

**Геофизические методы
исследования земной коры.**

Инженерная геофизика

Глава 5. Инженерная геофизика

- 5.1. Геологическая среда и геофизические методы для ее исследования
- 5.2. Гидрогеологическая и почвенно-мелиоративная геофизика
 - 5.2.1. Геофизические методы при гидрогеологических съемках
 - 5.2.2. Поиски и разведка пресных подземных вод
 - 5.2.3. Поиски и разведка термальных вод
 - 5.2.4. Поиски и разведка минеральных вод
 - 5.2.5. Изучение динамики подземных вод и водных свойств толщ горных пород
 - 5.2.6. Изучение условий обводненности горных выработок
 - 5.2.7. Гидромелиоративные и почвенно-мелиоративные исследования
 - 5.2.8. Изучение минерализации подземных вод, литологии и флюидонасыщенности горных пород электроразведкой методом сопротивлений
- 5.3. Инженерно-геологическая геофизика
 - 5.3.1. Общая характеристика инженерно-геологической геофизики
 - 5.3.2. Инженерно-геологические съемки
 - 5.3.3. Изучение условий строительства инженерных сооружений
 - 5.3.4. Изучение тектонических нарушений
 - 5.3.5. Изучение физико-геологических явлений и процессов
 - 5.3.6. Изучение инженерно-геологических условий строительства на акваториях и берегах
 - 5.3.7. Определение физико-механических свойств горных пород по данным сейсморазведки
 - 5.3.8. Определение деформационно-прочностных свойств горных пород по данным сейсморазведки и сейсмоакустических исследований
- 5.4. Мерзлотно-гляциологическая геофизика
 - 5.4.1. Строение мерзлых пород и задачи их изучения
 - 5.4.2. Физические свойства и строение мерзлотно-геофизических разрезов
 - 5.4.3. Картирование мерзлых и талых пород
 - 5.4.4. Расчленение мерзлых и талых горных пород
 - 5.4.5. Изучение ледников
- 5.5. Археологическая и техническая геофизика
 - 5.5.1. Особенности выявления искусственных малоглубинных погруженных объектов
 - 5.5.2. Археологическая геофизика
 - 5.5.3. Техническая геофизика (изучение подземных коммуникаций)

5.1. Геологическая среда и геофизические методы для ее исследования

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

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

- высокую детальность изучения геологической среды на сравнительно небольших глубинах (от нескольких единиц до десятков, реже первых сотен метров) с изменяющимися в пространстве и во времени физическими свойствами, а значит, литологией, водно-физическими характеристиками, с широким проявлением природных процессов и инженерно-хозяйственной деятельности человека;
- использование портативных методов и облегченных измерительных установок для ускорения, удешевления геофизических работ и возможности проведения повторных наблюдений;
- применение нескольких (до 3-4) геофизических методов разной физической природы для повышения точности получаемой информации;
- широкое использование буровых скважин и горных выработок, проходка которых не сложна при небольших глубинах разведки.

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

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

5.2. Гидрогеологическая и почвенно-мелиоративная геофизика

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

5.2.1. Геофизические методы при гидрогеологических съемках.

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

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

сопротивлениям и продольным проводимостям, рассчитываемым в результате интерпретации вертикальных и дипольных электрических зондирований (ВЭЗ, ДЭЗ).

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

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

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

Интерпретация данных геофизических методов должна быть направлена не только на получение геометрических параметров разреза, но главным образом на геолого-гидрогеологическое истолкование результатов и, прежде всего, определение фильтрационных свойств пород (коэффициентов фильтрации, водопроницаемости и др.). Для этого устанавливаются вероятностно-статистические связи между геолого-геофизическими свойствами по данным параметрического бурения, опорных геофизических наблюдений у скважин и выполнения ГИС в скважинах.

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

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

Густота сети наблюдений при выполнении зондирований не должна превышать 200 x 500 м, а на ключевых участках 100 x 200 м. Шаг наблюдений при профилировании не

должен превышать 50 м. Интерпретация данных крупномасштабных геофизических съемок, проводимых с целью решения гидрогеологических задач, сводится к построению разрезов и карт послойных или обобщенных геофильтрационных параметров. Их получают в результате корреляции геофизических и гидрогеологических параметров по опытно-фильтрационным наблюдениям в скважинах и в ходе геофизических работ около них.

5.2.2. Поиски и разведка пресных подземных вод.

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

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

- на стадии поисков - литологическое картирование в плане и по глубине с выделением водовмещающих рыхлых или трещиноватых и закарстованных скальных пород, изучение грунтовых, пластовых и трещинных подземных вод, оценка геофильтрационной и гидрохимической обстановки;
- на стадии предварительной разведки - изучение литологического строения, выделение зон повышенной обводненности по значениям коэффициентов фильтрации и водопроницаемости, определение глубин залегания и мощностей водоносных и водоупорных горизонтов, выявление " гидрогеологических окон " в локальных водоупорах, обеспечивающих связь разных водоносных горизонтов, гидрогеохимическое картирование зон с разной минерализацией подземных вод;
- на стадии детальной разведки - детализация и проверка данных предварительной разведки бурением скважин, определение эксплуатационных запасов подземных вод разной минерализации путем анализа всех полевых материалов и данных скважинных, в том числе режимных, геофизических наблюдений.

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

Сеть наблюдений зависит от масштаба съемок и сложности гидрогеофизических условий. Расстояние между точками наблюдения должно составлять около 1 см в масштабе результирующих разрезов и карт. Очень ответственным является этап физической интерпретации материалов, который обычно проводят с использованием ЭВМ. Геолого-гидрогеологическое истолкование геофизических данных осуществляется на основе вероятностно-статистических связей между геофизическими параметрами и геофильтрационными свойствами в массиве горных пород, определяемыми по данным опытно-фильтрационных работ и геофизических исследований в скважинах.

5.2.3. Поиски и разведка термальных вод.

Крупные месторождения термальных вод приурочены к парогидротермальным системам и резервуарам с термальной водой (" тепловым котлам "), которые характеризуются следующими особенностями:

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

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

5.2.4. Поиски и разведка минеральных вод.

Поиски и разведка минеральных вод, пригодных для лечебных целей или являющихся источником химического сырья, - достаточно специфическая задача. Поиски таких месторождений имеют сходство с поисками месторождений пресных вод, а разведку проводят бурением скважин и проведением в них геофизических исследований. Среди методов ГИС основными являются резистивиметрия, электрические и ядерные. Ниже рассмотрены способы определения минерализации подземных вод по их удельному электрическому сопротивлению (5.2.8).

5.2.5. Изучение динамики подземных вод и водных свойств толщ горных пород.

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

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

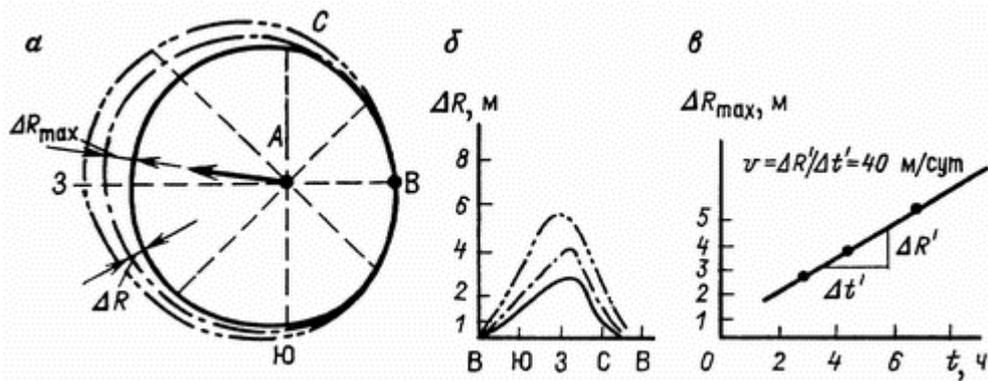


Рис. 5.1. Пример определения направления и скорости движения подземных вод методом заряженного тела: а - план эквипотенциальных линий, б - график смещения эквипотенциальных линий, в - график скоростей, $\Delta R'$ - максимальное смещение изолиний за время $\Delta t'$ после засолки

Для оценки вертикальной фильтрационной неоднородности водоносного пласта и послойного определения коэффициентов фильтрации разрезов с ненапорными подземными водами используют резистивиметрические наблюдения в скважинах с искусственно засоленным подземным потоком. При этом с помощью резистивиметра периодически измеряют удельное сопротивление предварительно засоленной поваренной солью воды в стволе скважины. По сопротивлениям до засоления ρ_0 и после засоления ρ_1 и ρ_2 , определенным через время t_1 и t_2 после засолки, можно оценить скорость фильтрации по формуле

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

где d - диаметр скважины.

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

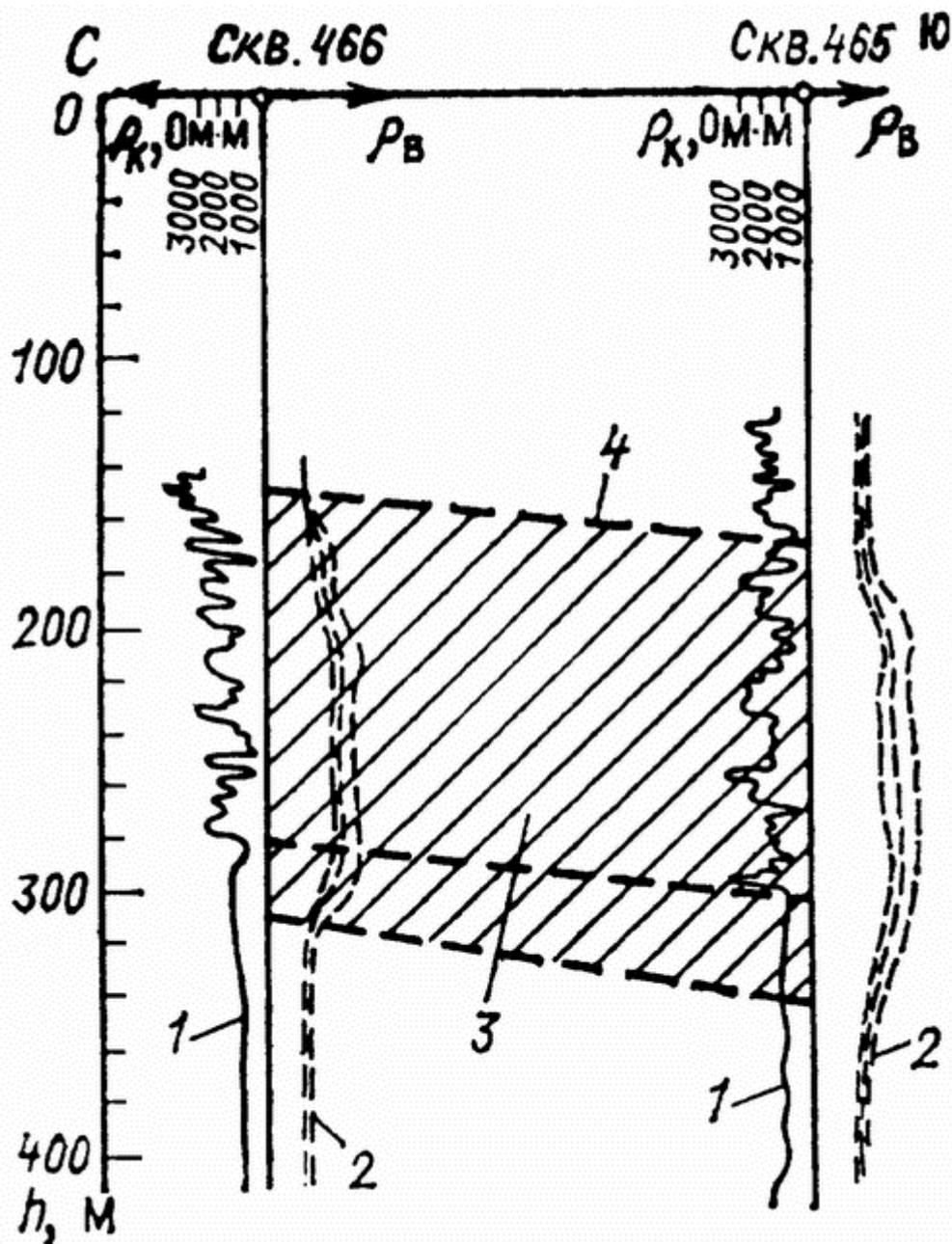


Рис. 5.2. Результаты скважинных геофизических исследований на одном из участков СУБР: 1 - график кажущихся сопротивлений по данным каротажа КС; 2 - кривые резистивиметрических наблюдений; 3 - зона активной циркуляции подземных вод; 4 - границы слоев

5.2.6. Изучение условий обводненности горных выработок.

При изучении обводненности горных выработок в ходе разработки месторождений твердых полезных ископаемых наиболее важной практической задачей является выявление обводненных зон для бурения водопонижительных скважин и проектирования других осушительных мероприятий. Особенно значительна обводненность месторождений, сложенных песчано-глинистыми или неравномерно закарстованными и трещиноватыми карбонатными породами. Обводненные зоны здесь носят локальный, незакономерный характер и приурочены к увеличениям в разрезе содержания толщ песчаных коллекторов или карстовых водонасыщенных полостей и трещиноватых зон.

Основными полевыми методами изучения обводненности горных выработок являются ВЭЗ, ВЭЗ-ВП, МПВ, а также электромагнитные профилирования (ЭП, ЕП). Методика полевых работ сводится к площадным съемкам с густотой сети наблюдений (100-500)

\times (100-500) м. Глубинность разведки должна превышать проектируемые глубины выработок.

5.2.7. Гидромелиоративные и почвенно-мелиоративные исследования.

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

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

- определена литологическая характеристика верхней (5-10 м) толщи пород и проведено почвенное картирование;
- выявлены глубины залегания уровня грунтовых вод, регионального водоупора, мощности и взаимосвязь различных водоносных горизонтов между собой и с поверхностными потоками;
- изучены физико-механические и водные свойства горных пород зоны аэрации и полного водонасыщения, т.е. определены коэффициенты пористости, влажности, проницаемости, фильтрации, водопроводимости, а также минерализация и динамика вод, засоленность и заболоченность почв.

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

- среднemasштабными дистанционными электромагнитными исследованиями - инфракрасной (радиотепловой) съемкой с помощью тепловизоров и высокочастотной радиотелеметрии, активной радиолокацией с помощью радиолокаторов миллиметрового и сантиметрового диапазона волн;
- крупномасштабными электромагнитными профилированиями (СДВР, ДИП (ДЭМП), ЭП, ЕП, ВП) и зондированиями (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП, РВЗ);
- скважинными наблюдениями электрическими, нейтронными, термическими методами.

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

5.2.8. Изучение минерализации подземных вод, литологии и флюидонасыщенности горных пород электроразведкой методом сопротивлений.

Особо ценное значение гидрогеологической и почвенно-мелиоративной геофизики заключается в возможности получения количественных характеристик водных свойств

горных пород при совместных гидрогеологических и почвенно-мелиоративных работах, с одной стороны, и электроразведки - с другой. Подобное совмещение обеспечивает повышение информативной и экономической эффективности работ, так как позволяет интерполировать и экстраполировать данные трудоемких геолого-гидрогеологических и почвенно-мелиоративных исследований на отдельных опорных точках на всю площадь, изученную высокопроизводительными электроразведочными методами.

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

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

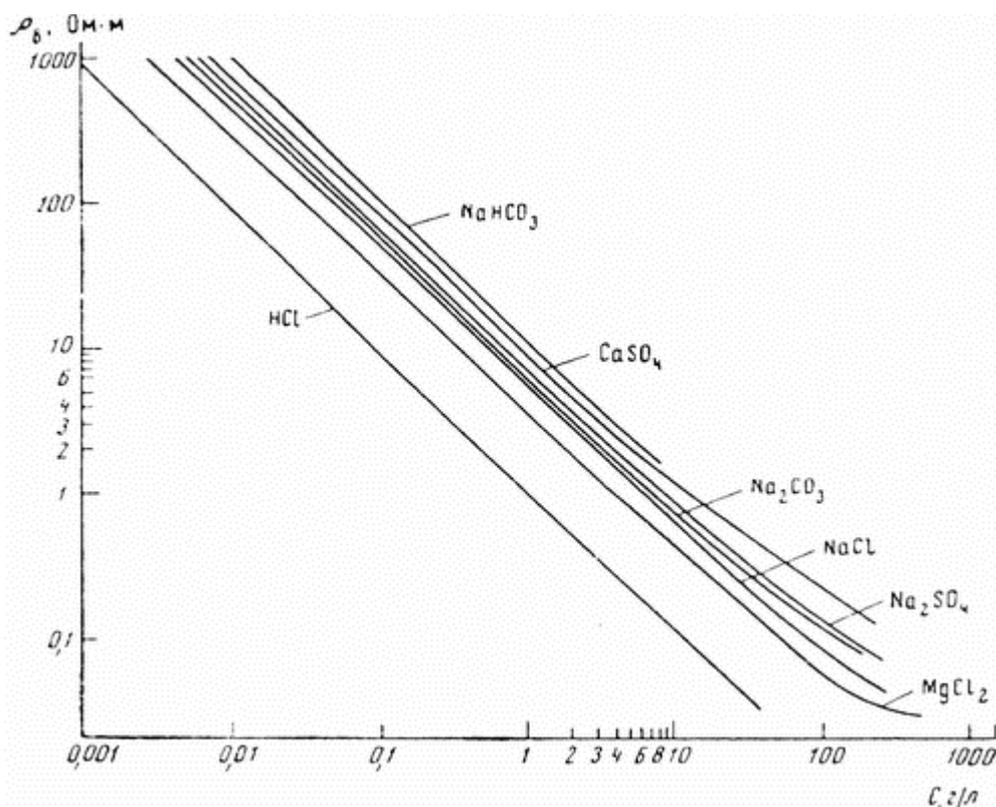


Рис. 5.3. Зависимости удельного электрического сопротивления подземных вод (ρ_w) от концентрации (C) и химического состава растворенных солей [Методы геофизики в гидрогеологии и инженерной геологии, 1985]

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

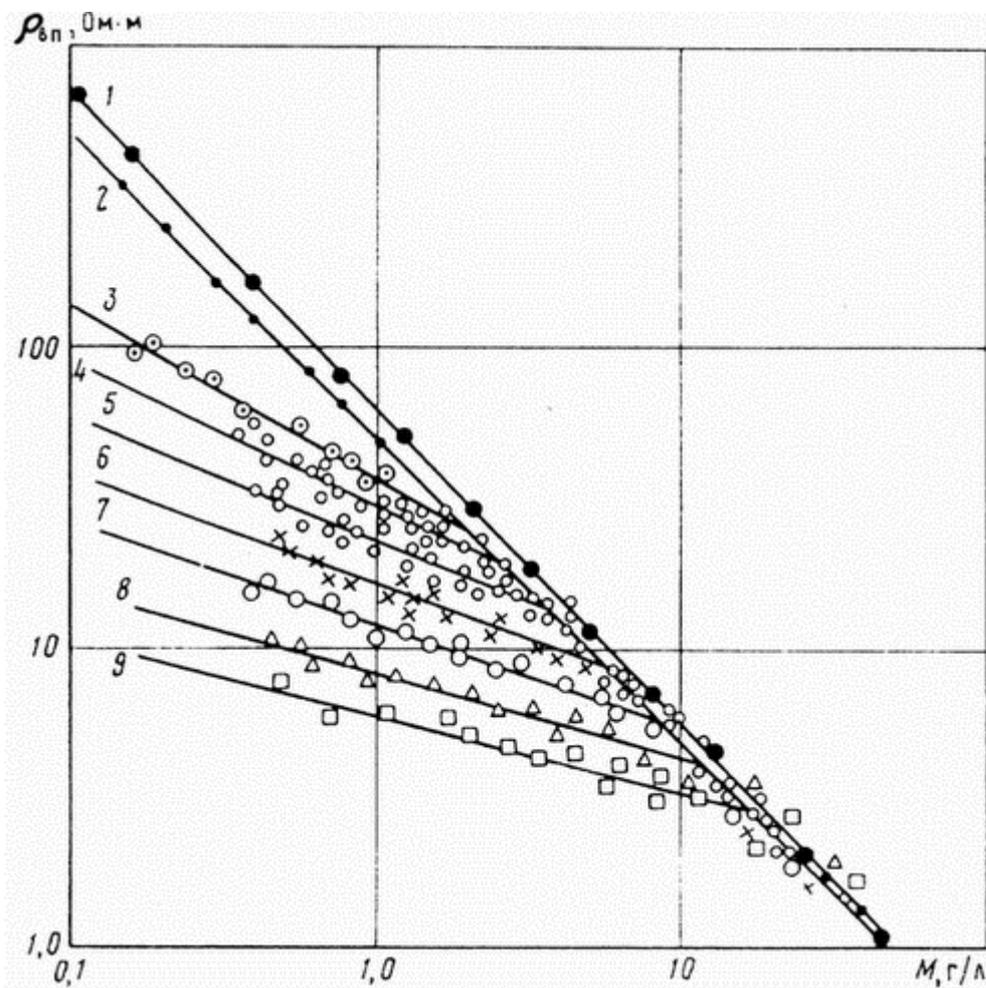


Рис. 5.4. Зависимость удельного электрического сопротивления (ρ_{sp}) водонасыщенных пород от минерализации (M): 1 - природные воды; 2 - гравийно-галечниковые отложения; пески: 3 - крупнозернистые, 4 - среднезернистые, 5 - мелкозернистые; суглинки: 6 - легкие, 7 - средние, 8 - тяжелые глины, 9 - глины [Методы геофизики в гидрогеологии и инженерной геологии, 1985]

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

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

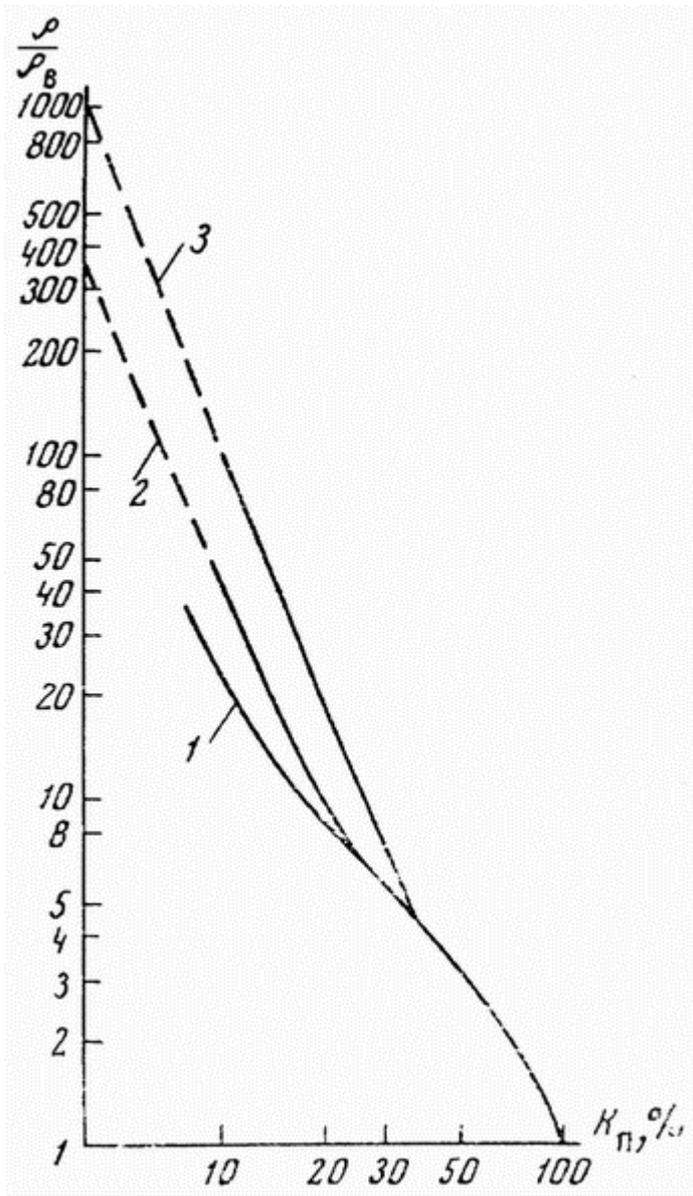


Рис. 5.5. Кривые зависимости относительного сопротивления (ρ/ρ_w) от коэффициента пористости (K_p): 1 - пески; 2 - слабосцементированные песчаники и рыхлые известняки; 3 - сильносцементированные песчаники, известняки и доломиты [Методы геофизики в гидрогеологии и инженерной геологии, 1985]

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

Т а б л и ц а 5.1

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

О количестве (запасах) подземных вод можно судить по коэффициенту фильтрации (K_f), измеряемому в м/сут, который через величину УЭС песчано-глинистых пород γh_0 (в Ом*м) оценивается по формуле $K_f = 0,01\rho$. Водопроницаемость ($T_n = K_f h$) толщи во-

доносных пород мощностью h корреляционно связана с поперечным удельным сопротивлением этой толщи $T = \rho h$, которое при интерпретации данных электроразведки может быть получено самостоятельно. Формула связи имеет вид $T^e = DT$, где D - эмпирический коэффициент, близкий для песчано-глинистых пород к 0,01.

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

Хотя нефтепродукты по УЭС близки к изоляторам, в горных породах, насыщенных ими, УЭС может быть как выше, так и ниже, чем у тех же пород, но водоносных. Объясняется это вымыванием нефти водой, химическим и биологическим (под воздействием микроорганизмов) окислением. Окисление, идущее на контакте вода - нефть, происходит тем быстрее, чем больше воды в породе и скорость ее движения, а значит, выше в ней концентрация кислорода. В результате нефтезагрязнение замещается продуктами окисления (сульфиды, в частности, пирит и др.), которые образуют в подземной воде электролит с низким УЭС. Поэтому в обводненных породах при разных соотношениях высокоомного слоя нефти или нефтепродуктов и окружающего их низкоомного слоя за счет переработки нефтепродуктов могут создаваться зоны как повышенного, так чаще и пониженного УЭС. В районах, где расположены необводненные породы, нефтепродукты могут сохраняться сколь угодно долго, а загрязненные ими породы выделяются как высокоомные объекты.

5.3. Инженерно-геологическая геофизика

5.3.1. Общая характеристика инженерно-геологической геофизики.

Инженерно-геологическая геофизика - это раздел прикладной геофизики, предназначенный для решения разнообразных инженерно-геологических задач. Геофизические исследования выполняются при проведении средне- и крупномасштабной инженерно-геологических съемок, а также при детальных работах, связанных с проектированием, строительством и эксплуатацией различных сооружений. Они позволяют повышать детальность и точность изысканий, уменьшать затраты времени и средств на проведение инженерно-геологических работ [\[Ляховицкий Ф.М. и др., 1989; Методы геофизики в гидрогеологии и инженерной геологии, 1985; Полевые методы гидрогеологических, инженерно-геологических, мерзлотных и инженерно-геофизических исследований, 1982\]](#).

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

Инженерно-геологические геофизические исследования выполняются на земной поверхности, в скважинах и горных выработках. Используют также аэрокосмические и аэро-

геофизические материалы. Ведущими методами являются сейсмические: метод преломленных волн (МПВ), реже - отраженных волн (МОВ), а также один-два из следующих: электропрофилирование методами естественного поля (ЕП), кажущихся сопротивлений, радиоволновым (РВП), вертикальные электрические зондирования методом сопротивлений или вызванной поляризации (ВЭЗ или ВЭЗ-ВП), частотные зондирования (ЧЗ), зондирования становлением поля (ЗС) и радиоволновые (РВЗ), гравимагнитные, ядерные и скважинные методы.

5.3.2. Инженерно-геологические съемки.

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

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

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

5.3.3. Изучение условий строительства инженерных сооружений.

Расчленение поверхностных и коренных отложений и изучение оснований проектируемых наземных и подземных инженерных сооружений (промышленных, гражданских, гидротехнических, транспортных и др.) проводят для оценки несущей способности и устойчивости массивов горных пород на конкретных строительных площадках. Эти работы характеризуются большой детальностью (масштаб исследований от 1:10000 до 1:1000). Геофизические методы используют для картирования рыхлых отложений и определения глубины залегания коренных скальных пород, детального расчленения верхней части разреза, оценки физико-механических и водно-физических свойств пород в их естественном залегании, изучения трещиноватости и нарушенности массива, определения уровня грунтовых вод и их динамики (см. 5.2.8 - 5.3.8). В задачи геофизических методов входит также изучение напряженного состояния коренных пород, выявление геодинамических явлений и сейсмичности (карст, суффозия, оползни, обвалы, просадки и др.), представляющих опасность для будущего строительства, проведение мониторинга за работой ответственных сооружений и изучение их влияния на геологическую среду [Комплексные инженерно-геофизические исследования при строительстве гидротехнических сооружений, 1990].

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

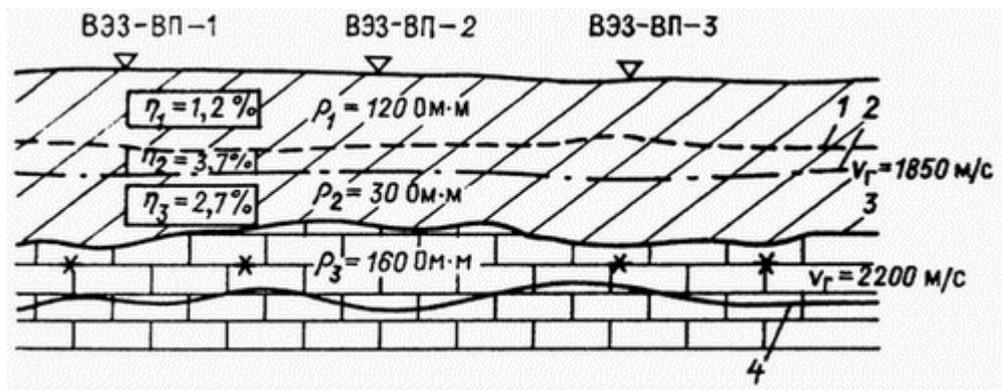


Рис. 5.6. Пример определения условий залегания скальных пород под рыхлыми образованиями по данным методов ВЭС, ВЭС-ВП и МПВ: 1 - уровень капиллярного поднятия по данным ВЭС-ВП; 2 - поверхность грунтовых вод по данным ВЭС, ВЭС-ВП и МПВ; 3 и 4 - кровля скальных пород по данным ВЭС, сохранных пород по данным МПВ (v_3 - граничная скорость) [Хмелевской В.К. и др., 1988]

5.3.4. Изучение тектонических нарушений.

При изучении тектонических нарушений, выделении трещиноватых и ослабленных зон целесообразно использовать аэрокосмические фото- и инфракрасные съемки, а также не менее двух-трех из следующих методов: электропрофилирование, метод преломленных волн, микромагнитную и эманионную съемки, круговые электрические зондирования (КВЭС).

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

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

5.3.5. Изучение физико-геологических явлений и процессов.

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

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

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

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

В задачи геофизических методов при изучении оползней входят:

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

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

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

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

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

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

5.3.6. Изучение инженерно-геологических условий строительства на акваториях и берегах.

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

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

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

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

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

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

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

подземных вод. Совместное применение сейсморазведки и электроразведки позволяет решать практически все задачи, рассмотренные в 5.3.1.

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

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

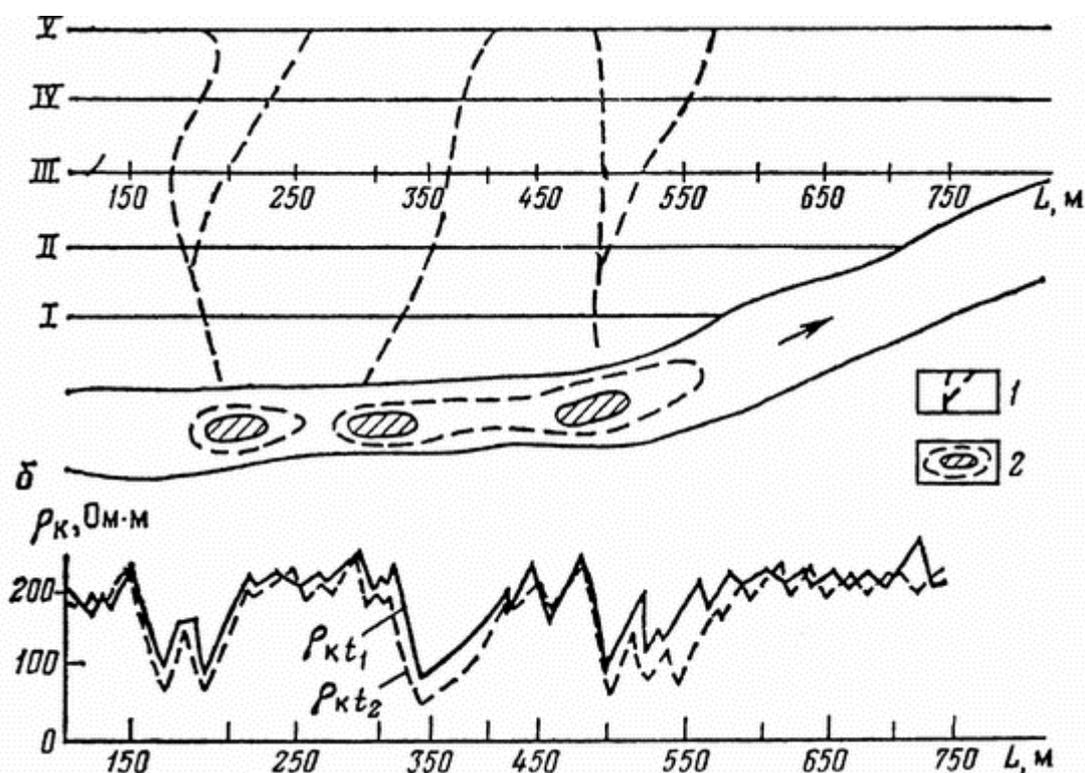


Рис. 5.7. Результаты наземного электропрофилеирования и речной резистивиметрии для изучения техногенных карстовых явлений: а - план, б - графики ρ_k по профилю III в моменты времени t_1 и t_2 ; I-IV - профили наблюдений; 1 - водотоки, 2 - зоны разгрузки (повышенная проводимость воды) в реке

5.3.7. Определение физико-механических свойств горных пород по данным сейсморазведки.

По скоростям продольных (желательно и поперечных) упругих волн, получаемым в результате полевой и акваториальной сейсморазведки, а также сейсмоакустических исследований скважин, определяются физико-механические свойства горных пород (плотность, пустотность, пористость, заполнитель пустот) Комплексные инженерно-геофизические исследования при строительстве гидротехнических сооружений, 1990; Ляховицкий Ф.М. и др., 1989; Полевые методы гидрогеологических, инженерно-

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

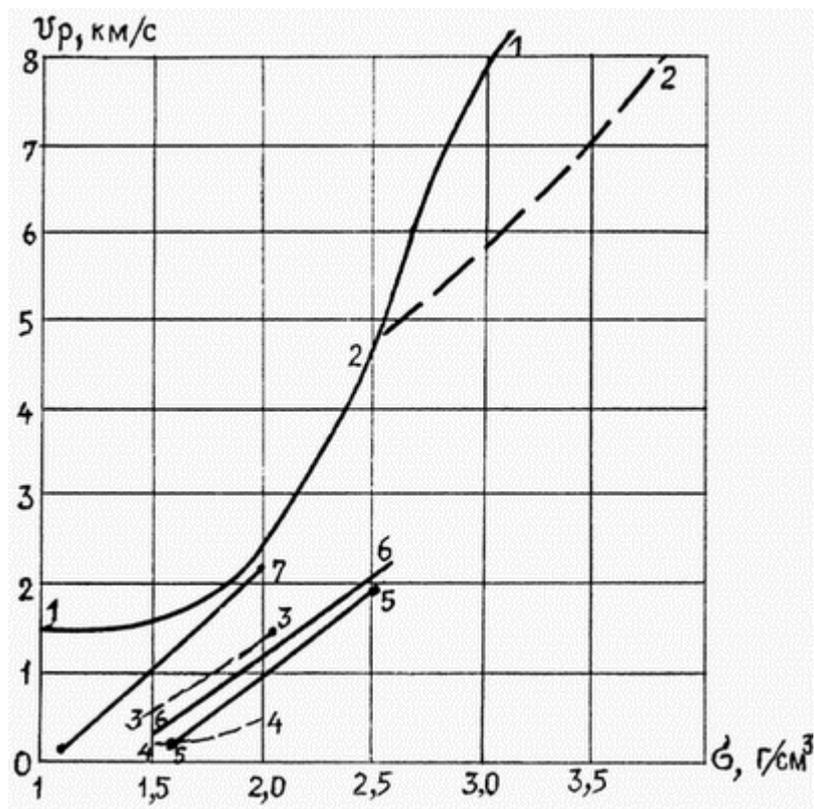


Рис. 5.8. Графики зависимостей скоростей продольных волн (V_p) от плотности (σ) по данным разных авторов: теоретические данные для осадочных пород (1); экспериментальные данные для магматических и метаморфических пород (2), глин (3), песчано-гравийных отложений (4), песков (5), песчано-глинистых грунтов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

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

Пористость (n) песчано-глинистых пород через V_p (в км/с) можно рассчитать по эмпирической формуле В.И.Бондарева: $n = a \lg(3,5/V_p)$, где $a = 0,5$ (для сухих) и $a = 1,7$ (для водонасыщенных пород). Погрешности в определении плотности, пустотности и пористости составляют около 20% [Н.Н.Горяинов Н.Н. и др., 1992].

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

Насыщенность пустот воздухом, водой, вторичными продуктами разрушения по-разному влияют на V_p и V_s . В целом с увеличением пустотности (пористости и трещиноватости) скорость продольных волн уменьшается в большей степени для сухих пород и в меньшей — для полностью водонасыщенных. Например, для магматических пород увели-

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

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

5.3.8. Определение деформационно-прочностных свойств горных пород по данным сейсморазведки и сейсмоакустических исследований.

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

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

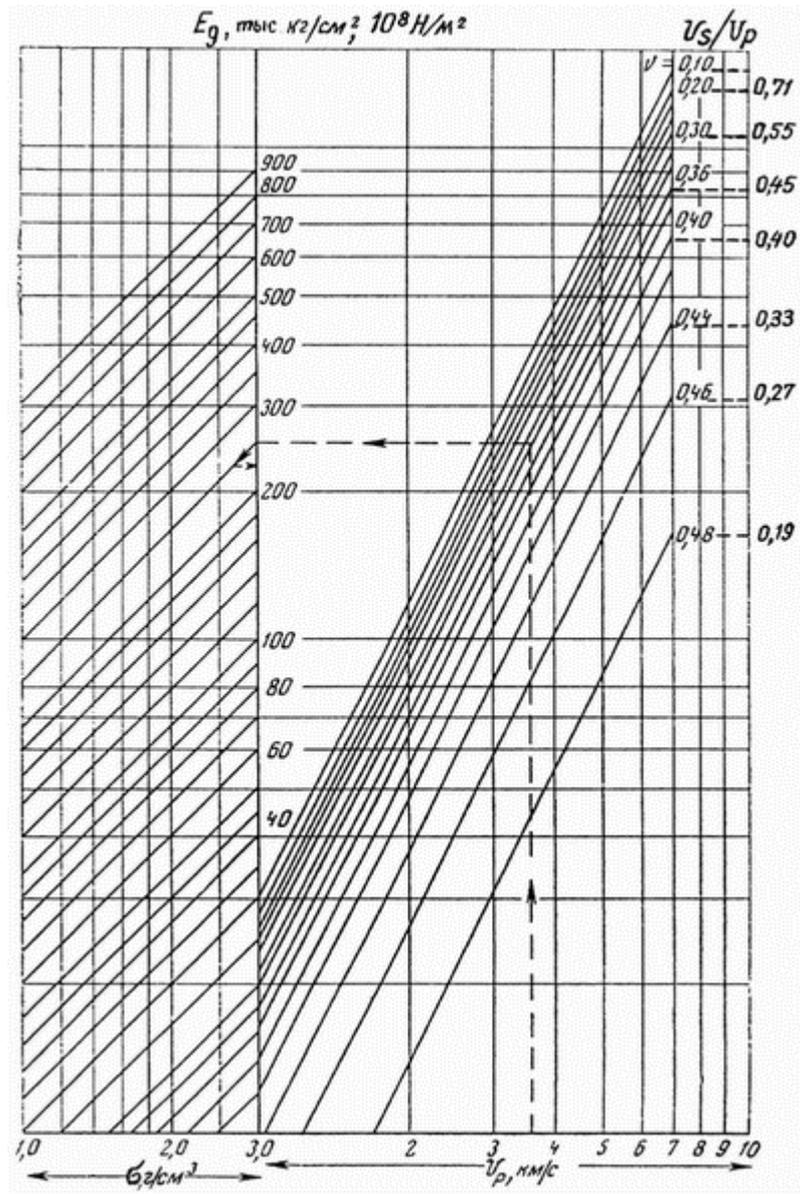


Рис. 5.9. Номограмма В.Н.Никитина для вычисления динамического модуля упругости (E_g) по V_p, σ, ν [Савич А.И., Яценко З.Г., 1979]

Номограмма на рис. 5.9 позволяет определить достаточно точно параметры ν и E_g (погрешности не превышают 20%) для сплошных однородных и изотропных упругих сред, к которым можно отнести скальные породы. Для дискретных неоднородных (полускальные и рыхлые осадочные) и особенно анизотропных (сланцы, глины) геологических сред получаемые с помощью этой номограммы параметры ν и E_g являются эффективными, т.е. характеризуют усредненные упругие свойства. С достаточной точностью они могут использоваться для получения лишь относительных значений $\Delta\nu, \Delta E_g$, которыми определяется упругая неоднородность среды. Абсолютные же величины этих модулей можно получить, установив корреляционные связи между геолого-геофизическими свойствами изучаемого района. В целом для различных пород ν меняется от 0,1 до 0,5, а E_g - от единиц до сотен 10^2 МПа (от долей единиц до десятков ГПа).

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

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

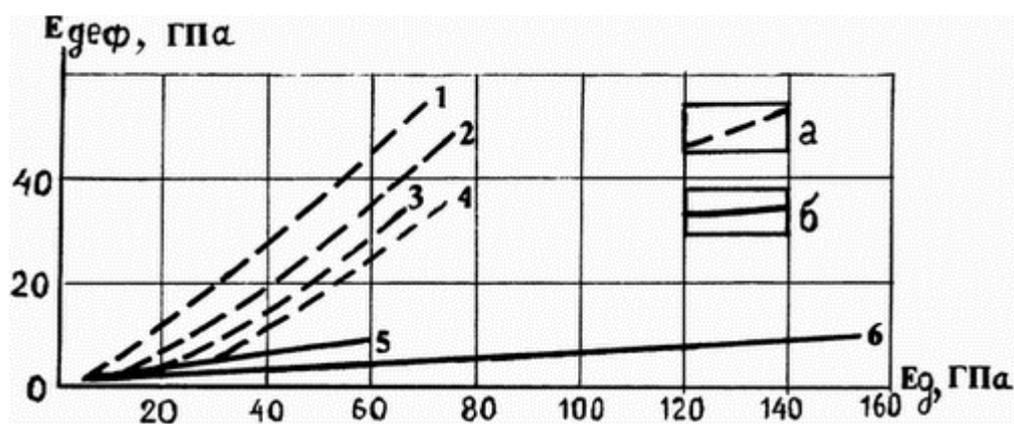


Рис. 5.10. Графики зависимости общего модуля деформации ($E_{деф}$) от динамического модуля упругости ($E_{д}$) для разных пород: 1 и 3 - воздушно-сухих и водонасыщенных магматических и метаморфических, 2, 5 и 4, 6 - воздушно-сухих и водонасыщенных осадочных при испытаниях на образцах (а) и натуральных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

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

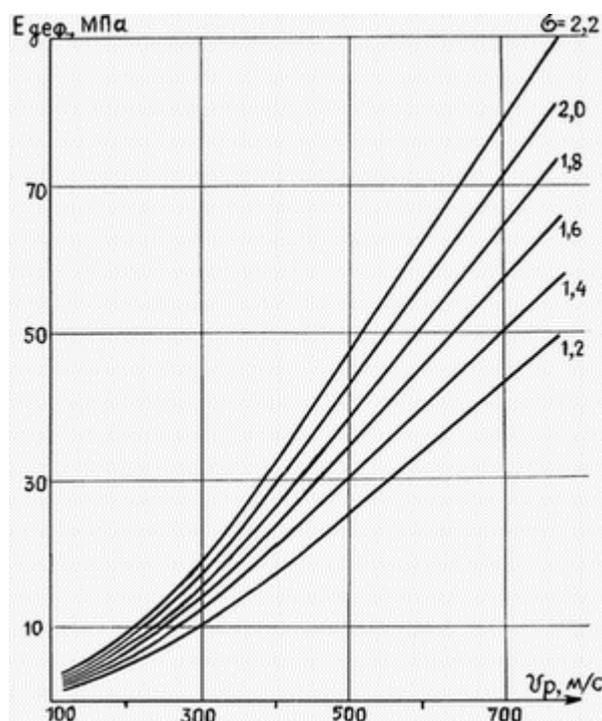


Рис. 5.11. Графики зависимости модуля общей деформации ($E_{деф}$) от скорости распространения продольных упругих волн V_p для песчано-глинистых пород разной плотности (σ) [Савич А.И., Яценко З.Г., 1979]

Среди прочностных свойств горных пород часто используется предел прочности на сжатие ($\sigma_{сж}$), равный напряжению одноосного сжатия образца, при котором он разрушает-

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

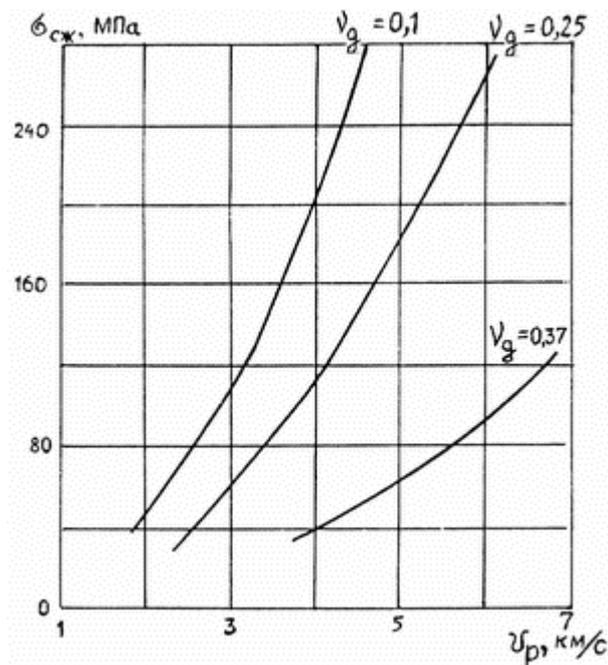


Рис. 5.12. Теоретические графики зависимости предела прочности пород на сжатие ($\sigma_{сж}$) от скорости продольных волн (V_p) для разных значений ν_g скальных пород [Савич А.И., Яценко З.Г., 1979]

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

5.4. Мерзотно-гляциологическая геофизика

5.4.1. Строение мерзлых пород и задачи их изучения.

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

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

Геофизические методы можно применять для решения следующих трех групп задач:

- картирования мерзлых и талых отложений (выявление литологических контактов, тектонических нарушений, зон трещиноватости, участков сквозных и несквозных таликов, подземных льдов, обводненных зон);
- расчленения мерзлых и талых горных пород по глубине (определение кровли и подошвы многолетнемерзлых пород, изучение распространения на глубине мерзлых и талых пород, сквозных и несквозных таликов, т.е. выяснение строения многолетнемерзлых пород в плане и по глубине, поиски и разведка межмерзлотных и подмерзлотных подземных вод);
- изучения мерзлотных процессов и явлений, в том числе динамики сезонного промерзания и оттаивания, процессов наледеобразования, пучения, термокарста, морозобойного растрескивания и др.

5.4.2. Физические свойства и строение мерзотно-геофизических разрезов.

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

Электрохимическая активность (α) мерзлых и талых пород может значительно различаться вследствие наличия и движения надмерзлотных и межмерзлотных вод. Вызванная поляризация (η) у мерзлых пород выше, чем у талых, и достигает 2-3% для мелкодисперсных пород, 10% - для льда и 15 % - для грубодисперсных пород.

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

Мерзлотно-геофизические разрезы характеризуются следующими основными особенностями:

- непостоянством физических свойств в плане и по глубине даже для одних и тех же литологических комплексов горных пород, если в них изменяются температура, льдистость, криогенное строение;
- резким (например, для ρ на несколько порядков) изменением физических свойств горных пород в слое годовых колебаний температур, мощность которого 0,3-3 м, что приводит к различиям "зимних" и "летних" свойств горных пород;
- скачкообразным, а иногда плавным (градиентным) увеличением ρ и V в зоне годовых теплообменов мощностью 10-30 м;
- наличием в средней части многолетнемерзлых отложений зоны (мощностью от 0,1 до 0,3 от общей мощности многолетнемерзлых пород) с высокими электрическими сопротивлениями и скоростями упругих волн;
- скачкообразным или плавным изменением физических свойств в нижней части многолетнемерзлых пород, т.е. на границе мерзлых и талых пород.

5.4.3. Картирование мерзлых и талых пород.

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

- аэрогеофизические (особенно аэромагнитные) и полевые гравимагнитные съемки;
- электрические и электромагнитные профилирования следующими методами: естественного поля (ЕП), кажущихся сопротивлений (ЭП), вызванной поляризации (ВП), бесконтактного измерения электрического поля (БИЭП), дипольного электромагнитного (ДЭМП), высокочастотного непрерывного (ВЧЭП или НЭП), сверхдлинноволнового радиокомпарационного (СДВ-РК);
- инфракрасные (ИКС) и радиотепловые (РТС) съемки.

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

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

Для наиболее уверенного решения задач мерзлотного картирования используют не менее двух-трех из перечисленных выше геофизических методов (в том числе термические съемки). Выбор методов определяется мерзлотно-геофизическими и геоморфологи-

ческими условиями, а также глубиной разведки. Наименьшей глубиной (около 10 м) и удобством при проведении работ зимой, а также в районах с неблагоприятными поверхностными условиями (выходы скальных пород, курумы и др.) характеризуются методы ИКС, СДВ-РК. Глубиной, превышающей несколько десятков метров, обладают методы ЕП, ДЭМП, БИЭП, а несколько первых сотен метров - ЭП, ВП, а также гравимагниторазведка и зондирования.

Система или сеть наблюдений зависят от масштаба, целевой направленности работ, особенностей мерзлотно-геофизических и геоморфологических условий. При мерзлотно-геофизических съемках в мелком и среднем масштабах работы проводят на отдельных ключевых участках, выявленных в ходе ландшафтно-мерзлотных съемок и дешифрирования аэрокосмических снимков. При крупномасштабных и детальных геофизических съемках выполняют площадные наблюдения с направлением профилей в крест простиранию элементов рельефа и границ участков, выделенных при ландшафтно-мерзлотных съемках. Расстояние между профилями в масштабе получаемых карт составляет 1-2 см, а шаг наблюдений берут в несколько раз меньше, так чтобы он составлял на местности 1-10 м.

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

5.4.4. Расчленение мерзлых и талых горных пород.

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

Выбор одного-двух из названных методов зондирования определяется геоморфологическими и мерзлотно-геофизическими условиями, а также задачами, стоящими перед геофизическими методами. Наибольшее применение находят ВЭЗ, отличающиеся простотой проведения измерений и приемов интерпретации. Их применяют летом, когда условия заземления бывают вполне удовлетворительными. Метод ВЭЗ-ВП относится к детализационным, его используют реже. Несмотря на методические преимущества зондирований, выполняемых на постоянных разносах и переменных частотах (ЧЗ) или временах становления поля (ЗС), эти методы применяются мало из-за сложных приемов интерпретации. В зимних условиях и в случае наличия поверхностных отложений высокого сопротивления целесообразно применять ЧЗ, ЗС или наиболее эффективное радиолокационное зондирование (РЛЗ). Сейсморазведку, несмотря на возможность проведения работ и летом и зимой, при мерзлотных исследованиях применяют реже, чем электроразведку. Это объясняется не только более сложной техникой и методикой, но и сложными сейсмогеологическими условиями.

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

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

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

5.4.5. Изучение ледников.

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

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

5.5. Археологическая и техническая геофизика

5.5.1. Особенности выявления искусственных малоглубинных погруженных объектов.

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

Особенностью изучения "культурного слоя", мощностью от десятков сантиметров до десяти метров, является наличие переработанных грунтов с резко неоднородными физическими свойствами, высокого уровня как природных, так и особенно техногенных помех (электромагнитных, вибрационных, акустических, магнитных, ядерных, тепловых),

а также вещественных загрязнений, обусловленных засоренностью мусором. Кроме того, физические свойства искомым объектов (археологических памятников, подземных сооружений, труб, кладов и т.п.) слабо изучены и резко меняются. Если к этому добавить неоднородность рельефа, то перед геофизиками стоит сложная задача, подобная той, которую можно представить при " рассмотрении объектов под разбитым стеклом или подернутой волновой рябью поверхностью воды " . Из-за малых глубин залегания искомым объектов выявленные аномалии нетрудно проверить, поэтому точность интерпретации должна быть высокой.

5.5.2. Археологическая геофизика.

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

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

Предпосылками применения геофизических методов являются контрастность свойств объектов и среды, соотношение размеров объекта и глубины его залегания и уровень сигнала от объекта по сравнению с уровнем помех. Хотя глубины археологических объектов невелики, но по перечисленным выше предпосылкам применения археологическая геофизика не имеет серьезных преимуществ перед другими областями применения, скорее наоборот - археологические объекты оказываются весьма трудными для изучения геофизикой. У археологической геофизики есть два преимущества: обычно эти исследования столь детальны, что передвижение по площади осуществляется очень быстро и не требует транспорта, а проверки геофизических аномалий могут быть выполнены с небольшими затратами из-за их малых глубин. Без геофизики трудоемкость археологических раскопок велика, так как часто осуществляется с огромной избыточностью, напоминая поиск иголки в стоге сена. Поэтому археологи очень заинтересованы в использовании геофизических методов, чтобы заменить сплошные раскопки выборочными.

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

Геофизические методы могут применяться для построения детальных планов погребенных объектов, поисков скоплений керамического материала, очагов, зольников,

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

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

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

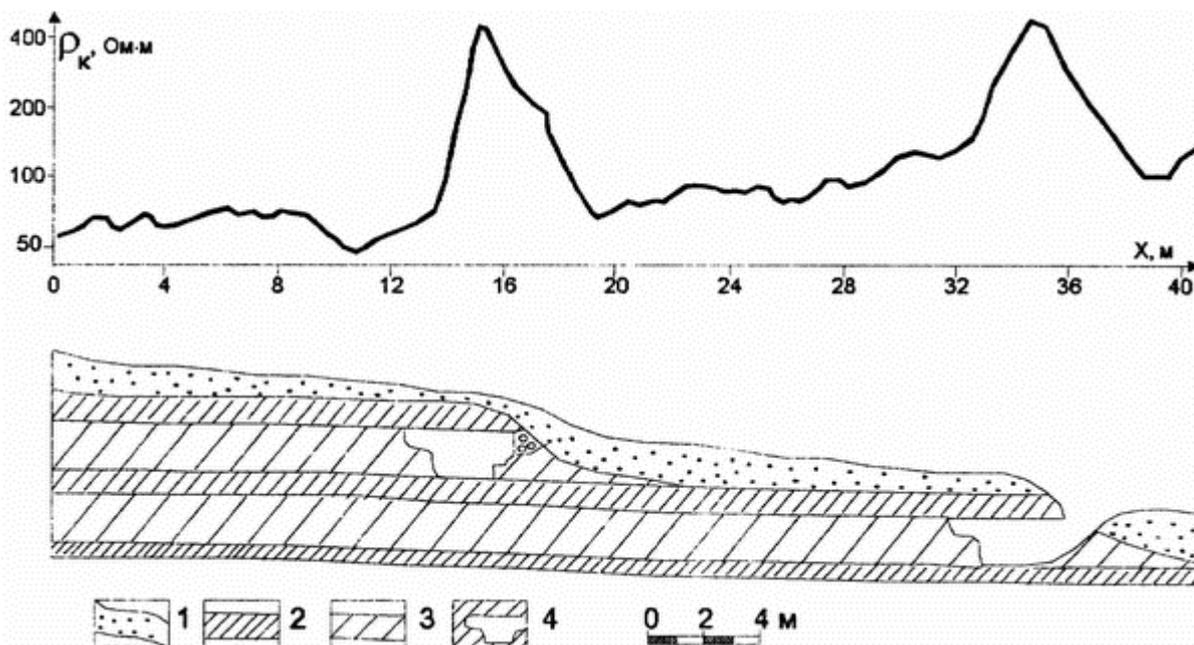


Рис. 5.13. Схема строения склона Песочной балки со склепами и идеализированный график электропроводности в крест склону: 1 - почвенный слой ($\rho_k = 30-70$ Ом*м); 2 - прослой плотных известняков ($\rho_k = 300-600$ Ом*м); 3 - рыхлые обломочные известняки ($\rho_k = 20-50$ Ом*м); 4 - склепы

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

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

Плантажные стены шириной около 1 м возводились параллельно друг другу через расстояние примерно 5 и 2 м. Они картировались с помощью электроразведки методом электропрофилирования дипольной экваториальной установкой, которая обладает высокой чувствительностью при прослеживании высокоомных объектов, какими являются стены (см. рис. 5.14). Амплитуды выявленных линейно вытянутых аномалий оказались невелики и плохо коррелировались по профилям из-за сравнительно большого межпрофильного расстояния. Поэтому были рассчитаны модули спектров пространственных частот аномалий $\rho_{кс}$ наиболее ярко выраженными гармониками с периодами 2 и 6 м. Следовательно, расстояние между осевыми линиями основных плантажных стенок может составлять, по нашему мнению, около 6 м, а система плантажа - с периодом 2 м.

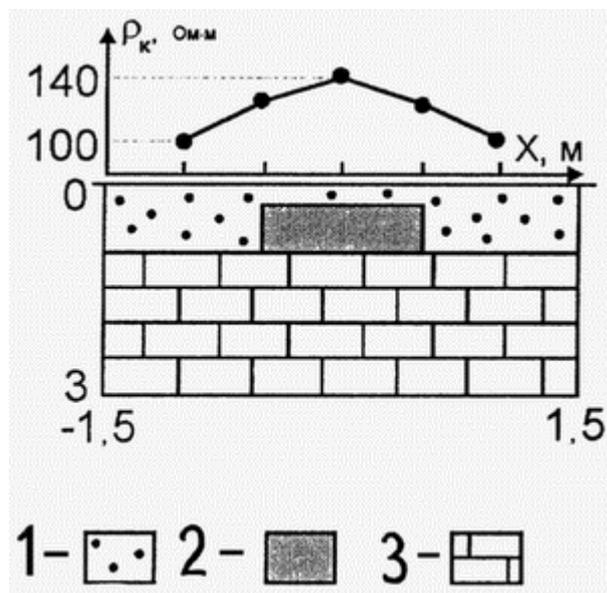


Рис. 5.14. Монтаж плантажной стены и аномалии $\rho_{кс}$ над ней в среде с электрическим сопротивлением: 1 - 30 Ом*м, 2 - 100 Ом*м, 3 - 30 Ом* м

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

вмещающего их слоя гумуса и подстилающих коренных пород, характеризуются индивидуальным и устойчивым комплексом магнитных свойств.

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

Аномальное магнитное поле городища складывается из совокупности однотипных аномалий (изометричных или близких к изометричным) интенсивностью 7-40 нТл (см. рис. 5.15). Локальные аномалии магнитного поля складывались из 152 почти округлых в плане аномалий, имеющих примерно одинаковую форму, интенсивность и размеры 1-1,8 м. В размещении аномалий заметна закономерность. Они объединены в ряды. Центральные ряды прямолинейны и параллельны оси площадки, периферийные повторяют изгибы ее краев. Закономерная структура магнитного поля особенно четко проступает в средней части городища. Очаги представляли собой линзы прокаленного песка с круглой или прямоугольной оградкой из не крупного бутового камня. Остатки глинобитных печей представлены развалами обожженной глины, из которой был сооружен свод печей. В основании развалов находится вымостка из прокаленных булыжников, которые составляли под печи. Очаги являются древними сооружениями, а многие жилые постройки с печами создавались позднее. Польза от геофизических материалов во многом зависела от возможности распознавания этих объектов по аномалиям магнитного поля.

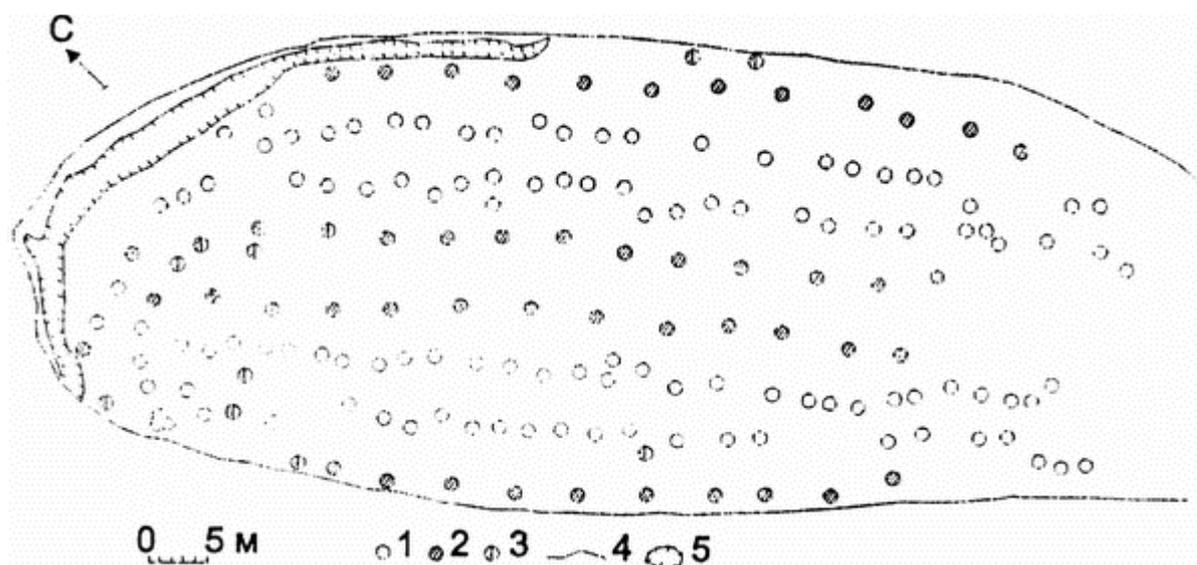


Рис. 5.15. Схематическая карта размещения очагов и печей в пределах городища Камно: 1 - очаг, 2 - печь, 3 - объект неустановленного типа, 4 - край площадки городища, 5 - траншеи и ямы по данным магнитных съемок

5.5.3. Техническая геофизика (изучение подземных коммуникаций).

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

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

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

Для защиты от коррозии применяют катодную защиту магистральных трубопроводов постоянным током низкого напряжения (около -1,5 В). При катодной защите на трубу подается отрицательный потенциал (катод), в то время как положительный полюс (анод) относится в сторону от трубы и заземляется в специальные скважины. В местах нарушения изоляции с трубы стекает электрический ток, который предохраняет трубу от коррозии. При нарушении слоя гидроизоляции коррозия сильно зависит от удельного электрического сопротивления окружающих пород. При этом чем ниже сопротивление вмещающего грунта, тем больше тока может перетекать из трубы и, следовательно, выше коррозионная опасность.

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

Как отмечалось выше, геофизические методы могут помочь при решении многих задач контроля состояния труб. Первая задача - это тщательное изучение трассы под строительство трубопровода, особенно в наиболее ответственных местах, например, на пересечениях рек. В последнее время переход к укладке труб под рекой осуществляется с помощью скважин наклонного бурения, которые проходят в слое с наилучшими прочностными свойствами. При изысканиях в местах переходов трубопровода через реки используется комплекс акваторных и наземных геофизических методов: речная сейсмоакустика, вертикальные (ВЭЗ) и сплошные (СЭЗ) электрические зондирования, исследования с георадаром, бурение опорных скважин на суше и на акваториях. Сейсмоакустика дает детальное послойное расчленение верхних слоев осадков в пределах акватории. Совместно с электроразведкой это позволяет оценить литологию каждого слоя, определить степень его сохранности. Наземная и акваториальная электроразведка позволяют связать в единый разрез исследования на берегах и на акватории. На рис. 5.16 показан разрез по геофизическим данным и бурению в месте проектируемого перехода трубопровода под проект наклонного бурения для прокладки трубы под рекой.

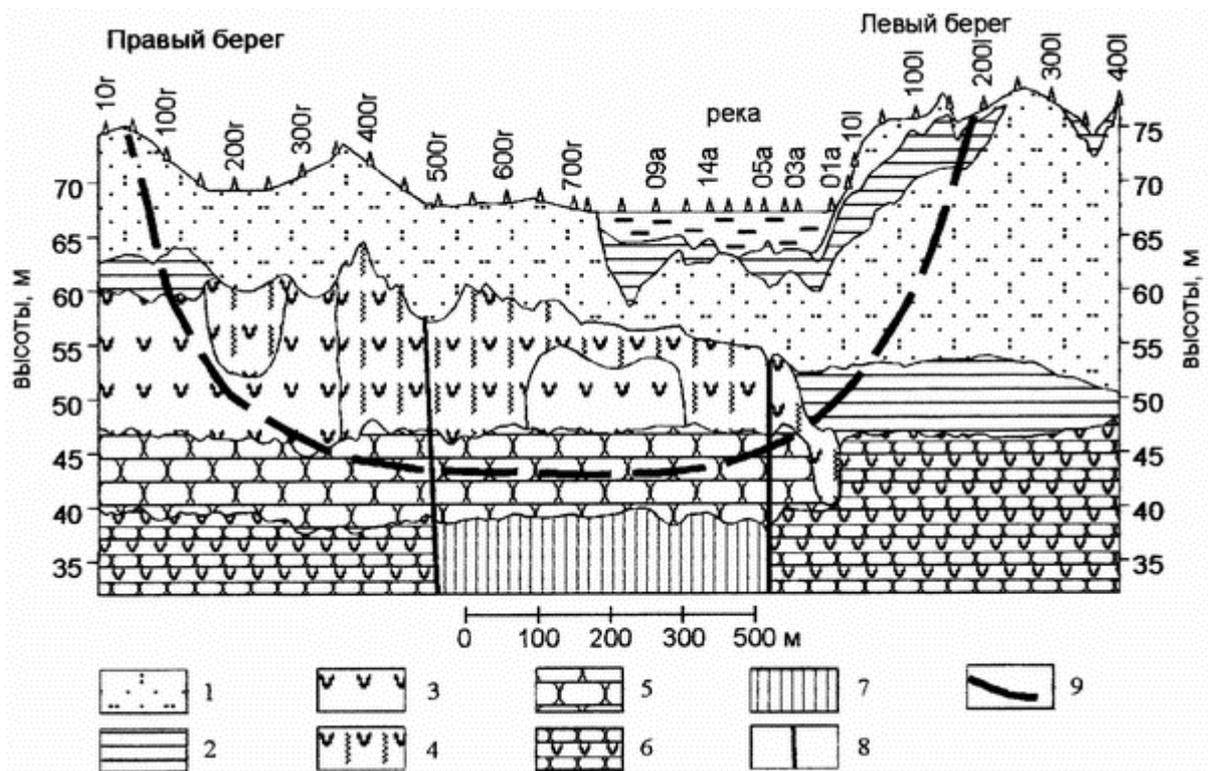


Рис. 5.16. Результаты геолого-геофизических исследований под проект наклонного бурения для прокладки трубы под рекой: 1 - пески и супеси (20 Ом*м), 2 - глины и суглинки (12-70 Ом*м), 3 - гипсы (300-500 Ом*м), 4 - гипсы трещиноватые (100-500 Ом*м), 5 - ангидриты (160-250 Ом*м), 6 - ангидриты и гипсы (>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

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

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

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

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

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

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

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

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

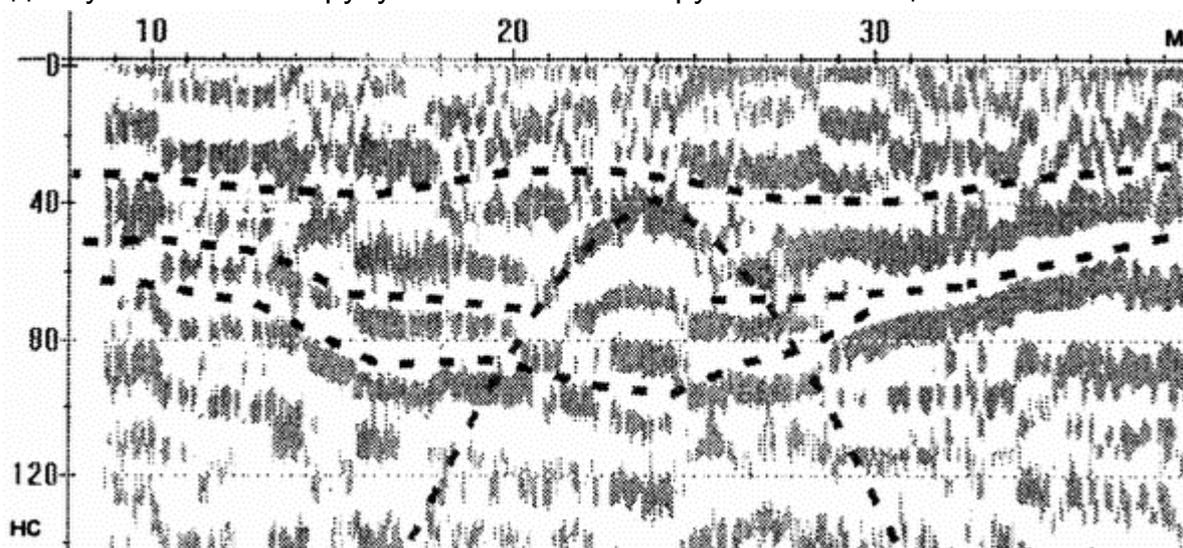


Рис. 5.17. Результаты георадарного профилирования над трубой магистрального нефтепровода, расположенного в траншее

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

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

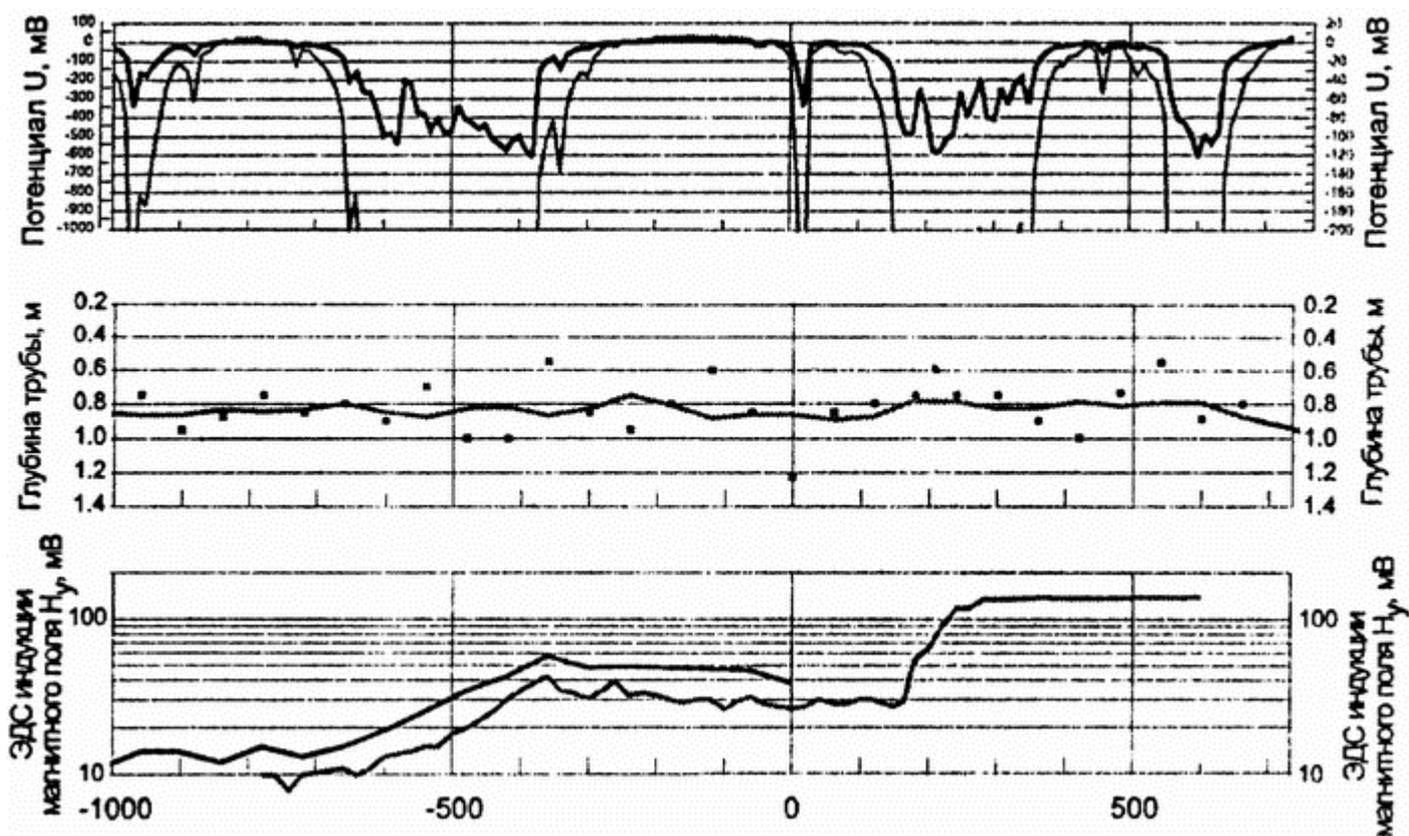


Рис. 5.18. Результаты измерения ПКЗ, глубины трубы и амплитуды H_y с магнитной антенной

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

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