$ – множитель, зависящий от взаимного расположения измерительных (MN) и питающих (AB) электродов.

Магнитная восприимчивость – способность горных пород намагничиваться под воздействием внешнего магнитного поля.

Магнитная постоянная – магнитная проницаемость вакуума ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

Магнитное поле – материальная среда взаимодействия магнитных масс, описываемого законом Кулона.

Магнитные массы – мера количества магнетизма магнита.

Магнитные полюса – точки сосредоточения равных по величине и обратных по знаку магнитных масс, существующих только в паре.

Магнитный диполь – система двух разноименных точечных масс, расстояние между которыми мало по сравнению с расстоянием до точек измерений.

Магнитосфера – область вокруг Земли, занятая магнитным полем.

Методы ГИРС (картаж) – геофизические исследования, проводящиеся с целью: 1) расчленения геологических разрезов; 2) выявления и разведки полезных ископаемых; 3) определения глубины залегания и толщин пластов; 4) оценки технического состояния скважин и др.

Модели волновая, квазистационарная и стационарная – упрощенные модели электромагнитных полей, в которых обычно рассматривают теорию электроразведки для случаев непроводящей среды (волновая модель), медленно меняющегося (квазистационарная модель) и не изменяющегося во времени (стационарная модель) электромагнитного поля.

Модуль Юнга – коэффициент, характеризующий сопротивление горной породы растяжению или сжатию.

Мониторинг загрязнения – неотъемлемая часть мониторинга окружающей среды, представляющая собой комплексную систему наблюдений, оценки и прогноза изменений природных объектов под влиянием антропогенных, преимущественно техногенных факторов.

Область использования экогеофизических методов – сфера человеческой деятельности, относящаяся к изучению геоэкологических задач геофизическими методами.

Остаточная намагниченность – часть полной намагниченности ферромагнитных объектов после прекращения действия внешнего магнитного поля.

Плотность избыточная – разность плотностей вмещающих пород и пород структуры, создающих гравитационную аномалию.

Подземная геофизика – технологии изучения естественных и искусственно созданных геофизических полей в горных выработках (карьерах, шахтах), основанные на различии горных пород по физическим свойствам и выполняемые путем геофизического профилирования в подготовительных горных выработках и непосредственно в забоях, а также путем просвечивания (сканирования) массивов горных пород по схемам шахта – шахта, скважина – шахта, шахта – поверхность и т. д.

Поправка Буге – суммарная поправка за высоту и промежуточный слой.

Поправка Фая (поправка за высоту или «свободный воздух») – поправка в значение силы тяжести за притяжение масс, расположенных между физической поверхностью и уровнем моря.

Проводимость продольная суммарная – сумма продольных проводимостей отдельных слоев (отношение толщины к удельному электрическому сопротивлению) при протекании тока вдоль напластования.

Процесс становления поля – процесс распространения в Земле электромагнитного поля, возбуждаемого включением или выключением постоянного тока в питающей цепи.

Пульсации магнитные – короткопериодные вариации от токовых вихрей верхней части атмосферы.

Радиационное поле – материальная среда радиоактивных излучений Солнца, горных пород земной коры и техногенных источников на Земле.

Радиоактивность – самопроизвольный распад ядер атомов неустойчивых элементов, подчиняющийся определенному статистическому закону.

Радиоактивность искусственная – радиоактивность, создаваемая в устойчивых атомных ядрах путем облучения их потоками нейтронов или бомбардировкой протонами, нейтронами, α -, β -, γ -частицами.

Радиоактивные свойства пород – количественные показатели, характеризующие способность природных объектов создавать естественные и искусственные поля ионизирующего и нейтронного излучения.

Радиометрические съемки – изучение в заданном масштабе проявления и распределения радиоактивных полей посредством специальной аппаратуры в вариантах пешеходном, автомобильном и аэро-.

Рациональный комплекс геолого-геофизических методов – набор как традиционных, так и вновь разрабатываемых методов исследований, комплексная интерпретация которых позволяет решать основные геологические и геоэкологические задачи с повышенной полнотой и достоверностью.

Сейсмоволновое поле – материальная среда упругих колебаний вследствие деформаций, возникающих в природных объектах в результате ударов, взрывов, землетрясений и т. д.

Тепловая съемка – изучение теплового поля Земли на заданной территории посредством дистанционных методов (аэрокосмических исследований) – инфракрасной (ИК) и радиолокационной (РЛ) съемок, которые осуществляются с помощью специальной сканирующей аппаратуры (тепловизоров), где кванты электромагнитного излучения (инфракрасного и радиоволнового диапазонов) поступают на фотокатод и вызывают эмиссию электронов. Последняя определяется спектральным составом электромагнитного излучения, в свою очередь зависящего от температуры и материала поверхности, на которую направлен объектив тепловизора.

Тепловое поле – материальная среда существования тепловых потоков, создаваемых естественными (за счет солнечной радиации) и искусственными (в результате вулканической деятельности, действия термальных вод, техногенных тепловых объектов) источниками тепла.

Тепловой баланс – расчетное соотношение на основе закона сохранения и превращения энергии поступающих и расходующихся тепловых потоков.

Тепловой поток – передача тепла контактным способом посредством молекулярной теплопроводности.

Термические свойства горных пород – свойства, характеризующиеся параметрами удельной теплопроводности (λ), теплоемкости (C) и температуропроводности (a), связанными между собой соотношением $a = \lambda / C \delta$, где δ – плотность горной породы.

Термометрическая съёмка – изучение теплового поля Земли на заданном участке дневной поверхности контактным (с помощью термощупов) и бесконтактным (посредством тепловизоров) способами, сопровождаемое исследованием влажности почвогрунтов и ее колебаниями с течением времени.

Типовой комплекс геолого-геофизических методов – полный набор наиболее эффективных и хорошо освоенных в производстве методов и видов работ, которые обеспечивают достоверное решение поставленных геологических и геоэкологических задач с экономически оправданным уровнем затрат.

Ток проводимости – движение электрических зарядов в проводнике.

Ток смещения – изменение во времени (в зависимости от частоты) электромагнитного поля, т. е. волновой процесс смещения, релаксации, ориентации (дипольной, ионной, атомной) двойных электрических слоев.

Уровенная поверхность – поверхность, в любой точке которой сила притяжения направлена к ней нормально (вертикально) и гравитационный потенциал имеет постоянное значение.

Электромагнитное поле – материальная среда взаимодействия электрически заряженных частиц, в совокупном виде характеризующаяся суммой электрического и магнитного полей, приводящей к существованию в этой среде электромагнитных волн.

Эффективная глубина проникновения электромагнитной волны – расстояние, на котором амплитуда волны уменьшается в n раз.

Эффективность экогеофизических методов – обеспечение достоверного решения поставленных экологических задач с экономически оправданным уровнем затрат.

Литература

Основная

1. *Бродовой В. В.* Комплексирование геофизических методов. – М.: Недра, 1991. – 330 с.
2. Геофизика: учебник / под ред. В. К. Хмелевского. – М.: КДУ, 2012. – 320 с.
3. Комплексирование методов разведочной геофизики. Справочник геофизика / под ред. В. В. Бродового и А. А. Никитина. – М.: Недра, 1984. – 384 с.
4. *Никитин А. А., Хмелевской В. К.* Комплексирование геофизических методов: учебник для вузов. – Тверь: ГЕРС, 2004. – 294 с.
5. *Новицкий Г. П.* Комплексирование геофизических методов разведки. – Л.: Недра, 1974. – 256 с.
6. *Тархов А. Г., Бондаренко В. М., Никитин А. А.* Комплексирование геофизических методов. – М.: Недра, 1982. – 295 с.

Дополнительная

7. *Богословский В. А., Жигалин А. Д., Хмелевской В. К.* Экологическая геофизика: учебное пособие. – М.: Изд-во МГУ, 2000. – 256 с.
8. *Зинченко В. С.* Петрофизические основы гидрогеологической и инженерно-геологической интерпретации геофизических данных: учебное пособие для студентов вузов. – М.; Тверь: АИС, 2005. – С. 93–105.
9. *Кунин Н. Я.* Комплексирование геофизических методов при геологических исследованиях. – М.: Недра, 1972. – 267 с.
10. *Огильви А. А.* Основы инженерной геофизики: учебник для вузов / под ред. В. А. Богословского. – М.: Недра, 1990. – 501 с.
11. *Трухин В. И., Показеев К. В., Куницын В. Е.* Общая и экологическая геофизика. – М.: Физматлит, 2005. – 576 с.
12. *Фоменко Н. Е., Гроссу А. Н.* Физика горных пород: учебное пособие / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск, 2011. – 144 с.

Подписано в печать 29.12.2016.
Формат 60×84 1/16. Усл. печ. л. 16,97. Уч.-изд. л. 26,93.
Бумага офсетная. Тираж 40 экз. Заказ № 5590.

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1. Тел. (863) 247-80-51.