МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный технический университет
имени К.И. Сатпаева

А. Нурмагамбетов, Е.И. Кульдеев

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОФИЗИКА

Рекомендовано Научно-методическим советом
университета в качестве учебного пособия

Алматы 2012

УДК 550.3 (075)
ББК 26.21я73
Н 90

Н 90 Нурмагамбетов А., Кульдеев Е.И. Инженерная геофизика: Учеб. пособие. – Алматы: КазНТУ, 2012. – 242 с.
Ил. 68. Табл. 1. Библиогр. – 28 назв.
ISBN 978-601-228-333-4

Настоящее издание представляет собой учебное пособие по курсу «Инженерная геофизика». Его содержание соответствует требованиям государственного стандарта для специальности 6М074700 «Геофизические методы поисков и разведки МПИ».

В учебном пособии дается систематизированное изложение вопросов, отражающих современные тенденции в развитии инженерно-геофизических исследований.

В первой части рассматриваются основы и методы инженерной геофизики. Основное внимание уделяется физическим свойствам горных пород, поскольку применение геофизических методов для решения инженерных задач основано на использовании различий в физических свойствах горных пород. Подробно изложены методы и принципы обработки и интерпретации материалов наблюдений комплекса геофизических методов, используемые в инженерной геофизике.

Во второй части книги описывается применение инженерно-геофизических методов при решении различных задач: изучение разрывных нарушений, карста, оползней, гидрогеологических и инженерно-геологических, гидромелиоративных и почвенно-мелиоративных задач, использование методов инженерной геофизики при строительстве различных сооружений и т. д.

Учебное пособие предназначено для магистрантов, обучающихся по специальности 6М074700 «Геофизические методы поисков и разведки МПИ», а также может быть полезно для специалистов смежных областей.

УДК 550.3 (075)
ББК 26.21я73

Рецензенты:
Садыков Д.Ш., д-р геол.-минер. наук, проф. КазНТУ им. К.И. Сатпаева
Омирсериков М.Ш., д-р геол.-минер. наук, проф., директор Института геологических наук им. К.И. Сатпаева,.
Садыкова А.Б., д-р физ.-мат. наук, зав. лаб. Института сейсмологии МОиН РК

Печатается по плану издания Министерства образования и науки Республики Казахстан на 2012 г.

ISBN 978-601-228-333-4

© Нурмагамбетов А.,
Кульдеев Е.И., 2012
© КазНТУ, 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ

С 2009 г. в учебный план магистрантов специальности 6М074700 – «Геофизические методы поисков и разведки МПИ» введена дисциплина «Инженерная геофизика». При чтении данного курса магистранты сталкиваются со значительными трудностями в связи с отсутствием необходимой учебной литературы. Учебники и учебные пособия, а также статьи и отдельные монографии по вопросам инженерной геофизики, выпускаемые российскими издательствами, не всегда доступны. Эти обстоятельства и побудили авторов написать предлагаемое учебное пособие. Основная цель данного курса – дать необходимые знания об основных элементах инженерной геофизики, ознакомить слушателей с геофизическими методами, применяемые в гидрогеологии, инженерной геологии, при проектировании и строительстве различных сооружений.

Круг решаемых задач в геофизике со временем расширился – от изучения планеты в целом до исследования геологического материала на молекулярном уровне. Обладая уникальными возможностями детального автоматизированного сбора измеряемых параметров естественных и управляемых искусственных физических полей в разных геосферах Земли, методы разведочной геофизики служат совершенным инструментом обязательной части изысканий для целей строительства и при изучении окружающей среды для ее охраны и контроля.

В основе учебного пособия положен курс лекций, читаемый авторами в течение последних нескольких лет магистрантам геофизической специальности. Материалы в нем предназначены для подготовленного читателя, знакомого с основами сейсморазведки, термометрии, магниторазведки, электроразведки и других геофизических методов исследований. Главные задачи учебного пособия – представить в одном издании сведения о смежных отраслях геофизики, способствовать расширению геофизического кругозора магистрантов, создать благоприятные

условия для развития творческого подхода в решении специфических задач инженерной геофизики.

В книге в компактной форме приведены данные о физических параметрах геологической среды, применяемых в различных геофизических методах исследований. Даны описания модификаций геофизических методов, образующих арсенал инженерной геофизики. Приведены примеры комплексного изучения одного объекта многими геофизическими методами. Представлены технологические подробности некоторых геофизических работ.

Материалы, собранные в учебном пособии, взяты из опубликованных работ и из трудов авторов. Ссылки на публикации и список литературы приведены.

Просьба отправлять замечания и предложения по содержанию учебного пособия по адресу: 050013, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22, КазНТУ им. К.И. Сатпаева, ИГиНГД им. К. Турысова, кафедра геофизики.

ВВЕДЕНИЕ

Разведочная геофизика возникла в начале XX века. Уже в 30-х годах были проведены первые электроразведочные и сейсмические исследования для поисков подземных вод и изучения оснований гидротехнических сооружений. Эти работы положили начало инженерной геофизике, которая в 50-60-е годы получила дальнейшее развитие. Были созданы специализированные геофизические подразделения во многих проектно-изыскательских и научно-исследовательских институтах и организациях.

Современное развитие геофизики позволяет решать довольно сложные задачи. За период существования этой относительно молодой науки она вооружилась большими знаниями, позволяющими ей эффективно и с большой точностью решать эти задачи. Эффективность изучения геологической среды инженерно-геофизическими исследованиями во многом определяется грамотной постановкой задачи и правильным выбором комплекса геофизических методов.

Геофизические исследования при инженерно-геологических изысканиях являются самостоятельным видом работ. Они выполняются на всех стадиях (этапах) проектирования в сочетании с другими видами инженерно-геологических работ с целью:

- определения геологического строения массива горных пород;
- выявления тектонических нарушений, в т. ч. активных зон повышенной трещиноватости и обводненности;
- определения глубины залегания уровня подземных вод, водоупоров, направления движения потоков подземных вод, а также гидрогеологических параметров грунтов и водоносных горизонтов;

- определения состава, состояния и свойств грунтов в массиве и их изменений во времени;
- выявления и изучения геологических процессов и их изменений во времени;
- проведения мониторинга опасных геологических и инженерно-геологических процессов;
- сейсмического микрорайонирования территории.

При изысканиях для разработки предпроектной документации на больших площадях (трассах значительной протяженности), в районах с развитием опасных инженерно-геологических процессов и в особых условиях (шельф, подрабатываемые и урбанизированные территории), а также при мониторинге возможных изменений геологической, геокриологической и экологической обстановки геофизические исследования рекомендуется выполнять в составе первоочередных работ.

Геофизические исследования обладают рядом особенностей, выделяющих их среди других видов инженерно-геологических исследований:

- получаемая с их помощью информация носит интегральный характер, т. е. относится к определенному объёму (а не к «точке») пород;
- геофизические методы позволяют прослеживать геологические границы непрерывно;
- в ряде случаев информация о характеристиках массива может быть получена преимущественно с помощью геофизических методов (например, оценка неоднородности массива, определение динамических модулей упругости);
- геофизические исследования в большинстве случаев проводятся без нарушения сплошности изучаемой геологической среды и могут выполняться многократно (с любой заданной периодичностью) без изменения условий наблюдения, что позволяет эффективно использовать их для проверки получаемой информации и проведения мониторинга изменений геологической среды;

- геофизические наблюдения позволяют оценивать состояние пород и локализовать участки прогнозируемого его изменения (например, напряжение, сплошность, влажность и пр.);
- геофизические исследования позволяют проводить дистанционные наблюдения, в т. ч. в процессе мониторинга;
- геофизические исследования по стоимости и срокам выполнения во многих случаях предпочтительнее горнопроходческих, полевых опытных и других видов изысканий, особенно на стадии обоснования инвестиций.

Необходимым условием применения любого геофизического метода является наличие дифференциации исследуемых сред по физическим свойствам, достаточной для её установления с помощью имеющихся технических средств.

Профессионально проведенные инженерно-геофизические работы являются одной из самых эффективных и высокотехнологичных схем изучения состояния геологической среды. Их результативность зависит от грамотной постановки задачи, выбора требующегося комплекса методов геофизики и профессионализма работников.

Часть I. ОСНОВЫ И МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ

1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ

Инженерная геофизика это самостоятельный раздел разведочной геофизики, призванный изучать самую верхнюю часть земной коры, в пределах которой протекает вся строительная и хозяйственная деятельность человека. Это толща, мощность которой в большинстве случаев не превышает десятков метров, реже первых сотен и как исключение приближается к тысяче метров.

Было бы неправильно полагать, что в связи с относительной доступностью приповерхностная часть геологической среды является более простым объектом исследований, чем глубокозалегающие толщи пород. На самом деле, верхняя часть геологического разреза крайне неоднородна по своему составу и состоянию. Она находится под воздействием множества внешних и внутренних факторов, непрерывно и в ряде случаев незакономерно меняющихся в пространстве и во времени. Такая изменчивость в ее строении и состоянии требует особого подхода к выбору методов проведения наблюдений, их комплексированию и расшифровке получаемых данных.

Инженерно-геофизические исследования отличаются от других видов разведочной геофизики спецификой решаемых задач и условиями проведения работ. Для инженерной геофизики обязательным является изучение состава горных пород, состояния и свойств массивов горных пород и грунтовых толщ со всеми присущими им неоднородностями. А также изучение разнообразных физических полей, характерных для обследуемых участков, с целью прогноза кратковременных и долговременных изменений геологической среды, которые в дальнейшем могут произойти под влиянием как природных, так и техногенных факторов. Кроме того, инженерную геофизику все шире исполь-

зуют для контроля различных операций, выполняемых при строительстве (замораживание, цементация, уплотнение, физико-химическое закрепление).

Связь инженерной геофизики с близкими ей дисциплинами геологического и геофизического циклов изображена в наглядной форме на рис.1.1 [11]. Дисциплины геофизического цикла являются источником, откуда инженерная геофизика черпает методы проведения наблюдений, аппаратуру, приемы решения прямых и обратных задач, сведения о распределении физических свойств и физических полей в геологической среде. Теснее всего она связана с разведочной геофизикой, частью которой до недавнего времени считалась. Из богатого арсенала методов разведочной геофизики заимствовано большинство широко используемых на практике приемов исследований. Однако они во многих случаях подверглись коренной перестройке как в отношении пространственной и временной систем наблюдений, так и приемов обработки результатов, включая сюда физический и математический аппарат.

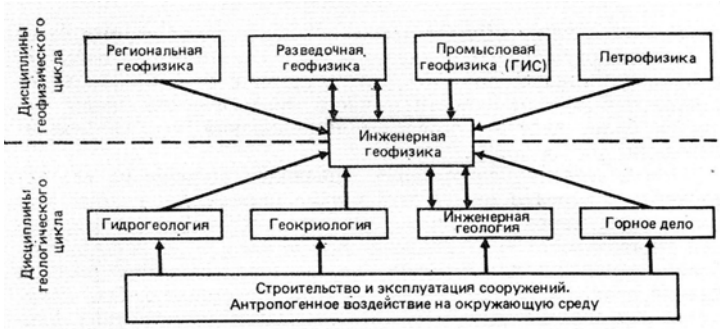


Рис. 1.1. Связь инженерной геофизики с близкими ей научно-прикладными дисциплинами [11]

Роль дисциплин геологического цикла связана в первую очередь с постановкой задач, которые призвана решать инженерная геофизика. Однако они лишь под определенным

углом зрения трансформируют задачи, возникающие в процессе проектирования, строительства и эксплуатации наземных и подземных сооружений, а также при изучении влияния человеческой деятельности на геологическую среду. Часть этих задач решается инженерной геофизикой самостоятельно, т. е. без привлечения дисциплин геологического цикла.

Итак, *инженерная геофизика* отличается от других разделов геофизики как предметом исследований, так и способами исследований. Сформулированное выше назначение инженерной геофизики дает основание рассматривать ее и в качестве науки, призванной изучать верхнюю часть литосферы как среду обитания человека. При этом речь идет о выяснении особенностей залегания геологических тел и определении их свойств, а также свойств и состояния массивов горных пород и грунтовых толщ со всеми присущими им неоднородностями. Одновременно изучаются разнообразные физические поля, характерные для обследуемых участков, и дается анализ кратковременных и долговременных изменений геологической среды, которые в дальнейшем могут произойти под влиянием как природных, так и техногенных факторов.

Существуют четыре основных направления применения методов инженерной геофизики, в каждом из которых можно выделить большое число отдельных областей приложения рассматриваемого метода и многочисленные задачи [1, 8 и др.]:

1) изыскания, проводимые для обоснования проектов строительства;

2) исследования, способствующие успешному проведению самого строительства;

3) наблюдения за работой законченных сооружений и наблюдения за взаимодействием их с окружающей средой;

4) анализ влияния антропогенной нагрузки на геологическую среду.

В последующих разделах мы попытаемся раскрыть содержание этих разделов.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Горные породы представляют собой сложные агрегаты минеральных частиц, связанных между собой силами молекулярного взаимодействия. В условиях естественного залегания они пронизаны системой пор и трещин, в той или иной степени заполненных водными растворами различного химического состава, концентрации и агрегатного состояния, а также воздухом. Таким образом, каждая горная порода – это сложное вещество, состоящее из трех фаз: твердой (один или несколько минералов), жидкой (водный раствор, нефть или нефтепродукты) и газообразной (воздух или горючие газы). Поэтому физические свойства горных пород определяются, прежде всего, свойствами самих фаз, их количественным соотношением в породе (рис. 2.1).



Рис. 2.1.Фазовый состав горной породы

Широкий диапазон значений физических свойств горных пород объясняется многообразием их минерального состава, строения, многофазностью, а также генезисом горных пород. При изменении одного из физических свойств горной породы происходит изменение других. Это явление называется взаимо-

связью физических свойств горных пород. Взаимосвязи позволяют определять значения одних физических свойств по другим.

Применение геофизических методов для решения инженерных задач основано, именно, на использовании различий в физических свойствах горных пород. Эти различия определяются минеральными и гранулометрическими свойствами горных пород (грунтов), их текстурой, структурой, степенью водонасыщенности, составом и концентрацией поровых электролитов, пористостью и другими параметрами. Они-то и служат причиной появления геофизических аномалий тех или иных параметров физических полей Земли, т. е. отклонений реальных наблюденных (измеренных) параметров от нормального поля.

В инженерной геофизике широко используются следующие физические свойства горных пород: *плотность, пористость, влажность, влагоемкость, гранулометрический состав, проницаемость, удельное электрическое сопротивление, поляризуемость, диэлектрическая проницаемость, намагниченность, магнитная восприимчивость, скорость распространения упругих волн, естественная радиоактивность, теплопроводность, теплоемкость.*

Эти физические свойства можно сгруппировать на следующие группы.

2.1. Основные инженерно-геологические свойства горных пород

Плотностью σ любого вещества называют отношение массы вещества *m* к ее объему $V(\sigma = m/V)$. Горные породы, как правило, неоднородны и состоят из твердой, жидкой и газообразной фаз вещества. Поэтому плотностью горной породы называют отношение массы вещества всех фаз, присущих данной породе в условиях естественного залегания, к объему, занимаемому веществом этих фаз, т. е.

$$\sigma = (m_1 + m_2 + m_3)/(V_1 + V_2 + V_3) = m/V, \qquad (2.1)$$

где $m_1, m_2, m_3, V_1, V_2, V_3$ – массы и объемы твердой, жидкой и газообразной фаз соответственно; m, V – суммарные масса и объем всех фаз горной породы. Отношение массы твердой фазы вещества к ее объему ($\sigma_{min} = m_1 / V_1$) называют минеральной плотностью. Плотность горных пород тесно связана с различными физико-геологическими факторами, которые определяют состав, структуру минерального скелета породы и пористость.

Корреляционная связь между плотностью и другими физическими параметрами горных пород широко используются при комплексной интерпретации материалов геофизических исследований. Так, зависимость между плотностью и пористостью горных пород выражается уравнениями вида

$$\sigma_c = \sigma_м(1-k_п), \tag{2.2}$$

$$\sigma_в = \sigma_м(1-k_п) + \sigma_ж \cdot k_п,$$

где $k_п$ – коэффициент общей пористости; σ_c – плотность сухой породы; $\sigma_в$ – плотность водонасыщенной породы; $\sigma_м$ – минеральная плотность; $\sigma_ж$ – плотность поровой жидкости.

Скорость распространения упругих волн пропорциональна плотности при определенных значениях и постоянстве модулей упругости. В большинстве случаев более плотные горные породы характеризуются повышенной скоростью распространения упругих волн.

Пористость $k_п$, или коэффициент пористости, определяется отношением объема пор $V_{пор}$ к объему всей породы в сухом состоянии и выражается в долях единицы или процентах:

$$k_п = \frac{V_{пор}}{V} \cdot 100\% . \tag{2.3}$$

Коэффициент пористости может быть рассчитан по удельному и объемному весу породы:

$$k_{\text{п}} = (1 - \frac{\delta}{\gamma}) \cdot 100\%, \tag{2.4}$$

Горная порода является многофазной системой, состоящей из твердой фазы (минерального скелета) и порового пространства, заполненного воздухом или жидкостью (рис. 2.1). Поры в горной породе могут сообщаться друг с другом или быть изолированы минеральным скелетом. Поры различают по происхождению, размерам, форме, условиям взаимосвязи:

1) общую пористость – суммарный объем всех пустот независимо от их формы, величины и взаимного расположения;

2) пористость закрытую – совокупность замкнутых пор, не имеющих между собой сообщения;

3) пористость открытую – совокупность сообщающихся между собой пор и пустот (в пределах этой пористости возможно движение жидкости и газов при определенных давлении и температуре).

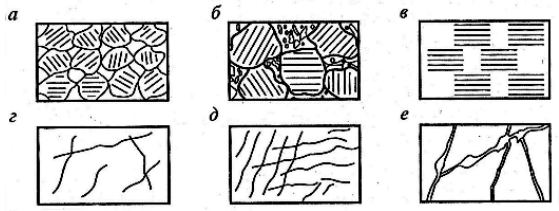


Рис. 2.2. Примеры первичной (*а,б,в*) и вторичной (*г,д,е*) пористости в обломочных, глинистых и карбонатных породах[по В.С.Зинченко]: *а – хорошо отсортированный и высокопористый песчаник; б – плохо отсортированный песчаник с пониженной пористостью; в – микрослоистые глины; г – трещиноватая карбонатная порода ($к_т \sim 0{,}15$ %); д – то же ($к_т \sim 0{,}3$%); е – трещиноватая, кавернозная карбонатная порода ($к_т \sim 5$ %)*

Проницаемость или коэффициент проницаемости $k_{пр}$ – способность горных пород пропускать через себя жидкости и газы при перепаде давления. Проницаемость зависит от размера сообщающихся между собой пор и трещин в горных породах, выражаемым в $м^2$, Дарси, *мД*.

Различают проницаемость абсолютную (физическую) и эффективную (фазовую). Под абсолютной (физической) проницаемостью понимают проницаемость горной породы для газа и однородной жидкости при полном заполнении пор породы газом или жидкостью и отсутствии физико-химического взаимодействия между жидкостью и породой.

Под эффективной, или фазовой, проницаемостью понимают проницаемость горной породы только для газа или жидкости при движении в них другого флюида – жидкости или газа.

Отношение эффективной проницаемости к абсолютной называется относительной проницаемостью.

2.2. Водно-физические свойства горных пород

Водно-физические свойства горных пород характеризуют их способность изменять состояние, прочность и устойчивость при взаимодействии с водой, поглощать и удерживать воду или фильтровать ее.

К числу наиболее широко изучаемых показателей водно-физических свойств относятся: влажность, влагоемкость, гранулометрический состав, горных пород.

Влажность – важнейшая характеристика физического состояния песчаных, и особенно, глинистых пород. Она характеризуется количеством воды, заполняющей поры. Все количество воды, которое содержит порода в естественных условиях залегания, называют *естественной влажностью* породы. Различают весовую влажность и объемную.

Влажность отдельных образцов определяют путем высушивания их при температуре 100–105 °С до постоянного веса. Зная вес породы до высушивания *Р* и вес сухого образца после высу-

шивания P_c, можно легко определить вес воды $P_в$ и влажность породы:

$$w = \frac{P - P_с}{P_с} = \frac{P_в}{P_с} \cdot 100\%. \tag{2.5}$$

Объемную влажность так же, как и весовую, выражают в долях единицы и в процентах, но от объема сухой породы. Если поры породы полностью заполнены водой, то объем воды в породе равен объему ее пор (пористости).

Влагоемкость и водоотдача пород. Влагоёмкостью горных пород называют их способность принимать, вмещать и удерживать определенное количество воды. Она характеризуется коэффициентом влагоемкости, который выражается в весовых или объемных процентах. В первом случае он определяется отношением массы воды к массе минеральных частиц породы (показатель абсолютной влажности), во втором – отношением объема воды к объему образца (показатель относительной влажности). Взаимосвязь между весовой и объемной влагоемкостями выражается формулой

$$w_{о.в} = w_{в.в} \cdot \delta, \tag{2.6}$$

где $w_{о.в.}$ – коэффициент объемной влагоемкости, %; $w_{в.в.}$ – коэффициент весовой влагоемкости, %; δ – объемный весь сухой породы, *г/см*^{3}.

Пластичность – это способность грунта изменять форму под воздействием внешних условий без изменения объема. Пластичность грунта наблюдают в определенном интервале значений влажности. Влажность, ограничивающую интервал проявления пластических свойств грунта, называют пределами пластичности.

Гранулометрический состав – относительное содержание в нем (по массе) частиц различных размеров.

Гранулометрический состав является одним из важнейших факторов, определяющих физические свойства нескальных пород, такие как: пластичность, пористость, удельная поверхность, сопротивление сдвигу, сжимаемость, разбухание, водопроницаемость. Например, с уменьшением размера частиц уменьшается водопроницаемость пород, возрастает их пористость. Для определения гранулометрического состава выполняется гранулометрический (механический) анализ. Он заключается в расчленении грунта на группы с близкими по величине частицами (фракциями). Размеры частиц горных пород изменяются в очень широких пределах – от 1 *мкм* или 0,01 *мм* (частицы глинистых и коллоидно-дисперсных минералов) до сотен миллиметров (галька, валуны).

2.3. Электромагнитные свойства горных пород

Основными (первичными) электромагнитными свойствами горных пород являются: удельное электрическое сопротивление ρ, диэлектрическая проницаемость ε, естественная электрохимическая активность A_e и вызванная электрохимическая активность $A_в$. Если их измеряют в малых объемах породы или в однородных средах, то называют истинными. Эти же свойства могут быть пластовыми, интервальными и средними, когда они характеризуют соответствующие элементы геологических сред (пласты, интервалы, толщи).

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) является важнейшей характеристикой токопроводящей способности геологической среды, предопределяющей распределение постоянного и в значительной степени переменного электрического тока.

УЭС измеряется в Омах на метр (*Ом·м*) и численно равно сопротивлению одного кубического метра породы с сечением в 1 $м^2$, измеренному перпендикулярно к этому сечению. Обратной величиной является удельная электрическая проводимость $\gamma = 1/\rho$, измеряемая в сименсах на метр (*См/м*). Электропроводность, как и все остальные электрофизические свойства, зависит

от минералогического состава, структуры твердой фазы и характера заполнителя пустот (водные растворы солей, лед, воздух). Минералы, слагающие горные породы, имеют как электронную, так и ионную электропроводность, причем у минералов, относящихся к группе проводников и полупроводников, главенствует электронная, а у минералов-диэлектриков – ионная электропроводность.

Для наиболее распространенных осадочных, изверженных и метаморфических горных пород в реальных условиях залегания (в массиве) оно зависит от минерального состава, физико-механических и водных свойств горных пород, а также от некоторых других факторов (температуры, глубины залегания, степени метаморфизма и техногенных воздействий и другое).

Большинство широко распространенных породообразующих минералов характеризуется высокими сопротивлениями, колеблющимися в пределах 10^6-10^{16} *Ом·м*. Это обстоятельство позволяет считать, что практически все осадочные, а также в значительной мере изверженные и метаморфические породы, слагающие верхнюю часть геологического разреза, проводят электрический ток только благодаря наличию в их порах и трещинах водных растворов солей.

Температура оказывает влияние, как на сопротивление минерального скелета породы, так и на сопротивление проводящей компоненты, т. е. водных растворов, насыщающих пустоты породы. Однако сопротивление большинства породообразующих минералов в диапазоне температур, с которыми приходится иметь дело при инженерно-геологических изысканиях (от -20 до +100 °С), изменяется настолько незначительно, что с ним практически не считаются. Поэтому считают, что воздействие температуры на горные породы соответствует воздействию этого фактора на ее жидкую фазу.

При возрастании температуры подвижность ионов увеличивается, и сопротивление горных пород понижается.

Реакция УЭС горных пород на давление, под которым они находятся, сложна и зависит от характера их электропроводности,

структурных и текстурных особенностей, степени заполнения пор влагой и некоторых других факторов. Оно может быть даже неодинаковым по знаку в различных диапазонах действующих механических нагрузок. Сопротивление минерального скелета с увеличением давления обычно уменьшается.

У грунтов, не полностью насыщенных водой, что особенно характерно для зоны аэрации, может наблюдаться уменьшение сопротивлений с ростом давления. В этом случае под воздействием давления часть пор смыкается, что способствует более равномерному распределению влаги в остальных порах и, следовательно, образованию менее извилистых токопроводящих каналов.

Горные породы могут быть электрически анизотропными, т. е. могут обладать неодинаковой электропроводностью (сопротивлением) в различных направлениях. Она может быть обусловлена особенностями отложений тех или иных пород, процессами метаморфизма, трещиноватостью, выветриванием, воздействием внешних физических полей и другими факторами. Анизотропия проявляется почти во всех осадочных породах, которые состоят из чередования пропластков с различным сопротивлением. Такая система, естественно, будет лучше проводить электрический ток по напластованию, чем в других направлениях. Метаморфические породы также чаще всего состоят из ориентированных частиц, имеющих различные электрические свойства, что приводит к более легкому прохождению электрического тока по простиранию. Трещиноватые горные породы также обладают анизотропией, т. к. представляют собой среду, в которой токопроводящие каналы ориентированы в плоскости трещин.

Величина анизотропии определяется коэффициентом анизотропии

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_l}}, \qquad (2.7)$$

где ρ_n – УЭС по нормали к напластованию; ρ_l – та же величина по напластованию. При этом ρ_n всегда больше ρ_l.

Диэлектрическая проницаемость ε. Этот параметр является коэффициентом обратной пропорциональности в формуле Кулона, описывающей взаимодействие между двумя электрическими зарядами в среде.

С формальной стороны диэлектрическая проницаемость характеризует способность среды сгущать или же разрежать силовые линии электромагнитного поля при постоянном значении его напряженности.

В отличие от электрической проводимости, диэлектрическая проницаемость в значительной степени зависит от минерального состава скелета горной породы. Для большинства минералов величина ε не превышает 10–12 единиц. При температуре 18 °С диэлектрическая проницаемость чистой свободной воды равна 81, т. е. почти на порядок выше, чем среднее значение этого параметра у породообразующих минералов.

Диэлектрическая проницаемость горной породы как гетерогенной системы зависит от соответствующих значений этого параметра для отдельных слагающих ее фаз, их количественного соотношения и взаимного расположения.

Естественная и вызванная электрохимическая активность горных пород. В результате естественных электрохимических процессов, протекающих в природной геологической среде, горные породы в ряде случаев оказываются электрически поляризованными, что приводит к возникновению естественных электрических полей. Такие локальные поля определяются различными геолого-гидрогеологическими факторами и подразделяются на диффузионно-адсорбционные, фильтрационные и окислительно-восстановительные.

Интенсивность этих полей характеризуется через особый электромагнитный параметр среды – электрохимическую активность. Различают следующие виды электрохимической активности.

Диффузионно-адсорбционная активность – определяет свойство пород создавать естественную разность потенциалов вследствие диффузии ионов, находящихся в подземных водах

разной концентрации, и адсорбции некоторых из них на поверхности твердых частиц.

Вследствие различной электролитической подвижности ионов на контакте двух одинаковых по составу электролитов разной концентрации возникают диффузионные потенциалы, величина ЭДС которых определяется формулой (Нернста)

$$E_d = k_d \lg(\rho_2/\rho_1), \qquad (2.8)$$

где $k_д$ – коэффициент диффузионной ЭДС.

Если между растворами различной концентрации располагаются перегородки из глины или какой-либо другой мелкодисперсной породы, характер прохождения ионов в порах нарушается. В результате образуется двойной электрический слой, состоящий из слоя ионов, непосредственно прилегающего к твердой фазе породы (неподвижный слой), и слоя менее прочно связанного с поверхностью и имеющего постепенно убывающую плотность по направлению от твердой фазы в глубь жидкой фазы (подвижный слой или диффузионный).

Возникающая вследствие указанного распределения зарядов диффузионно-адсорбционная ЭДС рассчитывается по формуле

$$E_{da} = k_{da} \lg(\rho_2/\rho_1), \qquad (2.9)$$

где $k_{да}$ – коэффициент диффузионно-адсорбционной ЭДС, который зависит не только от химического состава электролитов и температуры, но и в значительной степени от минералогического состава, размеров и конфигурации пор породы, слагающей перегородку между электролитами.

Величину

$$A_{da} = (E_{da} - E_d)/\lg(\rho_2/\rho_1) \qquad (2.10)$$

принято называть диффузионно-адсорбционной активностью. Она характеризует свойства пород адсорбировать из растворов, наряду с молекулами воды, ионы определенного знака.

Фильтрационная активность пород характеризует свойство пород создавать естественную разность потенциалов при фильтрации подземных вод через поры в породе. Величина фильтрационных потенциалов может быть определена по формуле

$$\Delta U_{\Phi} \approx a_{\Phi} \Delta P, \qquad (2.11)$$

где a_{Φ} – фильтрационная активность породы, ΔP – перепад давлений, под действием которого происходит фильтрация.

Окислительно-восстановительная активность характеризует свойства металлов создавать на контакте с ионопроводящей средой разность потенциалов (электродный потенциал).

Электродные потенциалы возникают при переходе катионов из металла в раствор. Раствор при этом заряжается положительно.

Что касается металла, то за счет избыточных электронов его поверхность заряжается отрицательно. Таким образом, на границе электронных и ионных проводников образуется двойной электрический слой. Под влиянием целого ряда факторов, связанных с физико-химическими особенностями среды, потенциал этого слоя не остается постоянным на различных участках поверхности раздела. В результате в окружающем пространстве создается электрическое поле, параметры которого зависят от минералогического и структурного состава контактирующих проводников, концентрации электролита, его *pH*, подвижности подземных вод и многих других причин.

Вызванная поляризация (ВП). При прохождении электрического тока через горные породы физико-химические процессы и явления, наблюдаемые в природных условиях, искусственно активизируются. Эта активизация приводит к возникновению электрических полей, которые складываются с первичным полем электрического тока, введенного в геологическую среду. После отключения электрического поля в течение некоторого отрезка времени будет суще-

ствовать вторичная (наведенная) ЭДС, которую можно наблюдать как самостоятельное явление.

Интенсивность и временные параметры ВП зависят от минералогических и структурных особенностей горных пород, а также минерализации и ионного состава подземных вод. Основной, но не единственной причиной возникновения ВП в ионопроводящих средах являются диффузионные потенциалы в токопроводящих каналах (порах). Под влиянием электрического тока движение ионов в них активизируется, причем подвижность катионов и анионов оказывается различной в зависимости от сечения поровых каналов. Тем самым нарушается равенство чисел переносов в узких и широких капиллярах. Отсюда локальное увеличение концентрации электролита в местах выхода электрического тока из узких капилляров, что приводит к возникновению диффузии ионов в обратном направлении. Как следствие в каждой из элементарных ячеек, объединяющих широкие и узкие капилляры, создаются вторичные диффузионные электродвижущие силы. В объеме горных пород возникает как бы множество элементарных диполей, в своей совокупности обусловливающих электрическое поле, которое накладывается на первичное.

Когда поступление первичного электрического тока в геологическую среду прекращается, вторичное наведенное электрическое поле исчезает не сразу, а в течение некоторого отрезка времени.

Вызванную электрохимическую поляризацию характеризует ее активность

$$A_B - \Delta U_{ВП}(t_1)/\Delta U - E_{ВП}(t_1)/E\,, \qquad (2.12)$$

где ΔU и E – разность потенциалов и напряженность поляризующего поля;

$\Delta U_{ВП}(t1)$ и $E_{ВП}(t1)$ – разность потенциалов и напряженность поля, замеренного через определенный фиксированный интервал времени после отключения тока (чаще всего через 0,5 с).

Поляризация, выраженная в процентах, обозначается обычно через η. Для ионопроводящих пород она меняется от десятых и даже сотых долей процента до 5–6 %.

2.4. Другие электрические и тепловые свойства

С *электрохимической,* или *естественной, поляризуемостью* геологических сред α в инженерной геофизике приходится сталкиваться при изучении естественных постоянных электрических полей диффузионно-адсорбционной и фильтрационной природы. Она характеризует способность твердых частиц адсорбировать на своей поверхности или в капиллярах ионы одного знака и выносить по движению потока воды ионы другого знака. Электрохимическую активность измеряют в милливольтах, и она изменяется от – (10–15) мВ в чистых песках, близка к нулю в скальных породах и возрастает до 20–45 мВ в глинах. В целом она зависит от минерального состава пород, глинистости, дисперсности, извилистости и диаметра поровых каналов, пористости, проницаемости, влажности, химического (качественного и количественного) состава подземных вод.

Поляризуемость η, т. е. способность пород накапливать заряды при пропускании постоянного или низкочастотного (до 10 Гц) тока чаще всего определяют по формуле $\eta = (\Delta U_{ВП} / \Delta U_{пр}) \cdot 100$ %, где $\Delta U_{ВП}$, $\Delta U_{пр}$ – разности потенциалов в питающей цепи во время пропускания постоянного тока и через 0,5 с после его отключения. Поляризуемость скальных осадочных пород не превышает 1–2 %, а магматических и метаморфических 2– 5 %. В рыхлых осадочных породах она изменяется от 1 до 15 % в зависимости от пористости, глинистости, извилистости поровых каналов, водонасыщенности, минерализации подземных вод, засоленности почвогрунтов.

Диэлектрическая проницаемость ε горных пород зависит от диэлектрической проницаемости твердой фазы и заполнителя пор. Для большинства породообразующих минералов относи-

тельная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{отн}$ изменяется от 2 до 11, достигая у некоторых оксидов и сульфидов 20 и более. Воздушно-газовый заполнитель имеет минимальную ($\varepsilon_{отн}$ = 1), а водный – максимальную ($\varepsilon_{отн}$ = 80 при 18 °С) диэлектрическую проницаемость. Поэтому в рыхлых осадочных породах $\varepsilon_{отн}$ изменяется от 2,5 до 40 в зависимости от пористости и водонасыщенности. В магматических породах $\varepsilon_{отн}$ варьирует в пределах 6–12, а в метаморфических – от 4 до 17.

Магнитная проницаемость μ громадного большинства горных пород и руд близка к проницаемости свободного пространства. Лишь у ферромагнетиков она может превышать ее в 2–10 раз.

Теплопроводность λ_T горных пород зависит от теплопроводности минерального скелета и заполнителя пор. Высокой теплопроводностью обладают рудные минералы [до 40 Вт/(м· °С)], для всех же остальных породообразующих минералов она изменяется от 2 до 15 Вт/(м · °С). Для воды и льда λ_T составляет, соответственно 0,6 и 2,2, а для воздуха около 0,02 Вт/(м · °С). В целом теплопроводность магматических, метаморфических, скальных и рыхлых осадочных пород изменяется соответственно в пределах 1,5–2,5; 2–5; 2–3,5; 1– 2 Вт/(м · °С).

Удельная теплоемкость C горных пород сравнительно постоянна, возрастает с увеличением водонасыщенности от 500 до 1500 Дж/кг · град.

Температуропроводность ($a = \lambda_T / C\sigma$, где а – плотность) горных пород изменяется в пределах $(5–15)\cdot 10^{-7}$ м^2/с.

Тепловой инерцией $Q = \sqrt{\lambda_T G\sigma}$, используемой при аэрокосмических тепловых съемках, определяется способность геологических сред реагировать на периодический нагрев (например, вследствие суточного изменения солнечной активности). Значение Q минимально для сухих почв, торфа (до 500

Дж/м^2·с$^{1/2}$·К, где К – градусы Кельвина). Для рыхлых осадочных пород Q возрастает от 500 до 2000, а для скальных осадочных и изверженных пород изменяется в пределах 1000–2500 Дж/м^2·с$^{1/2}$·К. Для воды (океаны, моря, озера) тепловая инерция максимальна (10000 *Дж/м*^{2}·*с*$^{1/2}$·*К*). Водонасыщенность является основным фактором, увеличивающим тепловую инерцию горных пород.

2.5. Магнитные свойства

Наиболее важными магнитными параметрами горных пород и руд являются магнитная восприимчивость, магнитная проницаемость, индуцированная намагниченность, остаточная намагниченность и естественная остаточная намагниченность.

Магнитная восприимчивость характеризует способность горных пород намагничиваться (изменять свой магнитный момент) под действием внешнего магнитного поля (*нТл*).

Магнитная проницаемость μ – способность горных пород изменять свою индукцию под действием внешнего магнитного поля. Измеряется в генри на метр (*Гн/м*).

Индукционная намагниченность I_i – намагниченность, создаваемая магнитным полем и исчезающая после прекращения его воздействия. Измеряется в амперах на метр (*А/м*).

Остаточная намагниченность Ir – намагниченность, создаваемая магнитным полем и сохраняющаяся после прекращения его действия (*А/м*).

Естественная остаточная намагниченность I_n – остаточная намагниченность, создаваемая древним или современным полем Земли (*А/м*).

2.6. Упругие и физико-механические свойства

Различают деформации упругие (после снятия нагрузок полностью восстанавливается форма и объем тела), пласти-

ческие (после снятия нагрузок форма и объем тела восстанавливаются не полностью) и разрушающие (порода теряет свою сплошность, разрушаясь на части).

Горные породы являются дифференциально-упругими средами, т. е. полностью восстанавливающими форму и размеры после снятия воздействий. Для большинства горных пород и минералов справедлив закон Гука, устанавливающий пропорциональность между действующей нагрузкой и деформацией.

Упругие свойства горных пород в основном характеризуются скоростями распространения продольных и поперечных волн, модулем Юнга (динамическим модулем упругости), коэффициентом Пуассона, модулем сдвига и модулем деформации.

Скорости распространения сейсмических волн характеризуют упругие свойства среды. Различают продольные волны (волны сжатия) P и поперечные волны (сдвиговые волны) S. При прохождении продольных волн смещение частиц среды происходит в направлении ее распространения, т. е. вдоль луча. При прохождении поперечных волн смещение частиц среды происходит в плоскости, нормальной к лучу.

Скорости распространения упругих волн в неограниченной абсолютно упругой изотропной среде можно определить по формулам, являющимися решениями волновых уравнений. При этом скорость распространения продольной волны определяется соотношением

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-k)}{\sigma(1+k)(1-2k)}} = \sqrt{\frac{k+\frac{4}{3}\mu}{\sigma}}, \qquad (2.13)$$

где E – модуль Юнга; k – коэффициент Пуассона; σ – плотность среды; L – коэффициент Ламе; μ – модуль сдвига:

$$L = \frac{E\,k}{(1+k)(1-2k)} \qquad (2.14)$$

Скорость распространения поперечной упругой волны:

$$V_S = \sqrt{\frac{E}{2\sigma(1+k)}} = \sqrt{\frac{\mu}{\sigma}}. \qquad (2.15)$$

Скорость распространения поверхностной волны Релея:

$$V_R = (0{,}87 + 1{,}12k)\sqrt{\frac{\mu}{\sigma(1+k)}} \qquad (2.16)$$

При этом всегда наблюдается следующее соотношение скоростей:

$$V_P > V_S > V_R.$$

Соотношение скоростей продольных и поперечных волн является только функцией коэффициента Пуассона:

$$V_P/V_S = \sqrt{\frac{2(1-k)}{1-2k}}. \qquad (2.17)$$

Для большинства горных пород скорость распространения продольных волн приблизительно в 2 раза больше скорости поперечных волн.

Модуль Юнга (динамический модуль упругости) $E_Д$ имеет размерность силы на единицу площади. Модуль Юнга – это величина напряжения, которая вызывает удлинение стержня единичного сечения вдвое. Измеряется в ньютонах на квадратный метр ($Н/м^2$) или Паскалях ($Па$).

Коэффициент Пуассона k (коэффициент поперечного сжатия), или коэффициент пропорциональности между относительным сокращением (удлинением) стержня под действием нагрузки и относительным увеличением (сокращением) его поперечных размеров. Коэффициент Пуассона – величина безразмерная, может принимать значения от 0 до 0,5.

Модуль сдвига μ определяется отношением касательного напряжения к величине угла сдвига и характеризует способность тел сопротивляться изменению формы. Измеряется в Н/м2.

Модуль деформации $E_{деф}$ является одной из основных характеристик пород, он равен отношению нормального напряжения к производимому им полному относительному удлинению и используется при расчетах устойчивости любых инженерных сооружений. Обычно $E_{деф}$ вычисляют на основании значений, получаемых в результате статических нагрузок при испытании породы в лаборатории. Измеряется в ньютонах на метр (*Н/м*).

2.7. Термические свойства

Температурное поле верхних слоев земной коры обусловлено наличием тепловых потоков. Тепловой поток – это количество теплоты, проходящее в единицу времени через произвольную изометрическую поверхность. Основными параметрами, определяющими термические свойства горных пород, являются теплопроводность, теплоемкость и геотермический градиент

Теплопроводность λ – это свойство среды передавать кинетическую тепловую энергию ее молекул измеряется в ваттах на метр-кельвин [*Вт/(м·К*)]. Она определяется из известного уравнения Фурье

$$dq = \lambda(dS|dl)dtd\tau \qquad (2.18)$$

описывающего передачу количества тепла dq за время $d\tau$ через элемент среды с поперечным сечением dS длиной dl при перепаде температур dt. В системе СИ теплопроводность горных пород в первую очередь зависит от вида породы (минеральный состав, структура), пористости и трещиноватости, типа порозаполнителя и степени насыщенности, температуры (особенно при отрицательных температурах).

Среди чаще всего встречающихся породообразующих минералов кварц характеризуется особенно высоко λ. Поэтому те-

плопроводность магматических пород возрастает с увеличением содержания кремнезема. Если к горной породе приложить давление, то пористость и трещиноватость ее уменьшаются, и контакты между соприкасающимися частицами улучшаются, следствием чего является общее увеличение λ. Этот параметр возрастает также в мерзлых породах по мере замещения воды в порах и трещинах льдом.

Если заполняющая поры и трещины вода движется, то за счет дополнительного конвекционного переноса тепла наблюдается резкое увеличение λ. В данном случае говорят о кажущейся теплопроводности (*lк*), которая приводит к возникновению геотемпературных аномалий и определяет возможность применения геотермии в качестве эффективного метода гидрогеологических исследований.

Удельное тепловое сопротивление ξ – величина, обратная теплопроводности ($\xi = 1/\lambda$), и имеет размерность метр-кельвин, деленный на ватт [(*м·К)/Вт*]. Для различных горных пород и полезных ископаемых ξ варьирует в широких пределах (от тысячных долей до десятков метр-кельвин, деленный на ватт).

Удельная теплоемкость C_P характеризует свойство среды изменять свою температуру и измеряется в джоулях на килограмм-кельвин [*Дж/(кг·К)*]. Величина C_P для большинства горных пород варьирует в пределах 580–2090 Дж/(*кг·К*) и возрастает с увеличением влажности.

Геотермический градиент Г характеризует интенсивность возрастания температуры. Величина, обратная геотермическому градиенту, называется геотермической ступенью.

Температуропроводность а характеризует теплоинерционные свойства горных пород, имеет размерность квадратный метр на секунду ($м^2/с$) и выражает изменение температуры в единице объема среды за единицу времени. По температуропроводности горные породы различаются более чем в 100 раз.

2.8. Ядерно-физические свойства

Под ядерно-физическими свойствами принято понимать естественную радиоактивность горных пород, а также особенности взаимодействия с ними искусственного ядерного излучения.

Естественная радиоактивность. Естественная радиоактивность горных пород связана с наличием в них изотопов, которые обладают свойством самопроизвольно распадаться. Этот распад может сопровождаться как выбросом α- и β-частиц, так и излучением электромагнитной волны (γ-излучение). При проведении геофизических исследований γ-излучение имеет наибольшее значение, т. к. имеет сравнительно высокую проникающую способность (20–30 *см*).

Естественная радиоактивность горных пород обусловлена, в основном, присутствием в них естественных радиоактивных элементов урана ^{238}U и продуктов его распада (радия, тория) и радиоактивного изотопа калия ^{40}K. Остальные радиоактивные элементы (рубидий, самарий) характеризуются большими периодами полураспада и малыми концентрациями в горных породах и поэтому практически на естественную радиоактивность горных пород не влияют.

Свойства, определяющие взаимодействие горных пород с искусственным излучением. Ряд методов инженерной геофизики основан на изучении реакции взаимодействия горных пород с γ-квантами и нейтронным излучением.

Помещенный в геологическую среду источник γ-квантов создает вокруг себя некоторое их распределение – «облако», размеры и плотность которого обусловлены способностью окружающей среды рассеивать и поглощать кванты. Ослабление потока квантов происходит по закону $I=I_0 e^{n}{}_0{}^{\sigma R}$, где I_0 – интенсивность излучения источника; I – интенсивность на расстоянии R от источника; σ – плотность вещества; n_0 – массовый коэффициент поглощения, определяющий вероятность взаимодействия γ-квантов с веществом, которая зависит от энергии излучения, заряда и атомного номера атомов.

Как следует из приведенной формулы, поток излучения быстро убывает по мере удаления от источника (особенно с увеличением плотности горных пород и концентрации в них тяжелых элементов). Основными видами взаимодействия γ-кванта с веществом являются: образование электрон-позитронных пар, фотоэффект и, что особенно важно, эффект Комптона, при котором одному из внешних электронов атомов передается часть энергии γ-кванта. В результате квант изменяет направление своего движения («рассеивается»). Вероятность возникновения эффекта Комптона пропорциональна количеству электронов в единице объема среды, иначе говоря, ее плотности. На использовании эффекта Комптона основаны приемы определения плотности и связанной с ней пористости горных пород.

При облучении горных пород потоком нейтронов они, не являясь носителями электрических зарядов, беспрепятственно проникают сквозь электронные оболочки атомов и взаимодействуют с их ядрами. Основным видом взаимодействий при этом является упругое рассеивание. Оно сводится к столкновению нейтрона с ядром, причем последнему передается часть энергии нейтрона. Это явление носит название замедления, а изменение после соударения направления движения нейтронов – рассеивания. При упругом столкновении энергия передается от одного тела к другому тем больше, чем ближе их массы. Поэтому водород, масса ядра которого соответствует нейтрону, является наиболее эффективным из замедлителей. Длина замедления пути нейтрона L_3 представляет собой один из основных нейтронных параметров и определяется как среднее расстояние по прямой линии от места вылета нейтронов до места, где они превращаются в тепловые, т. е. начинают принимать участие в тепловом движении вещества. Для большинства пород L_3 колеблется от 10 до 30 см и оказывается тем меньше, чем больше содержится в породе воды, являющейся основным носителем водорода.

Тепловые нейтроны, в отличие от нейтронов большей энергии, сталкиваясь с ядрами атомов, не теряют и не приобретают в среднем энергии. В результате такой диффузии происходит за-

хват этих нейтронов ядром атома того или иного элемента. Захват нейтрона ядром атома сопровождается выделением энергии, обычно в форме одного или нескольких γ-квантов. Наиболее активные поглотители нейтронов – хлор и бор, в связи с чем горные породы и подземные воды, содержащие в большом количестве упомянутые элементы, хорошо выделяются по этой их особенности.

При инженерно-геофизических исследованиях нейтронные методы используют для оценки пористости по замедляющему эффекту среды. Эффект замедления при полном водонасыщении пропорционален общей пористости породы.

Методика измерений физических свойств горных пород. Физические свойства горных пород определяются путем прямых лабораторных измерений на образцах или испытаний пород на опытных площадках, а также косвенными способами при интерпретации скважинных и наземных, акваториальных и аэрокосмических геофизических наблюдений. Физические свойства пород, измеренные на образцах и в естественном залегании (в массиве), различаются между собой. Это принято объяснять масштабным коэффициентов, т. е. различием физических свойств в малых объемах горной породы (в образцах) и в больших объемах, когда свойства пластов, толщ или иных геологических включений оказываются осредненными. Кроме того, при изъятии образцов из скважин или обнажений меняется их пористость, флюидонасыщенность и т. п., что изменяет их физические свойства.

Знания физических свойств горных пород позволяют рационально проектировать инженерно-геофизические работы, и главное, осуществлять интерпретацию полученных материалов.

3. КЛАССИФИКАЦИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

По природе изучаемых физических полей геофизические методы подразделяются на методы изучения *естественных* и *искусственных* полей. К первым относится поле силы тяжести (гравитационное поле), магнитное поле Земли, электромагнитное и термическое поля различного происхождения, поля упругих колебаний, возникающих за счет природных механических процессов в геологической среде, и некоторые другие. Искусственные поля – это в первую очередь электромагнитные поля, создаваемые контактным (гальваническим) или индукционным способами при помощи специальных генераторов, и поля упругих колебаний, вызываемых взрывами, ударами или вибрациями, в основе которых лежит механическое воздействие на грунт. Методы, основанные на изучении природных полей можно отнести к категории пассивных, а искусственных – к категории активных. Для ряда методов характерно использование как природных (естественных), так и искусственных полей.

Особенностью инженерной геофизики является широкое использование различных геофизических методов, что связано с разнообразием решаемых задач. Однако ведущая роль принадлежит электромагнитным и сейсмическим методам. Гравиметрические, магнитометрические, термометрические и ядерно-физические методы имеют менее большое значение, хотя при решении определенного круга задач в благоприятных геологических условиях их применение оказывается весьма эффективным.

3.1. Электромагнитные методы

К электромагнитным можно отнести физические методы поисков полезных ископаемых и исследования оболочек Земли, основанные на использовании электромагнитных полей частотой от миллигерц (1мГц = 10^{-3} Гц) до эксагерц (1 ЭГц = 10^{18} Гц). Их принято подразделять на магнито-, электро-, терморазведку

и ядерную геофизику. В инженерной геофизике наибольшее применение находят методы электроразведки и ядерной геофизики, меньшее – термо- и магниторазведки.

Но наибольшим числом методов и модификаций характеризуется электроразведка, которые по частотному спектру, природе полей и аномалий подразделяются на:

• методы естественных электромагнитных полей Земли, включающих магнитотеллурические зондирования (МТЗ) и профилирования (МТП), основанные на изучении полей космического происхождения; переменного естественного электрического (ПЕЭП) и магнитного (ПЕМП) поля атмосферного происхождения; естественного поля (ЕП) на постоянных поляризованных полях электрохимической и электрокинетической природы;

• методы сопротивлений и поляризационные методы, объединяющих электрические зондирования, основанные на изучении изменения с глубиной кажущихся сопротивлений (КС) или вызванной поляризации (ВЭЗ-ВП), и электрические профилирования, предназначенные для выделения на примерно одинаковых глубинах неоднородностей КС (метод ЭП) или ВП (метод ВП);

• методы искусственных низкочастотных полей (частоты 10 Гц–10 кГц) включающих электромагнитные зондирования [частотные с использованием гармонических полей и становлением поля (ЗС), в которых применяются ступенчатообразные неустановившиеся поля] и электромагнитные (индукционные) профилирования, объединяющие методы низкочастотного гармонического профилирования (НЧМ) и профилирования способом переходных процессов (МПП), в которых применяют ступенчатообразные поля;

• высокочастотные (10 кГц–10 мГц) методы электроразведки: радиоволновые зондирования (РВЗ), основанные на изучении интерференции прямых и отраженных радиоволн, и радиоволновые профилирования (РВП), в которых с помощью радиокомпараторов изучают либо поля широковещательных длинноволновых (ДВ–РК) и специальных сверхдлинноволновых

(СДВ–РК) радиостанций, либо поля портативных передатчиков, используемых в дипольном электромагнитном профилировании (ДЭМП);

•сверхвысокочастотные (волны метровой и микрометровой длины) включают радиолокационные зондирования (РЛЗ), а также радарные (РЛС) и радиотепловые (РТС) съемки. Более высокие частоты используют в *терморазведке* [радиотепловые (РТС), инфракрасные (ИКС) и спектрометрические (СПС) съемки]; при *визуальной* (фото-, телесъемке); *ядерных методах* исследований, объединяющих естественные и искусственные гамма- и нейтронные методы. Хотя инфракрасные, ультрафиолетовые, и особенно, визуальные съемки не считают геофизическими (их называют *дистанционными аэрокосмическими геологическими исследованиями),* однако их сходство и единство с другими электромагнитными методами бесспорно.

Практически все рассмотренные выше электромагнитные методы можно использовать в инженерной геофизике при наличии соответствующей аппаратуры и благоприятных геолого-геофизических условиях. Однако возможности разных методов, объемы их применения резко различаются, а все они подразделяются на ряд целевых (прикладных) комплексов, предназначенных для инженерно-геологических, мерзлотных, гляциологических, почвенно-мелиоративных и техногенных исследований.

Подробные описания указанных методов, методики проведения полевых наблюдений и интерпретации материалов приведены в специальной геофизической литературе и научных статьях [19, 20]. Следует отметить, что из всего разнообразия методов электроразведки наиболее широко в инженерной геофизике применяются методы сопротивлений (ВЭЗ, ЭП, метод заряда), метод вызванной поляризации (ВЭЗ–ВП), метод естественного поля (ЕП).

Методы сопротивлений. Физической основой методов сопротивлений является то что, в земле с помощью металлических стержневых заземлителей (питающих) АВ, гальваническим или индукционным способом, создается искусственное посто-

янное электрическое поле, которое затем исследуют путем измерения разности потенциалов между двумя приемными заземлениями MN, подключенными к прибору (рис. 3.1).

Особенности распространения электрического поля в земной коре зависят от электрических свойств разреза, размеров питающей линии, частоты применяемого тока. Величина разности потенциалов между приемными заземлениями (электродами) MN зависит от силы пропускаемого тока I, удельного электрического сопротивления среды ρ и расстояния до питающих электродов AB и определяется выражением

$$\Delta U = U_M - U_N = \frac{\rho I}{2\pi}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right). \qquad (3.1)$$

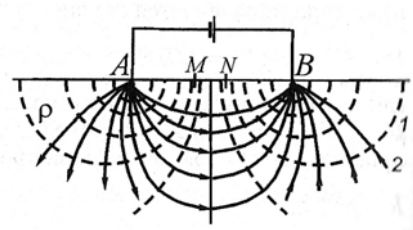


Рис. 3.1. Схема измерения разности потенциалов и силы тока в методе сопротивлений: *Линии: 1 – эквипотенциальные; 2 – токовые*

Из приведенной формулы можно вычислить удельное электрическое сопротивление среды

$$\rho = \frac{\Delta U}{I} \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)}. \qquad (3.2)$$

Выражение

$$\frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)} \qquad (3.3)$$

называется коэффициентом установки, обозначается k и измеряется в метрах. Следовательно, по формуле

$$\rho = k\frac{\Delta U}{I} \tag{3.4}$$

можно рассчитать удельное электрическое сопротивление пород.

Однако данное выражение справедливо для однородной среды. В случае неоднородной среды истинное удельное электрическое сопротивление изменяется за счет влияния окружающей вмещающей среды и поэтому измеренное удельное сопротивление – величина условная, и ее называют кажущимся удельным электрическим сопротивлением

$$\rho_k = k\frac{\Delta U}{I}. \tag{3.5}$$

Величина ρ_k зависит от геологического строения разреза. При наличии в разрезе объекта с хорошей проводимостью ток концентрируется в проводящем объекте, поэтому плотность вмещающей среды уменьшается, и на поверхности земли над проводящим объектом будет отмечаться малое значение ρ_k. При наличии плохо проводящего объекта ток обтекает его и во вмещающей среде, увеличивается плотность тока, а на поверхности над плохо проводящим объектом возрастает величина ρ_k.

Метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) основан на изучении изменения удельного электрического сопротивления горных пород (по вертикали) на глубину. Метод ВЭЗ служит для вертикальной стратификации геологических и гидрогеологических разрезов. Глубина проникновения электрического тока регулируется расстоянием между источником тока и приемником. Она возрастает с увеличением разноса.

Работы обычно выполняют симметричной четырехэлектродной установкой, размеры которой все время увеличивают, при этом пункт наблюдения (центр установки) оставляют постоянным. Аппаратуру и оборудование устанавливают около пунк-

та наблюдения. Приемную и питающую линии составляют из полуразносов AB/2 и MN/2. Величина AB/2 выбирается равной 1,5; 3; 4,5; 6; 8; 10; 15; 25; 40; 65; 100 м и т. д. При изменении величины AB/2 от 1,5 до 10 м, от 15 до 100 м и от 150 до 1000 м линию MN соответственно берут близкой к 1; 10 и 100 м.

На каждом разносе измеряют ΔU и I и затем рассчитывают коэффициент установки по формуле (3,3) и величину кажущегося сопротивления по формуле (3.5). Результаты измерений методом ВЭЗ изображают в виде кривых ВЭЗ, построенных на билогарифмическом бланке.

Интерпретация данных ВЭЗ подразделяется на качественную и количественную. В ходе качественной интерпретации по кривым ВЭЗ определяют тип кривой и выделяют горизонты, которые наиболее резко отличаются по электрическим свойствам от лежащих рядом горизонтов, а также делается заключение о пригодности кривой ВЭЗ для количественной интерпретации. Чтобы получить общее представление об исследуемой площади, в ходе качественной интерпретации составляют, карты типов кривых для всей площади, разрезы кажущихся сопротивлений для каждого профиля, планы изоом для определенных разносов AB.

Карта типов кривых позволяет определить площади, в пределах которых выделяются кривые одного типа.

Разрезы кажущихся сопротивлений используют для общей характеристики геологического разреза (рис. 3.2).

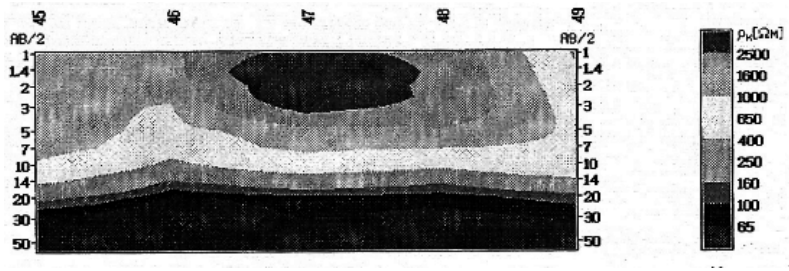


Рис. 3.2. Разрез кажущихся сопротивлений

Планы изоом ρ_k строят по результатам площадных работ (рис. 3.3). По ним выделяют объекты высокого и низкого сопротивления. Построение нескольких планов изоом для разных разносов АВ дает возможность проследить выделенные объекты на глубину.

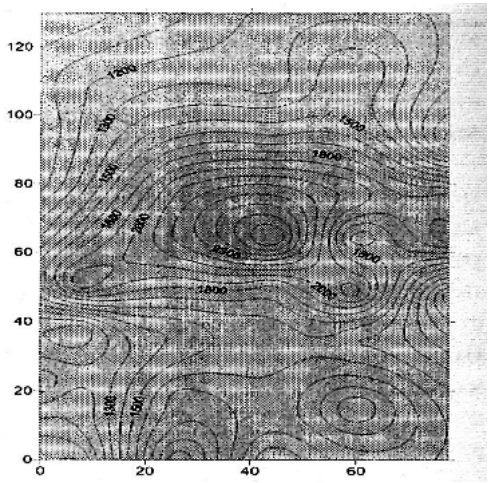


Рис. 3.3. План изоом

Наиболее полные геологические выводы может дать количественная интерпретация кривых ВЭЗ, которая сводится к определению числа горизонтов в разрезе, сопротивления и мощности каждого горизонта. По результатам количественной интерпретации строится геоэлектрический разрез, который позволяет выявить структурные особенности слагающих геологических толщ. Количественная интерпретация выполняется палеточным способом или с помощью ЭВМ.

Круговые зондирования (КВЭЗ). Это модификация ВЭЗ, которую целесообразно проводить при наличии анизотропной среды, обусловленной слоистостью и негоризонтальностью залегания осадочных отложений, трещиноватостью горных пород и т. п.

Методика измерений сводится к тому, что на одном и том же пункте в различных азимутах (обычно через 45°) выполняют вертикальные электрические зондирования. По результатам измерений строятся круговые диаграммы, на которых по направлениям, соответствующим азимутам разносов, откладывают в обе стороны от точки измеренные значения ρ_k. Круговые диаграммы строятся для всех питающих разносов АВ (рис. 3.4).

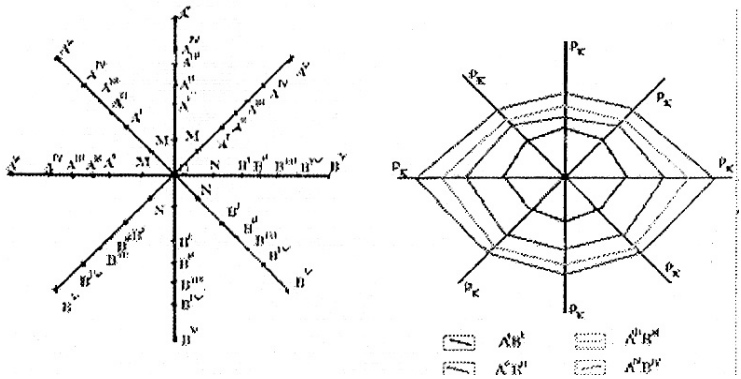


Рис. 3.4. Круговое электрическое зондирование; схема работ и круговые диаграммы

Интерпретация результатов КВЭЗ сводится к анализу круговых диаграмм и определению коэффициента анизотропии по формуле (3.6).

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_{II}}{\rho_{I}}}. \qquad (3.6)$$

При отсутствии анизотропии диаграмма имеет вид окружности, над анизотропной средой – вид эллипса.

Методы электропрофилирования (ЭП). Основаны на изучении кажущегося удельного сопротивления пород при постоянных размерах установки, т. е. взаимное положение питающих и приемных заземлений остается постоянным, в то время как вся

установка от пункта к пункту перемещается вдоль профиля. Это позволяет изучать геологический разрез вдоль линий наблюдений примерно на одинаковой глубине. Для получения наиболее четких результатов в различных геологических условиях применяют различные установки электропрофилирования. В зависимости от применяемой установки и методики полевых работ различают методы симметричного, дипольного, комбинированного профилирования, метод срединного градиента и т. п. В инженерной геофизике предпочтение отдается симметричному и комбинированному профилированиям.

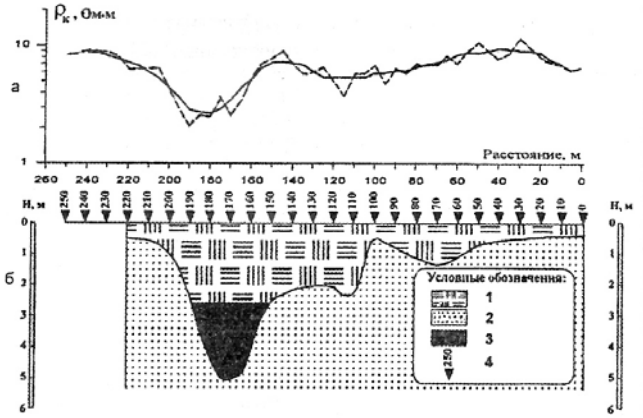


Рис.3.5. График электрического профилирования при АВ=10 м, MN=1 м (а) и геологический разрез по профилю вдоль нефтеналивной эстакады (б) [18]

Симметричное профилирование **(СЭП).** При работах этим методом используют симметричную четырехэлектродную установку, которую перемещают вдоль профиля с шагом, чаще всего равным расстоянию MN.

Для измерений используют симметричные установки с двумя питающими линиями (AA'MNB'B). AB – большой разнос подбирается так, чтобы получить наиболее полную информацию на глубине залегания искомых объектов. Малый разнос A'B' должен ха-

рактеризовать особенности верхней части разреза. Иногда применяют установку с тремя питающими линиями AA'A"MNB"B'B, которая позволяет изучать геологический разрез на трех глубинах и еще более повысить геологическую информативность метода. Величина разносов определяется по данным предварительно выполненных рекогносцировочных ВЭЗ.

На каждом пункте наблюдения в линии MN измеряют ΔU, в линии AB – ток I и рассчитывают значение ρ_k по формуле (3.5). По значениям ρ_k строят графики, карты графиков кажущихся сопротивлений.

Интерпретация результатов электропрофилирования является качественной. В результате интерпретации на картах графиков и изолиний ρ_k проводят корреляцию однотипных элементов и выделяют аномалии. Сопоставляя графики с фактическими геологическими материалами по данной площади, определяют тип геоэлектрического разреза, плановое положение структур (оси складок, выходы пластов под покровные отложения, положения зон тектонических нарушений и т. п.), направление падения пластов и другие качественные характеристики разреза.

Круговое профилирование. Применяется в основном для определения направления трещиноватости горных пород. Суть данного метода сводится к тому, что на каждом пункте профиля определяют не одно, а несколько значений ρк в разных направлениях; ρ_{k1} с установкой A1MNB1, ρ_{k2} – с установкой A2MNB2 и т. д. Затем по направлениям, соответствующим азимутам разносов, откладывают в обе стороны от точки измеренные значения ρ_k и получают полярную диаграмму.

Интерпретацию круговых диаграмм выполняют с учетом парадокса анизотропии. Когда установка расположена вдоль трещиноватости, ток от электрода A течет к электроду B вдоль трещин, плотность тока в линии MN высокая, разность потенциалов ΔU большая, а следовательно, и значения ρк высокие. Когда установка ориентирована поперек трещин, ток растекается в стороны вдоль трещин, плотность тока в линии MN меньше

а, следовательно, и значения ρ_k минимальные, хотя фактически сопротивление пород в этом направлении наиболее высокое.

Метод комбинированного профилирования применяют для поисков и прослеживания, крутопадающих хорошо проводящих тел.

Установка комбинированного профилирования состоит из двух встречных несимметричных трехэлектродных установок AMN и BNM с общим питающим электродом C, отнесенным от середины MN в перпендикулярном направлении на большое расстояние (обычно равное 10–15 AO, т. е. в бесконечность). Измерение разности потенциалов между электродами MN выполняется на каждом пункте дважды: одно измерение при токе в линии AC (прямая установка AMNC), другое – при токе в линии BC (обратная установка BNMC). Это позволяет получить для каждого пункта по два значения ρ_k, а по профилю построить два графика ρ_k.

Пересечение графиков $\rho_к$, полученных двумя установками, позволяет наиболее точно определить положение крутонаклонных маломощных геологических тел, трещиноватых зон и небольших нарушений. Если проводящих тел несколько, то и пересечение будет не одно. С увеличением глубины залегания рудных тел возможности метода значительно уменьшаются.

Электротомография. Материалы многоканального электропрофилирования по методу сопротивлений (электротомографии) позволяют оценить, главным образом, характер и степень флюидонасыщения грунтового массива. Совместно с данными сейсморазведки с использованием различных типов волн удается получить более полную оценку состояния грунтового массива как основания для проектируемого сооружения.

Приведенные [16] на рис. 3.6 разрезы скоростей поперечных волн и кажущихся электрических сопротивлений характеризуют существенную неоднородность массива мореных суглинков, слагающих крутые склоны залесенного оврага в тех местах, где бурение и проведение геотехнических исследований невозможно. При этом разрез кажущихся сопротивлений более

наглядно отображает ослабленные зоны с высокой степенью водонасыщения, по которым происходят оползневые перемещения склонов.

Количественные характеристики грунтов, получаемые в результате преобразования разрезов кажущихся сопротивлений по сложным инверсионным алгоритмам, как правило, являются относительными. Однако результаты качественной интерпретации весьма наглядно отображают состояние грунтового массива. Приведенные на рис. 3.6 геоэлектрические разрезы получены в пределах одного участка работ, но характеризуют грунтовые массивы совершенно различного строения.

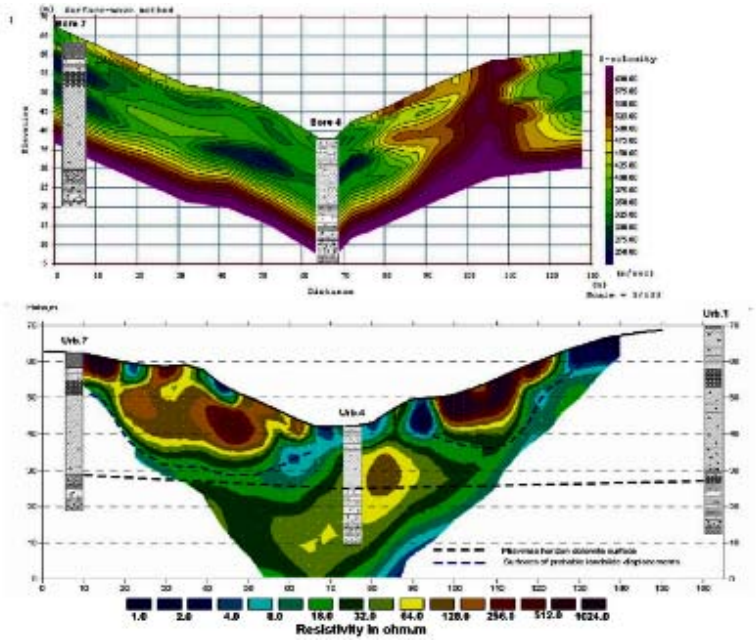


Рис. 3.6. Разрез скоростей попереречных волн по данным MASW (*а*) и разрез кажущихся сопротивлений по данным электротомографа (*б*) через овраг в месте проявления оползневых процессов на склонах [16]

На рис. 3.7, *а* верхняя часть грунтового массива представлена сухими насыпными песками, подстилаемыми мощным слоем водонасыщенных мореных суглинков. На рис. 3.7, *б* относительно тонкий слой аллювия и мореных суглинков подстилается высокоомными доломитами верхнего девона. При этом увеличение мощности низкоомных приповерхностных отложений на концах профиля обусловлено наличием закарстованных участков на поверхности доломитов, отчетливо выделяемых и по данным сейсморазведки рефрагированными волнами.

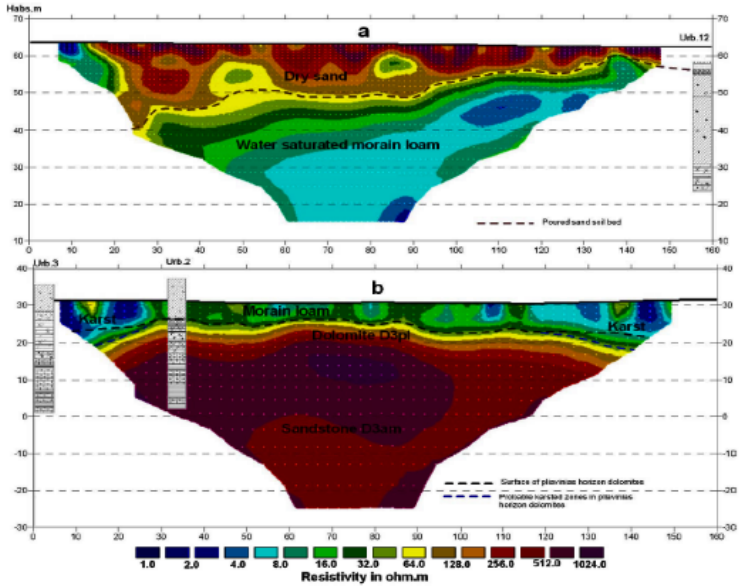


Рис. 3.7. Примеры разрезов кажущихся электрических сопротивлений

Метод заряда. В инженерной геофизике применяют гидрогеологический вариант метода заряда. Сущность метода заключается в изучении электрического поля, создаваемого питающим электродом А, заземленным в скважину ниже уровня грунтовых вод (УГВ). Второй электрод В относят на расстояние, в

10 раз превышающее глубину залегания УГВ, чтобы можно было пренебречь влиянием его потенциала. С помощью приемных электродов MN изучается поле «заряженного» тела.

Работы выполняют как в необсаженных, так и в обсаженных скважинах, оборудованных фильтрами. Глубина залегания изучаемого водоносного горизонта не должна превышать 100 *м*.

Установка для работы методом заряда состоит из питающей линии AB с источником тока и электродами, приемной линии MN с электродами и измерительного устройства.

Методика работ сводится к следующему. В скважину в водоносный горизонт опускают питающий электрод A. Второй электрод B относят в бесконечность (рис. 3.8, *а*). Затем радиально от скважины под углом 45° разбиваются лучи. Приемный электрод N устанавливают неподвижно вдоль луча, направленного в противоположную сторону от предполагаемого направления потока. Второй приемный электрод перемещают по лучам, отыскивая по нулевому отсчету пункт, где потенциал равен потенциалу в пункте N. Расстояние от A до N выбирают таким образом, чтобы оно в 1,5–2 раза было больше глубины залегания водоносного горизонта. На каждом луче находят точки равных потенциалов; соединив их, получают изолинию потенциала, называемую базисной. После этого в скважину опускают мешок с солью. При растворении соли образуется линза минерализованной хорошо проводящей воды – заряженное тело. Минерализованная вода быстро перемещается вдоль течения подземного потока, медленнее – в поперечном направлении и практически не перемещается против течения. После засолки через определенные промежутки времени по тем же лучам (при тех же неподвижных электродах N) проводят измерения и строят изолинии. В первый момент опускания соли изолинии потенциала будут иметь вид окружностей с центром, соответствующим устью скважины. С течением времени изолинии будут принимать форму вытянутых по течению потока фигур (рис. 3.8, *б*).

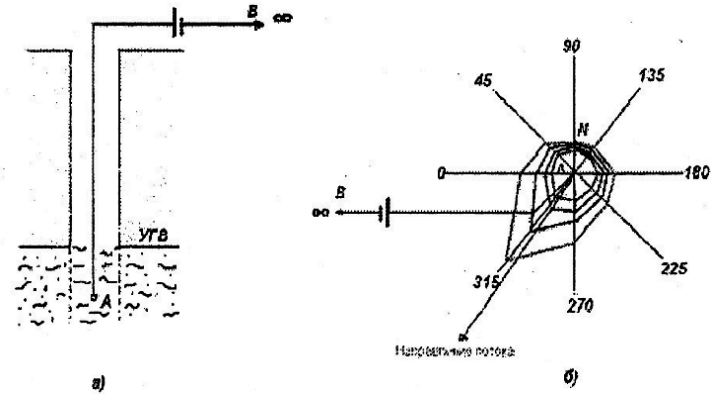


Рис. 3.8. Гидрогеологический вариант метода заряда

Метод постоянного естественного электрического поля (ЕП). Этот метод основан на изучении локальных электрических полей электрокинетической и электрохимической природы. Естественные электрические поля создаются в Земле без вмешательства человека благодаря электродвижущим силам химического, фильтрационного и диффузионного происхождения.

Возникают естественные электрические поля в пористых пластах с циркулирующими в них водами, на границе с рудными телами или на границе двух пластов с различной электронной проводимостью, а также возле искусственных металлических сооружений, погруженных в землю (трубопроводов, рельсов).

Установка метода ЕП состоит из приемной линии MN, измерительного прибора, приемных электродов и проводов. Питающая линия отсутствует. Для работы методом ЕП применяют измерительную аппаратуру метода сопротивлений (АЭ–72, ЭРА, МЭРИ). В качестве измерительных электродов используют неполяризующиеся электроды.

С помощью метода ЕП можно определить направление движения грунтовых вод, потоков, обнаружить выходы трещинных вод под наносы, фильтрацию вод из водоемов и т. п. Измерения методом ЕП проводят на поверхности, в скважинах, подземных горных выработках.

Наблюдения проводят по готовой топографической сети. Обычно применяется прямоугольная сеть, профили ориентируются вкрест простирания искомых или прослеживаемых объектов. Густота сети зависит от масштаба съемки. Съемки ведут двумя способами: потенциала и градиента потенциала.

При способе потенциала работы выполняют с перемещением только одного приемного электрода M, второй N устанавливают на магистрали неподвижно и величину потенциала на нем условно принимают за нуль. Неподвижный электрод N устанавливается на расстоянии 0,1–0,2 *м* от нулевой точки профиля. Наблюдения начинают с измерения поляризации электродов, для чего подвижный электрод M устанавливается рядом с неподвижным. Затем подвижный электрод последовательно переставляют на нулевую, первую и другие точки профиля и измеряют разности потенциалов (рис. 3.6).

После того как профиль в одном направлении будет пройден, выполняют наблюдения в другом направлении профиля. Затем переходят на другой профиль. При переходе с одного профиля на другой увязывают наблюдения, т. е. делаются два измерения: одно при подвижном электроде на нулевой (увязочной) точке только что наблюденного профиля, другое при перестановке подвижного электрода на нулевую точку следующего профиля. Каждое измерение повторяют 2–3 раза. Разность между средними значениями второго и первого измерений: принимается за разность потенциалов между нулевыми (увязочными) точками данных профилей.

В способе *градиента потенциала* переносят оба электрода MN на одинаковые расстояния, обозначенные пикетами; измеренная разность потенциалов между ними соответствует точке в центре MN. Методика наблюдений следующая: после наблюдений с данным расположением электродов отключают от них провода и переносят задний по ходу электрод на два интервала вперед, а передний остается на месте. Причем провод от клеммы M измерительного прибора всегда должен быть подсоединен к переднему по ходу электроду. При такой схеме работ нет необ-

ходимости измерять разность потенциалов, обусловленную поляризацией электродов. Это связано с тем, что разность потенциалов поляризации электродов на двух соседних точках имеет разные знаки и при вычислении кривой потенциал автоматически исключается.

Работы по способу градиента обычно ведутся замкнутыми полигонами (рис. 3.9). Дойдя до конца одного профиля, наблюдатель переходит на конец другого, производя между ними увязочные наблюдения. Второй профиль проходят уже от конца до магистрали.

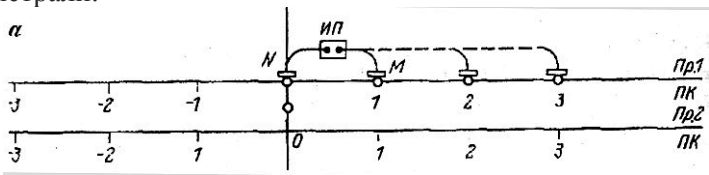


Рис. 3.9. Схема работ способом потенциала

Дойдя до магистрали, наблюдатель снова возвращается к исходной точке, увязывая измерения по магистрали. Затем таким же образом наблюдения выполняются на других половинах профилей. В результате получают систему увязанных полигонов, что позволяет рассчитать потенциалы всех точек площади по отношению к потенциалу исходной точки.

Обработка результатов наблюдений в методе ЕП сводится к вычислению потенциала в каждой точке относительно нулевой по формуле

$$U_i = \Delta U_j - U_э + \frac{\Delta U_i}{n} i, \qquad (3.7)$$

где ΔU_i – измеренная разность потенциалов в i-той точке; $U_э$ – средняя электродная разность потенциалов; ΔU_j – невязка по полигону, т. е. разность отсчетов на первой точке вначале конце рабочего дня; n – общее число точек за день.

Результаты работ методом ЕП изображают в виде графиков, карт графиков потенциалов или градиента потенциалов и карты потенциалов.

Качественная интерпретация данных метода естественного электрического поля (ЕП) начинается с оценки природы и устойчивости аномалий, наблюдаемых на картах и графиках потенциала U или градиента потенциала.

Для геологической интерпретации используются лишь устойчивые во времени аномалии.

При качественной интерпретации данных съемки U_i или ΔU выделяются интенсивные аномалии, коррелируются по соседним профилям, и проводится их геологическое истолкование с учетом ожидаемой природы естественного электрического поля.

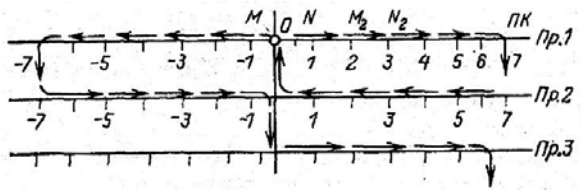


Рис. 3.10. Схема работ по способу градиент потенциала

Метод вызванной поляризации (ВП). Этот метод основан на изучении вторичных электрических полей, наблюдаемых в земле после пропускания длительных импульсов постоянного электрического тока. При этом на границе твердой и жидкой фаз (влага в порах горных пород), а также в присутствии рядом с диэлектриками электроннопроводящих минералов происходит электрохимическая реакция, за счет которой и возникает вторичное электрическое поле, получившее название вызванной поляризации. Интенсивность ВП растет с увеличением времени зарядки. Она в значительной мере зависит от состава и концентрации внутрипорового электролита и от структуры пор, что создает предпосылки применения метода ВП для решения задач гидро-

геологии и инженерной геологии. Время зарядки 3–5 мин обеспечивает вызванную поляризацию, близкую к предельной $\Delta U_{пр}$.

При измерениях в методе ВП используются такие же установки, как и в методах сопротивлений. В качестве измерителей используют специальные станции ВП. Для питания линии АВ применяют токи большой величины (25–30А), которые получают от генератора. Для уменьшения общего сопротивления на концах питающей линии АВ забивают по несколько десятков стержневых электродов, соединяя их параллельно. В качестве приемных электродов используют неполяризующиеся электроды.

При выключении тока в линии АВ первичное электрическое поле исчезает мгновенно, а поле ВП спадает со временем до нуля. Спад ВП протекает в первые секунды, поэтому измерять его нужно сразу после выключения зарядки.

Наблюдения выполняют методом профилирования ВП и зондирования ВП. Расчеты полей ВП сводятся к определению: 1) $\Delta U_{пр}$ в линии MN в период зарядки; 2) I_{AB} в линии АВ в период зарядки; 3) $\Delta U_{вп}$ в линии MN после выключения тока в питающей линии.

По полученным значениям вычисляют

$$\rho_k = K\frac{\Delta U_{пр}}{I}, \quad \eta_k = \frac{\Delta U_{вп}}{\Delta U_{пр}} 100, \tag{3.8}$$

где $\eta_к$ называется кажущейся поляризуемостью горных пород и измеряется в процентах.

При проведении работ методом профилирования ВП строят карты графиков для участка и графики $\rho_к$ и $\eta_к$ вдоль профиля.

По наблюдениям с установкой ВЭЗ вычерчивают на билогарифмическом бланке кривые ВЭЗ–ВП параметров $r_к$ и $h_к$, строят вертикальные разрезы измеренных параметров. Полученные материалы интерпретируют в основном качественно.

3.2. Методы сейсморазведки

Методы сейсморазведки, применяемые в инженерной геофизике в зависимости от частоты используемых упругих волн, делятся на:

- сейсмические методы (частоты 100–500 Гц);
- геоакустические методы (частоты 600–3000 Гц);
- ультразвуковые методы (частоты свыше 20000 Гц).

В инженерной геофизике в основном используют сейсмические и ультразвуковые методы, основанные на изучении полей упругих волн, распространяющихся в горных породах в результате искусственного внешнего воздействия (взрыва, удара или иного начального импульса).

Общие сведения о сейсмических волнах

Типы сейсмических волн [28]

Как известно, в однородной изотропной идеально упругой среде могут возникать два типа объемных волн – продольные *P* и поперечные *S*, которые различаются по характеру смещений частиц среды при распространении и по скоростям. Продольные волны распространяются примерно в два раза быстрее поперечных.

Скорости продольной *P*- и поперечной *S*-волн, как указывалось выше, связаны с упругими характеристиками среды следующими соотношениями:

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-k)}{\sigma(1+k)(1-2k)}} = \sqrt{\frac{k+4/3\mu}{\sigma}},\ V_S = \sqrt{\frac{E}{2\sigma(1+k)}} = \sqrt{\frac{\mu}{\sigma}}, \quad (3.9)$$

где k – коэффициент Пуассона; E – модуль продольной упругости, или модуль Юнга (эти параметры могут быть определены экспериментально в лаборатории при растяжении стержня); σ – плотность среды; μ- модуль сдвига. Отношение V_P/V_S зависит только от коэффициента Пуассона:

$$V_P/V_S = \sqrt{\frac{2(1-k)}{1-2k}}. \qquad (3.10)$$

В жидких и газообразных средах распространяется только продольная волна, поскольку $\mu = 0$.

На границе раздела земля – воздух возникают поверхностные волны Релеевского типа *R*. Скорость этих волн составляет примерно 0,9 величины скорости поперечных волн v_S, а частицы среды при прохождении волны движутся по траекториям, близким к эллиптическим. Амплитуда смещений у релеевской волны, достигая максимума на некоторой небольшой глубине от свободной поверхности, далее уменьшается в глубину по экспоненциальному закону. Этим и объясняется тот факт, что волны этого типа могут быть зарегистрированы лишь на свободной поверхности.

В инженерной геофизике используют все три типа волн. В то время как в обычной разведочной сейсморазведке в основном используют продольные волны, а поверхностные волны относятся к волнам-помехам.

Законы геометрической сейсмики

Распространение сейсмических волн в горных породах и отложениях происходит по законам геометрической оптики, т. е. на границах раздела и неоднородностей волны могут отражаться, преломляться и рассеиваться подобно тому, как это происходит со световыми волнами на поверхностях раздела сред с различной оптической плотностью (воздух – вода, воздух – стекло и т. п.). По этому принципу различают волны прямые, отраженные, преломленные проходящие, преломленные скользящие, рефрагированные (рис. 3.11). Из перечисленных в инженерной геофизике используют все типы волн, за исключением отраженных.

Если имеются два пласта большой мощности, соприкасающиеся вдоль плоской границы раздела со скоростями v_1 и v_2, то из пункта возбуждения в первом пласте со скоростью v_1 будет распространяться прямая волна которая, достигнув границы раздела пластов, отражается и преломляется. В результате за

счет энергии падающей волны образуются вторичные волны: отраженная распространяющаяся в первом пласте со скоростью v_1 и преломленная (проходящая) распространяющаяся во втором пласте со скоростью v_2.

В том случае, когда скорости распространения прямой (падающей) и отраженной волн в первом пласте равны, выполняется закон отражения: угол падения равен углу отражения (рис. 3.11).

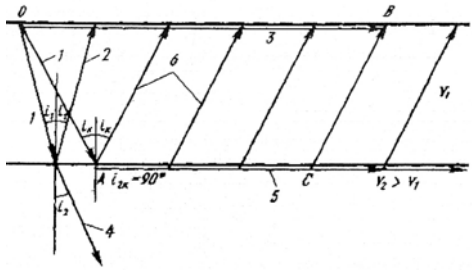


Рис. 3.11. Схема хода лучей сейсмических волн различных типов:
1 – падающая; 2 – отраженная; 3 – прямая; 4 – преломленная проходящая; 5 – преломленная скользящая; 6 – преломленная головная

Преломление на границе происходит по закону синусов, который устанавливает взаимосвязь между углами падения α, преломления β и скоростями распространения упругих волн v_1 и v_2 в пластах

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}. \qquad (3.11)$$

Из этого закона следует, что после преломления сейсмический луч может либо отклонится в сторону границы раздела тогда $\beta > \alpha$, либо приблизится к ее нормали тогда $\beta < \alpha$. Граница, на которой происходит излом лучей волн, называется скоростной границей.

Однако при определенной геологической ситуации может возникнуть момент, когда угол преломления β станет равным 90° и преломленный луч пойдет по границе раздела – появится

скользящая (граничная) волна, скорость распространения которой практически равна скорости преломленной волны *v2*.

Согласно принципу Гюйгенса-Френеля, скользящая волна явится источником элементарных колебаний, которые достигнут поверхности. Упругие волны, рожденные скользящей волной, называются головными. Наблюдаемая скорость распространения головных волн вдоль поверхности земли равна истинной скорости движения скользящей волны, а, следовательно, и скорости преломленной волны v_2. Таким образом, зарегистрировав на поверхности головную волну, мы можем рассчитать скорость распространения преломленной волны.

Основным условием, при котором может возникнуть скользящая и вслед за ней головная волны является то, чтобы угол *b* стал равным 90° ($\sin \beta = 1$). Закон преломления в этом случае примет вид $\sin \alpha = v_1/v_2$.

Но угол падения прямой волны а обязательно должен быть меньше 90°, иначе прямой луч не попадет на границу раздела. Следовательно, $\sin \alpha < 1$, т. е. $v_1/v_2 < 1$ или $v_2 > v_1$. Угол *α,* при котором образуются преломленные (головные) волны в сейсморазведке называется критическим и обозначается i.

Упругая волна распространяется во все стороны от точки возбуждения с постоянной скоростью, определяемой свойствами среды. Поверхность, отделяющая область колебаний от области, где они еще не начались, называется передним фронтом волны.

Поглощение упругих колебаний

Поглощение упругой энергии определяет *коэффициент поглощения* a_n, являющийся величиной, обратной расстоянию, на котором амплитуда гармонически плоской упругой волны уменьшается в 2,71 раза. Используют также безразмерные параметры: *декремент поглощения,* характеризующий поглощение на расстоянии, равном длине волны, $\delta = \alpha\lambda$, и величину, обратную δ, – добротность $Q = \pi / \delta$. Коэффициент поглощения α_n возрастает с увеличением частоты колебаний. Частотная зависимость α_n имеет степенной характер: $\alpha_n \sim \omega^n$, где $1 \le n \le 2$.

Годографы сейсмических волн

При распространении волны в однородной изотропной среде фронт представляет собой расширяющуюся сферу. Поверхность, с которой фронт волны совпадает в любой фиксированный момент времени, называется изохроной. График зависимости времени прихода волны t от расстояния до источника колебаний x называют годографом. Математическое выражение зависимости $t = f(x)$ носит название уравнения годографа. Сейсмические годографы являются исходным материалом для решения обратной задачи сейсморазведки – определения в пространстве положения и формы границ раздела и скоростей распространения упругих волн в пластах.

Годограф прямой волны, распространяющейся вдоль профиля, представляет собой прямую линию, выходящую из начала координат (рис. 3.12).

Уравнением годографа прямой волны имеет вид

$$t = \frac{x}{V}. \qquad (3.12)$$

Для преломленной волны, образовавшейся на плоской границе раздела, параллельной дневной поверхности, уравнение годографа запишется в виде

$$t = \frac{x}{V_2} + \frac{2h\cos i}{V1}, \qquad (3.13)$$

а сам годограф также представляет собой прямую линию, начинающуюся в точке с координатами

$$x_{нт} = 2htgi \quad \text{и} \quad t_{нт} = \frac{2h}{V_{1}\cos i} \qquad (3.14)$$

и отсекающую своим продолжением на оси ординат время

$$t_0 = \frac{2h\cos i}{V_1}, \qquad (3.15)$$

называемое в сейсморазведке временем t_0

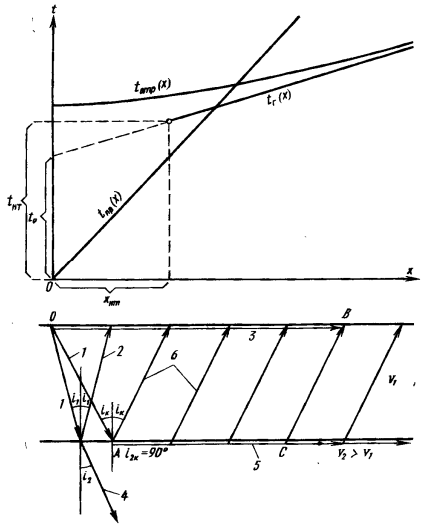


Рис. 3.12. Схема хода лучей сейсмических волн различных типов и соответствующие им годографы сейсмических волн:
Волны: 1 – падающая; 2 – отраженная; 3 – прямая; 4 – преломленная проходящая; 5 – преломленная скользящая; 6 – преломленная головная. Годографы: $t_{пр}(x)$ – прямой волны, $t_г(x)$ – преломленной головной волны, $t_{отр}(x)$- отраженной волны

Для случая плоской границы, наклоненной по отношению к дневной поверхности под углом φ, уравнение годографа записывается в виде

$$t = \frac{x\sin(i \pm \varphi)}{V_2} + \frac{2h\cos i}{V_1}, \qquad (3.16)$$

где угол i имеет знак «+» в сторону падения пласта и «-» – в сторону восстания.

Общее выражение для уравнения годографа в многослойной среде с плоскими горизонтальными границами раздела записывается следующим образом:

$$t = \frac{x}{V_2} + 2\sum_{k=1}^{k=m} \frac{h_k \cos i_{mk}}{V_{1k}}, \qquad (3.17)$$

где v_T – скорость в нижнем преломляющем слое; v_K – скорость в k-том слое; h_k – мощность k-того слоя; i_{mk} – угол между лучом падающей волны и нормалью к границе в k-том слое.

Скорость распространения волны вдоль профиля определяется наклоном годографа. Эта скорость называется кажущейся, т. к. в соответствии с выражением для годографа величина ее в случае наклонной преломляющей границы будет зависеть от того, в какую сторону (падения или восстания) получен годограф.

В неоднородной (градиентной) среде, характеризующейся плавным возрастанием скоростей от дневной поверхности вглубь разреза, возникает особый вид волн, называемый рефрагированным. Для них характерна криволинейная форма лучей, которая зависит от закона изменения скорости в глубину.

Образуются рефрагированные волны следующим образом. Пусть имеем среду, состоящую из отдельных слоев малой мощности и имеющих постоянные скорости, причем $v_1 < v_2 < v_3 < ... v_n$ (рис. 3.13).

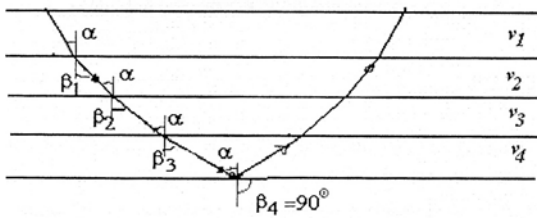


Рис. 3.13. Образование рефрагированных волн

Тогда на каждой границе будет происходить преломление волн, распространяющихся от источника колебаний, в соответствии с законами преломления и отражения

$$\frac{V_1}{\sin\beta_1} = \frac{V_2}{\sin\beta_2} = \frac{V_3}{\sin\beta_3} = \ldots . = \frac{V_n}{\sin\beta_n} = const \quad . \qquad (3.18)$$

Так как скорости v с глубиной возрастают, то и углы β также будут увеличиваться с глубиной и на определенной глубине $\beta = 90°$. Начиная с этой глубины, волны будут выходить на земную поверхность. Причем путь, который пройдет волна, будет таким же, как и путь до точки с максимальной глубиной проникновения волны. Если мощность слоев будет стремиться к нулю, а количество таких слоев – к бесконечности, то луч волны станет криволинейным. Таким образом, плавное увеличение скорости с глубиной приводит к образованию рефрагированных волн.

В некоторых случаях возможна такая ситуация когда скорость распространения упругих волн выше преломляющей границы *v(z)* возрастает, а ниже этой границы скорость $v_Г$ остается постоянной. Тогда, если угол а, под которым луч падает на преломляющую границу, меньше критического, то преломленная волна уходит на глубину, и ее нельзя зарегистрировать на поверхности. Если угол *a* больше критического угла *i,* то преломления не происходит, а происходит отражение. И только в том случае, когда $\alpha = i$ происходит явление полного внутреннего отражения и преломленная волна скользит вдоль преломляющей границы в подстилающей среде со скоростью $v_Г$. Это волна в каждой точке, которой она достигла, порождает другую преломленную волну – головную рефрагированную (лучи этой волны имеют криволинейную форму) (рис. 3.14).

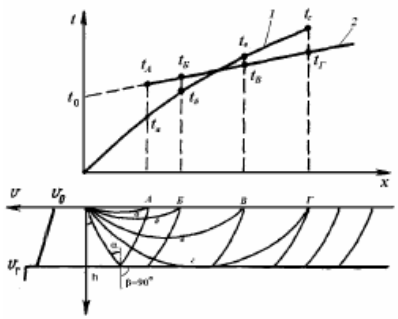


Рис. 3.14. Схема образования прямой и головной рефрагированных волн

3.2.1. Сейсмические методы

Сейсмические методы – методы, позволяющие осветить сейсмическими волнами и увидеть недра Земли – ее геологические структуры. При инженерных изысканиях для оценки состояния и свойств грунтового массива и насыщающих его флюидов обычно используются несколько типов упругих волн в геологических средах. Определяют:

1) скорости распространения продольных υ_P, поперечных υ_S, поверхностных υ_R и других волн;

2) изменение с расстоянием амплитуды колебаний указанных волн, что позволяет вычислять коэффициенты и декременты поглощения $\alpha_P, \alpha_S, \delta_P, \delta_S$;

3) отношения сейсмических параметров для разных волн $\gamma_\upsilon = \upsilon_S / \upsilon_P, \gamma_\alpha = \alpha_S / \alpha_P$ и т. д.;

4) изменения сейсмических параметров в зависимости от направления распространения волн, т. е. коэффициенты анизотропии для скорости, декрементов поглощения;

5) некоторые статистические характеристики среды, например коэффициент мутности и др.

Параметры, характеризующие скорость распространения волн, называют кинематическими, а параметры, определяемые изменением формы записи (амплитуда, частота), – динамическими.

Виды сейсмических наблюдений

В зависимости от условий проведения сейсмических работ в инженерной геофизике применяют следующие виды исследований: наземные (обычная сейсморазведка); в горных выработках: подземную сейсморазведку; в скважинах: ВСП; на акваториях: морскую и речную сейсморазведку. При всех видах исследований, как правило, стремятся к регистрации волн разных типов (продольных, поперечных, обменных, поверхностных), поэтому инженерная сейсморазведка является по существу многоволновой.

В последнее время стало развиваться новое направление инженерно-сейсмических исследований, основанное на регистрации произвольных шумов, тресков и тому подобных колебаний, возникающих при различных геологических и техногенных процессах, например при деформации горных массивов, оснований инженерных сооружений. В горном деле уже давно используют записи естественных шумов (или *акустическую эмиссию)* для прогноза в шахтах и рудниках горных ударов и выбросов [19]. Аналогичные задачи стоят и в инженерной геологии при изучении развития карста, оползней, обвалов, просадок и других геодинамических явлений. Важной задачей является использование акустической эмиссии и микросейсм для контроля процессов деформации оснований плотин, дамб, ГЭС при их сооружении и при наполнении водохранилищ. Указанный метод можно назвать методом естественных сейсмических полей.

Разнообразие задач обусловливает разнообразие видов наблюдений – на дневной поверхности или внутри среды (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Виды сейсморазведочных наблюдений и съемок

Выполняемые с дневной поверхности	Выполняемые внутри среды
1. Продольное профилирование	1. Продольное профилирование в горных выработках
2. Сейсмическое зондирование	2. Вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП) и сейсмокаротаж
3. Симметричное сейсмозондирование (ССЗ)	3. Сейсмическое просвечивание:
4. Площадная съемка	а) между горными выработками,
5. Непродольное профилирование	б) между скважинами,
6. Круговое сейсмическое зондирование (КСЗ)	в) смешанного типа

Сейсмические наблюдения с дневной поверхности

Все перечисленные виды наблюдений с поверхности земли сводятся к двум основным – профилированию или просвечиванию.

Продольное непрерывное профилирование заключается, как следует из названия, в наблюдениях вдоль протяженных, обычно прямолинейных профилей за распространением различных типов роли, приходящих к расположенным на профилях сейсмоприемникам разными путями, зависящими от строения среды. Суть его сводится к тому, что пункт возбуждения и сейсмоприемники располагаются на одном прямолинейном профиле. При продольном профилировании наблюдения выполняют по системе встречных годографов и системе нагоняющих годографов.

Наблюдения по системе встречных годографов позволяют получить два встречных годографа, относящихся к одному участку преломляющей границы.

Расстояние между сейсмоприемниками может составлять 2, 5, 10 м. Работы ведут методом первых вступлений. На каждой установке сейсмоприемников записываются сейсмограммы из нескольких пунктов взрыва (удара), чаще из четырех, реже из шести– восьми, располагаемых на концах, иногда в середине ус-

тановки и на расстояниях, кратных длине установки (выносные пункты взрыва). Таким образом, при продольном профилировании используют 4-, 6- или 8- кратное перекрытие каждого интервала, что связано с изменчивостью скоростей и непостоянством сейсмогеологического разреза.

Непродольное профилирование. При непродольном профилировании источник колебаний располагается не по линии профиля, а в стороне от него, на некотором расстоянии, обеспечивающем прослеживание в первых вступлениях волны от изучаемой преломляющей границы (рис. 3.15).

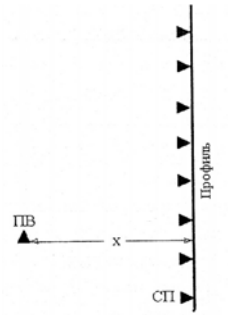


Рис. 3.15. Схема проведения непродольного профилирования

Расстояния между соседними сейсмоприемниками такое же, как и при продольном профилировании.

Сейсмическое просвечивание позволяет по времени распространения волны, прошедшей через определенный участок породы «на просвет», определить среднюю скорость распространения волны на этой базе. При профилировании регистрируются прямые и преломленные (рефрагированные) волны, при просвечивании – только прямые, хотя, строго говоря, в неоднородной среде сейсмические лучи могут испытывать на своем пути преломления на границах неоднородностей или искривления (рефракцию) при плавном изменении свойств среды.

Сейсмозондирование позволяет найти положение линии t_o и определить граничные скорости вдоль каждого преломляющего

горизонта на всем протяжении профиля сейсмозондирования или интервала, соответствующего расстановке приборов.

В инженерной геофизике также используется методика симметричного и кругового сейсмозондирования. Суть симметричного сейсмозондирования заключается в том, что пункт удара и сейсмоприемник последовательно и одновременно относятся на все увеличивающиеся и равные расстояния от центра установки-профиля (рис. 3.16, *а*).

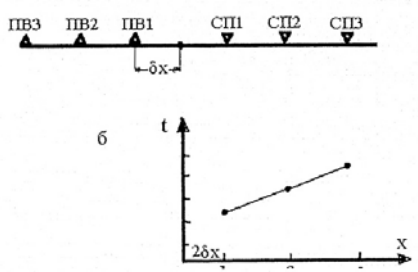


Рис. 3.16 Симметричное сейсмическое зондирование:
а – схема работ, б – годограф

Круговое сейсмическое зондирование (КСЗ) применяется для изучения анизотропии скоростей в исследуемых породах в условиях естественного залегания.

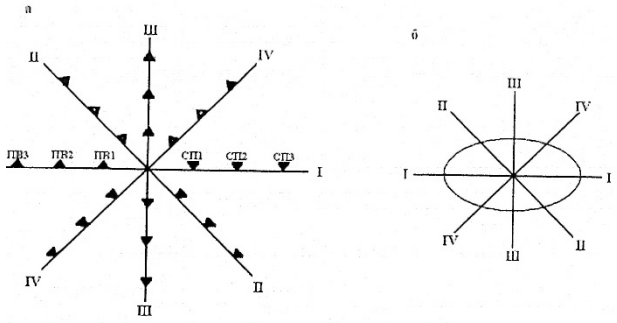


Рис. 3.17 Круговое сейсмическое зондирование:
а – схема работ, б – индикатриса скоростей

Сейсмические наблюдения во внутренних точках среды

Сейсмические наблюдения на дневной поверхности не позволяют детально изучить свойства и состояние внутренних частей массивов пород. С этой целью применяются исследования в горных выработках и скважинах.

Сейсмокаротаж. Сейсмокаротаж выполняется в скважинах для определения пластовых и средних скоростей в выделяемых при этом пластах.

В скважинах, заполненных водой или буровым раствором, наблюдения выполняют по методике сейсмического профилирования, т. е. в скважину опускаются сейсмоприемники, а пункт возбуждения располагают у устья скважины (рис. 3.18, *а*). Такая методика еще называется прямым сейсмокаратажом.

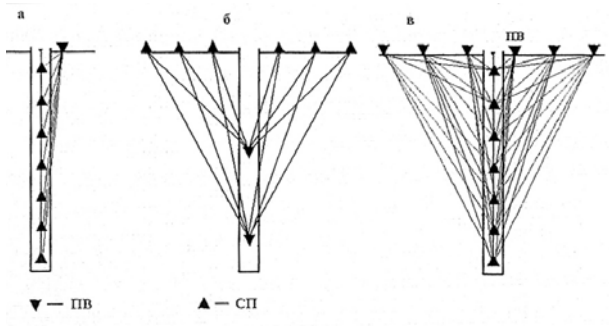


Рис. 3.18 Сейсмические наблюдения в скважинах:*а – прямой сейсмокаротаж; б – обращенный сейсмокаротаж; в – ВСП*

При изучении сухих скважин применяют методику так называемого обращенного сейсмокаротажа, когда регистрирующие приборы располагаются на поверхности земли вдоль короткого профиля, проходящего через устье скважины, а в скважине производят возбуждение сейсмических колебаний с помощью взрывов. При постоянной установке приборов производится регистрация серии взрывов, выполняемых в скважине, начиная от ее забоя, через постоянный интервал, равный 5–10 м (рис. 3.18, *б)*.

Наблюдения выполняются как с многоканальной, так и одноканальной аппаратурой. При работах с многоканальной аппаратурой используется обычная сейсмокоса, на которой крепятся гидроизолированные сейсмоприемники.

Количество и шаг между СП определяются глубинами исследуемых скважин и требуемой точностью определения скоростей. Для неглубоких скважин он обычно равен 1 м, для более глубоких 3–10 м. Естественно, что шаг приборов, как и в обычном профилировании, зависит также и от скорости в исследуемой породе: чем больше скорость, тем больше и шаг. Число приборов принимается преимущественно равным числу приемных каналов сейсмостанции.

При работах с одноканальными станциями используется специальный каротажный зонд с прижимным устройством. Зонд опускается на забой скважины и затем с шагом 1–2 м или менее, в зависимости от глубины скважины, поднимается и прижимается к стенке. На каждой стоянке производится регистрация сейсмических волн, возбуждаемых ударом кувалды у устья скважины.

Вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП). Это аналог сейсмокаротажа, который применяют для детального изучения скоростного строения среды с определением величин скоростей в выделяемых при этом пластах. Методика ВСП заключается в том, что регистрация упругих колебаний производится от пунктов возбуждения, расположенных на разных расстояниях от устья скважины (рис. 18, *в*). Наблюдения по методу ВСП выполняют только много- канальными установками.

Современные методы сейсморазведки, основанные на регистрации различных волн

В современной инженерной сейсморазведке для изучения ВЧР используются следующие методы [16].

Метод преломленных волн (МПВ)

Основным видом наземных сейсмических исследований является продольное профилирование. В зависимости от решаемых задач наблюдения проводят по отдельным профилям или

по системе пересекающихся профилей (площадная съемка). Профили стремятся располагать вдоль элементов рельефа. Как правило, система наблюдений является полной, корреляционной для прослеживаемой преломляющей границы, что обеспечивается получением встречных и нагоняющих годографов вдоль всего профиля. Если прослеживается несколько границ, то часто система наблюдений является полной для самой глубокой (опорной) границы, а другие границы изучают по неполным системам. Это позволяет использовать интерполяционные приемы для повышения точности интерпретации [11].

Для изучения азимутальной изменчивости граничных скоростей используют системы из нескольких пересекающихся профилей («звездочки»), а также сочетание продольного и непродольного профилирования. Последнее применяют также при изучении узких погребенных и современных долин, когда из-за рельефных условий нельзя выйти за пределы мертвой зоны для регистрации головной волны. При использовании легких переносных одно-, трехканальных станций можно применять упрощенные системы наблюдений, позволяющие быстро выявлять интересующие аномалии. Такой системой является профилирование на постоянной базе или на двух постоянных базах (аналог профилирования в электроразведке). Установку приемник-источник или перемещают вдоль профиля, или вращают на одной точке с равным угловым шагом по азимуту (круговое зондирование) для изучения азимутальной анизотропии. Другая тенденция заключается в использовании многократных систем, аналогичных системам МОГТ. Для преломленных волн в этом случае говорят об *общей глубинной площадке* (ОГП), а не о точке. Отметим, что годограф ОГП (координату x отсчитывают от центра установки) не зависит от наклона границы и позволяет находить граничную скорость.

Важной проблемой является выбор шага сейсмоприемника по профилю Δx, поскольку надо учитывать как требование детальности (уменьшение Δx), так и производительности работ (увеличение Δx). Для удобства значение Δx выбирают кратным

10. Значения Δx обычно составляют 1-2,5 м при изучении глубин до 30-40 м, а также при детализации изучаемых объектов. При глубинах изучения 50–100 м и более шаг Δx составляет 5–10 м. Наблюдения с одноканальной станцией и ручным ударным возбуждением часто выполняют по методу «обращенного годографа»: перемещают источник при неподвижном приемнике.

Метод отраженных волн (МОВ)

Метод отраженных волн еще не нашел широкого применения в инженерной сейсморазведке, несмотря на определенные преимущества МОВ перед МПВ в отношении разрешающей способности, точности определения глубин, возможности прослеживать пласты с пониженной скоростью упругих волн. Основные трудности использования МОВ связаны с:

1) необходимостью перехода на более высокие частоты, чему препятствует их высокое поглощение в зоне малых скоростей (ЗМС);

2) трудностью подавления волн-помех вблизи пункта взрыва (ПВ).

Использование цифровых сейсмостанции с накоплением позволяет перейти к регистрации отраженных волн, приходящих с малых глубин. Для этого применяют многократное перекрытие (до 12), уменьшенный шаг $\Delta x = 2 \div 5$ м, выносные ПВ, невзрывные источники. В ряде случаев удается прослеживать отражения в закритической области ($x > x_н$). Если отражение уверенно идентифицируется визуально, применяют профилирование на постоянной базе, что значительно упрощает методику работ. Есть примеры проведения работ МОВ на поперечных SH-волнах по системе *Y-Y,* когда покрывающая толща представлена водонасыщенными рыхлыми отложениями. Эти работы эффективнее по сравнению с работами на продольных волнах, т. к. наблюдается большая дифференциация разреза по скоростям v_s и значительное (в 1,3–1,5 раза) уменьшение длины применяемых волн. При использовании отраженных поперечных SH-волн основной помехой являются поверхностные волны Лява. Для их подавления целесообразно располагать сейсмические профили

на участках поверхностного залегания слоя с большей скоростью (относительно нижележащих пород). В такой ситуации был получен разрез на рис. 3.19.

Обработка данных МОВ полностью автоматизирована и выполняется на компьютерах. Окончательный результат обработки представляется в виде временных и глубинных разрезов, в некоторых случаях в виде пространственных картин расположения отражающих поверхностей. МОВ используется для определения глубины и характера залегания границ раздела геологических напластований, выявления структурных неоднородностей в строении массива пород.

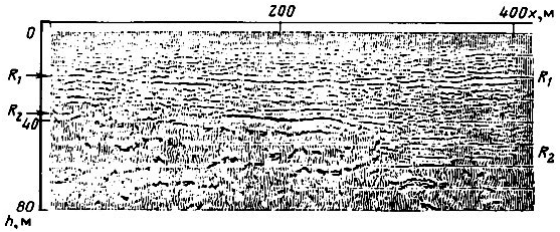


Рис. 3.19. Сейсмический разрез МОГТ по *SH*-волнам, полученный с использованием удара по брусу, шестикратное суммирование воздействий

Метод отраженных волн – мини ОГТ

Из всех применяемых в малоглубинной сейсмике методов наибольшую глубинность исследования верхней части геологического разреза обеспечивает метод отраженных волн в модификации общей глубинной точки (ОГТ). Система наблюдений предусматривает достаточно высокую плотность точек возбуждения упругих волн и пунктов приема сигнала на единицу профиля с целью обеспечить многократное перекрытие при прослеживании отражающих границ. Технология работ достаточно трудоемка, но обеспечивает получение наиболее достоверной информации о геометрии границ раздела физических свойств в изучаемом пространстве, связанных не только со слоистостью, но и с возможными нарушениями сплошности пород вследствие

тектонических подвижек (рис. 3.15). Во многих случаях использование простейших и безопасных для окружающей среды поверхностных источников упругих волн типа падающего груза (рис. 3.20, *б*) позволяет получить достаточно сильные отражения от границ на глубине 500–600 м.

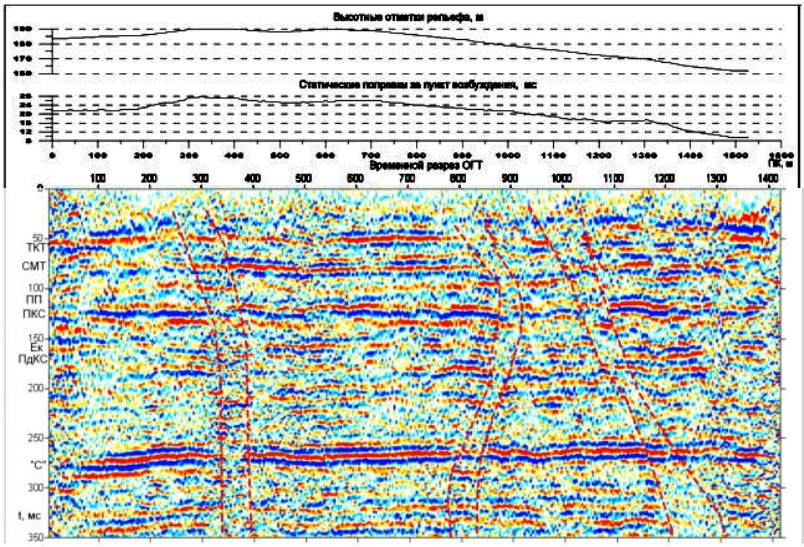


Рис. 3.20. Временной разрез по профилю Верхне-Камского месторождения калийных солей [16]:

Профиль обработан с использованием падающего груза 40 кг с накоплением 4-х воздействий. Высота подъема груза 3 м. Шаг возбуждения по профилю 8 м, интервал приемных каналов 8 м, расстановка центральная, 48 каналов, длина базы приемов 384 м. Группирование приемников 5 геофонов, базы группирования 16 м. Регистрирующая аппаратура – сейсмостанция IS–12B–01 (Intersels, Латвия), шаг дискретизации 0,5 мс. Фильтрация на приеме 14/500 Гц. 70 м – ТКТ – терригенно-карбонатная толща; 110 м – СМТ – соляно-мергельная толща; 180 м – ПП – переходная пачка; 230 м – ПКС – покровная каменная соль; 260 м – Ек – кровля кармалитовой зоны; 300 м – ПдКС – подошва продуктивной толщи; 500 м – С – подошва всей соляной толщи

При инженерных изысканиях обычно ставится задача изучения свойств грунтового массива и коренных пород на глубину 40–50 м. Но иногда возникают специфические задачи, требующие глубинности изучения 150–200 м.

Метод рефрагированных волн

Метод рефрагированных волн наиболее часто применяется в инженерной геофизике для изучения геометрии и физических свойств поверхности коренных пород и определения мощности рыхлых четвертичных отложений.

Наиболее оправдано использование метода рефрагированных волн при отсутствии ясно выраженной слоистости приповерхностного слоя отложений и, как следствие, отсутствии отраженных волн на записях. Глубиннность исследований по методу рефрагированных волн обычно составляет 25–30 % от максимального расстояния источник – приемник. При наличии мощного приповерхностного слоя рыхлых грунтов (сухих песков, торфяников), в котором происходит быстрое затухание энергии упругих волн, для получения годографа рефрагированной волны в первых вступлениях на базе приема в 250–400 м приходится использовать достаточно мощные источники упругих волн, зачастую – взрывы там, где это разрешено природоохранными органами.

Одним из наиболее распространенных применений метода рефрагированных волн является выявление закарстованных участков в приповерхностных слоях коренных пород, представленных галогенно-карбонатными отложениями. В этих случаях глубинность метода обычно ограничена глубиной залегания кровли высокоскоростных отложений, однако изменчивость физических свойств выветрелой поверхности коренных пород и перекрывающего слоя грунтов проявляется достаточно отчетливо.

Метод поверхностных волн

При использовании простейших поверхностных источников упругих колебаний свыше 85 % энергии удара уходит на формирование низкочастотных и низкоскоростных поверхностных волн. Являясь наиболее сильными помехами для метода от-

раженных волн, они в то же время содержат весьма ценную для изучения свойств грунтов информацию о скоростях распространения поперечных волн.

Наиболее передовая и быстро развивающаяся в настоящее время в малоглубинной сейсмике методика обработки, основанная на многоканальном анализе поверхностных волн (MASW), позволяет получать достаточно детальные одно- и двухмерные модели распределения скоростей поперечных волн V_s в массиве грунтов.

Естественным ограничением методики MASW является небольшая глубина проникновения энергии поверхностных волн в толщу грунтового массива. Существенным фактором для увеличения глубинности метода является возможность привлечения для совместного анализа с полученными в активном режиме записями пассивных низкочастотных шумов транспорта и работающих механизмов.

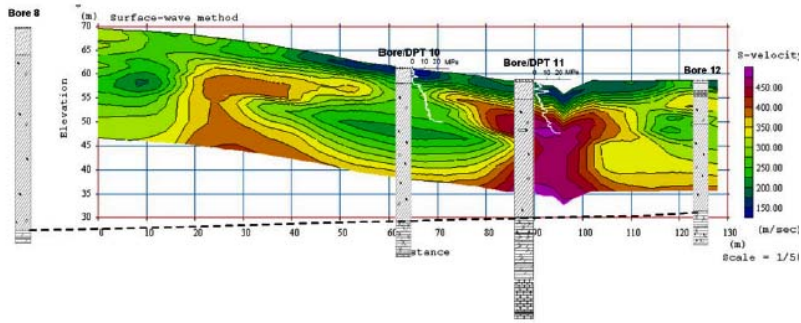


Рис. 3.21. Распределение скоростей распространения поперечных волн в толще мореных суглинков по данным MASW по одному из профилей

Основными предпосылками для многоканального частотного анализа является преобладание энергии компоненты поперечных смещений при распространении колебаний вдоль поверхности раздела сред и частотная дисперсия фазовых скоростей – увеличение видимого периода и, соответственно, увеличение глубины проникновения энергии поверхностной волны в

толщу грунтового массива при увеличении скорости распространения поперечных смещений.

Приведенный на рис. 3.21 разрез характеризует типичное соотношение представительности геотехнических методов, бурения и геофизики при оценке физических свойств грунтового массива. Несмотря на достаточно высокую плотность точек бурения, они не обеспечивают пространственного построения границ инженерно-геологических элементов внутри относительно однородного массива мореных суглинков. В то же время скорости поперечных волн, характеризующие в первую очередь свойства скелета грунта, дают наглядную пространственную картину распределения в мореных суглинках крупнообломочной фракции с повышенными скоростями распространения поперечных волн.

Скважинные методы включают сейсмический каротаж (СК), вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП), сейсмическое просвечивание (СП).

При скважинных сейсмических измерениях прием или возбуждение волн осуществляется непосредственно в скважинах и, наряду с прямыми проходящими волнами, используются отраженные и преломленные.

Сейсмическим каротажам (*СК*) называется метод определения средних скоростей путем измерения времени распространения проходящих волн, возбуждаемых у устья скважины или на некотором расстоянии от нее, до скважинного сейсмоприемника, опускаемого на разную глубину. Методика обработки СК включает осреднение ломаной линией вертикальных годографов, получаемых в результате проведенных измерений. По точкам излома годографа определяются границы выделенных пластов, а по наклону – величины скоростей.

Вертикальное сейсмическое профилирование (*ВСП*) является эффективным методом околоскважинных и межскважинных исследований в сейсморазведочном диапазоне частот при распространении сейсмических волн во внутренних точках реальных сред. При ВСП используется система наблюдений, состоящая из источника колебаний и приемников (или одиночного

приемника) упругих волн. Обычно в скважине перемещаются приемники, смонтированные в виде косы (приемник), а на поверхности земли перемещается, удаляясь от устья скважины, источник упругих колебаний (ПУ). Изучаются волны разных типов: продольные, поперечные и обменные. Анализируются не только первые вступления волн, но и вся сейсмограмма.

По расположению сейсмоприемников различают прямое ВСП (сейсмоприемники располагаются в скважине), обращенное ВСП (сейсмоприемники находятся на земной поверхности, а возбуждение упругих колебаний происходит в скважине) и комбинированное ВСП.

По технике записи различают однокомпонентное ВСП (Z) и трехкомпонентное (поляризационная модификация).

По системам наблюдений выделяют односкважинное и многоскважинное ВСП.

3.2.2. Геоакустические методы

В последнее время при проведении геофизических исследований все чаще возникают ситуации, когда стандартные, традиционно используемые методы не позволяют эффективно решить поставленные перед ними задачи. Это связано со многими причинами как техногенного (высокий уровень вибрационных и электромагнитных помех), так и геологического характера. В связи с этим возрастает актуальность применения нестандартных методов и методик, позволяющих если не решить, то увеличить эффективность решения большинства прикладных геофизических задач.

Геоакустические методы призвания проводит исследования в диапазоне длин волн (частоты 600–3000 Гц), промежуточном между сейсмическими и ультразвуковыми методами. Но основным отличием акустических методов от сейсмических, помимо используемого диапазона частот, является способ возбуждения сейсмических колебаний. Для этой цели применяется электро-

гидравлический эффект, заключающий в возникновении в жидкости ударной волны при высоковольтном разряде электричества.

Поскольку в акустических методах используются колебания сравнительно высоких частот (до 20 кГц), которые сильно поглощаются в исследуемой среде, то изучаемые базы (глубины) невелики. Они варьируют от первых метров до первых десятков метров. Разрешающая способность методов (минимальные размеры изучаемых объектов) зависит от длительности и частоты изучаемого сигнала, глубины залегания исследуемых объектов, уровня помех и эффективности их подавления.

При акустических исследованиях, как правило, проводят комплексные измерения по методикам просвечивания и профилирования. При просвечивании получают надежные данные о скоростях продольных волн. Профилирование используют для определения скорости волн Релея, по которым рассчитываются скорости поперечных волн.

В последние годы при решении прикладных геофизических задач с положительной стороны зарекомендовал себя *метод резонансно-акустического профилирования* (РАП) [сайт http://www.geoacoustic.com/Alterra/methods.html]. Он относится к категории геофизических методов, изучающих и использующих для получения информации естественные физические поля. Это ставит его в разряд методов с небольшой себестоимостью, т. к. позволяет обходиться без громоздких источников возбуждения.

Метод РАП (ООО «Аль-Терра», 2009) использует для получения информации собственное акустическое поле Земли, а именно – поле акустического резонанса, возникающее в толщах горных пород под влиянием различных внешних факторов. Внешними факторами являются источники сейсмической активности земной коры, механические колебания, возникающие в результате напряжений земной толщи, движения планет и мн. др. Под влиянием вышеперечисленных внешних факторов в слоистой толще возникают поперечные упругие колебания.

Поперечные упругие волны возникают только в телах, в которых возможны упругие деформации сдвига. Существова-

ние *поперечных поверхностных волн* является следствием взаимодействия продольных и (или) поперечных упругих волн при отражении этих волн от плоской границы между различными средами. Границей между средами могут быть поверхности ослабленного механического контакта между средами, обусловленные:

- резкой сменой литотипов пород изучаемого разреза;
- прослоями различного генезиса (углистыми, глинистыми, слюдистыми и т. п.);
- перерывами в осадконакоплении;
- интрузивными и экструзивными контактами;
- тектоническими нарушениями;
- границами раздела "осадочный чехол – кристаллический фундамент" и рыхлые отложения – осадочный чехол.

Чем слабее контакт, тем большая возможностью взаимного перемещения соседних слоев, и, следовательно, больше амплитуда возникающих собственных колебаний.

В результате поверхностные волны локализуют энергию возмущений, созданных на поверхности, в сравнительно узком слое. Именно это свойство поверхностных волн приводит к резонансным явлениям. Также любая упругая среда характеризуется тем, что резонансные эффекты в ней проявляются и тогда, когда изначально там не было свободных поверхностей, а затем они появились, например, в результате возникновения и развития трещин. В случае среды «граница твердого тела и жидкости» возникает незатухающая поверхностная волна, что характеризуется существенным повышением амплитуды колебаний. Возможно искусственное усиление амплитуды принимаемых собственных колебаний (приведение акустического датчика в состояние резонанса) путем механического его возбуждения, при этом мощность источника возбуждения не имеет особого значения. Как правило, для возбуждения достаточно обыкновенного молотка.

При возбуждении (ударе в непосредственной близости от датчика) на датчик передаются акустические колебания широ-

кой полосы частот, которые при совпадении с частотами собственных акустических колебаний подповерхностных объектов, вызывают усиление их амплитуды. Частота колебаний обратно пропорциональна мощности колеблющегося «слоя». Под «слоем» понимается толща горных пород, находящаяся между поверхностью наблюдений и поверхностью «ослабленного механического контакта» (ОМК).

Записав и проанализировав суммарный (резонансный) акустический сигнал, можно вычислить его спектральные характеристики и выделить резонансные частоты колебаний, каждая из которых соответствует мощности соответствующего слоя, т. е. глубине залегания поверхности ослабленного механического контакта, при этом большей глубине залегания соответствует более низкая частота собственных акустических колебаний. Реальные сигналы, записываемые аппаратурой РАП, и их спектральные характеристики можно увидеть ниже (рис. 3.22)..

Как видно, результаты измерений (положение основных выделяемых экстремумов спектра) практически не зависят от того, выполнялись ли они с возбуждением датчика либо без его возбуждения. Это позволяет говорить именно о *естественной природе* фиксируемых акустических колебаний.

Метод Резонансно-акустического профилирования защищен патентом США (Patent No.: US 6,199,016 B1. Data of Patent: Mar.6, 2001).

Ниже представлены некоторые результаты работ методом РАП [сайт http://www.geoacoustic.com/Russian/rapplicat.html]. Как и всякий геофизический метод, метод РАП имеет ограничения в применении, связанные с физикой используемого явления. Таким образом, метод довольно успешно может применяться при поисках и картировании объектов, имеющих различия в механических характеристиках (например, степень трещиноватости, характер слоистости и т. д.). Как уже говорилось выше, в большинстве случаев механические структуры совпадают с геологическими, что делает возможным применение метода для изучения геологического разреза.

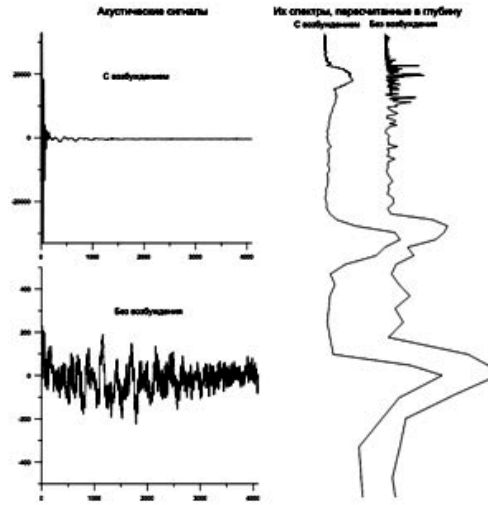


Рис. 3.22. Результаты сравнения результатов измерений РАП с источником возбуждения датчика и без него (частота дискретизации 4114 Гц)

Изучение геологического разреза. Результаты работ, проведенных для Департамента транспорта штата Огайо, показывают возможности метода РАП для изучения геологического строения района работ. Работы проводились по нескольким профилям, один из которых представлен на рис. 3.23.

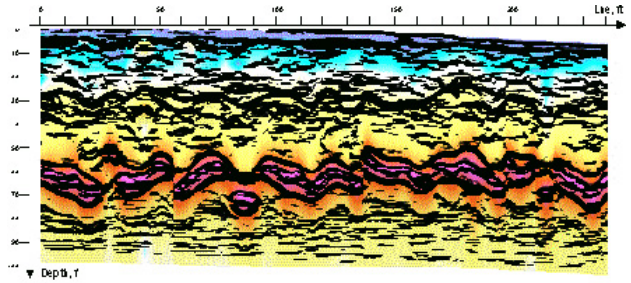


Рис. 3.23. Геологический разрез по профилю (метод РАП)

Одной из проблем, с которыми сталкиваются строительные организации в Огайо – это сильное развитие на территории штата угольных пластов. В результате этого часто происходят просадки грунта, на которых возводятся здания и сооружения. Задачей метода являлось картирование угленосного пласта, определение уровня грунтовых вод, и картирование геологических структур изучаемого разреза. Метод блестяще справился с поставленными перед ним задачами. Угленосные пласты откартированы на глубине 28–40 футов и прослежены по всей линии профиля. На глубине 60 футов выделен водоносный горизонт с подстилающей его прослойкой глинистых отложений. На глубинах более 70 футов выделена граница, определяющая начало нового породного слоя. Это четко видно по резкому изменению структуры слоистости геомеханического разреза.

Картирование водоносного горизонта. Работы методом РАП по картированию водоносного горизонта выполнялись в Ленинградской области с целью определения зон утечки жидких химических отходов из хранилища (рис. 3.24).

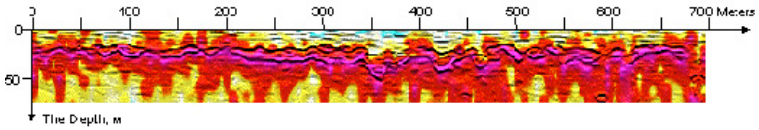


Рис. 3.24. Зоны утечки жидких химических отходов из хранилища

Хранилище жидких химических отходов «Красный Бор» является централизованным хранилищем федерального значения, вокруг него находятся сельскохозяйственные угодья с посадками картофеля. Возможные утечки отходов из хранилища могли происходить по водоносному горизонту, проходящему по поверхности контакта древних, кембрийских образований, с четвертичными ледниково-озерными песчано-глинистыми отложениями. В результате работ удалось выявить и проследить водоносный горизонт на глубинах 25–50 м, по которому происходил дренаж вещества из хранилища.

Изучение геологического разреза для строительства инженерных сооружений. Метод РАП может успешно применяться для изучения геологического разреза при проведении инженерно-строительных работ. Приведенный ниже рис. 3.25 демонстрирует эти возможности.

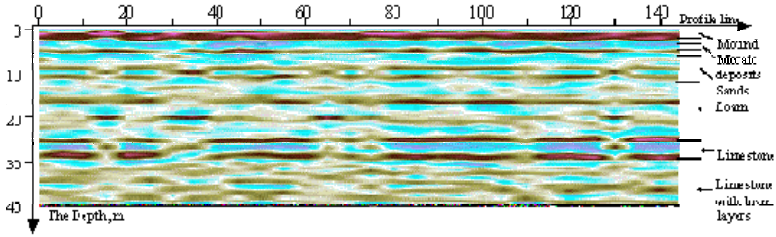


Рис. 3.25. Изучение геологического разреза при проведении инженерно-строительных работ методом РАП

Техническим заданием строительных работ предусматривалась прокладка инженерных коммуникаций подземной проходкой. Инженерные коммуникации должны были прокладываться в толще глин на глубине около 20 м. Для качественного выполнения работ было важно знать глубины залегания и выдержанность по мощности проектного горизонта. Как видно из рис. 3.26, поставленная задача была успешно решена при помощи метода РАП. Следует заметить, что возможности применения других геофизических методов были ограничены, т. к. территория строительства расположена в центре Москвы (Лужники), что обусловливало очень высокий уровень промышленных электромагнитных помех. В результате проведенных работ выделены не только кровля (глубина 12 м) и подошва (глубина 26 м) проектного горизонта, мощность которого выдержана по всей длине съемочного профиля, но и с большой детальностью откартированы все горизонты исследуемого разреза. Результаты работ совпадают с данными о разрезе, полученными при бурении разведочной скважины (на рис. 3.26 – справа от разреза РАП).

Картирование зон тектонических нарушений

Работы методом РАП, проведенные в 1997 г. на одном из объектов Крымского полуострова, и в дальнейшем в штате Юта США, показали возможность однозначного и высокоэффективного выделения зон тектонических нарушений (рис. 3.26), что позволяет рекомендовать РАП и для решения данной задачи.

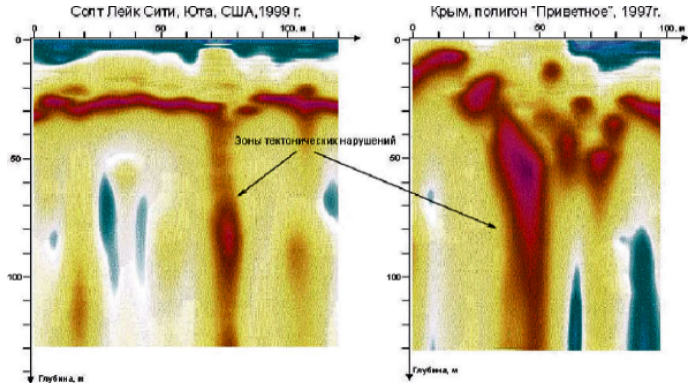


Рис. 3.26. Картирование зон тектонических нарушений (метод РАП)

Картирование зон фильтрации в теле дамбы

Вследствие прорыва дамбы одного из водоемов, входящих в систему водоснабжения Петродворцовой системы фонтанов, возникла необходимость ее восстановления и выявления зон фильтрации в теле дамбы, потенциально опасных на возникновение повторных прорывов. Работы по выявлению зон фильтрации проводились по насыпи дамбы и позволили выявить аварийные участки (рис. 3.27), определить объемы и скорректировать методику инженерно-восстановительных работ.

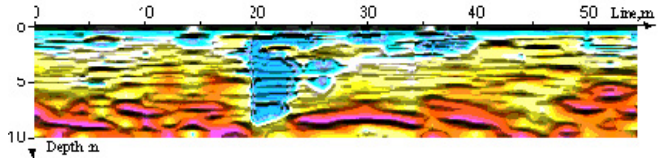


Рис. 3.27. Зона фильтрации в теле дамбы

Картирование подземных полостей. Одна из компаний, занимающихся археологией, предложила определить возможности метода РАП для картирования подземных полостей (Burrows cave) на юге штата Иллинойс, используемых в I веке н.э. в ритуальных целях первыми посетителями Америки из Мавритании. До сих пор для решения задач поисков и картирования пещер использовались традиционные методы – электроразведка, магниторазведка и георадар.

Электроразведка и георадар оказались малоэффективными в связи с развитием на территории глинистых отложений. Заверка бурением отрицательных магнитных аномалий (которые интерпретировались исследователями как аномалии от пустот в слабомагнитном осадочном чехле) часто не приносила результата.

Работы методом РАП, проведенные на территории распространения пещер, выявили причину неудовлетворительных результатов магниторазведки. Были выявлены понижения (рис. 3.28) слабомагнитного осадочного чехла, которые и определяли отрицательные аномалии магнитного поля и неправильно интерпретировались как аномалии, вызванные наличием пустот.

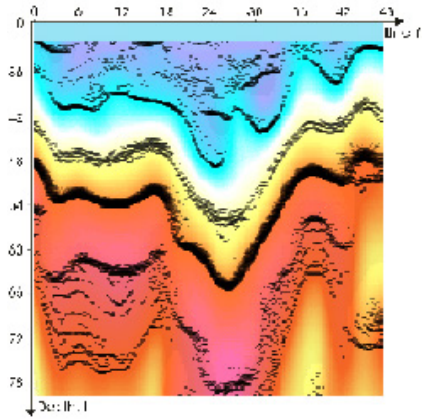


Рис. 3.28. Понижения слабомагнитного осадочного чехла

Проведенные методом РАП работы позволили выявить и непосредственно пещеры. Это стало возможным после проведения обработки фазовой составляющей РАП-сигнала. Как видно из рис. 3.29–3.30, пещеры выделяются достаточно контрастно и находятся на глубине около 20–30 футов (7–10 м) от поверхности наблюдения.

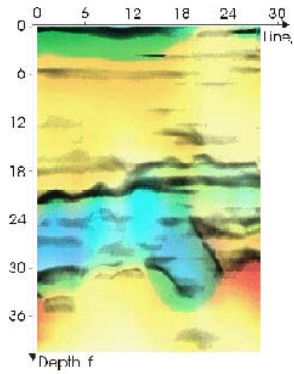


Рис. 3.29

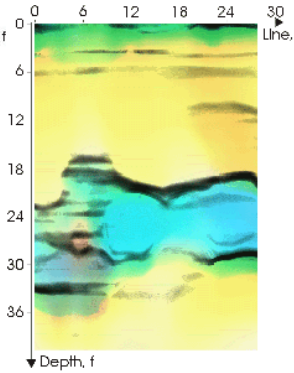


Рис. 3.30

Пещеры выделяются достаточно контрастно и находятся на глубине около 20-30 футов (7-10 метров) от поверхности наблюдения**.**

Сейсмоакустический метод по дну акваторий

При изучении рыхлых отложений по дну акваторий нашел широкое практическое применение сейсмоакустический метод (непрерывное сейсмоакустическое профилирование – НСП). В его основе лежит принцип гидролокации (эхолотирования), в течение многих десятилетий широко используемый для изучения рельефа дна водоемов. Метод основан на определении времени пробега ультразвуковых колебаний от их источника, находящегося на поверхности воды, до дна и обратно до приемника. Зная скорость распространения упругих колебаний в водной среде, определяют глубину до отражающей поверхности (дна) [11].

Возможности этого метода показаны в [10] на примере региональных исследований, выполненных в пределах шельфа Чукотского моря на площади около 2900 км^2 (рис. 3.31).

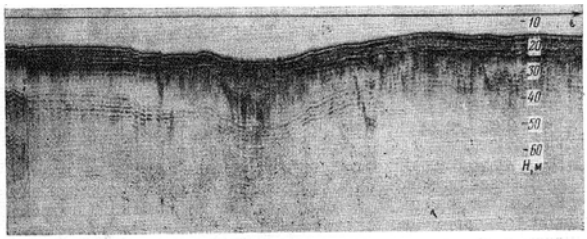


Рис. 3.31. Сейсмоакустический профиль [10]

В результате анализа материалов сейсмоакустических наблюдений и их сопоставления с геологической историей сопредельной суши авторы статьи приходят к интересным выводам о строении и истории развития изученной части шельфа Чукотского моря. Они исходят из предположения, что отложения, выделенные по сейсмоакустическим данным как неслоистая толща, представляют собой консолидированные мезозойские образования, слоистая толща – неконсолидированные кайнозойские образования, а новейшие отложения относятся к голоцену. Выровненная поверхность неслоистой толщи в юго-восточной части обследованной площади представляет собой пенеплен, образовавшийся в эпоху медленных постгеосинклинальных поднятий. В четвертичное время в нее врезались речные долины, что явилось следствием ускоренного ее поднятия. Потом последовало относительное опускание. Долины заполнились аллювиальными образованиями. Поверхность выравнивания опускалась под уровень моря и была перекрыта голоценовыми морскими осадками.

Рассмотренный пример наглядно иллюстрирует возможности сейсмоакустических исследований при изучении стратиграфии и истории новейших тектонических движений в пределах акватории, которая до того практически не была

изучена и в инженерно-геологическом отношении являлась белым пятном. Естественно, что полученные данные необходимо учитывать при проектировании гидротехнических сооружений на шельфе Чукотского моря и иных видах его хозяйственного освоения.

Сейсмоакустические исследования в скважинах

Акустический каротаж (*АК*) является одним из основных акустических методов и применяется в двух модификациях: точечный и волновой.

Точечный акустический каротаж обычно проводят многоканальным зондом, позволяющим вычислять интервальные скорости продольной (Р) и поверхностной (R) волн, которые после сглаживания используют для литологического расчленения разреза, выделения зон трещиноватости, расчета упругих и других физико-механических характеристик.

Волновой акустический каротаж проводят в скважинах, заполненных буровым раствором или водой, с непрерывной цифровой регистрацией волнового акустического сигнала и с последующей компьютерной обработкой. Этот громоздкий и сложный в производстве метод применяется для решения специальных задач в инженерной геологии.

Акустическое просвечивание (*АП*) *между скважинами* основано на изучении характеристик поля упругих колебаний с частотой до 10 кГц. При этом исследуются массивы пород до первых десятков метров. Межскважинное просвечивание позволяет подробно дифференцировать разрез. Эта особенность позволяет применять межскважинное просвечивание для изучения сложнопостроенных сред в тех случаях, когда малоэффективны традиционные методы сейсморазведки. В качестве источников сигнала могут использоваться скважинно-электроискровые.

При сейсмоакустических исследованиях в заполненных водой геотехнических скважинах прием колебаний осуществляется гидрофонным зондом, опущенным в скважину [16]. Возбуждение колебаний производится либо на поверхности, либо в соседней выработке – шахте или скважине. Для получения про-

странственной картины распределения физических свойств изучаемого массива используются несколько профилей, образующих площадную сеть точек возбуждения на поверхности массива (рис. 3.32). Это позволяет выполнить наблюдения по так называемой «полутомографической» схеме с изучением пирамидального объема вокруг исследуемой скважины (рис. 3.33).

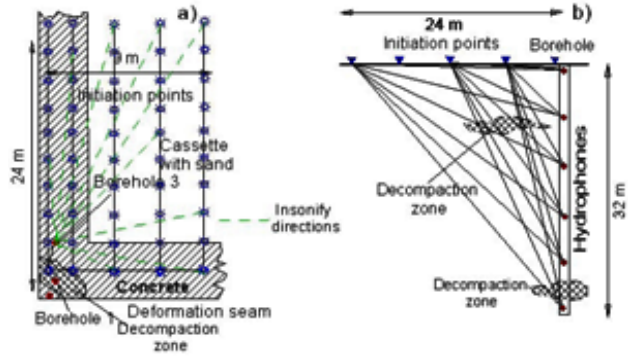


Рис. 3.32. Схема расположения профилей с точками возбуждения колебаний на поверхности [16]

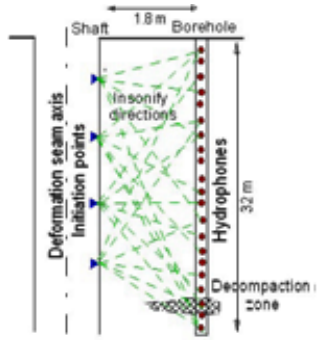


Рис. 3.33. Схема расположения точек возбуждения колебаний в смотровой шахте и лучевая схема при наблюдениях по методике межскважинного просвечивания (сейсмотомографии) [16]

Записи, полученные по методике сейсмотомографии, позволяют получить наиболее детальную и достоверную картину распределения физических свойств изучаемого массива в плоскости распространения лучей между двумя выработками за счет наиболее высокой и равномерной плотности сейсмических лучей.

3.2.3. Ультразвуковые методы

Ультразвуковые методы (частоты свыше 20 000 Гц) применяют для измерения скоростей упругих волн в скальных и полускальных породах в лабораторных (на образцах пород) и естественных условиях (на обнажениях, стенках горных выработок и в разведочных шпурах и скважинах). В связи с большим затуханием упругих волн ультразвуковой частоты исследуемые базы не превышают первых метров. При ультразвуковых исследованиях применяются те же методические приемы, что и в акустических методах. Разнообразие систем наблюдения при измерениях можно свести к двум основным – профилированию и просвечиванию.

Ультразвуковое профилирование

При профилировании один из датчиков, служащий излучателем, остается неподвижным, а второй последовательно перемещается через постоянный интервал Δx в точки наблюдений, расположенные вдоль прямой линии, проходящей через центр излучателя (рис. 3.34). В результате регистрируются времена прихода прямой продольной волны t_p и поверхностной релеевской волны t_R**.** Для надежного прослеживания обоих типов волн один и тот же профиль необходимо проходить дважды (с большим усилением для регистрации продольной волны с меньшим – для прослеживания поверхностной волны). Это связано с тем, что в жестких скальных породах релеевская волна может иметь интенсивность, почти на порядок большую, чем у прямой продольной волны.

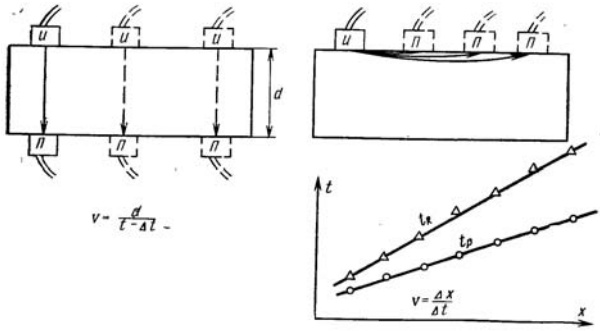


Рис. 3.34. Ультразвуковые наблюдения на образцах:
а – методика просвечивания: волновая картина, схема наблюдений и формула для вычисления скорости; б – методика профилирования: волновая картина, схема наблюдений и годографы волн P и R

В качестве образцов при ультразвуковых наблюдениях используются керны породы, отобранные из разведочных скважин. Линию наблюдений располагают по образующей керна, заранее разметив ее с шагом 1–2 см в зависимости от размеров образца, датчиков и величины скорости в породе. Поскольку линия профиля представляет собой прямую, а скорость остается практически постоянной и вдоль профиля и внутри образца, то при наблюдениях ограничиваются получением одиночного годографа с 10–12 точками на нем.

Однако следует иметь в виду, что скорость распространения упругих колебаний зависит не только от материала образца, но при определенных условиях и от его формы. Поэтому при выполнении ультразвуковых наблюдений необходимо знать условия, при которых могут быть получены значения скорости, отличающиеся от скорости в массиве v_{Pm}.

Исследователями установлено, что определяющим фактором является величина отношения диаметра образца к длине волны d/l_{Pm}.

Если $d/l<0,6$, то фазовая скорость, определенная по наклону годографа будет соответствовать значению скорости в стержне.

Если $d/l>2$, то можно быть уверенным, что определенная скорость будет соответствовать значению скорости в массиве.

В промежуточных случаях $(0,6<d/l<2)$ скорость, определенная по наклону фазового годографа, будет отличаться от скорости в стержне и скорости в массиве.

Таким образом, при профилировании на тонких стержнях вблизи источника колебаний существует область, где по годографу первых вступлений определяется скорость в массиве.

Ультразвуковое просвечивание

Методика просвечивания позволяет измерять скорости продольных, а при наличии специальных датчиков поперечных колебаний – и скорости сдвиговых волн. При просвечивании цилиндрических образцов-кернов, отобранных из скважин, датчик и приемник располагают на противоположных сторонах керна – по диаметру или оси. При наблюдениях должны выполняться следующие требования: 1) образцы должны иметь ровные параллельные друг другу поверхности; 2) датчики должны прикладываться строго напротив, чтобы ось одного являлась продолжением оси другого; 3) вступление импульса должно быть четким, т. е. момент прихода волны должен отмечаться резким срывом. Качество волновой картины зависит от надежности контакта. Поэтому для улучшения контакта поверхность датчиков слегка смазывают солидолом или вазелином.

Данные измерений скорости во взаимно перпендикулярных направлениях позволяют составить представление о скоростной анизотропии породы.

Ультразвуковой каротаж

Ультразвуковое профилирование в разведочных скважинах является специальным видом наблюдений и называется *ультразвуковым каротажем (УЗК)* [Никитин, Верутин]. При УЗК, как правило, получают встречные системы годографов. Это обусловлено не всегда ровной поверхностью стенок скважин, что может вызвать искажение формы наблюденных годографов. УЗК проводится только в заполненных водой скважинах с помощью специальных зондов с надежной гидроизоляцией датчиков.

В практике инженерно-геологических исследований получил распространение детальный ультразвуковой каротаж с семиэлементным зондом. Зонд опускается до забоя исследуемой скважины, а затем поднимается с шагом $\Delta x = 1$ м. На каждой станции зонд прижимается к стенке скважины, и проводится регистрация упругих волн. Для этого один из крайних датчиков, например верхний, включается в качестве излучателя, а соседний – в качестве приемника ультразвука. На регистрирующем приборе проводят запись трассы. Затем включают на прием, следующий к излучателю датчик, и проводят запись следующей трассы. Эти операции повторяются, пока не будут записаны трассы, соответствующие всем шести приемным датчикам. Затем в качестве излучателя включается нижний датчик, и весь цикл наблюдений повторяется в описанном выше порядке.

В результате на каждой стоянке зонда получается система встречных годографов. После отработки всей скважины с шагом зонда 1 м получается непрерывная система встречных и нагоняющих годографов со взаимными точками и перекрытиями на участке 20 см. Наблюдения по такой системе называют еще корреляционным каротажем (т. к. осуществляется корреляционное прослеживание волн в области как первых, так и последующих вступлений).

Наблюдения по описанной методике дают возможность одновременного прослеживания продольных и поперечных волн, что существенно увеличивает информацию об исследуемой породе.

Недостатком корреляционного каротажа является высокая трудоемкость полевых исследований и, особенно, последующей обработки данных наблюдений. Поэтому в нефтяной геологии, где необходимо исследовать очень глубокие скважины, большее распространение получил автоматический ультразвуковой каротаж, называемый там акустическим. В этом варианте каротажа запись времени распространения упругой волны от датчика к приемнику производится непрерывно во время подъема зонда.

3.3. Метод георадиолокационного зондирования

В инженерной геофизике существует множество методов решения разнообразных геолого-поисковых, инженерно-геологических, гидрогеологических, почвенно-мелиоративных, мерзлотных, гляциологических, геоэкологических, археологических, дефектоскопических и других задач. Они отличаются, прежде всего, глубинностью и разрешающей способностью разведки по глубине и в плане. Одним из самых интенсивно развивающихся в последнем десятилетии XX в. методов являлся *радиолокационный метод исследований среды,* иногда называемый *георадиолокационным подповерхностным зондированием (ГПЗ)* или сокращенно просто *георадарным методом* [1, 21].

Метод георадиолокации отличает универсальность, позволяющая использовать георадары для решения задач в геологии, транспортном строительстве, промышленном и гражданском строительстве, экологии, археологии, оборонной промышленности и т. д. В геологии георадары применяются для решения следующих задач:

- картирования геологических структур – восстановления геометрии относительно протяженных границ, поверхности коренных пород под рыхлыми осадками, уровня грунтовых вод, границ между слоями с различной степенью водонасыщения, поиска месторождений строительных материалов;
- определения свойств различных отложений по скорости распространения электромагнитных волн, опираясь на связь этих свойств с диэлектрической проницаемостью пород;
- определения толщины ледяного покрова;
- определения мощности водяного слоя и картирования поддонных отложений;
- определения мощности зоны сезонного промерзания или оттаивания, картирования границ мерзлых и талых пород.

В промышленном и гражданском строительстве георадары применяются для определения толщины стен и межэтажных перекрытий, характера армирования (частота и глубина заложения

арматуры), однородности буронабивных свай, обнаружения электропроводки и труб, проложенных в строительных конструкциях, обнаружения дефектов в строительных конструкциях.

В транспортном строительстве (автомобильные и железные дороги, аэродромы) георадиолокация зарекомендовала себя как эффективный метод для определения толщины конструктивных слоёв дорожной одежды и качества уплотнения дорожно-строительных материалов, содержания влаги в грунте земляного полотна и подстилающих грунтовых основаниях, эрозии грунтов и т. д.

Высокая разрешающая способность по вертикали позволяет достаточно детально проводить инженерно-геологическое расчленение разреза. Наличие скважин значительно повышает достоверность интерпретации георадиолокационных данных и дает возможность получать информацию о межскважинном пространстве. Даже при отсутствии скважинных данных большое значение имеет изучение геометрии разреза (характер изменения мощностей отдельных толщ, наличие палеоврезов, УГВ и т. д.). Существенное увеличение информации о разрезе дает комплексирование георадиолокации с электроразведкой и сейсморазведкой.

Глубинность исследований зависит от присутствия в разрезе глин, плотных суглинков и засоленных грунтов. Наличие перечисленных грунтов резко уменьшает глубинность работ, вплоть до нуля.

Физические основы метода

Суть метода заключается в излучении импульсов электромагнитных волн и регистрации сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства. Такими границами раздела в исследуемых средах являются, например, контакт между сухими и влагонасыщенными грунтами (уровень грунтовых вод), контакты между породами различного литологического состава, между породой и материалом искусственного сооружения, между

мерзлыми и талыми грунтами, между коренными и рыхлыми породами и т. д. [1].

Скорость распространения электромагнитной волны зависит от диэлектрической и магнитной проницаемостей среды. Для большинства горных пород значение магнитной проницаемости близко к единице и не зависит от частоты поля. С учетом этого скорость распространения волны будет

$$V = \frac{C}{\sqrt{\mu_{отн}\,\varepsilon_{отн}}} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_{отн}}},$$

где c – скорость распространения электромагнитных волн в вакууме

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}},$$

μ_0 и e_0 – магнитная и диэлектрическая проницаемости в вакууме.

Скорость электромагнитных волн – наиболее важный для радарных исследований параметр среды, т. к., во первых, отраженные волны, которые мы регистрируем, возникают на границах сред с разными скоростями. С другой стороны, разрешающая способность волновых методов определяется длиной волны (l), которая равна

$$\lambda = \frac{V}{f},$$

где f – частота.

Диэлектрическая проницаемость, а, следовательно, и скорость распространения электромагнитных волн незначительно зависят от частоты и типа грунтов, а определятся, главным образом, их влагонасыщенностью.

Определить скорости электромагнитных волн в радиолокации способами, применяемыми в обычной сейсмике, очень

трудно. Электромагнитные волны быстро затухают, и регистрировать сигналы при большом расстоянии между источником и приемником практически невозможно. Реальные скорости можно определить либо используя априорную информацию о строении разреза, либо по дифрагированным волнам, возникающим на неоднородностях разреза.

Методика полевых наблюдений [21]

Георадиолокационное зондирование проводится с использованием аппаратных и программных средств, специальных приборов – георадаров. Для зондирования среды используются георадары непрерывного и импульсного действия. Блок-схема георадара импульсного типа приведена на рис. 3.36.

Излучаемые в исследуемую среду короткие электромагнитные импульсы имеют 1,0–2,0 периода квазигармонического сигнала (рис. 3.35). Импульсы отражаются от находящихся в исследуемой среде предметов, элементов инженерных конструкций, границ раздела грунтов разного литологического состава, контактов сухого и влагонасыщенного грунта, мерзлого и талого грунта и т. п.

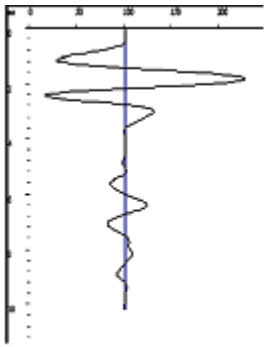


Рис. 3.35. Электромагнитный импульс

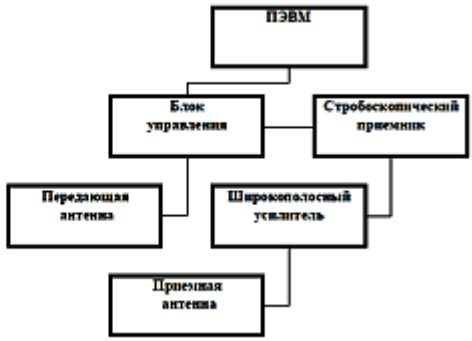


Рис. 3.36. Блок-схема георадара импульсного типа

Малая временная длительность излучаемого импульса приводит к возникновению достаточно широкого частотного спектра излучения (рис. 3.37). Центральная частота сигнала определяется свойствами антенн. Отраженные импульсы регистрируются приемной антенной и усиливаются в широкополосном усилителе (рис. 3.38). В процессе аппаратной обработки методом стробирования определяется время распространения в зондируемых средах сигнала, зарегистрированного приемной антенной. Фаза и величина напряжения, наведенного на входных цепях приемной антенны при регистрации сигнала, преобразуется в цифровой вид при помощи аналого-цифрового преобразователя и фиксируется в памяти компьютера в виде функции от времени, которая называется трассой (рис. 3.38, *А*). Совокупность трасс вдоль профиля съемки образует волновую картину или радарограмму (рис. 3.38, *Б*).

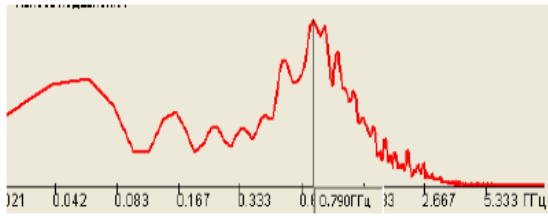


Рис. 3.37. Частотный спектр импульса

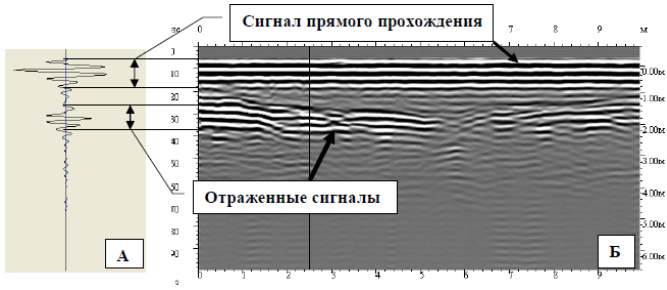


Рис. 3.38. Трасса (*А*) и волновая картина (радарограмма) (*Б*)

Первое отражение на радарограмме называют **прямой волной** (сигналом прямого прохождения). Прямая волна в большинстве случаев одинаковая для всех трасс профиля. Она определяется конструкцией антенны и поверхностью профиля.

Прочие волны на радарограмме являются **отраженными** от каких либо слоев или локальных объектов в грунте (или другой среде исследования).

Сущность обработки георадиолокационных данных состоит в выделении полезного сигнала на фоне помех и шума. С помощью разнообразных приемов преобразования сигналов, волны помехи стараются удалить с записи, ослабить или хотя бы опознать их на записи и не принимать за полезные волны.

В связи с тем, что получаемые георадарные данные очень похожи на сейсмические, потому и граф обработки целиком позаимствован у малоглубинной сейсморазведки.

Исключением является процедура *вычитания средней трассы*. Эта особенность георадара вызвана работой на малых временах задержки. Поэтому в регистрируемом сигнале присутствует интенсивная составляющая, связанная с приходом прямой волны и явлением реверберации (многократного отражения волны от приемной и передающей антенн). Эти волны распространяются по воздуху и поэтому почти не зависят от положения установки на профиле. Таким образом, средняя трасса будет содержать, главным образом, волны-помехи. В результате вычитания средней трассы (горизонтальной составляющей) из всех трасс мы избавляемся от волн-помех и одновременно теряем информацию о горизонтальных границах.

Ввод статических поправок. Цель процедуры состоит в удалении задержки сигнала при записи, т. е. в приведении времени первого вступления прямой волны к нулю.

Фильтрация. Эта процедура проводится в тех случаях, когда частотный спектр помехи или шума занимают на оси частот интервал, отличный или лишь частично перекрывающийся с частотным диапазоном полезного сигнала. В этом случае частотная фильтрация позволяет ослабить помеху и (или) шум,

практически без ослабления и искажения сигнала. При отсутствии помех эту процедуру применять не рекомендуется.

Определение скорости распространения волн. При наличии на радарограмме гипербол дифрагированной волны можно определить: среднеквадратическую скорость распространения волны в вышележащей толще; глубину залегания объекта и место его проекции на профиль.

Для этого нужно совместить наблюденный годограф с теоретическим.

Интерпретация георадарных данных

Результатом георадиолокационной съемки являются временные разрезы (радарограммы), на которых по горизонтали указано расстояние в метрах, а по вертикали – напряженность электрического поля в зависимости от времени и положения установки на профиле. Задачей обработки и интерпретации радарограмм является выделение и прослеживание осей синфазности отраженных волн от различных границ раздела (отражающих границ или горизонтов) волн и их сопоставление с гидрогеологическими особенностями разреза. Признаки, по которым объект распознается на радарограммах в процессе обработки, могут служить различные характеристики волнового поля (участки с различными типами записи).

При геологической интерпретации используются основныположения методики, разработанной в сейсморазведке для метода **t0**, получившей название сейсмостратиграфии.

При отсутствии геологических данных о разрезе интерпретация радарограмм может проводится только на качественном уровне.

Перед началом интерпретации необходимо убедиться в том, что отражающие горизонты на радарограмме являются однократными отражениями. Основным признаком многократных отражений является кратное увеличение времени прихода отраженной волны. В случае наклона отражающей границы с номером кратности будет увеличиваться наклон многократных отражений.

При проведении георадарных исследований с ненаправленными антеннами на радарограммах могут фиксироваться интенсивные воздушные отражения (отражения от объектов, находящихся в воздухе, – столбы, деревья, дома). При наличии подозрений на воздушные отражения необходимо по годографам дифрагированных волн оценить скорость (30 см/нс), расстояние до объекта и исключить их из рассмотрения. Очевидно, что наличие кратных и воздушных волн-помех проверяется по всей системе профилей.

Анализ волновой картины на радарограмме заключается в расчленении разреза на ряд участков или областей, которые отличаются друг от друга характером рисунка либо поверхностями угловых несогласий, либо интенсивными отражающими горизонтами. На рис. 3.39 представлены результаты профильных георадарных работ на участке автомобильной дороги.

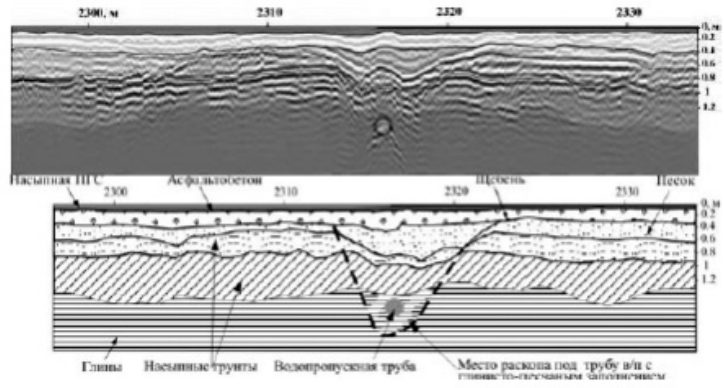


Рис. 3.39. Строение участка дороги с водопроводной трубой по георадиолокационным данным: *вверху – радарограмма, внизу – геологический разрез [1]*

Ниже приведены некоторые примеры применения георадарного метода геофизики в решении различных задач (рис. 3.40–3.43) [22].

Поисковая группа задач

На радарограмме выделена "звучащая" волна, достоверное математическое описание которой пока не найдено, но накомплен огромный опыт интерпретации, связанной с предположениями о наличии коммуникаций.

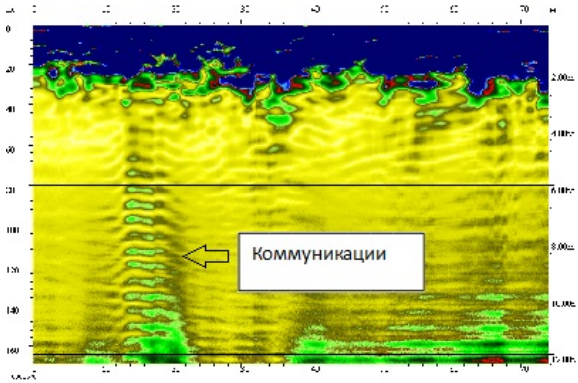


Рис. 3.40

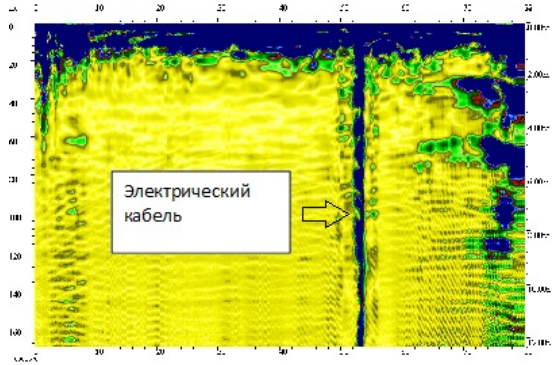


Рис. 3.41

На георадарном профиле выделен участок с коммуникациями – электрический кабель.

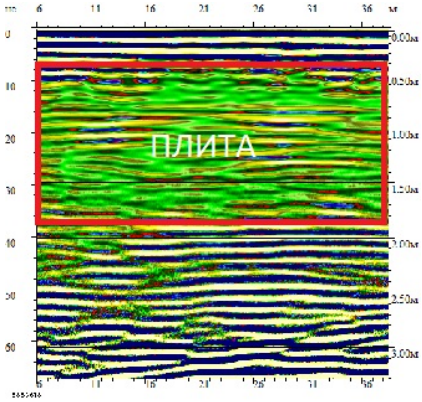


Рис. 3.42

Георадарная съемка позволила восстановить основные параметры фундамента строения: геометрию, мощность, качество фундаментного основания.

Геологическая группа задач

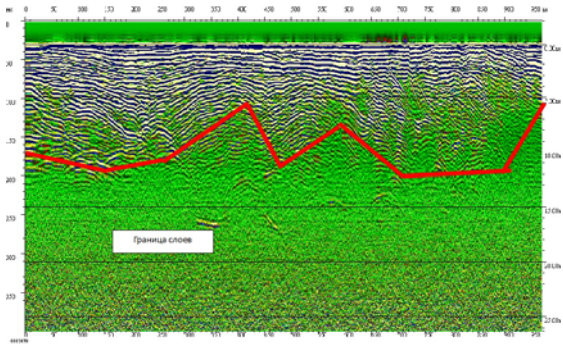


Рис. 3.43

Метод широко применим для картирования границ слоев (при этом желательно комплексирование с инженерной сейсмо-

разведкой). На рисунке показан георадарный профиль в рамках работ, проведенных с целью оценки запасов песка.

3.4. Аэрокосмические методы

Под аэрокосмическими методами понимается комплекс дистанционных исследований земной поверхности и подстилающих ее толщ горных пород при помощи измерительных приборов, находящихся на борту воздушных и космических носителей. При этом регистрируется собственное или отраженное электромагнитное излучение природных или искусственных объектов.

Наиболее широкое распространение в практике инженерной геологии получили методы, основанные на изучении земной поверхности в видимом диапазоне спектров, и в первую очередь – фотосъемка. Она в колоссальной степени расширяет возможности проведения исследований, делает их более надежными и позволяет выделять такие закономерности, которые ускользают из поля зрения исследователя при использовании только наземных методов. Одним из главных достоинств космо- и аэрофотоснимков является их документальность, т. е. точное и объективное отображение естественных и искусственных объектов на земной поверхности. Кроме того, они являются обзорными и дают возможность характеризовать ландшафтные особенности территорий, площадь которых меняется в зависимости от высоты полета и заданной детальности, от миллионов до сотен квадратных километров.

Многозональное и цветное фотографирование земной поверхности открывает дополнительные возможности при так называемом отраслевом дешифрировании, т. е. использовании аэрокосмоснимков для целей топографического, геоботанического, геологического, гидрографического, регионально-инженерно-геологического, гидрогеологического и мерзлотного картирования.

Инфракрасная (ИК) съемка обычно осуществляется при помощи сканирующей аппаратуры, т. е. информация об осо-

бенностях земной поверхности складывается из характеристик, получаемых по отдельным участкам, на которые в данный момент времени направлено регистрирующее устройство. Это направление непрерывно меняется перпендикулярно трассе полета или же по круговым траекториям (боковой обзор и круговой обзор). Изображение развертывается благодаря перемещению самолета и записывается регистрирующим устройством.

Чувствительным элементом тепловизоров, используемых для ИК-съемки, служит фотоэлемент. Кванты инфракрасного излучения поступают на фотокатод и вызывают эмиссию электронов. Их поток после ускорения и ряда преобразований фокусируется на люминесцирующий экран, вызывая его свечение. В результате на нем возникает видимое изображение обследуемого участка местности, которое репродуцируется на фотоленте или наблюдается визуально. Импульсы тока, возникающие на фотоэкране, могут поступать также на магнитную ленту, что открывает путь для ввода информации на вход ЭВМ, обеспечивая условия, необходимые для автоматизации обработки результатов наблюдений.

Инфракрасное излучение как носитель информации близко к свету и радиосигналам. Поскольку тепловое излучение тел непосредственно связано с их энергетическим состоянием, оно указывает на температуру источника. Кроме температуры, спектральный состав излучения зависит от материала поверхности, на которую направлен объектив тепловизора. Он несет, таким образом, информацию о веществе и состоянии источника излучения. Эти качества ИК-излучения позволяют выявлять внутренние свойства объектов и наблюдать глубинные процессы, что не удается при дешифрировании изображений земной поверхности, полученных в видимом диапазоне спектра.

Наблюдения в инфракрасной области спектра ведутся в трех диапазонах: ближнем (λ = 0,7–2,5 мкм), среднем (λ = 3–5,5 мкм), дальнем (λ = 8–14 мкм). Эти диапазоны соответствуют «окнам» прозрачности атмосферы. В ближнем диапазоне регистрируется главным образом длинноволновое

отражение солнечного излучения. В дальнем основную роль играет собственное излучение земной поверхности. В среднем излучение носит смешанный характер.

Выделяют две группы задач, решаемых при помощи тепловой съемки. Первая группа связана с изучением аномального температурного поля – это обследование областей современного вулканизма, поиски термальных вод и наблюдения за некоторыми видами термального загрязнения геологической и водной среды. Ко второй группе относится изучение нормального теплового поля, формирующегося за счет солнечной радиации – это в первую очередь задачи региональных геологических исследований, гидрогеологии, инженерной геологии, исследование акваторий. Во всех случаях рекомендуется проводить наблюдения многократно при различном стоянии Солнца, ночью, в разные сезоны года и т. д. В противном случае интерпретация тепловых наблюдений может привести к ложным заключениям.

Эффективность использования ИК-съемки в инженерной геологии, гидрогеологии, геокриологии и мелиорации обусловлена высокой ее чувствительностью к изменению влажности.

Инфракрасная (тепловая или термальная) съемка по информативности почти не отличается от рассмотренной выше радиотепловой. Условия распространения инфракрасного излучения с $\lambda_0 <$ 100 мкм сильно зависят от поглощающих и рассеивающих свойств атмосферы. Она избирательно прозрачна для ИК-излучений определенного спектра частот или «окон прозрачности». В результате ИКС, проводимой с помощью специальных тепловизоров, тепловая энергия трансформируется в электрическую и регистрируется на фотопленке или телевизоре. Поэтому, с одной стороны, получают информацию примерно такую же, как и при фотографической или телевизионной съемке в видимом диапазоне частот, но съемку можно выполнять не только днем, но и ночью. С другой стороны, информация, как и в радиотепловой съемке, обусловлена термической неоднородностью геологической среды, но больше искажена помехами (раз-

ная освещенность земной поверхности, климат, погода, облачность и др.). Области применения ИКС примерно такие же, как и РТС. К спектрометрической съемке близкого к видимому инфракрасного спектра излучений относят практически такую же съемку, как и видимого диапазона частот, но отличающуюся возможностью сравнения снимков разных спектров со специальными эталонами для определения спектральных яркостей природных образований. Многоспектральные снимки повышают информативность и разрешающую способность фототелевизионных аэрокосмических съемок.

Радиолокационная (РЛ) съемка основана на использовании радиоволнового диапазона электромагнитного спектра. Она подразделяется на пассивную (радиотепловую), λ = 0,3–10 см и активную (радарную), в которой используются электромагнитные излучения с длиной волны λ = 1,0–100 см.

Радиотепловая съемка в значительной степени аналогична ИК-съемке, однако характеризуется существенно меньшей разрешающей способностью. С ее помощью выделяются термические аномалии, охватывающие большие площади, по которым удается получать усредненные показатели.

При РЛ-наблюдениях фиксируется различная способность объектов земной поверхности отражать облучающие их радиоимпульсы. Интенсивность отраженного сигнала определяется электрофизическими характеристиками поверхностных отложений, к которым в первую очередь относятся диэлектрическая проницаемость и электропроводимость, в свою очередь зависящие от влажности.

Применение бортовых самолетных радиостанций началось после технического освоения сантиметрового диапазона волн.

При принятой в настоящее время системе бокового обзора антенна устанавливается вдоль фюзеляжа самолета. В результате поступательного перемещения антенного луча со скоростью полета носителя осуществляется обзор местности в полосах, расположенных по обе стороны от проекции линии полета. Передатчик представляет собой сочетание генератора электромаг-

нитных колебаний с модулятором. Он вырабатывает зондирующие импульсы заданной длительности, излучаемые затем антенной. Приемник выделяет отраженный полезный сигнал, преобразует его, усиливает и детектирует. Затем сигнал поступает на электронно-лучевую трубку или регистрируется на магнитную ленту.

Разрешающая способность радарного изображения зависит от длины волны используемого сигнала. Характер изображения определяется шероховатостью надпочвенного покрова, микрорельефом и рельефом. В реальных условиях отражение оказывается полурассеянным, что обусловлено множеством хаотично расположенных неровностей земной поверхности с размерами, соизмеримыми с длиной волны.

Радиолокационные наблюдения позволяют обнаруживать разрывные нарушения, определять состав пород, характеризовать степень их увлажненности и картировать участки развития мерзлоты, а также решать на обширных территориях многие другие задачи инженерной геологии и гидрогеологии. Намечается возможность зондирования толщи горных пород на глубину до десятков метров.

4. ДРУГИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Как указывалось выше, в инженерной геофизике гравиметрические, магнитометрические, термометрические и ядерно-физические методы имеют менее большое значение, хотя при решении определенного круга задач в благоприятных геологических условиях их применение оказывается весьма эффективным.

4.1. Гравиметрическая съемка

Гравиметрический метод исследований основан на изучении поля силы тяжести (V_z), аномалии которого связаны с изменением плотности пород. В инженерной геофизике гравиразведку применяют для изучения литологического строения разреза; при поисках и изучении зон повышенной трещиноватости и тектонических нарушений; для выявления карстовых зон; определения залегания кровли коренных пород; при инженерно-геологическом и гидрогеологическом районировании площадей. Но в основном гравиразведка в инженерной геофизике используется лишь как вспомогательный метод и, как правило, проводится в комплексе с другими методами инженерной геофизики. Гравиметрические наблюдения выполняются в виде площадной или профильной съемок. Детальность гравиразведочных исследований зависит от поставленных задач.

Наблюдения ведутся вдоль заданных направлений (профилей). Гравиметрическая съемка может носить линейный или площадной характер. Она дает возможность вести геологическое картирование по признаку плотностной характеристики пород. В области развития скальных пород позволяет прослеживать зоны разломов и крутые контакты, обнаруживать крупные карстовые полости. При исследовании рыхлых отложений дает возможность оконтуривать участки распространения галечников и конгломератов среди менее плотных песчано-глинистых образований, используется для выявления и прослеживания древних погребенных долин.

Перед началом гравиметрической съемки создают опорную гравиметрическую сеть обычно III класса. В пунктах опорной сети сила тяжести должна быть с более высокой точностью, чем на остальных пунктах съемки. Опорная сеть необходима для учета смещения нуль-пункта гравиметра. Наблюдения всегда начинают и заканчивают на опорных пунктах. На каждом рядовом пункте определяют приращение силы тяжести относительно некоторого пункта в районе исследования, которое называется исходным и на котором обычно известно абсолютное значение силы тяжести. Поправку за смещение нуль-пункта гравиметра вводят пропорционально времени между наблюдениями на рядовых и опорных пунктах в предположении, что положение нуль-пункта изменяется линейно.

При гравиметрических исследованиях в инженерной геофизике используют в основном высокоточные гравиметры.

По результатам профильной или площадной съёмок, выполняемых рейсами, начинающимися и заканчивающимися на опорных пунктах, после введения всех необходимых поправок строятся графики или карты аномалий силы тяжести в редукции Буге ($\Delta g_{Б}$).

Интерпретация данных гравиразведки состоит в выявлении закономерности распределения гравитационных аномалий на исследуемой территории и установлении связи этих аномалий с геолого-тектоническим строением участка. Интерпретация подразделяется на качественную и количественную.

В ходе качественной интерпретации устанавливают границы между различными комплексами пород, определяют вероятное расположение зон разломов, выявляют участки предположительно закарстованных пород и т. п. При проведении качественной интерпретации необходимо привлечение всей имеющейся геолого-геофизической информации по изучаемой территории.

Количественная интерпретация сводится к решению прямой или обратной задачи. Решение прямой задачи сводится к нахождению гравитационных аномалий, обусловленных телом, размеры, форма и плотность которого известны. Обратная зада-

ча заключается в вычислении по заданному (или полученному) распределению аномального гравитационного поля параметров тела: формы, размеров, плотности.

Современная точность гравиметров позволяет фиксировать в верхней части разреза (до глубины 1 0 м) неоднородности, отличающиеся друг от друга по плотности на 0,02– 0,03 г/см^2.

4.2. Магнитная съемка

Основным параметром, по которому ведется выделение геологических тел, является магнитная восприимчивость. Наземный вариант магнитометрических исследований применяется главным образом для целей геологического картирования в условиях развития магнитоактивных пород (основные изверженные, некоторые метаморфические и ряд других).

Микромагнитная съемка – один из видов магниторазведочных работ, предназначенный для изучения локальных геологических элементов, отражающихся в микроструктуре магнитного поля. Она применяется для расчленения по литологическим признакам осадочных пород и четвертичных отложений, изучения трещиноватости скальных пород и геодинамических процессов на оползневых и карстоопасных участках. Съемка выполняется с высокой точностью и большой густотой сети точек наблюдений; используются приборы повышенной чувствительности (протонные, квантовые магнитометры) и специальные приемы обработки материалов.

Высокая точность и технологическая мобильность протонных и квантовых магнитометров обусловили широкое привлечение микромагнитной съемки для решения многих задач поисков и разведки рудных месторождений, при археологических исследованиях, гидрогеологических и инженерно-геологических изысканиях.

На современном этапе можно выделить три вида микромагнитной съемки: по микроплощадкам, микрополосам и корреляционный способ. Первый вид применяется, главным образом, для литологического расчленения пород, перекрытых маломощными

рыхлыми отложениями. В его основе лежит связь элементарных магнитных аномалий, или микроаномалий, с литолого-петрографическими или структурными особенностями пород.

Микромагнитная съемка на площадках эффективно используется при изучении зон трещиноватости и оползневых структур. Сочетание съемки с повысотными и режимными наблюдениями при изучении оползневых структур позволяет проследить изменение вторичной трещиноватости, возникающей под действием динамических напряжений, с глубиной и во времени.

Полосовая микромагнитная съемка применяется для изучения таких геологические структур, как зоны разломов, тектонические нарушения, зоны трещиноватости, погребенные долины, дайки и другие, имеющие четко выраженный линейный характер, а также оползни. Полосы размещают, как правило, вдоль длинной оси структуры.

Микромагнитная съемка при изучении геодинамических процессов, связанных с подвижками отдельных частей массива грунтов и (или) перераспределением напряжений, проводится на закрепленных пунктах с периодичностью, обеспечивающей контроль за изменяющейся во времени геодинамической обстановкой.

4.3. Термометрическая съемка

Термометрические методы основаны на изучении распространения в горных породах естественных и искусственных тепловых полей. Интенсивность и распространение тепловых полей зависят от геотермических свойств, геометрических форм и размеров исследуемых сред. Тепловые потоки, наблюдаемые у земной поверхности, в основном создаются энергией естественных радиоактивных превращений, солнечной радиацией и энергией, освобождающейся при различных физико-химических процессах. В поверхностных слоях земной коры наблюдается суточная и годовая периодичность колебаний температуры. Эти колебания подчиняются соответствующим законам, и их амплитуда затухает с глубиной. Слои, в которых амплитуды суточных и годовых ко-

лебаний практически равны нулю, называют слоями постоянных суточных и годовых температур. Глубина залегания слоя постоянной суточной температуры не превышает 2 м.

Информация, полученная с ее помощью, используется при интерпретации геофизических данных (особенно, в районах распространения мерзлых грунтов, где её применение является обязательным). Кроме того, результаты измерения температуры в грунтовом массиве или в толще воды могут использоваться для решения инженерно-геологических и гидрогеологических задач, таких как:

- получение температурных данных для выбора типов фундаментов и выработки рекомендаций по выбору принципа использования многолетнемерзлых грунтов в качестве оснований фундаментов;
- выявление зон воздействия термальных вод;
- выявление зон нарушения режима подземных вод за счет утечек из водонесущих коммуникаций;
- обнаружение мест протекания и действия физико-химических процессов, влияющих на загрязнение геологической среды;
- оценка и прогноз устойчивости территорий освоения.

Наблюдения выполняют как на поверхности Земли, так и в скважинах. Наблюдения на дневной поверхности осуществляются при помощи термощупов и тепловизоров (приборы, основанные на регистрации теплового излучения поверхностями различных сред). Изучается влажность почвогрунтов и ее колебание с течением времени, определяются места инфильтрации воды, картируются места разгрузки подземных вод, решается широкий круг задач геокриологического характера.

Измерения температуры в скважинах выполняют с помощью электрических термометров сопротивлений.

Интерпретация данных ведется на качественном уровне.

4.4. Ядерно-физические методы

Ядерно-физические методы (радиоизотопные) базируются на существовании связей ядерных свойств пород с их плотностью, влажностью и глинистостью. Наиболее широко используются: гамма-гамма метод (ГГМ) определения плотности, нейтрон-нейтронный метод (ННМ) определения влажности и метод естественной радиоактивности для определения глинистости, как правило, в модификации скважинного и пенетрационного каротажа. Работы первыми двумя методами требуют использования искусственных радиоактивных источников. При наземных инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях возможно применение только *гамма- и эманационной* съемок.

Гамма-гамма метод основан на изучении радиоактивного гамма-излучения горных пород. Источником гамма-квантов является цезий – 137. ГГМ- метод позволяет получить только качественную характеристику поля γ-излучения, отражающую распределение суммы природных радионуклидов. При пешеходной съемке полевым радиометром измеряют интенсивность γ-излучения пород и руд в точках, расположенных по намеченному заранее маршруту или профилю.

Результаты гамма-гамма метода изображают в виде карт и графиков мощности экспозиционной дозы. Интерпретация результатов в основном качественная и сводится к оценке естественного фона, выделению аномалий, определению их размеров, интенсивности и установлению их геологических причин.

Глубинность гамма-метода относительно невелика (около 30 см). Это связано с поглощением гамма-лучей толщей горных пород. Однако в связи с миграцией газообразных радиоактивных эманации верхний слой может нести в себе информацию о радиоактивности коренных пород, что дает возможность в ряде случаев успешно выделять тектонические нарушения и геодинамические зоны.

Нейтрон-нейтронный метод основан на эффекте замедления быстрых нейтронов на атомах водорода и заключается в ре-

гистрации потока замедленных надтепловых и тепловых нейтронов. В методе используется плутниево-бериллиевый источник быстрых нейтронов и гелиевый или сцинтилляционный счетчик в качестве детектора медленных нейтронов. Методика, требования к соблюдению мер безопасности при работе и к градуировке приборов регламентируются ГОСТ 2306.

Метод естественной радиоактивности для определения глинистости дисперсных пород основан на зависимости естественного гамма-излучения от содержания глинистой фракции в породах. Для расчета содержания глинистой фракции b используются корреляционные связи интенсивности естественного гамма-излучения и величиной b. Естественная радиоактивность измеряется в соответствии с ГОСТ 25260* .

Эманационная съемка, основанная на определении содержания эманации радиоактивных газов, находящихся в почвенном воздухе, пробы которого берутся при помощи специального щупа с глубины примерно 1 м. Исследуется главным образом радон – радиоактивный газ ряда урана.

Для проведения эманационной съемки используют полевые эманометры, предназначенные для отбора проб почвенного воздуха, определения в пробах концентрации и природы эманации по сцинтилляциям от α-частиц на станках камер, покрытых тонким слоем сернистого цинка.

Интерпретация результатов эманационной съемки носит качественный характер и сводится к выделению аномалий и их анализу.

Эманационная съемка позволяет обнаруживать зоны тектонических нарушений, зоны трещиноватости и т. д. под рыхлыми отложениями небольшой мощности.

4.5. Наблюдения во внутренних точках геологической среды

Хотя в инженерной геофизике методы ГИС (или каротажа) применяются реже, чем в нефтегазовой геофизике, возможности

их велики. По сравнению с полевыми геофизическими методами ГИС отличаются следующими особенностями. Во-первых, являясь методами «ближнего действия», они обеспечивают получение физических свойств горных пород, близких к истинным в их естественном залегании. Во-вторых, обязательное применение нескольких (трех-шести) методов, легко осуществляемое при скважинных исследованиях, способствует практически однозначному геолого-гидрогеологическому истолкованию полученных физических свойств. В-третьих, изменяя методы, их глубинность, способы воздействия на контакт между скважинной жидкостью и пластом, можно следить за динамикой происходящих в нем процессов, что обеспечивает получение дополнительных сведений о породах, например, об их фильтрационных свойствах.

Кроме того, методы ГИС дают возможность при использовании надлежащей методики устанавливать положение границ с точностью до первых сантиметров, исключают пропуск даже тонких пропластков и позволяют изучать характеристики пород за пределами зоны их интенсивного изменения вблизи ствола скважины.

Электрический каротаж

Он является основным при изучении разрезов инженерно-геологических и гидрогеологических скважин. На практике применяют в основном три разновидности электрического каротажа: каротаж по методу сопротивлений (КС, $\rho_к$), резистивиметрический каротаж и самопроизвольной поляризации (ПС).

Каротаж по методу сопротивлений (КС, $\rho_к$) основан на расчленении пород по кажущемуся удельному электрическому сопротивлению. Этот метод является аналогом электрического профилирования с той разницей, что при профилировании установка постоянных размеров перемещается по поверхности земли, а при каротаже – вдоль ствола скважины. Измерения выполняются в необсаженных скважинах, заполненных водой или промывочной жидкостью, через которые осуществляется электрический контакт электродов зонда с окружающей средой. Ка-

жущееся удельное электрическое сопротивление рассчитывается по формуле (см. раздел 2).

Обычно применяют четырехэлектродную установку *AMNB*, но в скважину опускаются только три электрода *AMN* или *ABM*, а четвертый электрод *B* или *N* заземляют на поверхности возле скважины.

Зонд *AMN* называется однополюсным а *ABM* – двухполюсным. Расстояния между парными и непарными электродами в зонде оказывают влияние на результаты измерений, поэтому различают потенциал-зонд и градиент-зонд. В потенциал-зонде расстояние между парными электродами в 5–10 раз превышает расстояние между непарными электродами. Расстояние между непарными электродами называется длиной потенциал-зонда *LПЗ*. В градиент-зонде расстояние между парными электродами во много раз меньше расстояния между непарными электродами. Длина градиент-зонда *LГЗ* определяется расстоянием от непарного электрода до середины между парными электродами. Чем больше эта величина, тем больше глубина исследований (обычно *LГЗ* – 2 м). В зависимости от расположения парных электродов относительно непарного различают градиент-зонды: подошвенный и кровельный. В подошвенном зонде парные электроды расположены ниже непарного и поэтому таким зондом отчетливо фиксируется подошва пласта высокого сопротивления (отмечается максимумом на диаграмме). В кровельном зонде парные электроды расположены выше непарного и поэтому таким зондом отбиваются подошва пласта (отмечается максимумом на диаграмме).

Каротажные диаграммы, полученные потенциал-зондом при пересечении пласта мощностью, большей, чем длина зонда, дают симметричный максимум или минимум, в зависимости от того, больше или меньше сопротивление пласта по отношению к вмещающим породам. Однако, если мощность $\boldsymbol{h}$ пласта соизмерима с размером зонда, аномалия становится расплывчатой и не позволяет надежно определять положение пласта в разрезе.

Выделение тонких пластов осуществляется при помощи градиент-зондов. Для сравнения между собой диаграмм КС, полученных в скважинах на той или иной территории с определенными условиями залегания пород, используют зонды одних и тех же размеров и типов, которые носят название стандартных. В качестве стандартного принимают выбранный экспериментально зонд такого размера, который позволяет выделить большее количество слоев и оптимальным образом оценить их удельные электрические сопротивления.

Резистивиметрический каротаж основан на измерении удельного электрического сопротивления бурового раствора или воды в скважине специальным прибором, называемым скважинным резистивиметром. Он представляет собой трех- или четырехэлектродный зонд небольшого размера, заключенный в трубку из изолятора. Трубка предназначена для исключения влияния окружающих пород на измерения. При перемещении зонда по скважине внутри трубки свободно проходит жидкость, заполняющая скважину, и проводится измерение сопротивления раствора $\rho_р$ по обычной методике КС. Результаты резистивиметрии используются для качественной интерпретации материалов электрического каротажа и решения гидрогеологических задач.

Каротаж потенциалов собственной поляризации (ПС) основан на измерении естественных потенциалов, возникающих у пластов с разной электрохимической активностью или на границе между породой и буровым раствором. Как известно, естественные потенциалы собственной поляризации образуются в результате протекания окислительно-восстановительных, диффузионно-адсорбционных и фильтрационных процессов, которые обязательно проявляются в присутствии высокоминерализованного бурового раствора, создающего в скважине давление, превышающее давление в пласте. Минерализованный буровой раствор под давлением проникает в поры пласта на определенную глубину, зависящую от пористости породы, и возникает фильтрационный потенциал. Соприкасаясь с поровой влагой, ионы более концентрированного фильтрата бурового раствора

переходят в менее концентрированный пластовый, и на контакте растворов появляется диффузионный потенциал. Окислительно-восстановительный потенциал появляется в горных породах, содержащих минералы с электронной проводимостью. Соприкасаясь с электролитом – буровым раствором, минералы окисляются или восстанавливаются, реакция сопровождается возникновением э. д. с. Все эти возникающие потенциалы накладываются на потенциалы собственной поляризации, существующие в результате природных условий, и создаются естественные электрические поля, фиксируемые методом ПС.

Работы методом ПС выполняют установкой, содержащей только два приемных электрода – *M* и *N*. В качестве электродов используются неполяризующиеся или свинцовые электроды. Измерения проводят способом потенциалов или способом градиента потенциалов. Способ потенциалов заключается в том, что измерение ΔU_{nc} выполняют установкой, состоящей из подвижного электрода *M* и неподвижного электрода *N* заземленного у устья скважины. Подвижный электрод *M* перемещают по стволу скважины и на пульте регистрации записывают диаграмму ΔU_{nc}. В способе градиента потенциала оба приемных электрода *M* и *N* передвигают по скважине на постоянном расстоянии друг от друга, равном 1–2 м.

Метод ПС используется для выделения глинистых тел (обычно максимумы на диаграммах) среди песчанистых пород и, наоборот, песчанистых (минимумы) – среди глинистых. Он дает также возможность определять границы между талыми и мерзлыми породами. Повторные наблюдения при различных концентрациях электролита, заполняющего ствол скважины, позволяют характеризовать минерализацию пластовых вод. Применение метода ограничено в условиях высокого уровня блуждающих токов.

Радиоактивный каротаж (РК)

Радиоактивный каротаж – это совокупность методов, основанных на изучении полей ионизирующих излучений (в основном γ-квантов и нейтронов). Методы радиоактивного каро-

тажа можно разделить на пассивные (методы регистрации естественного излучения) и активные (методы регистрации излучений, возникающих при облучении горных пород γ-квантами или нейтронами, создаваемыми источниками, находящимися в глубинном приборе). Основными методами радиоактивного каротажа являются гамма-каротаж, гамма-гамма-каротаж и нейтронный каротаж.

Гамма-каротаж (ГК) основан на изучении разрезов скважин по интенсивности гамма-излучений, создаваемых породами, окружающими ствол скважины в радиусе 30–40 см. Работы методом ГК выполняют скважинным радиометром, состоящим из зонда (детектора) и пульта регистрации.

На диаграммах ГК выделяются пласты с различной радиоактивностью: максимумами отмечаются породы и руды, содержащие естественные радиоактивные элементы (*U*, *Th*, *Ra*, *K* и др.), а также граниты и глины; минимумами отмечаются песчанистые карбонатные породы, каменная соль, угли. Основной задачей гамма-каротажа является литологическое расчленение пород и их дифференциация по содержанию глинистых компонентов.

Гамма-гамма -каротаж (ГГК) основан на изучении интенсивности рассеянного гамма-излучения, которое возникает вследствие взаимодействия гамма-излучений радиоактивного источника (обычно препарат *Co 60*) с горными породами, окружающими ствол скважины. Интенсивность рассеянного гамма-излучения, прошедшего через горные породы, зависит от плотности этих пород. Чем больше плотность горных пород, тем меньше интенсивность рассеянного излучения.

Измерения проводят зондом, содержащим источник γ-квантов и детектор, разделенные стальным или свинцовым экраном (расстояние между ними составляет 20–70 см). Существуют два варианта ГГК: плотностной гамма-гамма-каротаж (ГГК-П) и селективный гамма-гамма-каротаж (ГГК-С). В инженерной геофизике применяют плотностной гамма-гамма-каротаж, который дает возможность изучать плотностной разрез толщи пород, пройденных скважиной.

Нейтронный каротаж основан на анализе реакции горных пород на их облучение потоком нейтронов. В практике инженерно-геологических исследований наиболее часто применяют две разновидности нейтронного каротажа: нейтрон-нейтронный каротаж (ННК) и нейтронный гамма- каротаж (НГК).

Нейтрон-нейтронный каротаж (ННК) основан на регистрации потока нейтронов, замедлившихся до тепловой и надтепловой энергии при облучении пород источником быстрых нейтронов. Измерения проводят зондом, содержащим источник нейтронов и детектор нейтронов. Регистрируют плотность тепловых и надтепловых нейтронов по стволу скважины.

Нейтроный гамма-каротаж (НГК) основан на регистрации гамма-излучения радиационного захвата нейтронов. Если порода, расположенная около зонда НГК, обладает повышенным содержанием водорода (в породе много воды, нефти или газа), то быстрые нейтроны, испущенные излучателем при взаимодействии с ней, переходят в тепловые и поглощаются. При этом возникает вторичное гамма-излучение. Это вторичное гамма-излучение регистрируется детектором.

Нейтронные методы каротажа служат для дифференциации геологического разреза по содержанию в породах водорода. Они позволяют выделять водоносные породы и оценивать их емкостные характеристики. Используются для определения льдистости пород в условиях развития многолетней мерзлоты.

Акустический каротаж (АК)

Акустический каротаж основан на изучении полей упругих колебаний в звуковом и ультразвуковом диапазоне частот. Основное назначение АК состоит в том, чтобы детально расчленять разрез, ориентируясь на различие скоростей распространения упругих колебаний в горных породах.

Различают сейсмический и собственно акустический каротаж. При сейсмическом каротаже упругие колебания возбуждаются взрывом или электрическим разрядом вблизи устья скважины, а время прихода колебаний к различным точкам наблюдения по стволу скважины регистрируется сейсмоприемниками.

Акустический каротаж предполагает возбуждение колебаний магнитострикционным излучением с частотой 10–100 КГц и регистрацию колебаний в точках приема пьезоэлектрическими сейсмоприемниками. Излучатель и приемник разделены акустическими изоляторами. Работу проводят с помощью акустического зонда, опущенного в скважину, и наземной аппаратуры. Существуют двухэлементный и трехэлементный зонды. Двухэлементный зонд состоит из излучателя и детектора (сейсмоприемника).

Трехэлементный зонд содержит излучатель и два приемника, расположенных по одну сторону от излучателя.

В различных установках акустического каротажа регистрируются: интервал времени $\Delta\mathbf{t}$ между двумя приемниками, интенсивность затухания **а** упругих колебаний в породах, вскрываемых скважиной. На величину затухания сильное влияние оказывают глинистость, трещиноватость, кавернозность пород и характер насыщения пор.

На диаграммах АК минимумами Δt и a выделяются скальные породы, более высокие их значения соответствуют рыхлым породам. По мере увеличения степени уплотнения пород и их возраста скорости имеют тенденцию возрастать, поэтому величины Δt и a уменьшаются. Метод АК широко используется для определения пористости и трещиноватости горных пород (в этом случае вычисления выполняются по уравнению среднего времени) и для контроля качества цементации затрубного пространства.

Термический каротаж

Термический каротаж заключается в изучении распределения температуры по стволу скважины. Он основан на связи температуры в скважине с тепловыми свойствами горных пород, характером и интенсивностью тепловых процессов, происходящих в геологической среде и в системе горные породы – скважина. При проведении термического каротажа изучают или естественные, или искусственно созданные тепловые поля.

Методом естественного теплового поля изучают геотермический градиент - изменение температуры Земли в градусах Цельсия на 100 м глубины и геотермическую ступень – разность глубин, соответствующую изменению температуры на 1°С в районе работ. Геотермический градиент пропорционален тепловому сопротивлению породы, которое зависит от литологического разреза скважин, поэтому термограмма скважины имеет разный наклон относительно вертикали против пластов с разной теплопроводностью. Местные или локальные тепловые поля обычно связаны с пластами-коллекторами, сульфидными рудами, углями и солями.

Метод искусственного теплового поля основан на наличии в скважине неустановившегося теплового режима, возникающего сразу после прекращения циркуляции бурового раствора. Так как окружающие скважину породы обладают разной температуропроводностью, то и скорость восприятия раствором температуры окружающих пород будет неодинаковая. Это фиксируется термограммой раствора. Например, если температура раствора ниже естественной температуры пластов, то песчаный пласт отметится более резким повышением температуры раствора, чем глинистый пласт, т. к. пески обладают большей теплопроводностью по сравнению с глинами. По температурным кривым выделяют пласты с большей или меньшей теплопроводностью.

Для измерения температуры в скважине применяют электрические термометры сопротивлений, опускаемые в скважину.

Их действие основано на свойстве металлического проводника изменять свое сопротивление с изменением температуры окружающей среды и, следовательно, самого проводника.

5. АППАРАТУРА И ОБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОФИЗИКЕ

Геофизическая аппаратура отличается большим разнообразием. Аппаратурная база и принципы измерения тех или иных параметров физических полей регулярно обновляются. Если 10–15 лет назад основными сейсмическими приборами были 12- или 24-канальные сейсмические станции с гальванометрической или магнитной регистрацией, то в настоящее время в инженерно-сейсморазведочной практике используются современные портативные цифровые сейсмические приборы со встроенными программными средствами для обработки материалов наблюдений. Ведущей тенденцией непрерывно обновляющейся техники является повышение помехоустойчивости, точности, компьютеризация процессов измерения и предварительной обработки полученных материалов в ходе проведения работ.

5.1. Инженерно-сейсмическая аппаратура

Инженерно-сейсмические наблюдения проводятся с помощью сейсмостанций, представляющих собой комплекты аппаратуры, предназначенной для регистрации упругих колебаний, искусственно создаваемых в породах с помощью источников колебаний.

***Источники* сейсмических колебаний**

В значительной степени методика сейсмических исследований определяется типом применяемых источников колебаний. Обычно используют импульсные источники: взрыв, механический удар, электрический разряд, газовую или пневматическую пушку. Пьезоэлектрические и магнитострикционные источники применяют в скважинах и на акваториях. В настоящее время разработана также методика сейсмической разведки, основанная на использовании квазисинусоидальных колебаний (вибросейс, акустическое прозвучивание [15 и др.]).

В инженерной сейсморазведке в основном используют импульсные источники колебаний, создающие кратковременное ударное воздействие в заданной точке (на поверхности, в горной выработке или в воде). Несмотря на определенные достоинства взрывного метода (неограниченная глубинность, широкий частотный спектр), он все более вытесняется невзрывными источниками, которые имеют следующие преимущества: исключение вредного воздействия на окружающую среду; экономичность; возможность проведения исследований в населенных пунктах; создание направленного воздействия для записи поперечных волн.

В качестве альтернативных источников используют:

1. Удары по земной поверхности молотком, кувалдой или с помощью падающего груза или ударно-механические источники (глубинность соответственно растет от десятков до сотни метров) получили наибольшее распространение из-за своей простоты и управляемой направленности;

2. Импульсные газовзрывные источники, представляющие собой цилиндр, в котором при подрыве пропана в кислороде вследствие газовой детонации движется поршень, ударяющий по земной поверхнсоти;

3. Импульсные возбудители от высоковольтных электроискровых источников, разряд которых в воде создает упругую волну;

4. Вибрационные пневматические или гидравлические датчики, действующие по принципу перфораторов или гидравлических домкратов, и др. Глубинность исследований указанных выше методов от нескольких сотен метров до нескольких километров.

Для скважинных сейсмических наблюдений применяют также механические пружинные ударники и электродинамические источники с управляемой направленностью.

При изысканиях под массовые виды строительства основным способом возбуждения упругих колебаний является ударный с помощью ручного темпера (кувалды), переносного копра или передвижного пункта удара (ППУ).



Рис. 5.1. Возбуждение упругих колебаний с помощью поверхностного источника «падающий груз» весом 36 кг [16]

В исключительных случаях при достаточном обосновании допускается применение взрывного способа с использованием ВВ (с поверхности или в скважине), газообразной смеси, порохового заряда, электрического разряда в жидкости и т. д. в соответствии с «Правилами безопасности при проведении взрывных работ».

Способы возбуждения колебаний должны обеспечить получение четких записей полезных волн. Продолжительность и интенсивность сейсмической записи должны обеспечить уверенное выделение регистрируемых типов волн.

Для определения оптимальных условий возбуждения и приема других колебаний проводятся опытные методические работы.

Применение ручного тампера (кувалды) целесообразно в наиболее простых инженерно-геологических условиях при глубине исследования до 10–20 м.

Тампер массой от 5 до 10 кг должен иметь максимально возможную и удобную для нанесения площадь ударной части. На рыхлых и слабо сцементированных грунтах необходимо ис-

пользовать деревянные или металлические подставки с площадью, превышающей площадь ударной части тампера не менее чем в 2 раза.

Возбуждение колебаний с помощью переносного копра обеспечивает глубину исследования до 30–40 м. Переносная копровая установка представляет собой разборную треногу с ручной лебедкой для подъема груза массой 100–150 кг.

Для увеличения глубины исследования (до 50–100 м) необходимо применять ППУ, смонтированный на автомобиле или тракторе.

В настоящее время имеются различные конструкции ППУ с массой поднимаемого груза до 500 кг, высотой подъема до 5 м с маятниковым устройством для нанесения горизонтального удара.

Продольные волны возбуждаются вертикально направленным ударом, а поперечные – горизонтально направленным ударом с помощью устройства маятникового типа. В зависимости отрешаемых задач, условий возбуждения и приема упругих колебаний горизонтальный удар наносится либо по вертикальной стенке горной выработки (шурф, закопушка) глубиной 0,7–0,8 м, либо по специальному устройству, обеспечивающему передачу грунту сдвигового импульса.

В процессе полевых наблюдений следует обеспечить постоянство условий возбуждения с целью сопоставимости сейсмограмм по форме записи на соседних стоянках.

Сейсмическая аппаратура

Специфика условий работ в инженерной сейсморазведке предъявляет особые требования к сейсморазведочной аппаратуре. В связи с необходимостью изучения малых (в пределах первых десятков метров) глубин аппаратура должна быть высокочастотной. При наблюдениях на дневной поверхности она должна обеспечивать возможность регистрации упругих волн в диапазоне 30–150 Гц, а при наблюдениях в горных выработках – до нескольких сотен Гц.

Участки работ при выполнении инженерно-геологических исследований нередко расположены в сложных условиях, по-

этому аппаратура должна быть портативной и экономичной по питанию.

Для проведения полевых сейсморазведочных работ необходимо использовать сейсморазведочные станции, параметры которых соответствуют техническим требованиям и поставленным задачам. Источники возбуждения и приемники упругих колебаний (сейсмоприемники) должны рассматриваться в качестве составной части сейсморазведочной аппаратуры, а их технические характеристики должны быть согласованы с основной аппаратурой.

Особенности проведения инженерно-сейсмических исследований определяют следующие требования к сейсмической аппаратуре:

1) портативность, небольшие габариты и масса;

2) наличие устройств для синхронного накопления слабых воздействий;

3) наличие дисплея для оперативного контроля принимаемых сигналов и воспроизводящего устройства для записи сигналов на бумагу.

В настоящее время выпускают цифровые сейсмические станции, отвечающие указанным требованиям, трех типов:

малоканальные (1–3 канала записи);

среднеканальные (6–12 каналов);

многоканальные (24 канала и более).

Малоканальные сейсмостанции применяют при скважинных сейсмических исследованиях и для изучения самой верхней части разреза (до 30 м), когда можно использовать ручное ударное возбуждение. Такие станции необходимы для того, чтобы непрерывно по площади прослеживать и разделять разные упругие волны, приходящие от разных объектов. Многоканальные сейсмостанции обеспечивают наибольшую производительность.

Таким образом, современная инженерно-сейсмическая аппаратура – это сложный измерительный комплекс, фактически представляющий специализированную ЭВМ. Он содержит следующие блоки: набор сейсмоприемников, усилителей, регист-

рирующих головок по числу каналов в станции; коммутатор каналов; преобразователей аналоговой записи в цифровую и обратно; блоки питания и контроля работы станции.

5.2. Электроразведочная аппаратура

Для решения инженерно-геологических задач электроразведочными методами в странах дальнего и ближнего зарубежья выпускаются различные современные цифровые приборы и оборудование. Выпускаемая электроразведочная аппаратура представляет собой комплекс взаимосвязанных технико-методических и программных средств: техника измерений, методика полевых работ, программное обеспечение обработки и интерпретации собранных данных. Она дает возможность:

- провести измерения нестационарного напряжения в широком временном диапазоне от 5 мкс до 64 с;
- имеет большой динамический диапазон измерения нестационарного напряжения (от 0,1 мкВ до 10 В);
- характеризуется высокой помехоустойчивостью, высокой степенью автоматизации сбора и обработки информации и портативностью и относительно малой потребляемой мощностью.

Для решения инженерно-геологических задач, как правило, электроразведочная аппаратура бывает переносной. Она имеет небольшие габариты и массу. В комплект аппаратуры обычно входят источники постоянного или переменного тока. В качестве источников постоянного тока используют сухие элементы, аккумуляторы, либо специальные генераторы постоянного тока, приводящиеся в действие двигателем автомобиля или бензоэлектрическими агрегатами. В качестве источников переменного тока применяются генераторы гармонических колебаний или прямоугольных импульсов.

Измерительная аппаратура используется для измерения тока в питающих линиях и определения амплитудных и фазовых значений (абсолютных и относительных) напряженности поля.

Изучение небольших глубин (до 500 м) проводится с помощью электроразведочного измерителя напряжений ЭИН–204 (цифровой компьютеризированный микровольтметр) с портативным генератором.

Для работы на малых глубинах (до 100–200 м) используются индуктивные наземные и воздушные методы электроразведки с гармоническим (с частотой до 10 кГц) и импульсным (длительность импульсов десятки миллисекунд) возбуждением поля и измерением магнитных его компонентов. С этой целью созданы различные малосерийные комплекты аппаратуры, состоящие из генераторов и микровольтметров.

С помощью высокочастотных радиоволновых методов можно изучать самую верхнюю часть разреза (10–30 м). Для этого используются различные радиопередатчики и радиоприемники, работающие в диапазоне сверхдлинных (частота свыше 10 кГц), длинных (частота больше 100 кГц), средних (частота свыше 1 МГц) и коротких (частота больше 2–10 МГц) волн.

5.3. Аппаратура для скважинных наблюдений

Основными методами каротажа, применяемого в инженерно-геологических изысканиях, являются:

1) гамма-каротаж (ГК);

2) гамма-гамма-каротаж (ГГК);

3) нейтрон-нейтронный каротаж (ННК).

Последние два метода при изучении инженерно-геологических скважин объединены общим названием радиоизотопные методы измерения плотности и влажности грунтов. Кроме того, указанные методы используются для оценки общей трещиноватости и пустотности грунтов.

Измерения в скважинах выполняют комплектом аппаратуры, называемым каротажной станцией. В каротажной станции, смонтированной на одной-двух автомашинах, имеется следующее оборудование [89]:

- спускоподъемные устройства;

- скважинный прибор (каротажный зонд);
- усилительно-регистрирующая аппаратура.

За последнее десятилетие произошло техническое переоснащение каротажной службы, выразившейся в замене обычных каротажных станций с аналоговыми или цифровыми регистраторами новыми, компьютеризированными каротажными станциями, а обычных скважинных приборов – комплексными скважинными приборами, зачастую с цифровыми выходами информации. Информацию о скважинной аппаратуре, используемую в инженерно-геологических изысканиях, можно найти в специальных сайтах «Скважинная аппаратура».

В настоящее время на рынке геофизических услуг получили широкое распространение инженерно-геофизические аппаратура и оборудование, выпускаемые следующими известными российскими компаниями.

1. Научно-технический кооператив (НТК) «Диоген» (сайт *http://www.ntkdiogen.ru*/) предлагает широкий спектр услуг по разработке и производству специализированной геофизической сейсморазведочной и электроразведочной аппаратуры. В его работе принимают участие сотрудники нескольких Российских институтов и университетов, имеющие многолетний научный и практический опыт в разработке, изготовлении и эксплуатации сейсмической и электроразведочной аппаратуры.

Основные направления работы:

- разработка, производство и поставка специальной и геофизической аппаратуры;
- разработка, производство специализированных компьютеризированных регистраторов для специальных и геофизических измерений;
- разработка, производство и поставка специализированной аппаратуры для скважинных исследований;
- разработка специального программного обеспечения для производимой специальной и геофизической аппаратуры;

- проведение геофизических работ со своим аппаратно-программным обеспечением и разработка специальной и геофизической аппаратуры на заказ.

НТК «Диоген» предлагает инженерно-сейсморазведочные и электроразведочные станции для проведения инженерно-геологических изысканий в разных модификациях.

Инженерно-сейсморазведочные сейсмостанции:

- Цифровая сейсмологическая станция «ДИОГЕН–Х/24S».
- Цифровая инженерная сейсмостанция «Диоген–24/14».
- Цифровая двухрежимная сейсмостанция «Диоген–24/24».
- Портативный электродинамический источник «Д–600».

Электроразведочная аппаратура (Емкостные измерители сопротивления):

- Электротест ЕИС–3КМ.
- Электротест–Рм.
- Электротес–2Рм.
- Электротест С/USB.
- Электротест ТЕМ.
- Электротест-Р+.



Рис. 5.2. Цифровая двухрежимная 24-канальная сейсмостанция «Диоген-24/24»

2. Компания **"ГЕОТЕХ"** (сайт http://geotech.ru/) существует на рынке с 2003 г. и сегодня является одной из наиболее интенсивно развивающихся организаций в области современного геофизического оборудования и инженерных изысканий (сейсморазведка, электроразведка и георадиолокация).

Компания НПЦ "ГЕОТЕХ" совместно с корпорацией "ЛогиС", внедряющей современные технологии в области производства геофизического оборудования, предлагает:

- георадары серии "ОКО";
- восьми- и четырехканальный регистраторы сейсмических сигналов серии "Дельта" и сейсмические станции «Лакколит»;
- многоканальные электроразведочные аппаратурно-программные комплексы, электроразведочные станции, генераторы и измерители.



Рис. 5.3. Георадар «ОКО-2» Сейсмостанция «Лакколит 24-М3» Электроразведочная «ЭРП-1»

- электромагнитная аппаратура «Эра-Макс»



Рис. 5.4

3. Георадары серии «Лоза» поставляет общество с ограниченной ответственностью "Главкомплект» (сайт http://pkfgk.ru/).

Низкочастотный импульсный электромагнитный георадар «ЛОЗА–Н» (1–50 МГц) позволяет обследовать структуру грунта в пределах глубин от 0 до 60 м с использованием НЧ антенн 15–25 МГц.

Среднечастотный импульсный электромагнитный георадар «ЛОЗА–Н» (50–300 МГц) позволяет обследовать структуру грунта в пределах глубин от 0 до 10 м.

4. Выполнением полевых (производственных) работ, обработкой геофизических материалов, разработкой и внедрением новых образцов геофизической аппаратуры с 2008 г. занимается общество с ограниченной ответственностью "Аль Терра" (сайт http://www.alterra.geoacoustic.com).

Выпускаемая продукция:

- аппаратура метода РАП (для приема и записи акустического сигнала). В настоящее время для работы применяются два типа аппаратуры (РАП и РАП–Плюс).

- портативная цифровая электроразведочная аппаратура низкой частоты «ЭРП–1», предназначенная для выполнения геофизических наблюдений методами электроразведки (методом сопротивлений на постоянном и переменном токе (ВЭЗ, ЭП, СГ, МЗ, а также измерения полного вектора электрического поля – МДС, векторная съемка; естественное электрического поля (ЕП) и вызванной поляризации (в варианте ИНФАЗ–ВП).





Рис. 5.5

Аппаратура модификации «РАП»

Электроразведочная аппаратура «ЭРП–1»

5. Проведением инженерно-геофизических исследований и разработкой геофизической аппаратуры с середины 90-х годов XX в. занимается ООО «ГЕОСИГНАЛ» (http://www.geosignal.ru/). Им разработана аппаратура для сейсмических и электромагнитных исследований серии «ЭХО». В настоящее время компания предлагает новейшие разработки этой серии: сейсморазведочную станцию ЭЛЛИСС–3, и электроразведочную систему ЭЛСИС–1 и телеметрическую сейсморазведочную систему ТЕЛСС–3, разработанную с учетом последних достижений в области электроники.

6. Из числа казахстанских компаний, работающих в сфере инженерно-геофизических услуг можно отнести Институт геофизических исследований НЯЦ РК (сайт http://www.nnc.kz). Институт выпускает следующие электроразведочные приборы:

1. Регистратор электроразведочный ЭИН-2000;
2. Приемник ЭИН-209М;
3. Генератор ГЭР-2;
4. Генератор ГЭР-0,3



Рис. 5.6. Приемник электроразведочный «ЭИН–209М»

6. Разработкой программного обеспечения электроразведки**,** изготовлением электроразведочной аппаратуры и проведением электроразведочных работ занимается научно-производственная компания **«Элгео» (**г. Санкт-Петербург (http://www.elgeo.ru/).

Перечень специальных геофизических приборов и оборудования, выпускаемых российскими и другими компаниями можно найти в каталогах «Сейсморазведочная аппаратура», «Электроразведочная аппаратура» и т. д.

6. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИМАТЕРИАЛОВ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ

К большинстве современной инженерно-геофизической аппаратуре прилагается компьютерная программа для обработки материалов наблюдений с необходимыми методическими рекомендациями. Специалист, владеющий знаниями в области геофизической обработки, может с успехом пользоваться этими программами. В данном разделе мы решили кратко остановиться на общих принципах обработки и интерпретации данных [1, 2, 18 и др].

6.1. Общие принципы обработки и интерпретации

Особенности обработки геофизических материалов. Полевые геофизические материалы содержат количественные значения тех или иных физических параметров поля, сведения об их изменениях в пространстве и во времени, полученные с определенной технической и методической погрешностью. Эти данные часто осложнены помехами (которые, кстати, могут представлять самостоятельный интерес):

- *природными* (вариации полей вследствие разной космической, солнечной и земной активности, неоднородности поверхностных геологических образований, наложения аномальных физических полей от геологических неоднородностей или полезных ископаемых, расположенных на разных глубинах);
- *техногенными* (электромагнитными, тепловыми, упругими, радиоактивными).

Выделение из наблюденных полей, осложненных множеством помех, нормальных и получение аномальных полей – сложная техническая и вычислительная проблема. Она решается в ходе обработки, как правило, компьютерных материалов с помощью разных физико-математических приемов выделения

полезной информации на фоне помех и трансформации ее в разнообразные аномальные параметры.

Особенности интерпретации. Интерпретация материалов геофизических исследований основывается на решении так называемых прямых и обратных задач.

Под прямыми задачами понимают нахождение элементов поля для заданной модели геологической среды при детерминированном положении источников поля. Строгие решения возможны для ограниченного набора моделей, которыми аппроксимируются те или иные характерные геологические структуры и геологические тела. Простейшие модели – это плоский контакт между горными породами с различными физическими свойствами, слоистые геологические тела, тела в виде сферы и т. д. Модели подбирают таким образом, чтобы они в наибольшей степени соответствовали типичным геологическим условиям. Для ряда характерных моделей-эталонов заранее проводят расчеты, по результатам которых составляют наборы теоретических кривых и программ ЭВМ для различных значений контрастности свойств геологических тел и их размеров.

Обратную геофизическую задачу можно сформулировать следующим образом: в результате измерений становится известным пространственное распределение элементов того или иного поля, необходимо воссоздать модель геологической среды. Так, например, рассматривая кажущееся удельное электрическое сопротивление как функцию расстояния между питающими электродами измерительной установки, можно определить глубину залегания коренных пород или уровень подземных вод. Это оказывается возможным при сопоставлении интерпретируемых графиков с вышеупомянутыми эталонными кривыми (палетками), построенными по результатам решения прямой задачи для типичных моделей-эталонов. Можно сказать, что решение прямых и обратных задач – это по существу физико-математическое обеспечение процесса геофизической интерпретации.

В результате широкого использования компьютерной технологии понятия о прямых и обратных задачах по существу пе-

рестали противопоставляться друг другу. По специально рассчитанным программам можно практически одновременно решать оба вида задач и непосредственно сопоставлять результаты. В одних случаях считается целесообразным уже на первых этапах интерпретации вводить в компьютер возможно больший объем сторонней информации, полученной в результате других видов исследований (например, бурения, геологической съемки и т. д.). Многое тут зависит от опыта и искусства интерпретатора – какой отобрать материал и в каком виде использовать его при проведении счета. В других случаях признается оптимальным на первых этапах интерпретации не подавлять «инициативы» компьютеру и дать ему возможность «объективно» разобраться в массиве чисел, полученных в результате наблюдений. Только на следующем этапе, когда компьютер «выскажет свое мнение» по поводу введенных в нее показателей, используется дополнительная информация, корректирующая формализованные решения. Получаемые данные вновь вводятся в машину, которая выдает уточненные результаты. Такой процесс последовательного уточнения данных интерпретации носит название итерации. Он может повторяться несколько раз, пока интерпретатор не решит, что существенного улучшения результатов нельзя уже получить.

При инженерно-геофизических исследованиях наиболее ответственной и сложной задачей интерпретации является восстановление вертикального геологического разреза по данным электрометрических и сейсмометрических наблюдений. Успешность ее решения определяется двумя основными показателями: точностью фиксации по вертикали положения геологических границ и уровня грунтовых вод в заданной точке и точностью и представительностью описания разреза по какому-нибудь направлению или же в пределах заданной площади. При этом нужно иметь в виду, что любой наземный геофизический метод дает возможность определять глубину залегания границ раздела с некоторой свойственной ему точностью. Эта точность зависит от мощности и условий залегания геологических тел, их физи-

ческих характеристик и соотношения этих характеристик с соответствующими параметрами выше- и нижезалегающих пород. По существу следует говорить не о выделении границ, а о вероятных интервалах глубин, в пределах которых располагаются изучаемые границы. Отчетливей всего эти положения проявляются в случае градиентных границ, когда переход от одного геологического тела к другому происходит постепенно, т. е. свойства являются непрерывной функцией координат. В целом, вопрос о точности интерпретации настолько сложен, что выходит за рамки данного обсуждения.

6.2. Сейсмические данные

Конечная цель обработки первичных сейсмических материалов сводится к определению двух основных величин – глубин залегания сейсмических границ или мощностей пластов и скоростей распространения в них сейсмических волн. Материалы обработки представляются в виде сейсмических разрезов, которые затем преобразуются в инженерно-геологический, на котором выделенным пластам придается конкретное геологическое содержание, а для пород определяются те или иные инженерно-геологические показатели свойств.

Таким образом, процесс обработки и интерпретации сейсмических данных разделяют на два этапа: предварительную обработку и собственно интерпретацию или решение обратной задачи. На первом этапе решается задача корреляции волн, построение годографов, введение поправок и увязка систем годографов, а на втором – расчет по годографам глубины залегания сейсмических границ, изучение характера изменения скорости упругих волн с глубиной и вдоль профиля, так называемое решение обратной задачи.

В инженерной сейсморазведке МПВ в большинстве случаев обратную задачу решают на основе анализа и обработки годографов, т. е. графиков $t(x)$, где t – время прихода волны; x – расстояние от источника колебаний до точки измерения. Методы

решения обратной задачи основаны на результатах решения прямых задач, т. е. на анализе сейсмических годографов для моделей среды, используемых в инженерной сейсморазведке.

В последнее время стали развиваться автоматические методы построения динамических временных разрезов по данным МПВ, аналогичные известным способам цифровой обработки данных МОВ, например, методика продолжения сейсмического волнового поля. Используют также метод многократного суммирования по общей глубинной площадке. В отличие от МОГТ, в этом случае кинематическую поправку рассчитывают для прямолинейного годографа преломленной волны.

Предварительная обработка

На данном этапе на основании имеющейся априорной геолого-геофизической информации и просмотра полученных сейсмограмм интерпретатор проводит корреляцию (прослеживание) целевых волн, дающих необходимую информацию. Основные трудности при этом связаны с наличием случайных помех-микросейсм и регулярных волн-помех (звуковая, поверхностные, кратные отражения), которые мешают проведению корреляции. Особенности корреляции волн при изучении верхней части разреза (ВЧР) заключаются в следующем. Поскольку изменения расстояний от ПВ до точки измерения по сравнению с глубиной изучаемых границ весьма значительны, динамические особенности волн (период, амплитуда) изменяются заметно. Первые вступления волн можно выделить только вблизи ПВ. Как правило, корреляцию проводят по максимумам или минимумам колебаний. Оси, синфазно соответствующие различным фазам одной волны, обычно параллельны, и годографы фаз приводятся к годографам первых вступлений сдвигом на фазовую поправку.

Признаком смены волн являются изменения v^* и динамических характеристик. Однако аналогичные признаки могут наблюдаться и при осложнениях записи вследствие криволинейно преломляющей границы, наличия контактов и т. д. Для разделения указанных случаев используют нагоняющий годограф, на котором смена волн должна наблюдаться примерно на таком же

расстоянии от ПВ (т. е. на другом ПК профиля), а осложнение будет отмечаться на том же ПК (т. е. на другом расстоянии от ПВ). Наиболее четко смену волн устанавливают в тех случаях, когда наблюдается зона интерференции, за которой обе волны прослеживаются раздельно.

Для отождествления волн, прослеженных на разных сейсмограммах, сопоставляют записи, полученные во взаимных точках. В соответствии с принципом взаимности для определенной волны времена прихода во взаимных точках должны быть равны. При идентичности условий возбуждения и приема принцип взаимности распространяется и на форму записи. Принцип взаимности не выполняется для несимметричных обменных отраженных и головных волн (PPS, SSP, PS и др.) в случае наклонной границы. Для определения природы волн сопоставляют нагоняемый и нагоняющий годографы. Для головных волн они параллельны, для отраженных – расходятся, для рефрагированных – сближаются.

Интерпретация данных

Интерпретация данных МОВ-ОГТ. За последние годы известные алгоритмы и программы машинной обработки данных МОВ-ОГТ были адаптированы для изучения ВЧР. Имеются примеры успешного применения МОГТ для изучения карбонатной толщи, поверхность которой залегает на глубинах 30–100 м. При машинной обработке вводят кинематические и статические поправки, проводят деконволюцию, фильтрацию и строят временной разрез. Для перехода от временного разреза к глубинному могут быть использованы как ручные, так и машинные способы. Есть примеры применения сложных методов цифровой обработки сейсмических данных для прослеживания отражений от неглубоких границ (до 8 м). Указанные выше особенности ВЧР вызывают необходимость повышения точности определения статических и кинематических поправок при обработке данных малоглубинных наблюдений МОВ.

Интерпретация записей поверхностных волн. При стандартных сейсмических исследованиях МОВ или МПВ обычно

регистрируют и поверхностные волны Рэлея (если система наблюдений *z - z*, *x - x*, *y - z*) и волны Лява (система *y - y)*. Поскольку для этих волн характерна дисперсия скоростей, количественная интерпретация записей заключается в сопоставлении экспериментально полученных и теоретических дисперсионных кривых, т. е. графиков зависимости скорости от длины волны. С методической точки зрения путем подбора определяют средние параметры слоистой структуры $(\upsilon_{Pi}, \upsilon_{Si}, h_i)$ на базе источник – сейсмоприемник. В особых случаях близкого залегания к поверхности вертикальных контактов (чередование мерзлых и талых участков) их можно картировать по записям отраженных волн Рэлея.

При сейсмических и акустических исследованиях в штольнях, скважинах, а также на образцах записи волн Рэлея используют совместно с Р-волнами для определения упругих параметров пород с помощью номограммы Кнопова.

Обработка материалов продольных вертикальных наблюдений

Полученные в результате сейсмокаротажа или сейсмоторпедирования вертикальные годографы усредняют ломаной линией. По точкам излома годографа определяют границы выделения пластов, а по наклону – скорости. Указанную операцию можно проводить автоматически с помощью ЭВМ [11]. Имея данные по нескольким скважинам, расположенным вдоль профиля, можно построить разрез в изолиниях скоростей.

Интерпретация данных сейсмического просвечивания. При наличии горных выработок (скважин, штолен и других) можно изучать горный массив путем сейсмического просвечивания (СП). Можно рассматривать как межскважинное просвечивание, так и просвечивание между скважиной или другой горной выработкой и земной поверхностью. Обычно при интерпретации данных СП используют времена первых вступлений проходящих волн, чтобы определить скоростное строение массива.

Простейшая обработка заключается в расчете для каждого ПВ полярных диаграмм скорости (индикатрис), исходя из пред-

положения о прямолинейном распространении регистрируемой волны от источника до приемника**.** Для однородной изотропной среды индикатриса имеет кругов $\upsilon_i = l_i / t_i$ ую форму. Закономерные изменения υ_i в зависимости от направления могут быть вызваны упругой анизотропией, связанной с упорядоченной гетерогенностью среды (мелкая слоистость, ориентированная трещиноватость и т. п.). Резкие локальные уменьшения υ_i для определенных направлений указывают на наличие зон с пониженной скоростью (карст, зоны нарушений и т. п.). Однако указанный упрощенный подход содержит явное противоречие: в случае изменения скоростей лучи преломляются, т. е. нельзя рассчитывать скорость по элементарной формуле для прямолинейных лучей.

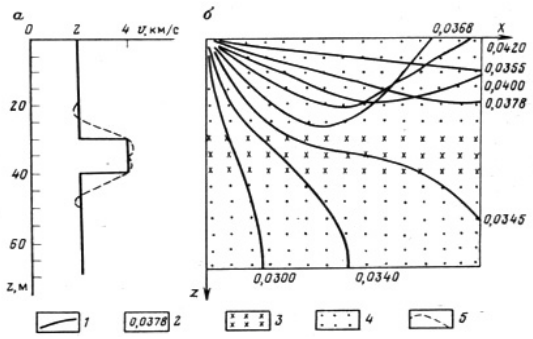


Рис. 6.1. Применение решения прямой задачи сейсмопросвечивания для слоев повышенной скорости методом сеточной аппроксимации среды [15]

6.3. Электроразведочные данные

Принципы интерпретации данных электромагнитного профилирования

Данные различных методов электромагнитного профилирования, представленные в виде карт графиков (корреляцион-

ных планов), графиков и карт тех или иных наблюденных или расчетных параметров, несут в себе информацию о геоэлектрических неоднородностях вдоль профилей или по площади в определенном интервале глубин. Интерпретация данных профилирования в основном качественная, реже количественная.

Сущность качественной интерпретации данных электромагнитного профилирования сводится к визуальному (или с помощью вероятностно-статистических методов) выявлению аномалий, т. е. отклонений полученных параметров поля от первичного (нормального) или среднего (фонового) поля, и оценке природы аномалиесоздающих объектов. Интенсивность аномалий зависит от точности съемок, которую принято выражать через среднюю квадратическую σ или среднюю арифметическую ΔA погрешности:

$$\sigma = \pm\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{(A_i - A_{ki})^2}{(2n-1)}}, \text{ или } \Delta A = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(A_i - A_{ni}),$$

где $\sigma \approx 1.25\Delta A$; A_i; A_{ki} – амплитуды основного и контрольного параметров на i-й точке при общем числе контрольных точек n. При выделении аномалий используют следующее «правило трех σ и трех точек»: аномалию считают достоверной, если ее интенсивность превосходит σ в 3 раза, а прослеживается она не менее чем на трех точках профиля.

После выявления положения аномалиесоздающих объектов на картах оценивают их геометрическую характеристику. Обычно форма и простирание аномалий соответствуют плановому положению объекта. Ширина l аномалий над тонкими ($l < h$) объектами зависит от глубины залегания их верхних кромок h, а над мощными ($l > h$) от их ширины.

Количественная интерпретация данных электромагнитного профилирования сводится к определению (чаще оценке) формы, глубины, иногда размеров, физической и геологической природы аномалий. Она начинается с выбора физико-геологических

моделей, которыми можно аппроксимировать разведываемые объекты. Простейшими из них являются контакты сред, мощные *(l> h)* и тонкие *(l<h)* пласты, изометрические (шарообразные) и вытянутые (линзообразные, цилиндрообразные) объекты и др. Для таких моделей с помощью математического или физического моделирования решены прямые задачи и разработаны аналитические и графические способы решения обратных задач.

При физической интерпретации оценивают электромагнитные свойства аномалиесоздающих объектов. С учетом геологической ситуации ведут инженерно-геологическое и гидрогеологическое истолкование полученных результатов. В целом, если в результате электромагнитного профилирования выявлены интенсивные аномалии, то используют детерминированные подходы к их интерпретации, а если слабые, то применяют вероятностно-статистические приемы, которые служат лишь для оценки наличия и местоположения объектов, создающих аномалии.

Достаточно точная интерпретация данных *электромагнитных зондирований* возможна при наличии дополнительной геолого-геофизической информации. При малоглубинных исследованиях, когда стоимость бурения невелика, количество такой информации часто бывает вполне достаточным. Однако качество ее может быть низким. Это связано с невозможностью интерполяции и экстраполяции, параметрических геолого-геофизических данных на соседние точки зондирований из-за сильной горизонтальной и вертикальной изменчивости разреза, что типично для верхних частей геологической среды. Поэтому обычные детерминистские подходы к интерпретации, основанные на известных аналитических выражениях для кажущихся сопротивлений горизонтально-слоистых сред, оказываются неточными, особенно при определении геометрических характеристик разрезов с малыми мощностями слоев по сравнению с глубиной их залегания. Это приводит к необходимости расширения роли статистических подходов для определения физико-механических и водных свойств пород, а сам процесс интерпретации становится нетривиальным, конкретно обусловленным,

требующим разработок для каждого региона своих приемов интерпретации, желательно с использованием ЭВМ. Среди электромагнитных зондирований при инженерно-гидрогеологических исследованиях наибольшее применение находят методы ВЭЗ и ВЭЗ–ВП. Поэтому особое внимание уделяется описанию не только традиционных, но и малоизвестных подходов к интерпретации данных этих методов.

Традиционная интерпретация данных электромагнитных зондирований сводится к определению по кривым кажущихся сопротивлений мощностей h_i, и сопротивлений ρ_i слоев геоэлектрического разреза в предположении, что физико-геологическая модель среды, над которой они получены, горизонтально-слоистая. Погрешности подобной интерпретации возрастают в условиях малоглубинных (около 100 м) исследований из-за следующих особенностей строения верхней части геологической среды [12,15].

1. Неблагоприятное геометрическое строение разрезов, связанное с наличием ряда (до десяти) пластов небольших по сравнению с глубинами залеганий мощностей, исключает возможность определения h_i и ρ_i в отдельности из-за широких пределов действия принципа эквивалентности, или некорректности решения обратной задачи.

2. Наличие выклиниваний пластов, крутых (свыше 20°) углов наклона слоев делает теоретически невозможной интерпретацию данных зондирований в рамках горизонтально-слоистых моделей, а приемы использования других моделей слабо разработаны и сложны.

3. Смена литологии, трещиноватости, обводненности, а значит, и электрических сопротивлений по простиранию затрудняет применение известного приема закрепления сопротивлений промежуточных горизонтов, полученных у параметрических скважин, для геометрической интерпретации данных соседних зондирований.

4. Высокий уровень технических помех и методических погрешностей техногенного происхождения (дороги, металли-

ческие конструкции, здания и т. п.) затрудняет получение точной исходной информации при крупномасштабных работах.

Вместе с тем небольшие глубины исследований и наличие доступной и недорогой геолого-гидрогеологической информации (съемки разного назначения, проходка скважин и иных горных выработок, опытные наблюдения в скважинах, шурфах) облегчают интерпретацию данных зондирований, особенно на этапе геологического истолкования. Преодолеть отмеченные трудности и повысить эффективность малоглубинных зондирований позволяет: а) увеличение количества физико-математической информации, извлекаемой из кривых зондирований, и в частности, использование не только формы кривых, но и их дифференциальных и интегральных характеристик; б) повышение качества исходных данных путем применения помехоустойчивой аппаратуры, группирования и накопления сигналов; в) применение для физического истолкования новых более сложных физико-геологических (двух- и трехмерных) моделей; г) более тесное комплексирование с инженерно-геологическими, гидрогеологическими и аэрокосмическими методами для уточнения и расширения статистических и логико-эмпирических связей между электрическими и геолого-гидрогеологическими параметрами.

Интерпретация данных электромагнитных зондирований при инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях должна проводиться следующим образом [15].

1. Сначала на основе качественного анализа кривых зондирований и сопоставления электрических горизонтов с геологическим оценивают общую геоэлектрическую характеристику района для выбора предварительных физико-геологических моделей изучаемого района с точки зрения возможности решения поставленных задач.

2. Далее проводят предварительную количественную интерпретацию параметрических зондирований графоаналитическими и ускоренными палеточными методами для увязки электрических и геолого-гидрогеологических горизонтов и построе-

ния физико-геологических моделей всего участка или его кусочно-однородных частей.

3. Следующим этапом рекомендуется палеточная количественная интерпретация, лучше ускоренными методами, например, с помощью номограмм-палеток всех кривых зондирований с получением всех возможных послойных и обобщенных параметров разреза. Она может иметь как самостоятельное значение, т. е. быть окончательной физической интерпретацией, так и давать априорную информацию для интерпретации с помощью ЭВМ.

4. Применение ЭВМ, которое не только ускоряет, упрощает и уточняет результаты палеточной интерпретации, но и облегчает последующую обработку данных. При обработке больших объемов данных электромагнитных зондирований машинная обработка крайне необходима.

5. Заключительным этапом является геологическое истолкование результатов с использованием корреляционных и логических связей между физическими параметрами и конкретными геометрическими физико-механическими и водно-физическими свойствами разреза. В результате получают окончательную физико-геологическую модель, включающую как геометрическое строение (положение поверхностей раздела с разными свойствами, литологией и состоянием), так и количественную характеристику физико-механических и водно-физических свойств среды в целом и на отдельных участках с оценкой возможной их динамики.

Часть II. ПРИМЕНЕНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЗАДАЧ

7. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ

Конечная цель системного подхода при инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях с привлечением инженерно-геофизических методов сводится к повышению геологической и экономической эффективности, а также уменьшение времени на проведение изысканий.

Гидрогеологические задачи

Одним из основных факторов, учитывающихся при проектировании, строительстве и эксплуатации инженерных сооружений, является гидрогеологическая обстановка. Она во многом предопределяет выбор места строительства, его технологию и прогноз экологических последствий хозяйственного использования созданного объекта. Особенно очевидно значение подземных вод при всех видах гидротехнического строительства, подземном строительстве и отработке полезных ископаемых, а также строительстве и эксплуатации атомных электростанций и других особо ответственных сооружений [12].

Инженерно-геофизические методы при гидрогеологических исследованиях проводят с целью решения следующих задач:

1) определения водопроницаемости массивов горных пород;

2) характеристики условий залегания и движения подземных вод в зоне аэрации;

3) изучения минерализации и температуры подземных вод во всем диапазоне глубин от земной поверхности до предельно больших глубин, представляющих интерес для данного вида строительства;

4) прогнозирования режима подземных вод, связанного с влиянием техногенных факторов.

Повышение геологической и экономической эффективности в решении перечисленных задач – главная задача инженерно-геофизических методов при гидрогеологических исследованиях.

Кратко остановимся на пути решения указанных задач.

Изучение водопроницаемости массивов горных пород

Под водопроницаемостью понимается способность горных пород пропускать через себя воду при наличии гидравлического градиента (как показана в [12], для ВЧР коэффициент фильтрации $K_Ф$ и коэффициент проницаемости $K_П$ связаны между собой зависимостью $K_Ф=K_П\sigma/\eta$, где σ – плотность жидкости, а η – вязкость). Все виды водопроницаемости горных пород (в скальных и рыхлых) находятся в тесной связи с изучаемыми в геофизике свойствами и, в первую очередь, – электрофизическими [20, 12, 27].

Степень водопроницаемости зависит от размера и количества сообщающихся между собой пор и трещин, а также от отсортированности зёрен горных пород. К хорошо проницаемым горным породам относятся галечники, гравий, крупнозернистые пески, интенсивно закарстованные и трещиноватые породы. Практически непроницаемыми (водоупорными) породами являются глины, плотные суглинки, нетрещиноватые кристаллические, метаморфические и плотные осадочные породы.

Водопроницаемость горных пород может определяться по скорости фильтрации, равной количеству воды, протекающей через единицу площади поперечного сечения фильтрующей породы. Эта зависимость выражается формулой Дарси: $v = k_ф I$, где v – скорость фильтрации; $k_ф$ – коэффициент фильтрации; I – напорный градиент, равный отношению падения напора h к длине пути фильтрации

Водопроницаемость горных пород зависит от многих факторов: степени трещиноватости и закарстованности скальных и полускальных пород; гранулометрического состава; минералогического состава дисперсных пород; пористости; величины действующего напора, вязкостных свойств воды и других факторов.

Наибольшей водопроницаемостью обладают сильнотрещиноватые и закарстованные скальные и полускальные породы и крупнообломочные гравийно-галечниковые и щебнисто-деревянные породы при отсутствии песчано-глинистого заполнителя. Дисперсные породы обладают значительно меньшей водопроницаемостью. При этом водопроницаемость дисперсных пород снижается с уменьшением крупности частиц и пористости пород, увеличением содержания в них глинистых минералов, особенно представленных монтмориллонитом; повышением содержания в породах и воде газов и одновалентных обменных катионов; уменьшением концентрации электролитов.

Для изучения водопроницаемости в основном применяют методы электроразведки ВЭЗ и ВЭЗ–ВП. Экспериментально установлено, что для маломинерализованных (до 1 г/л) вод нередко можно наблюдать сравнительно стабильную корреляционную связь УЭС и коэффициента фильтрации. Для песчано-глинистых пород на ограниченных участках УЭС обычно монотонно увеличивается с ростом $k_ф$. Уравнение связи между этими двумя величинами можно представить в виде

$$lg\, k_Ф = A_Ф + B_Ф\, lg\rho\,, \qquad (7.1)$$

где $A_ф$ и $B_ф$ – коэффициенты, определяемые опытным путем для изучаемого района или, еще лучше, для отдельно взятого участка. Таким образом, имея эмпирические зависимости между геофизическими параметрами и коэффициентом фильтрации горных пород, полученным по результатам геологического опробования и параметрических измерений у горных выработок можно определить коэффициент фильтрации.

Таким образом, для определения коэффициента фильтрации по данным геофизических методов, необходимо знать зависимости между УЭС, Р, h и коэффициентом фильтрации горных пород.

Изучение зон аэрации

Зона аэрации охватывает верхнюю часть разреза от дневной поверхности до первого горизонта грунтовых вод. Ее мощность обычно колеблется от сантиметров до нескольких десятков метров, достигая в отдельных случаях 200–300 м. Важнейшим признаком, отличающим породы зоны аэрации от других петрофизических зон, является неполная водонасыщенность порового пространства – изменение в нем объемного соотношения воздух – вода (рис. 7.1) [22].

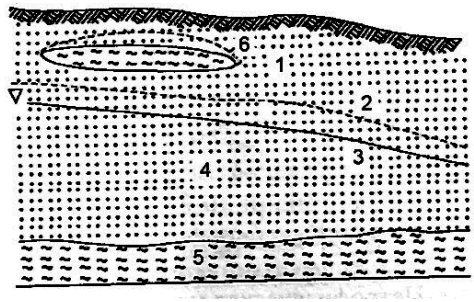


Рис. 7.1. Схема залегания вод зоны аэрации [23]: *1– зона аэрации; 2 – поверхность капиллярной зоны; 3 – поверхность уровня грунтовых вод; 4 – зона полного водонасыщения; 5 – водоупорный слой; 6 – верховодка*

Через зону аэрации осуществляется интенсивный тепломассаобмен геологической среды с атмосферой, определяющей ход многих гидрогеологических, инженерно-геологических и экологических процессов, в т. ч. техногенное воздействие на подземные воды.

Эта зона регулирует водообменные процессы, оказывая влияние на естественное и искусственное формирование режима подземных вод, геодинамические процессы, условия загрязнения природной среды.

На рис. 7.2 приведена петрофизическая модель зоны аэрации, где в качестве основных информационых параметров ис-

пользуются удельное электрическое сопротивление ρ и скорость продольных волн v_p.

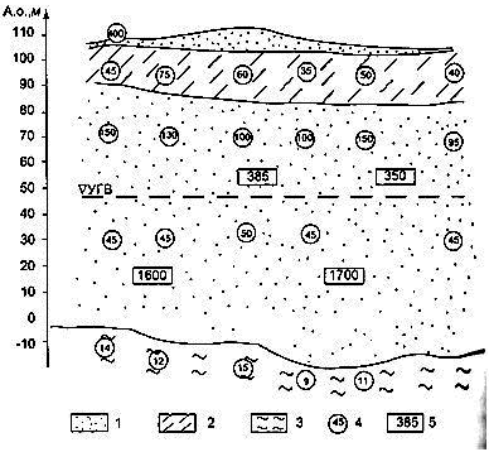


Рис. 7.2. Петрофизическая модель зоны аэрации из [23]:
1– песок; 2 – суглинок; 3 – глина; 4 – значение ρ (Ом·м); 5 – значение v_p (м/с); УГВ – уровень грунтовых вод

Изучение гидрогеологических и физико-механических параметров пород зоны аэрации, включающее характеристику литолого-генетических комплексов разреза с его детальным литологическим расчленением, определение мощности зоны аэрации, коэффициента фильтрации, засоления достигается определением таких петрофизических параметров, как удельное электрическое сопротивление ρ, поляризуемость η и A^*, диэлектрическая проницаемость ε, скорость продольных и поперечных волн V_P и V_S, и установлением соответствующих статистических зависимостей.

Физические предпосылки и практика инженерно-геофизических работ позволяют утверждать, что определение указанных выше параметров осуществляется сейсмическим ме-

тодом МПВ, электроразведочным методами ВЭЗ, ВЭЗ–ВП, методами ГИС.

Определение уровня грунтовых вод (УГВ)

Грунтовые воды – это первый от поверхности земли подземный водоносный слой, который залегает выше первого водоупорного слоя (глинистого грунта, который не пропускает воду и не дает ей просачиваться глубже).

Эта задача имеет большое значение как при инженерно-геологических, так и при гидрогеологических изысканиях для целей строительства, водоснабжения и мелиорации. Решение ее при залегании вод в рыхлых несвязных грунтах (пески, супеси, гравийно-галечные, обломочные отложения и их смеси) достаточно просто и надежно решается с помощью полевой сейсморазведки. Достоинство сейсмического метода по сравнению с разведочным бурением заключается в возможности непрерывного прослеживания зеркала грунтовых вод на всем протяжении разведочного сейсмического профиля.

Для определения глубины залегания границ раздела зоны аэрации и зоны полного водонасыщения в рыхлых породах при гидромелиоративных исследованиях применяются методы ВЭЗ в варианте микрозондирований, ВЭЗ–ВП и сейсморазведка методом преломленных волн (МПВ).

Физической предпосылкой, определяющей возможность выделения уровня грунтовых вод в рыхлых отложениях сейсмическим методом, является наличие скоростной дифференциации между влажными, но неводонасыщенными грунтами и полностью водонасыщенными грунтами.

Возможность использования сейсмического метода для определения положения УГВ в скальных и полускальных породах представляется проблематичной. Обусловлено это малым различием скорости продольных волн в таких породах ниже и выше уровня грунтовых вод (в связи с малым значением коэффициента трещинной пустотности – эквивалента пористости в рыхлых грунтах).

Эффективность применения электроразведки зависит в первую очередь от контрастности свойств па границе неполного и полного насыщения подземными водами пустот в горных породах. В случае однородных песчано-гравелистых грунтов УГВ на кривых электрических зондирований отмечается понижением $\rho_к$ и возрастанием $\eta_к$. Считается, что надежные результаты можно получить в случае, если электрическое сопротивление и поляризуемость пород зоны аэрации отличаются от тех же параметров пород водонасыщенной толщи не менее чем в 3 раза. При этом нужно учитывать степень засоления подземных вод и грунтов. Благоприятны для изучения разрезы с пресными (до 1 г/л) грунтовыми водами. При высокой и особенно построй минерализации воды и заселенных почвогрунтах контрастность между зонами аэрации и полного водонасыщения по параметру ρ заметно снижается.

При заложении фундамента наличие и уровень залегания грунтовых вод имеет ключевое значение. Чем выше уровень грунтовых вод, тем больше влажность, и тем меньше несущая способность грунта. Кроме того, при высоком уровне грунтовых вод вода заполняет вырытые траншеи и котлованы, заливать фундамент в таком случае нельзя, необходимо откачивать воду и делать гидроизоляцию.

Изучение динамики подземных вод

Изучение динамики подземных вод подразумевает решение следующих задач: определение направлений и скорости движения подземных вод, определение скорости фильтрации подземных вод.

Для определения направления и скорости движения подземных вод с успехом используются методы электроразведки: метод естественного поля (ЕП) и метод заряженного тела (МЗТ) – гидрогеологический вариант.

Метод естественного поля позволяет определить направление движения подземных вод без скважины при мелком залегании. Физико-геологической предпосылкой применения метода

ЕП является тесная связь электрического и фильтрационного полей. Потенциал поля возрастает в направлении движения потока.

Методика наблюдений сводится к измерению разности потенциалов ΔU по разным направлениям (через 30–45°). Обработка результатов сводится к построению круговой диаграммы (рис.7.3). При построении по каждому направлению от центрального пункта в обе стороны откладывают измеренные разности потенциалов.

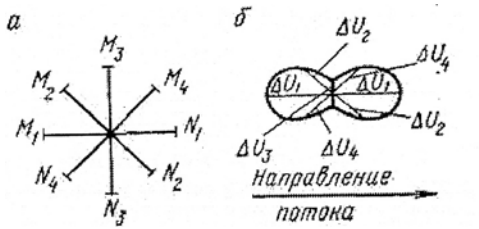


Рис. 7.3. Определение направления подземного потока методом ЕП:
а – расположение приемных линий; б – изменение ΔU

Концы отрезков ΔU1, ΔU2, ΔU3, ΔU4 соединяют и получают «восьмерку», длинная ось которой вытянута по течению потока. Направление потока определяют по направлению возрастания потенциала.

Если водоносный горизонт вскрыт только одной скважиной, то для определения направления и скорости движения подземных вод применяют гидрогеологический вариант метода заряда. Этот метод, основанный на изучении искажений в искусственном электрическом поле, создаваемом движением электролита в водном потоке.

В однородном гранулярном фильтрующем пласте зона пород, насыщенных электролитом, примет форму вытянутого языка (рис. 7.4, *а*).

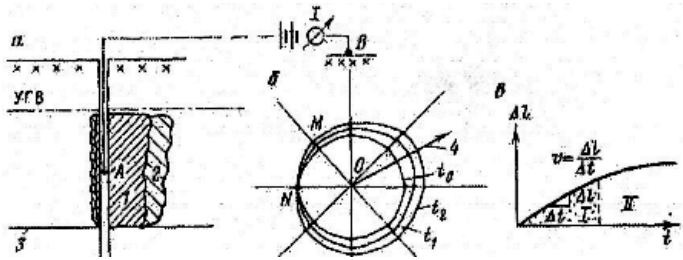


Рис. 7.4. Определение направления движения
и скорости подземных вод методом заряженного тела

По вертикали его размер в необсаженных скважинах будет определяться мощностью водоносного пласта, а для обсаженных – интервалом, соответствующим длине фильтра. Его ширина в несколько раз превысит диаметр скважины. На поверхности земли по наблюдательным лучам находят положение эквипотенциальной линии, соответствующей начальной форме зоны электролита («заряженного тела»). При малых скоростях потока эта форма близка к круговой (рис. 7.4, *б*). Если через некоторое время вновь определить положение эквипотенциальных линий, то оно окажется смещенным по отношению к начальному. Это смещение будет наибольшим в направлении перемещения тела высокой электропроводности, иначе говоря, в направлении движения подземных вод. Для получения более надежных данных последовательно снимают несколько эквипотенциальных линий. При скорости движения потока, превышающей 3 м/сут., эти линии снимают непрерывно. В случае меньших скоростей между последующими съемками допускается перерыв в 1–2 часа. Продолжительность всего цикла наблюдений на скважине обычно длится от 8–10 ч до 2–3 суток. В течение этого времени в скважину несколько раз добавляют соль, добиваясь тем самым непрерывного поступления электролита в окружающую среду.

По направлению среднемаксимального смещения всех эквипотенциальных линий находят наиболее вероятное направление движения подземных вод. Для определения скорости потока

строят график, по оси ординат, которого откладывают значения максимального смещения Δl, а по оси абсцисс – промежуток времени между съемками эквипотенциальных линий (рис.7,4, *в*). Конечная часть графика постепенно выполаживается. Это явление связано с тем, что после того, как солевое тело сильно вытянется, оно перестает уже быть эквипотенциальным, т. е. таким, в котором все точки находятся под одним и тем же потенциалом.

Потенциал вдоль языка электролита заметно падает. В результате приращение его длины приводит к меньшему, чем в начале, смещению эквипотенциальных линий. Наконец, это смещение становится совершенно незаметным, и график переходит в прямую линию, параллельную оси абсцисс.

Скорость движения подземных вод лучше всего определять по средней части графика, где он после усреднения случайных отклонений представляет собой прямую линию, наклоненную под тем или иным углом к оси абсцисс. Задавшись в этой части графика двумя точками, находят действительную скорость потока u как отношение смещения солевого тела *Δl* за промежуток времени Δt

$$v = \Delta l / \Delta t. \qquad (7.2)$$

Определение гидродинамических параметров

Для разработки конкретных мер по борьбе с повышенными притоками подземных вод к инженерным сооружениям необходимо знать не только общие условия формирования и движения фильтрационного потока, но и конкретные его параметры в различных точках и на различных глубинах. Такие данные получают по данным опытно-фильтрационных откачек и нагнетаний в специально оборудованных гидрогеологических скважинах.

Применение геофизических методов для определения гидродинамических параметров позволяет использовать не только специально оборудованные гидрогеологические скважины, но и скважины любого другого назначения (если они не обсажены).

На практике в основном применяет метод резистивиметрического каротажа. Суть метода заключается в определении

удельных электрических сопротивлений промывочной жидкости или воды, заполняющей ствол скважины. Сопротивление жидкости в стволе скважины замеряется резистивиметром, представляющим собой каротажный зонд малых размеров (в виде отрезка трубы, изготовленной из изоляционного материала. С помощью резистивиметра определяется сопротивление воды по всему стволу скважины. Затем в скважине создают повышенную концентрацию электролита, для чего по всему стволу несколько раз перемещают прикрепленные к каротажному кабелю мешки, наполненные солью (NaCI). Концентрацию электролита доводят до 2–3 г/л, что соответствует удельному сопротивлению примерно 2–3 Ом·м. О равномерности созданной концентрации электролита судят по контрольной резистивиметрической диаграмме, снятой по всему стволу скважины или в пределах подлежащего изучению интервала. Повторные замеры сопротивлений, т. е. снятие резистивиметрических диаграмм, по которым определяются скорости вымывания электролита из ствола скважин, начинают проводить через определенные интервалы времени, которые зависят от количества опресняющей воды и колеблются от 15–30 мин до нескольких суток и даже недель. При этом записывается время начала и окончания снятия каждой резистивиметрической диаграммы.

Полученные в результате наблюдений кривые удельных сопротивлений характеризуют изменение концентрации электролита вдоль исследованного интервала в последовательные моменты времени (рис. 7.5).

Анализ совокупности этих кривых позволяет выделить отдельные участки или зоны относительно быстрого возрастания сопротивления, соответствующие местам интенсивного опреснения раствора, т. е. местам наиболее активной циркуляции подземных вод. По конфигурации кривых сопротивлений можно определить качественные особенности фильтрации подземных вод, а также степень трещиноватости и проницаемости стенок скважины в исследуемом интервале.

Кроме того, анализ, конфигурации резистивиметрических кривых в ряде случаев позволяет установить наличие вертикальных перемещений подземных вод водоносных горизонтов, обладающих различными напорами.

Равномерный вымыв электролита из скважин позволяет вычислить скорость фильтрации для различных интервалов.

Для ламинарного течения используется следующая формула определения скорости фильтрации в породе:

$$V_Ф = \frac{1{,}81d}{m(t_n - t_1)} \, lg \frac{C_1 C_0}{C_n - C_0}, \qquad (7.3)$$

где d – диаметр скважины; C_0 – естественная концентрация электролита в подземных водах; C_1 и C_n – концентрация электролита в скважине в моменты времени t_1 и t_n; m – коэффициент проницаемости стенок скважины, изменяющийся от 0,5 до 4; для хорошо промытых необсаженных скважин m = 2.

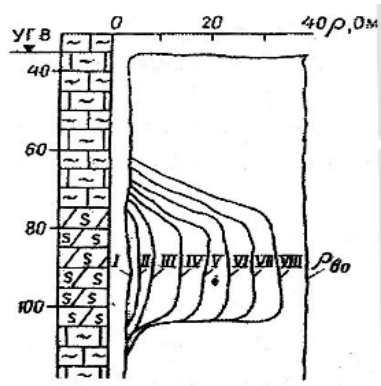


Рис. 7.5. Совокупность резистивиметрических кривых

Определение минерализации подземных вод

Оценку общей минерализации подземных вод в водоносных пластах можно проводить электроразведочными методами.

Физической предпосылкой их применения является зависимость электрического сопротивления и амплитуды ПС от минерализации пластовой воды. На практике в основном применяют методы электрического каротажа (БКЗ, ПС) и резистивиметрический метод.

Резистивиметрический метод позволяет получить достаточно надежные данные о минерализации только в случае безнапорных вод при высоких скоростях их движения и бурении без глинистого раствора. Для измерений используется скважинный резистивиметр. УЭС вычисляется по формуле $\rho_k = K\,\Delta U/I$, где ΔU – разность потенциалов; I – сила тока; К – геометрический коэффициент, зависящий от расстояния между электродами. Для перехода от единиц УЭС к единицам минерализации резистивиметр градуируют, используя растворы с известной минерализацией, сопротивление которых легко может быть установлено по таблицам и графикам. По результатам градуировки строится градуировочный график, который позволяет быстро определить минерализацию вод по значению УЭС в полевых условиях.

В сложных гидравлических системах электролит, заполняющий скважину, может в значительной степени отличаться от пластовых и трещинных вод как по концентрации, так и составу. В таких случаях используются косвенные приемы электрометрических наблюдений, позволяющие определить общую минерализацию подземных вод. Обычно устанавливается связь между УЭС пород за пределами воздействия буровой скважины ($\rho_п$) и сопротивления насыщающих их вод: $\rho_B = \rho_П/P$.

Для пластов мощностью более 3–4 м $\rho_П$ находят по результатам бокового каротажного зондирования. Относительное сопротивление Р определяется с учетом особенностей различных горных пород.

На практике при определении минерализация воды в песках величину Р для различных по гранулярному составу песков берут равной; Р = 4 общий случай; для тонкозернистых песков Р = 3; для уплотненных песков (как правило, до палеогенового

возраста) Р = 5. Для песчаников, известняков и ряда других пород Р находят из отношения $\rho_{ЗП}/\rho_C$, где $\rho_{ЗП}$ – сопротивление пород в зоне проникновения промывочной жидкости, ρ_C – сопротивление промывочной жидкости. Это отношение определяют специальными приемами с применением малых потенциал- и градиент-зондов. По величине ρ_B оценивают далее минерализацию воды в эквиваленте наиболее преобладающей соли по соответствующим номограммам.

По данным ПС, общая минерализация пластовой воды может быть оценена, если измерение аномалий ПС в скважине проводится при двух различных концентрациях бурового раствора.

Методически работы строятся следующим образом. Сначала регистрируют одну кривую ПС при заполнении скважины раствором, при котором проводилось бурение. Затем опускают на забой скважины бурильные трубы и проводят несколько циркуляционных циклов закачки раствора новой концентрации. После извлечения труб регистрируют вторую кривую ПС. Второй раствор обычно приготавливается с добавкой поваренной соли из расчета, чтобы его сопротивление уменьшилось в несколько раз.

Из совместного решения двух уравнений Нернста получают

$$\lg \rho_в = \frac{\Delta U_{ПС2}\, dn\rho_{ф2} \quad \Delta U_{ПС1}\, lg\rho_{ф2}}{\Delta U_{ПС2} - \Delta U_{ПС1}}, \qquad (7.4)$$

где $\rho_{Ф1}$ и $\rho_{Ф2}$ – сопротивления фильтрата бурового раствора при первом и втором измерениях; $\Delta U_{ПС1}$ и $\Delta U_{ПС2}$ – аномалии ПС соответственно при первом и втором измерениях, отсчитываемые от пласта глин, залегающего рядом с исследуемым и насыщенного водой той же минерализации.

Зная ρ_B, общую минерализацию оценивают по номограммам.

В современных условиях резистивиметрия позволяет наблюдать за изменением удельного сопротивления раствора в скважине после искусственного повышения его минерализации.

Этот метод дает возможность установить в разрезе местоположение и интенсивность притока или поглощения воды.

Исследования проводят после отмывки стенок скважины от глинистого раствора. Если в разрезе преобладают породы, легко разрушающиеся при отсутствии глинистого раствора, то исследования ведут только в скважинах, оборудованных фильтрами. Для измерений используют резистивиметр, который представляет собой небольшой трехэлектродный зонд специальной конструкции, изолированный от внешней среды непроводящим корпусом. В корпусе имеются сквозные отверстия, через которые раствор, находящийся в скважине, свободно поступает внутрь прибора.

Известны два способа резистивиметрических исследований: наблюдения при естественном режиме и наблюдения при нарушенном режиме фильтрации подземных вод.

Первый способ применяют для обнаружения мест притока воды в скважину и перелива воды из одного горизонта в другой, а также для определения скоростей фильтрации подземных вод. Сначала находят удельное электрическое сопротивление подземной воды, для чего регистрируют первую резистивиметровую кривую. Затем скважину промывают раствором поваренной соли повышенной концентрации. Последняя должна превышать концентрацию солей в подземных водах примерно в 3–4 раза. Часто промывку заменяют медленным протягиванием вдоль ствола скважины пористого мешка, наполненного солью. Тотчас после окончания этой операции снимают контрольную резистивимограмму, по которой судят о степени однородности условий в скважине. Через 10–15 мин замер повторяется. Так как подземные воды менее минерализованы, чем соленый раствор, находящийся в скважине, места притоков проявляются на резистивимограммах повышенными сопротивлениями раствора. При этом с течением времени величина сопротивлений возрастает (до значения, соответствующего удельному сопротивлению подземной воды) и тем быстрее, чем выше скорость фильтрации подземного потока. Для получения более четких результатов

проводят несколько последовательных замеров, постепенно увеличивая между ними, интервал времени.

Второй способ состоит в чередовании измерений с оттартываниями или наливами. Его применяют для более точного установления в разрезе мест притока вод или водопоглощающих зон и определения объемных расходов отдельных водоносных горизонтов.

Оттартывания усиливают приток, что позволяет более уверенно локализовать его местоположение. При наливах методика исследований несколько меняется. Их рекомендуется проводить в следующем порядке. Сначала ствол скважины заполняют однородным раствором определенной концентрации. Затем в скважину начинают закачивать с равномерной скоростью раствор, концентрация которого заметно отличается от концентрации раствора, заполняющего скважину, и при помощи резистивиметра наблюдают за движением границы раздела двух жидкостей. Если в скважине имеется несколько водоносных горизонтов, то положение их фиксируют по замедлению скорости движения водораздельной границы. Положение самого нижнего пласта определяют по полному прекращению движения контакта двух растворов.

Такие исследования широко применяют также в обсаженных скважинах для контроля за исправностью обсадных колот. Места нарушений в колоннах можно обнаружить, применяя те же приемы, что и описанные выше.

Определение глубины залегания регионального водоупора

Эта задача в основном решается с помощью таких геофизических методов, как ВЭЗ, ВЭЗ–ВП, сейсморазведка. Метод ВЭЗ дает хорошие результаты в случае, когда региональный водоупор представлен скальными породами (известняками, мергелями, эффузивами и т. д.), которые характеризуются существенно повышенным сопротивлением по отношению к вышележащей толще рыхлых образований. Несколько осложняется решение этой задачи в случае, когда региональный водоупор представлен глинами, а подземные воды имеют низкую (до 3 г/л) минерализацию. В этих условиях водоупор на кривых ВЭЗ (тип Q) харак-

теризуется пониженным по сравнению с вышележащей водонасыщенной толщей удельным электрическим сопротивлением.

Но наиболее сложными являются условия определения глубины до глинистого водоупора, залегающего под толщей, насыщенной грунтовыми водами с высокой (более 3 г/л) минерализацией. В этом случае обязательно применение метода ВЭЗ–ВП, т. к. породы такого водоупора характеризуются повышенными значениями относительной поляризуемости, а по удельному электрическому сопротивлению могут практически не отличаться от пород вышележащей толщи.

Определение глубины залегания регионального водоупора сейсморазведкой дает наилучшие результаты, если водоупор представлен скальными породами. Значительная разница в скоростях распространения продольных волн в водонасыщенных рыхлых породах (v_p = 1500 – 2500 м/с) и в скальных породах (vp = 3000 – 6 000 м/с), позволяет уверенно выделить скальный водоупор при использовании продольных волн. В случае, если региональный водоупор представлен глинами, скорость распространения волн в которых соизмерима со скоростью распространения волн в водонасыщенной рыхлой толще, то сейсморазведка не всегда дает положительные результаты, т. е. глинистый водоупор по продольным волнам выделяется, но глубина до него часто определяется со значительными ошибками. Это обусловлено наличием протяженной зоной интерференции продольной волны, связанной с границей водонасыщения, и волны, связанной с глинистым водоупором.

Наблюдения за коррозионными процессами. Среди множества причин, приводящих к коррозии металлических конструкций, находящихся в геологической среде, ведущее место занимают электрохимические явления, протекающие в переходной зоне металл – грунт. Коррозия возникает в том случае, когда отдельные участки поверхности металла приобретают неодинаковый электродный потенциал. Подобные условия могут создаваться при различном качестве обработки металла и изменении напряженного состояния отдельных элементов конструкции, а

также в результате воздействия внешних факторов: изменения состава и состояния поровой влаги и литологических особенностей горных пород. В результате образуются многочисленные коррозионные центры типа гальванических пар. При соприкосновении с поровым электролитом участки, характеризующиеся относительно отрицательными потенциалами, становятся миникатодами, а положительными – минианодами. Образуются системы замкнутых электрических цепей. В электролите (грунтах) ток течет от катода к аноду, а в металле – в противоположном направлении. Катодом обычно становятся участки поверхности конструкции, к которым поступает большее количество кислорода (чем выше концентрация кислорода в растворе, тем более положительным оказывается потенциал металла). Анодам соответствуют участки дефицитного поступления кислорода. В их пределах и происходит вынос ионов и, следовательно, разрушение его поверхности.

Коррозионная активность системы металл – электролит грунтов резко возрастает под влиянием сторонних электромагнитных полей, которыми могут являться поля природного и техногенного происхождения.

Электрические токи концентрируются в металлических конструкциях, находящихся в грунтах, и, стекая с них, образуют анодные зоны, в пределах которых и происходит наиболее энергичный вынос ионов металлов. Чем меньше переходное сопротивление, которое определяется УЭС грунта, тем выше плотность отекания тока и, следовательно, интенсивнее происходит разрушение металла.

Особое значение имеет борьба с коррозионным разрушением трубопроводов. Благодаря своей высокой электропроводности по отношению к окружающей среде трубопровод концентрирует в себе индустриальные и природные токи и канализирует их до места, где сопротивление грунтов минимально. Здесь и образуются анодные зоны, приводящие к коррозионному разрушению сооружения. Существенное значение имеет и гидрохимический фактор: обводненные породы препятствуют доступу кислорода к

металлу, что приводит к уменьшению деполяризации на катоде. В результате увеличивается разность потенциалов между катодом и анодом и повышается вынос ионов металла.

Для изучения коррозионных процессов применяют такие методы электроразведки, как ЭП и ВП, т. к. электрическое сопротивление связано с целым рядом показателей геологической среды оказывающих непосредственное влияние на коррозийный процесс. В каждой стране устанавливают нормативы значений сопротивлений, определяющих возможное развитие коррозионных явлений (>100 –низкая коррозионная активность, 100–20 – средняя, 20–10 – повышенная, <10 – высокая).

Помимо низких абсолютных значений сопротивлений, повышению коррозионной опасности способствует дисперсия этого параметра. Чередование участков распространения низких и повышенных ρк (литологическая смена пород, разрывные нарушения, различная обводненность) указывает на условия, способствующие возникновению дополнительных катодных и анодных зон, иначе говоря, новых систем коррозионных центров.

Измерения ρ_K осуществляются на глубинах, соответствующих глубине погружения металлических конструкций. При прокладке трубопроводов, протяженность которых сотни тысяч километров, как правило, используются установки профилирования с двумя разносами питающих электродов. Значение ρК на малых разносах (А'В' = 4–8 м) должно контролировать степень обводненности почвогрунтов и наличие зон повышенной их минерализации. В то же время ρК, замеренное на больших разносах (АВ =10 м), позволяет составить характеристику рабочего горизонта грунтов, вмещающих тело трубы. Шаг измерений зависит от конкретных местных условий и может варьировать от 5 до 50 м.

Параллельно с замерами сопротивлений и поляризуемости ведутся наблюдения за интенсивностью естественных и особенно техногенных электрических полей. Области их концентрации неблагоприятны для погруженных в грунт металлических конструкций. В процессе эксплуатации трубопроводов вдоль их трасс периодически проводят замеры электрических потенциалов

Инженерно-геологические задачи

Геологическое строение является основным компонентом комплекса инженерно-геологических условий. Его изучение включает в себя выделение и прослеживание геологических тел разного ранга (слоев, линз и т. д.), а также тектонических элементов, имеющих существенное инженерно-геологическое значение (зон трещиноватости, разломов и т. д.).

Верхняя часть разреза, которая в обычной сейсмике объединяется под названием «зона малых скоростей» и исключается из рассмотрения, в инженерной геофизике, как уже говорилось, является объектом самостоятельного изучения. Как показывает накопленный к настоящему времени достаточно большой опыт ее изучения, верхняя часть разреза с позиций сейсмики представляет собой сложно построенную неоднородную среду с большим количеством границ раздела, природа которых различна.

Изучение разрывных нарушений

Зоны развития разрывных нарушений характеризуются резким изменением свойств горных пород, напряженного состояния и гидрогеологических условий. Изменение электрических характеристик зависит от типа заполнителя трещин и трещиноватых зон и свойств ненарушенных пород. Нарушенные зоны различаются по фильтрационным характеристикам, что отражается на изменении температурного поля. В зоне нарушений часто изменяются и магнитные свойства горных пород в связи с процессами ожелезнения, гидротермальной деятельности и др. Таким образом, существуют предпосылки применения основных геофизических методов: гравиметрии, сейсморазведки, электроразведки, магниторазведки и термометрии, а также эманационной и гелиевой съемок.

Основным геофизическим методом изучения разрывных нарушений является электропрофилирование, которое дает возможность фиксировать положение нарушений как по смещению пластов, так и аномалиям физических свойств в зоне нарушения.

Для изучения разрывных нарушений широко используются вертикальные электрические зондирования. При использовании

метода ВЭЗ необходимо учитывать то что, кривые ВЭЗ, получаемые в непосредственной близости от нарушений, обычно сильно искажены. Поэтому для интерпретации используют неискаженные кривые, полученные в точках, сравнительно удаленные от изучаемой зоны.

Возможности использования сейсмических методов для обнаружения и прослеживания зон тектонических нарушений основаны на:

1) резком различии сейсмических свойств трещиноватых пород, приуроченных к зоне тектонических нарушений, и пород, находящихся вне ее пределов;

2) сложном характере рельефа коренных пород на границах зоны тектонического нарушения.

В основном сейсморазведку применяют для обнаружения малоамплитудных крутопадающих нарушений. Это связано с тем что, такую зону тектонических нарушений можно в первом приближении моделировать тонким крутопадающим пластом пониженной скорости и повышенного поглощения упругих волн.

Для поисков тектонических нарушений такого типа применяют метод преломленных волн МПВ. Наблюдения выполняют по системе параллельных профилей, направленных вкрест предполагаемой системы нарушений. Из за малой протяженности зон нарушений по профилю используют детальные системы наблюдений (шаг Δx – 2,5 м и расстояния между профилями до 100–200 м).

В последнее время для картирования разрывных нарушений стал использоваться метод отраженных волн (МОГТ). На временных разрезах МОГТ зоны тектонических нарушений отмечаются следующими признаками:

• смещением осей синфазности или заметным изменением их наклона;

• наличием субвертикальной узкой зоны разрыва временных осей (или зоны хаотической записи);

• наличием локальных участков уменьшения эффективной скорости за счет эффекта просвечивания нарушения отраженными волнами.

Для выделения разрывных нарушений с успехом можно использовать гравиразведку, магниторазведку и радиометрии (эманационная съемка). Методика выделения разрывных нарушений по материалам этих методов подробно описаны в специальной литературе.

Изучение трещиноватости

Трещиноватость является основной причиной, определяющей водопроницаемость скальных и полускальных горных пород. От нее также зависят их прочностные и деформационные свойства.

Трещиноватость горных пород влияет на все без исключения петрофизические свойства и, следовательно, на физические поля. Основными аномалиеобразующими факторами являются следующие [2, 12]:

1. Общий объем трещин по отношению к изучаемому объему горных пород. Чем больше это отношение, тем больше отличаются свойства изучаемого трещиноватого массива от свойств пород в монолитном залегании.

2. Распределение и ориентация трещин в геологической среде. Системы ориентированных трещин определяют анизотропию массивов и связанные с ней особенности структуры физических полей.

3. Характер заполнителя трещин. Трещины могут быть зияющими, т. е. заполненными воздухом, водой, льдом и переотложенным материалом, состав которого меняется от тонкопылеватого глинистого до грубой брекчии (изменчива также и степень его водонасыщения).

Поэтому в общем случае поведение петрофизических свойств и измеряемых физических полей непредсказуемо.

Из всех параметров трещиноватых горних пород лучше всего изучены электрофизические, поэтому для изучения трещиноватости в основном используются электрометрические наземные и скважинные методы. Реже применяются сейсмоакустические методы.

Наиболее распространенными из наземных электрометрических методов изучения трещиноватости являются методы ВЭЗ и ЭП. Они дают возможность характеризовать распределение

трещинной пустотности по глубине, определить господствующее простирание вертикальных и наклонных систем трещин, картировать их по площади.

С помощью ультразвукового и сейсмического методов может быть определена трещинная пустотность массива.

По данным ультразвукового каротажа строится график зависимости $v = f(h)$. На измеренные скорости оказывают суммарное влияние пористость и трещиноватость породы. Для определения трещинной пустотности используют формулу

$$n = \frac{\frac{v_{ск}}{v} - 1}{k - 1}, \qquad (7.5)$$

где $k = v_{ск}/v_з$; $v_{ск}$, $v_з$, $\bar{v}$ – скорости распространения упругих волн в скелете породы, материале заполнителя, и средняя или измеренная скорость.

Изучение трещиноватости ведется также сейсмоакустическими методами в наземном, подземном и скважинном вариантах. Выявление трещиноватости по этим методам осуществляется по существу по тем же признакам, что и прослеживание разрывных нарушений.

Изучение массива рыхлых пород

Рыхлые, преимущественно четвертичные отложения являются основанием и вмещающей средой для многих инженерных сооружений. Поэтому изучению этих отложений при инженерно-геологических исследованиях должны быть уделены большое внимание.

Характерная особенность строения разрезов, сложенных рыхлыми породами, – их слоистость при горизонтальном или слабо наклонном залегании слоев (в равнинных районах). При этом определяющее влияние на численные значения скоростей оказывает давление вышележащей толщи пород и структурное упрочнение пород с глубиной, которое обычно преобладает над влиянием литологии. Поэтому в большинстве случаев литологические границы являются преломляющими, а в связи со слабой

дифференциацией разрезов рыхлых пород по скоростям – слабыми границами.

Сейсмическими границами в рыхлых породах, как правило, слабыми, могут быть контуры погребенных русел древних рек (современные аллювиальные отложения в древнем аллювии).

Сильной сейсмической границей по продольным волнам является уровень грунтовых вод в рыхлых несвязных грунтах – песчано-гравийно-галечных или обломочно-щебнистых отложениях.

Перепад скоростей в данном случае может достигать v_2/ v = 2÷5. Обводнение рыхлых пород, как уже говорилось, сильно нивелирует скоростные различия по продольным волнам на литологических границах. Границы могут стать такими слабыми, что выделение их становится сложной, а подчас и невыполнимой задачей. В то же время по поперечным волнам границы ниже уровня грунтовых вод остаются такими же, как и в зоне аэрации.

Поэтому при необходимости выделения и прослеживания границ в толще обводненных отложений следует проводить исследования на поперечных волнах.

Особый случай с точки зрения сейсморазведки представляют так называемые градиентные среды, в которых скорость плавно, без скачков возрастает с глубиной. Такое изменение скорости может наблюдаться в массивах, сложенных коренными глинами, аргиллитами, слабыми сланцами. Наиболее отчетливо градиентное изменение скорости наблюдается при работах на обнажениях пород. Если же коренной массив перекрыт небольшим чехлом рыхлых отложений, градиентность выражена значительно слабее, или, иначе, возрастание скорости в глубину начинается с более высокой начальной величины v_0.

В большинстве случаев изучение рыхлых отложений (расчленение по литологическим и гранулометрическим составам, определение их мощности и изучение физико-механических и водно-физических свойств) решаются методами электрометрии. Возможности использования этих методов оценивают по разнообразию электрических параметров, свойственных различным генетическим группа рыхлых отложений.

8. ИЗУЧЕНИЕ КАРСТОВЫХ И ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ

8.1. Изучение карста

Карст (от нем. *Karst*, по названию известнякового плато Карас в Словении) – совокупность процессов и явлений, связанных с деятельностью воды и выражающихся в растворении горных пород и образовании в них пустот, а также своеобразных форм рельефа, возникающих на местностях, сложенных сравнительно легко растворимыми в воде горными породами – гипсами, известняками, мраморами, доломитами и каменной солью.

Проблема исследования карста является весьма актуальной, поскольку строительство промышленных и гражданских сооружений, расширение и реконструкция городов и рабочих поселков вовлекает в инженерную подготовку значительные массивы территорий, зачастую со сложными физико-геологическими явлениями.

При изучении карстовых районов, наряду с обычными инженерно-геологическими, следует широко использовать геофизические методы. Последние, изучая естественные и искусственно созданные физические поля над геологической средой, позволяют исследовать некоторый объем массива пород и выявить достаточно быстро различные неоднородности, включая карст.

Геофизические методы исследования в карстовых районах решают следующие основные задачи:

– литологическое расчленение пород;

– поиски и оконтуривание карстовых полостей или зон их развития (поверхностных и погребенных), определение рельефа карстующихся пород;

– изучение степени трещиноватости пород и преобладающего его направления;

– исследование гидрогеологических особенностей карста.

Для поисков и обнаружения карстовых полостей может быть использовано большинство существующих геофизических методов: электроразведка постоянным и переменным током, ма-

логлубинная сейсморазведка, гравиразведка с градиентометрами, магнитометрия, различные скважинные методы. Однако применение ряда геофизических методов, таких как гравиразведка и магнитометрия, может быть рекомендовано лишь в благоприятных случаях.

В большинстве районов использование гравиметрии и магнитометрии ограничено по тем соображениям, что и разрешающая способность этих методов весьма незначительна.

Крупные карстовые полости (пещеры), размеры которых соизмеримы с мощностью перекрывающих пород, могут быть обнаружены гравиразведочными наблюдениями с использованием высокоточных гравиметров. Карстовые же полости, заполненные вторичным материалом, слабо улавливаются гравиразведкой ввиду незначительного перепада плотностей вмещающих пород и карстовых образований.

По своим физическим характеристикам (удельное электрическое сопротивление, скорость распространения упругих волн, плотность и т. д.) зоны карстующих пород существенно отличаются от вмещающих пород, незатронутых карстовыми процессами. Эти отличительные особенности тем больше, чем интенсивнее карстовые процессы, чем больше карстовые полости и чем резче они отличаются по своему физическому состоянию от окружающих пород (незаполненные карстовые полости). В противном случае физическая дифференциальность значительно сглаживается, и выявлять и оконтуривать карстовые зоны становится затруднительно.

Известно, что особенно благоприятны для развития карста участки тектонических поднятий с малой мощностью покровных отложений, склоны современных и древних речных долин, участки, в разрезе которых гипсо-ангидритовые отложения перекрываются трещиноватыми карбонатными породами и, напротив, затрудняет развитие карста наличие перекрывающих водонепроницаемых глинистых пород (глины, мергели, алевролиты) значительной мощности.

Геофизические методы исследования на карст могут выполнять как прямую задачу поисков и оконтуривания карстовых образований (воронок, западин, понор и т. д.), так и косвенную – изучение общей геолого-гидрогеологической обстановки карстового района, определение мощности и состава покровных образований, изучение трещиноватости карстующегося массива, определение рельефа карстующихся пород и т. д.

Таким образом, задачи исследования карста геофизическими методами приобретают широкий и разнообразный характер. В настоящее время уровень геофизических исследований в методическом, техническом и теоретическом плане существенно возрос, поэтому их следует считать ведущими методами при изучении карста. При этом постановка геофизических работ должна тесно увязываться с обычными методами инженерно-геологических исследований (съемка, бурение). Комплекс инженерно-геологической съемки и геофизических исследований позволяет более уверенно и качественно проводить оценку закарстованных территорий.

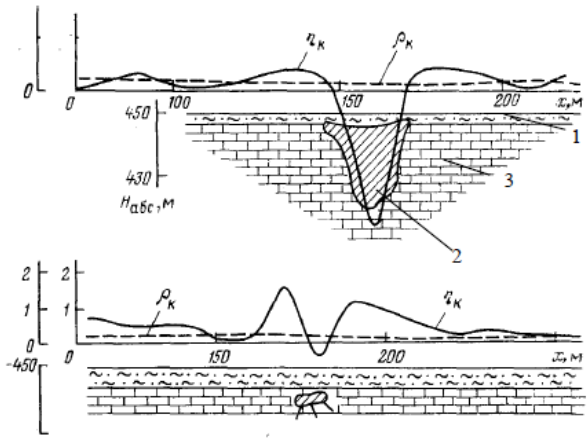


Рис. 8.1. Пример применения метода ВП для картирования карста [15,18]: 1– *аллювий; 2 – глинистый материал; 3 – известняк с карстом*

Электроразведка

Первые теоретические и модельные работы по электроразведке карста показали, что отдельные карстовые полости могут быть отмечены только в том случае, если максимальные поперечные размеры по горизонтали равны или превышают глубину залегания полостей. Исследования проводились в однородном электрическом поле постоянного тока. В дальнейшем эти выводы были подтверждены расчетами по формулам А.И. Заборовского [7] для шара в поле точечных источников.

На основании теоретических и модельных работ Б.К. Матвеев и А.А. Огильви [9, 13] сформулировали следующие важные положения для методики электроразведки карста:

1) карстовые полости, залегающие выше уровня подземных вод, отмечаются на графиках электропрофилирования максимума, а ниже – минимума кажущихся сопротивлений;

2) вероятность выделения и тех, и других почти одинакова при условии, что поперечные размеры полостей по горизонтали равны или превышают глубину их залегания;

3) величина аномалий зависит от целого ряда факторов: глубины залегания полостей, их горизонтальных размеров, мощности проводящих наносов, соотношений УЭС полости и вмещающих пород, а также от размеров и вида установок.

В толще рыхлых отложений, перекрывающих карстующиеся породы, непосредственно в окрестностях развития карстовых процессов наблюдаются резкие изменения гидрогеологического режима, что сильно влияет на величину УЭС рыхлых отложений в значительно более широкой зоне, чем участок, непосредственно охваченный карстовыми процессами. Данный признак позволяет выделять карстовые зоны, расположенные на значительно большей глубине, чем это допускают приведенные выше теоретические расчеты.

Таким образом, весь объем пород над карстовой полостью характеризуется измененной структурой, что существенно облегчает поиски и оконтуривание карстовых зон с установками

меньших размеров. Последнее обстоятельство особенно важно в условиях работы на застроенных территориях.

Сейсморазведка

Плотность пород тесно связана с их упругими свойствами, которые могут быть положены в основу при изучении карстовых образований сейсморазведочными методами.

С помощью сейсморазведки можно определить глубину залегания и мощность закарстованной толщи, выделить наиболее разрушенные зоны и проследить их простирание.

Если карстовая полость расположена в коре выветривания коренных пород, сейсморазведкой она может быть обнаружена по совокупности признаков [23]:

1) над карстовой полостью значения средней скорости упругих волн существенно уменьшаются;

2) низкие значения распространения продольных и поперечных волн отвечают зонам повышенной трещиноватости;

3) наблюдается изменение формы записи над карстовой полостью (аномально высокое затухание преломленных волн). При возбуждении колебаний над карстовой полостью для получения удовлетворительной записи волн необходимо применять заряды В.В. большой величины или увеличивать силу ударов.

Радиоволновые методы

Выявление и оконтуривание закарстованных зон, а также отдельных крупных карстовых полостей как пустых, так и заполненных водой или глинистыми отложениями, можно проводить радиоволновыми методами. При этом карстовая полость искажает нормальное поле радиостанции, поскольку среда в объеме полости отличается по своим электромагнитным параметрам от вмещающих пород.

Принципиально возможны при модификации применения радиоволновых методов:

а) радиоволновые просвечивания из скважины в скважину или из скважины (пещеры) на поверхность земли или с поверхности в скважину (пещеру). Во всех случаях используются автономные передатчики и приемник; карстовые зоны или

полости проявляются в виде «тени» (по измененному поглощению радиоволн);

б) измерение сопротивления излучения антенны на профилях, пересекающих площадь с предполагаемой карстовой зоной (полостью). Антенна передатчика располагается на определенной высоте над землей и настраивается в резонанс, после чего перемещается вместе с передатчиком. Над карстовой полостью настройка нарушается и по величине изменения измеряемой мощности или по изменению настройки судят о размерах и глубине расположения полости. Зона изменения излучения в плане позволяет оконтуривать полость;

в) метод радиокип, где измеряется излучение напряженности поля удаленной радиостанции. Над карстовой полостью или зоной вектор напряженности магнитной составляющей отклоняется от горизонтали, в нем появляется вертикальная составляющая, а горизонтальная составляющая изменяется от точки к точке.

Все эти методы были экспериментально проверены, и получены хорошие результаты, но ни один из них не был широко опробован при инженерно-геологических изысканиях. Причиной является отсутствие серийной аппаратуры, отвечающей условиям изысканий. Выпускаемые промышленностью приборы ПИНП (для метода радиокип) из-за своей конструкции недостаточно стабильны в работе, а аппаратура скважинного просвечивания типа АРП обладает недостаточной мощностью для работы в средах невысокого сопротивления. Аппаратура для второй группы методов серийно не выпускалась. Существенное значение имеет также мощность и волновое сопротивление верхней толщи, перекрывающей карстующиеся породы, в которой радиоволны испытывают сплошное поглощение.

Учитывая большие возможности радиоволновых методов и полученные положительные результаты, следует рекомендовать их включение в комплекс геофизических методов карста в благоприятной ситуации как рекогносцировочных для обследования больших площадей.

Скважинные методы

При поисках погребенных карстовых полостей, залегающих ниже уровня подземных вод, для изучения гидрогеологической обстановки в зоне развития карста могут использоваться скважинные методы, включая каротаж сопротивлений (КС), естественной поляризации (ЕП), резистивиметрию, и также ядерные методы каротажа: естественной гамма-активности (ГК) и гамма-гамма каротажа (ГГК). Перечисленными методами устанавливаются наиболее трещиноватые зоны в карстующихся породах, определяются скорости фильтрации для различных участков карстующих пород, а также глинистость и плотность пород. По этим данным можно судить о наличии на тех или иных интервалах сильно закарстованных пород.

Для локализации обводненных зон можно применять косвенные и прямые методы. Косвенные скважинные методы (КС, ЕП, ГК, ГГК) позволяют фиксировать зоны с пониженным электрическим сопротивлением и плотностью, характерных для закарстованных пород. Прямыми методами для локализации обводненных зон являются резистивиметрия и расходометрия.

8.2. Изучение оползневых процессов

Под оползнями понимается внезапный или постепенный отрыв горных пород и движение их по склону под влиянием силы тяжести.

Оползни – обычное явление в тех местностях, где активно проявляются процессы эрозии склонов. Развиваясь на территориях интенсивного хозяйственного освоения, оползни представляют всем без исключения инженерным сооружениям. Они происходят в том случае, когда массы породы, слагающие склоны гор, теряют опору в результате нарушения равновесия пород, вызванного подмывом водой, ослабления прочности пород при выветривании и переувлажнении осадками и подземными водами, вследствие сейсмических воздействий, а также строи-

тельной и хозяйственной деятельности, проводимой без учета геологических условий.

Изучение оползневых явлений – один из самых ответственных и сложных видов инженерно-геологических исследований. Поэтому в последние годы для изучения оползневых процессов широко привлекаются инженерно-геофизические методы.

При изучении оползней перед геофизикой ставятся следующие основные задачи:

1. Выявление структуры и геологического строения тела оползня и окружающего горного массива.

2. Изучение гидрогеологических условий как в теле оползня, так и в окружающем массиве.

3. Оценка динамики (скорости движения) оползня, изменения напряженного состояния и определение ожидаемого времени подвижек.

Геофизические свойства горных пород тела оползня по сравнению с окружающим массивом отличаются увеличением естественных электрических потенциалов, понижением удельного электрического сопротивления и скоростей распространения упругих волн, увеличением их затухания, появлением термических аномалий и др. Поэтому основными методами решения 1-й и 2-й из названных задач являются методы естественного поля (ЕП), электромагнитные зондирования (ВЭЗ, ЗСБ) и профилирования (ЭП, ДИП), сейсморазведка методом преломленных волн (МПВ), прослушивание электрических и сейсмических шумов (электрическая и сейсмическая эмиссия). Выбор одного-трех из этих методов диктуется природными (геоморфологическими и геолого-гидрогеологическими) условиями. В стабилизированном состоянии оползня геофизические параметры, получаемые при интерпретации режимных наблюдений, сохраняются постоянными. При подготовке активизации оползня они начинают заметно изменяться, что объясняется увлажнением, ростом трещиноватости и напряженного состояния, техногенными причинами (подрезка склонов, строительство на оползнях и т. п.). Это и позволяет прогнозировать время начала

скольжения и предсказывать катастрофические сходы оползней. За скоростью движения оползней (задача 3) можно следить, например, по сдвиганию магнитных реперов. Для этого в тело оползня помещают ряд вертикальных труб или стержней и проводят периодические магнитные съемки. По направлению максимального смещения изолиний и величине смещений за известное время можно рассчитать направление движения и скорость оползня.

Для определения структуры оползня успешно применяется сейсморазведка (МПВ) и электроразведка (ВЭЗ и ЭП). Предпосылкой применения *сейсморазведки* МПВ является изменение скорости сейсмических волн в зоне скольжения оползня. В ее пределах наблюдается уменьшение скорости. Оптимальной методикой наблюдений при изучении оползней является продольное профилирование с системами встречных и нагоняющих годографов при постоянном шаге приборов и двух-, трехкратном перекрытии каждого интервала между пунктами ударов. Расстояния между ПУ выбираются в зависимости от мощности оползня и неоднородности его состава по скоростям. Минимальная величина расстояния между ПУ может быть равна 10 м, максимальная – 20–30 м при наблюдениях с одноканальными установками и 50–100 м – с многоканальными станциями (на оползнях большой мощности).

Предпосылкой к применению сейсмического метода для определения общей мощности и расчленения оползней на отдельные горизонты служит известный факт существенного различия скоростей распространения упругих волн в монолитной, ненарушенной породе и в оползневой массе, состоящей из обломков той же породы различного размера ($\upsilon_{сохр}/\upsilon_{оп}$ = 2:10 и более). Необходимо также отметить, что в зоне скольжения оползня происходит изменение скорости сейсмических волн. В ее пределах наблюдается уменьшение скорости.

Оптимальной методикой наблюдений при изучении оползней является продольное профилирование с системами встречных и нагоняющих годографов при постоянном шаге приборов

и двух-, трехкратном перекрытии каждого интервала между пунктами ударов.

Необходимо отметить, что в отличие от электроразведки, сейсмический метод при изучении оползней наиболее эффективен в условиях минимального увлажнения склоновых образований как оползших, так и находящихся в условиях естественного залегания.

Различия в скоростях упругих волн в оползне и ненарушенной породе намного уменьшаются при насыщении ее водой.

Возможности и ограничения сейсморазведки при решении рассматриваемой проблемы определяются рядом факторов или условий, благоприятствующих проведению сейсмических исследований в пределах оползневых тел или, наоборот, осложняющих их.

Одни из перечисленных факторов связаны с физическими основами метода, другие обусловлены сложностью сейсмогеологических условий, третьи определяются возможностями сейсмической аппаратуры.

Среди факторов, делающих возможной постановку сейсмических исследований на оползнях, первый не требует комментариев. Второй означает, что сейсмический метод в общем накладывает меньше ограничений на приповерхностные условия (рельеф и выдержанность слоев), чем электроразведка. При выборе линии наблюдений на склоне необходимо лишь стремиться к тому, чтобы рельеф вдоль нее был более спокойным. Наконец, отсутствие ограничений на глубинность метода следует понимать так, что теоретически, применяя источник колебаний достаточной мощности, можно изучать любые глубины.

Применение *методов электроразведки* для изучения структуры оползня основано на том, что в зоне скольжения отмечается уменьшение удельного электрического сопротивления. ВЭЗ используется для определения верхней поверхности зоны скольжения. Максимальные разносы питающей линии АВ выбирают исходя из предполагаемой мощности оползня h. Он должен превышать 10h , а их направление разносов должно сов-

падать с горизонталями рельефа. Расстояние между профилями не должно превышать 50 м, а расстояние между точками – не более 20 м.

При выполнении работ методом ВЭЗ можно использовать симметричные четырех-или трехэлектродные двусторонние установки зондированиям (второй питающий электрод С выносится за пределы оползня на расстоянии АС = 10АО (ОВ)). Однако предпочтение отдается трехэлектродным двусторонним. Анализ расхождения право- и левосторонних кривых дает представление о том, с какой стороны находятся значительные неоднородности, а в благоприятном случае позволяет оценивать и падение тех или иных геологических тел.

При обследовании оползневого склона с помощью электрических зондирований наиболее вероятно получение геоэлектрического разреза имеющего три слоя. Верхний слой (ρ1) сравнительно сухих оползневых накоплений имеет удельное сопротивление примерно 20 Ом·м. Второй слой (ρ2) – основная часть оползневой массы – характеризуется повышенной влажностью (34 – 37 %) и как следствие, пониженным сопротивлением (4–5 Ом·м). Третий слой (ρ3) – глинистые породы, не затронутые оползневыми процессами с влажностью 25–28 %, дает тот же порядок сопротивлений, что и первый слой.

Электропрофилирование используется при картировании оползневых массивов. Профиля задаются по направлениям, соединяющим точки зондирований. Расстояние между точками наблюдений не должно превышать 5 м, а расстояние между профилями – 10–25 м. Профилирование ведется установками, обеспечивающими исследование на двух глубинах: на глубине, соответствующей зоне смещения и на уровне, характеризующем верхнюю часть разреза (главным образом зону аэрации). Оптимальные разносы выбирают по данным предварительно выполненных одиночных зондирований.

Для изучения гидрогеологических условий в зоне оползня наиболее широко применяют методы электроразведки (метод заряда, метод ЕП) и термометрию. С помощью метода заряда

при наличии скважины можно определить направление движения и скорость подземных вод.

Исследования по методу ЕП, характеризуют поведение геофильтрационного поля, что позволяет определить направление подземного потока. Расстояние между точками наблюдений не должно превышать 5 м, а расстояние между профилями – 10 м.

Метод ЕП позволяет выделять участки выхода фильтрационных потоков. На графиках такие участки отмечаются максимумом электрических потенциалов, спадающим более или менее равномерно по всем направлениям.

Для изучения динамики оползневых процессов проводят режимные геофизические наблюдения. Для решения данной задачи применяют методы сейсморазведки, электроразведки и магниторазведки. Из сейсмических и электрических методов в основном используют круговые сейсмические зондирования (КСЗ), круговые вертикальные электрические зондирования (КВЭЗ), круговые электропрофилирование (КЭП), метод ЕП.

Круговые сейсмические зондирования МПВ позволяют изучать скоростную анизотропию, которая имеет четкую связь с напряженным состоянием оползневого массива. А индикатором этого состояния является процесс развития системы трещин, которая и определяет упругую анизотропию.

Круговые ВЭЗ и ЭП позволяют изучать трещиноватость горных пород в оползневом массиве. Метод ЕП позволяет отслеживать поведение гидроизогипс.

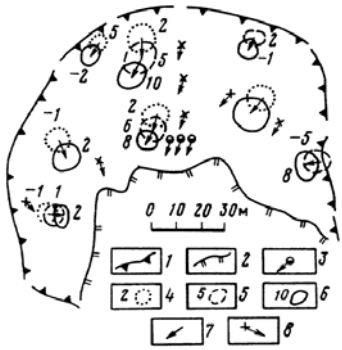


Рис. 8.2. Один из примеров использования результатов комплексных геофизических и геодезических исследований на оползне [15]:
1 – контур стенки отрыва; 2 – граница каньона; 3 – направление смещения магнитных реперов; 4–6 – эквипотенциалы естественного поля за три последовательных периода; 7 – направление смещения аномалии ЕП; 8 – направление смещений геодезических реперов

Применение *магниторазведки* основано на использовании специальных магнитных реперов, погружаемых через скважину в тело оползня. При выборе места для заложения репера необходимо следить, чтобы поблизости не было железных конструкций, линий электропередач и других источников паразитных магнитных полей. Измерения магнитного поля ведутся по радиальной или квадратной сети с расстоянием между точками 0,25–0,5 м. Для измерений применяются высокоточные квантовые магнитометры. Точки должны жестко закрепляться на местности. Перед заложением реперов проводится съемка нормального фонового магнитного поля. Для повышения точности измерений проводят синхронные наблюдения двумя магнитометрами, один из которых находится на контрольном пункте.

Каждый цикл наблюдений представляют в виде карты изодинам, на которой максимум отвечает положению проекции репера на земную поверхность. Оценить смещение проекции можно с помощью топографических засечек с неподвижных точек

склона или в результате измерения расстояния до проекции репера, заложенного в толщу устойчивых пород ниже поверхности скольжения. Частота повторных измерений зависит от оползневой активности того или иного склона. По их результатам строят разностные карты, позволяющие более надежно оценивать горизонтальные смещения репера.

Совместный анализ электроразведочных, сейсморазведочных, магниторазведочных и геодезических работ позволяет определить неравномерность смещения частей оползня по площади и глубине.

В процессе инженерно-геологических исследований оползневых процессов используют и *радиоизотопные методы*. Метод поглощения γ-излучения применяют для определения плотности грунта. В основе метода лежит зависимость между долями поглощаемого грунтом γ-излучения, проходящего через него, и массой грунта. Плотность грунта определяется с точностью ±0,01 г/см^3.

Другим методом определения плотности является *метод рассеянного γ-излучения*. Интенсивность рассеянного излучения зависит от плотности среды, энергии потока γ-частиц и расстояния между источником γ-лучей и детектором. Измеряется интенсивность рассеянного γ-излучения. В условиях стабилизации двух последних факторов можно определять плотность грунта.

Влажность грунта можно установить методом *рассеянного нейтронного излучения*. В основе метода лежит эффект замедления атомами водорода, содержащимися в воде, быстрых нейтронов, испускаемых источником, до тепловой энергии. Число медленных нейтронов, фиксируемых счетчиком, пропорционально влажности грунта. Эффект реализован в нейтронных измерителях влажности (НИВ–2, УР–70 и др.). В грунт тем или иным способом (скважина, вдавливаемый зонд) погружают источники быстрых нейтронов (полониево-бериллиевый, радиево-Д-бериллиевый, радиево-бериллиевый) и детектором медленных нейтронов фиксируют интенсивность нейтронного излучения.

9. АРХЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

На сегодняшний день успешно развивается одна из направлений поисковой геофизики, так называемая археологическая геофизика, изучающая закрытые объекты материально-культурного наследия, археологические предметы и комплексы.

Возникновение геофизики в археологии в России связано с появлением книги Г.С. Франтова и А.А. Пинкевича (1966). Основная заслуга этих авторов заключается в том, что они пробудили интерес к археологии у геофизиков после публикации книги М. Дж. Эйткина (1963). В западном мире это направление начало развиваться с конца 50-х годов прошлого века, когда американцами был разработан первый протонный магнитометр.

Несмотря на большое число геофизических методов, наиболее универсальными и эффективными для археологических целей являются магниторазведка, электроразведка и георадар. В настоящее время, по данным профессора Модина И.Н. [28] примерно 65% археологических памятников обследуется с помощью магниторазведки, около 15% – электроразведкой, столько же работ выполнено с помощью георадиолокации и около 5 % – с помощью сейсморазведки. Такой расклад объясняется очень просто: самый дешевый и мобильный метод – это магниторазведка, которая активно реагирует на все предметы, обработанные огнем. Георадар берет своей наглядностью и кажущейся простотой. К тому же результаты, которые мы получаем, дают представление не только о плановом положении объектов, но и об их геометрии на глубине. Электроразведка, отвоевав у магниторазведки к середине 80-х годов примерно 30 % объемов работ, потом уступила половину георадиолокации. Электроразведка – метод, который работает с управляемыми и контролируемыми источниками электромагнитных полей, поэтому здесь можно получить представление о глубине и свойствах объекта. Сейсморазведка – самый точный метод геофизики, но стоит он для археологов очень дорого, поэтому практически мало применяется. И есть еще одно принципиальное ограничение для сейс-

моразведки: все источники, которые использует этот волновой метод, в настоящее время являются слишком длинноволновыми и, следовательно, обладают невысокой разрешающей способностью, чтобы выявить небольшие объекты.

Предпосылками применения геофизических методов являются:

- контрастность физических свойств объектов поиска и вмещающей среды,
- достаточно большие или хотя бы соизмеримые размеры объекта относительно глубины его залегания,
- заметное превышение величины аномального поля, возбуждаемого объектом, над уровнем промышленных и геологических помех.

Актуальность проведения геофизической разведки особенно возрастает при экстренных исследованиях больших территорий перед застройкой или в процессе строительства. В этом случае очень часто случается, что раскопки на данном участке не запланированы, или по каким-либо причинам затруднены, или невозможны по причине огромного объема земляных работ. В такой ситуации геофизика является единственной панацеей при проведении исследований в сжатые сроки. Кроме этого геофизические методы активно применяются в случаях, когда ни в рельефе местности, ни в растительности, ни в подъемном материале нет каких-либо признаков погребенных объектов. В этом случае археологи вынуждены выполнять планомерные рутинные раскопки, которые часто бывают неэффективными. В то же время геофизики с помощью своих методов указывают на наиболее яркие аномалии, соответствующие археологическим памятникам, и определяют тактику последующих раскопок. Поскольку большинство археологических памятников скрыто под наносами почвенных напластований и сливаются с окружающим ландшафтом, то использование современных геофизических методов позволяет обнаруживать их с большой точностью. Поэтому археологи заинтересованы в использовании геофизических методов, чтобы заменить сплошные раскопки выборочными.

Геофизические методы могут применяться для построения детальных планов погребенных древних архитектурных сооружений, фундаментов зданий и оборонительных стен, рвов и валов, поисков скоплений керамического и железного материала, очагов, зольников, гончарных и металлургических печей, различных погребений (в грунтовых могилах, склепах и курганах). Кроме этого, отдельной интересной и важной проблемой является археомагнитная датировка.

Традиционные археологические исследования, предполагающие разру-шения памятника в процессе его изучения, не обеспечивают физическое сохранение объектов историко-культурного наследия. Основное преимущество, в силу которого геофизические методы применяются для зондирования грунта с целью определения местоположения археологических объектов, состоит в том, что они позволяют выявлять комплексы различных погребенных сооружений, не нарушая поверхностного слоя почвы и самого объекта поисков. Геофизические исследования культурного слоя памятника, его планировки и отдельных археологических объектов позволяют получать предварительную информацию для целенаправленного выбора участка раскопок, наиболее информативного с точки зрения изучения памятника. Применение геофизических методов в несколько раз сокращает объем земляных работ и стоимость археологической разведки. Кроме того, существенным преимуществом геофизических методов разведки является возможность послойного изучения археологического памятника [139].

Использование геофизических методов частично решает проблему охранных раскопок. Ввиду постоянного расширения инфраструктуры и территории городской застройки часто возникает проблема отвода под строительство участков, содержащих объекты археологии. Существующее законодательство предполагает археологическое согласование и выделение средств на охранные раскопки. Однако время, в течение которого возможны археологические раскопки, зачастую весьма огра-

ничено. В данном случае единственным решением проблемы является применение геофизических методов.

При разведке археологических памятников геофизическими методами в основном появляется возможность решения следующих задач:

• реконструкция границ и планировки археологических памятников;

• пространственное распределение (расположение) археогеофизических объектов;

• разведка археологических объектов на локализованных территориях.

Таким образом, основными факторами, определяющими привлекательность геофизических методов для археологии, являются возможность оперативного получения предварительной информации об объекте исследований, принцип сохранения археологических памятников и возможность существенного сокращения финансовых расходов и трудозатрат.

Использованию *электроразведки* при археологических исследованиях благоприятствует заметная дифференциация археологических объектов (каменных стен, траншей, могильных камер, металлических изделий, шлаков, углей и т. д.) и рыхлых вмещающих образований по электрическим свойствам. Обычно с помощью методов электроразведки решаются следующие задачи:

1) картирование древних рвов, дамб, горных выработок;

2) поиски и разведка могильников и некрополей;

3) исследование древних городов и поселений (зон распространения культурного слоя, каменных кладок, древних кострищ, подземных сооружений, складов вооружений и др.).

Среди используемых методов электроразведки можно указать электропрофилирование, ВЭЗ, метод ВП, методы изолиний и индукции, электромагнитные методы в модификациях незаземленной петли и др. Измерения выполняют по отдельным профилям. Шаг измерений составляет несколько метров, а при детальных работах – десятки сантиметров. В качестве удачных

приведем следующие примеры применения методов электроразведки при археологических исследованиях.

Электроразведочными следованиями на неолитовой стоянке концентрические рвы были оконтурены минимумами $\rho_к$. По данным симметричного электропрофилирования, надежно закартированы погребальные сооружения, выложенные камнями. Каменные кладки стен и фундаментов выявляются по четким максимумам $\rho_к$ [15].

Аэрофотосъемка значительных по площади археологических памятников со сложной структурой, *космическая съемка* в различных спектрах предоставляют новую полезную информацию об их планировке. Однако большая стоимость этих видов разведки не позволяет провести их на территории абсолютного большинства археологических памятников. Более того, интенсивное сельскохозяйственное использование территории многих археологических памятников, эрозионные процессы, ускоряющиеся в связи с применением тяжелой техники, искажают особенности рельефа, вызванные погребенными археологическими объектами. В этой ситуации данные аэрофотосъемки могут оказаться недостаточно информативными.

В основе *георадиолокационного метода* малоглубинной геофизики, известного еще как «подповерхностная радиолокация», лежит явление отражения высокочастотного электромагнитного сигнала от границ раздела в верхней части разреза – стратиграфических границ, уровней водонасыщения, разнообразных захороненных объектов, фундаментов и т. п. Это связано с высокой, по сравнению к другими методами геофизики, разрешающей способностью, производительностью, компактностью измерительной аппаратуры, возможностью бесконтактного возбуждения зондирующих сигналов. Проведение предварительных радиолокационных исследований позволяет планировать раскопки, минимизировать земляные работы, а следовательно, и затраты на их проведение и время проведения работ, уменьшить вероятность возможного механического разрушения экспонатов. По своим возможностям

георадиолокация часто оказывается наиболее эффективным методом неразрушающего обследования самых разнообразных археологических объектов.

В соответствии с принятой точкой зрения, при археогеофизических исследованиях принципиальными параметрами являются точность восстановления границ и пространственных характеристик археологических объектов поиска, а также высокая скорость измерений и достоверность интерпретации результатов. Даже на этапе становления археогеофизики была показана необходимость разработки специальной методики археогеофизических измерений, обработки и интерпретации полученных данных в зависимости от вида археологического объекта [68, 139]. Однако и в настоящее время при исследовании археологических памятников и поиске объектов на их территории в большинстве случаев используются методики измерений и аппаратура, разработанные в разведочной геофизике и предназначенные для поиска крупных геологических объектов. При таких измерениях однозначно выделяются только достаточно крупные археологические объекты, физические свойства которых значительно отличаются от вмещающего грунта. Таким образом, механическая адаптация геофизических методик не позволяет в полном объеме решать задачи археогеофизических исследований, которые предполагают определение местоположения локальных объектов поиска при максимальной точности восстановления контура и пространственных характеристик расположения в грунте.

Специфика в постановке задачи археогеофизических исследований определяет актуальность разработки методологии археогеофизических исследований, а также специализированной методики измерений и технологии ее применения при полевых археологических изысканиях. Прикладным аспектом данного направления исследований является создание современных аппаратных и программных средств археогеофизики с использованием адаптивных методов измерений многосеточной электрометрии и методов экспресс-обработки и анализа полученных

данных в полевых условиях, позволяющих исключить указанные недостатки применения традиционных геофизических методов. Использование автоматизированных средств для археогеофизических исследований позволит получить предварительную информацию о расположении объектов на территории археологического памятника, которая предоставит возможность планировать проведение раскопок, сократить материальные вложения и трудозатраты.

Поэтому разработка методологии, методики и технологии археогеофизических исследований – одна из актуальных задач. В данном случае под методологией понимается выявление и развитие основных принципов взаимодействия археологии и геофизики, обеспечивающих высокую результативность междисциплинарных исследований. Специализированная методика археогеофизических измерений должна обладать такими характеристиками, как адаптивность, универсальность, возможность тиражирования и междисциплинарность. Адаптивность предполагает возможность настройки в зависимости от задачи исследований, условий измерений и параметров археологических объектов. Универсальность подразумевает использование разработанных подходов и методов для неразрушающих исследований различных категорий археологических памятников, датируемых в широком хронологическом диапазоне и расположенных в различных ландшафтных зонах. Междисциплинарность предполагает использование методов археологии, геофизики и компьютерных технологий для полевых археологических исследований и музеефикации памятников историко-культурного наследия.

В качестве примера ниже приводим результаты комплексных геофизических исследований историко-археологического памятника кургана Шум-Гора, выполненные инженерно-геофизической компанией «ГеофизПоиск» http://geophyspoisk.com/examples/40-examples/82-2011-03-18-13-10-24).

Особенность этого крупнейшего захоронения X века заключается в невозможности применить к нему методы современного археологического изучения, поскольку он признан памятником культуры и раскопки на данном объекте запрещены. В связи с этим на Шум-Горе был выполнен комплекс геофизических исследований, целью которых являлось определение внутреннего строения кургана, в частности, поиска скопления валунного материала.

На участке были проведены:

1) опытно-методические сейсмические работы в профильном варианте;

2) объёмные сейсмические работы;

3) профильные электроразведочные работы.

4) магниторазведочные работы.

Основным был выбран сейсмический метод исследования с последующей трехмерной томографической обработкой результатов. Для получения точных трехмерных координат ПП и ПВ проводились топографические работы, и строилась цифровая модель рельефа.

Комплексные геофизические исследования, проведенные на территории археологического памятника – кургана Шум-Гора, позволили установить, что:

1. Шум-Гора не является объектом естественного происхождения.

2. Низкоскоростное обрамление основания Шум-Горы объясняется, вероятно, наличием рва глубиной ~ 1 м и шириной ~ 4 м, который впоследствии был заполнен валунно-сыпучим материалом.

3. Отдельные локальные повышения скоростей в периферийной части Шум-Горы, выявленные на разрезах –1 м и 1 м, могут быть связаны с наличием в этой зоне отдельных валунов.

4. В верхней части кургана (5 м выше основания) наблюдаются локальные высокоскоростные аномалии небольшого размера, что соответствует каменным кладкам, над которыми отмечается низкоскоростная аномалия шириной около 15 м, ко-

торая может быть проинтерпретирована как погребальная камера. Наличие засыпанной камеры подтверждается высокими значениями электрического сопротивления в этой зоне, характерной для разуплотненной песчаной фракции.

Окончательная геофизическая модель кургана в общих чертах согласуется с представлениями археологов о строении захоронений тех времен, тем не менее внося важные дополнения и коррективы.

Сопоставление горизонтального среза на уровне 1 м объемной скоростной модели 2005 г. (А) с профильными наблюдениями 2006 г. (Б) представлено на рисунке.

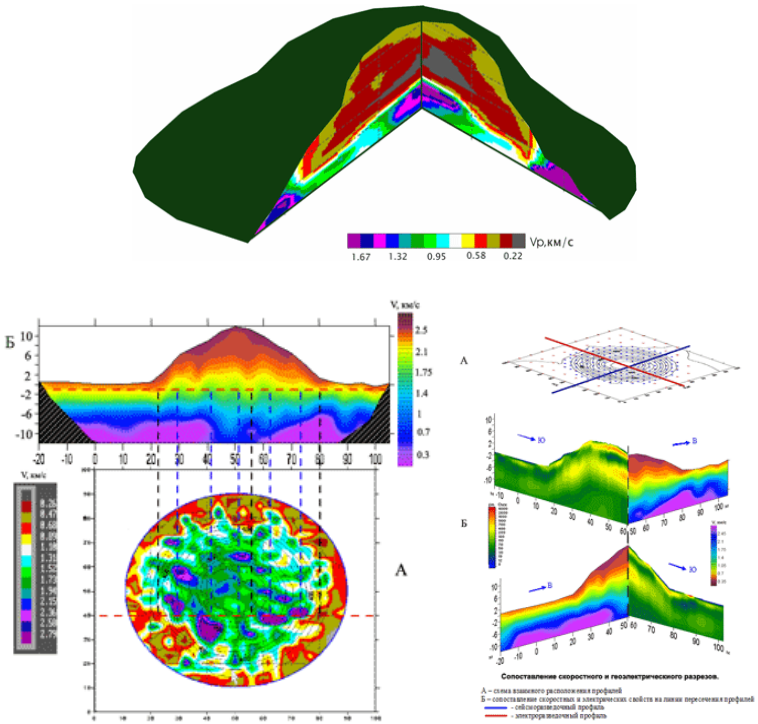


Рис. 9.1

Сравнение карты аномального магнитного поля со скоростным разрезом на уровне 1 м.

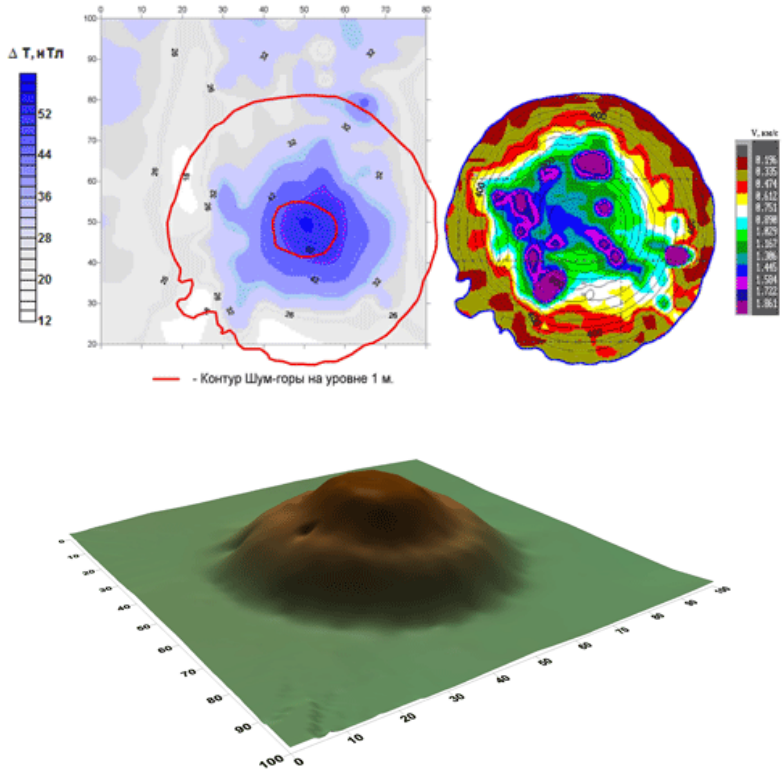


Рис. 9.2 . Объёмная скоростная модель кургана
(сайт: http://geophyspoisk.com/examples/40-examples/82-2011-03-18-13-10-24)

10. ИЗУЧЕНИЕ ЛЕДНИКОВ И СНЕЖНЫХ ПОКРОВОВ

10.1. Изучение ледников

Исследование ледников, как правило, требует синтеза знаний о ледниках и условиях их существования. При гляциологических исследованиях инженерно-геофизические методы используются для:

– определения мощности покровных и горных ледников;

– изучения их внутреннего строения и подледниковой толщи;

– морфологии подошвы ледников пород.

До недавнего времени для решения указанных задач широко использовали 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.

В настоящее время 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 определяется по формуле

$$h = V_t/2, \qquad (10.1)$$

где $V \approx \frac{300}{\sqrt{\varepsilon_{отн}}}$ (в м/мкс) – скорость распространения радиоволн во льду; $\varepsilon_{отн}$ – относительная диэлектрическая проницаемость льда; t – время запаздывания отраженного импульса, объясняется постоянным значением $\varepsilon_{отн}$ = 3,1–3,5 для льда. Метод

РЛЗ при ледовой разведке обладает очень большой глубинностью (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.

Кроме того, начиная с 1970-х годов для изучения ледниковых систем используется *космическая съемка.* Сначала она ограничивалась фотографированием в видимом диапазоне спектра электромагнитных волн. В настоящее время наряду с черно-белой и цветной фото- и телесъемкой применяются инфратепловая, микроволновая, радарная, спектрометрическая и другие виды фотоэлектронной съемки. Съемочная аппаратура принципиально та же, что и при аэрофотосъемке.

Спутниковая альтиметрия используется для оценки изменения высоты поверхности ледников. Эту съемку осуществляют такие спутники, как "GFO" (GEOSAT Follow–On), "TOPEX–2" ("JASON–1") и "ENVISAT", "ERS RA1", "ENVISAT RA2", "ICESat GLAS".

Для исследования современных изменений состояния ледников используются также данные *спутниковой гравиметрии* GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment). Эти спутниковые измерения направлены на изучение временных вариаций гравитационного поля Земли, связанных, в частности, с процессами изменения климата.

В гляциологических исследованиях также активно используется система *глобального определения местоположения* (GPS), которая начала разрабатываться в начале 1970-х годов.

10.2. Изучение снежного покрова

Информация о снежном покрове необходима для оценки водоносности рек, накопления воды в водоемах (озерах, водохранилищах, болотах) и оросительных системах, определения влагозапаса в почвогрунтах, зоне аэрации и оценки условий пи-

тания грунтовых и подземных вод, наконец, для изучения локальных, региональных и глобальных водных балансов. Традиционные способы определения запасов воды в снежном покрове сводятся к непосредственному измерению глубины снежного покрова снегомерной рейкой и его плотности путем отбора проб и их взвешивания. Операции эти трудоемки и к тому же не позволяют получать достоверную площадную информацию из-за большой пространственно-временной изменчивости высоты и плотности снежного покрова. Более эффективными и производительными оказались ядерные методы, основанные:

1) на поглощении гамма-излучения изотопных источников (метод гамма-просвечивания);

2) на рассеянии нейтронов, "испускаемых" изотопными источниками;

3) на поглощении естественного гамма-излучения почвы и пород (аэрогамма-съемка);

4) на поглощении космического излучения.

Физические основы первого способа аналогичны способу определения плотности и влажности пород, рассмотренному выше. На этой основе разработаны и используются походные портативные гамма-снегомеры и стационарные телеметрические гамма-снегомерные станции. Портативные гамма-снегомеры включают в себя мерный штырь, в наконечнике которого размещен источник гамма-излучения (^{137}Cs или ^{60}Co), а на кронштейне в верхней части штыря – детектор гамма-излучения и измерительный пульт. Имея некоторые недостатки, свойственные снегомерной рейке, гамма-снегомер удобнее тем, что измеряет не только толщину, но и массу снежного покрова, исключая отбор проб снега для определения плотности. Стационарные снегомерные станции работают по тому же принципу. Источник гамма-излучения заглубляется в грунт, а над земной поверхностью на некоторой высоте (выше максимального снежного покрова для данного района) устанавливают детектор. Обычно станции работают в дискретно-непрерывном режиме,

автономно выдавая информацию по программе или запросу в пункты ее сбора.

Второй способ основан на регулярных измерениях над одним и тем же местом естественного гамма-поля, создаваемого присутствующими в породах ураном, торием и калием. Помимо этого, гамма-фон может создаваться техногенными ядерными загрязнениями, атмосферным паводком, а также космическим излучением, влияние которого обычно учитывают методикой измерения или автоматически исключают аппаратурными средствами. Из-за большого периода распада радиоактивных изотопов урана, тория и калия и сравнительно большой устойчивости минерального и химического состава поверхностных отложений естественная их гамма-активность во времени остается практически неизменной, а естественное гамма-поле в приземных слоях атмосферы функционально зависит от массовой толщины снежного покрова, который действует как экран. Массовую толщину снежного покрова определяют по отношению регистрируемой интенсивности гамма-поля при его наличии и отсутствии. Практически способ реализуется путем облета данной территории по заданным профилям и на заданной высоте.

11. ГИДРОМЕЛИОРАТИВНЫЕ И ПОЧВЕННО МЕЛИОРАТИВНЫЕИССЛЕДОВАНИЯ

Геофизические методы успешно используются при проведении гидромелиоративных и почвенно-мелиоративных исследований.

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:

1) литологическое расчленение разреза, и в частности определение глубины залегания регионального водоупора, состава и строения водоносной толщи и зоны аэрации;

2) изучение глубины залегания уровня грунтовых вод, взаимосвязи различных водоносных горизонтов между собой и с поверхностными водотоками;

3) определение таких гидрогеологических параметров, как коэффициенты фильтрации $k_ф$ и водопроводимости $T=k_ф h$ (h – мощность пласта), влажность, минерализация подземных вод и др.

Цель *почвенно-мелиоративных исследований* – картирование почв и определение их водно-физических свойств. С точки зрения возможности применения геофизических методов главное отличие почвенно-мелиоративных исследований от гидромелиоративных заключается в глубинности исследований. При почвенно-мелиоративных исследованиях она не превышает 5 м, а при гидромелиоративных – составляет десятки метров.

Эти задачи решаются с помощью гидрогеологических и инженерно-геологических съемок, бурения скважин, шурфов и опытных наблюдений в них. Эффективность указанных работ существенно повышается благодаря внедрению в комплекс гидромелиоративных исследований геофизических методов.

От геофизических методов требуются: а) получение геолого-геофизических разрезов на глубину до десятки метров с тем большей детальностью, чем меньше глубина исследований; б) выяснение распределения по площади и глубине различных фи-

зических параметров пород для установления корреляционной связи между ними и гидрогеологическими параметрами.

Для решения указанных задач следует применять высокомобильные геофизические методы: радиоволновое профилирование (в вариантах импеданса и радиокип), дистанционные (радиолокационные РЛС и радиотепловые РТС) съемки, а также съемки естественных электрических, магнитных и ядерных полей. Достоинством этих съемок является возможность ведения работ при наличии облачности и ночью. Интенсивность отраженных сигналов в РЛС определяется отражательными свойствами земной поверхности, которые зависят от ее шероховатости и электрических свойств почв и горных пород. Диффузное рассеивание дают участки глыбового навала, хорошее отражение наблюдается над влажными почвами, полное отражение – над водными поверхностями. Интенсивность регистрируемых естественных излучений зависит от электрических и оптических свойств почв и пород. Дистанционные съемки дают возможность картировать почвы по литологии, влажности, засоленности, а также объему растительной массы.

С помощью этих методов можно оценить такие физические параметры почв, как диэлектрическая проницаемость, электропроводность, теплоемкость, теплопроводность, электрохимическая активность, магнитная восприимчивость, радиоактивность. Путем корреляции их с параметрами, получаемыми почвоведами при изучении разрезов, можно охарактеризовать тип почв, их засоленность, ожелезненность, заболоченность, оценить водно-физические свойства (влажность, влагоемкость, водопроницаемость, коэффициент фильтрации и др.).

При детальном изучении ключевых участков кроме перечисленных выше методов геофизического картирования можно использовать методы ВЭЗ, ВЭЗ–ВП, МПВ, скважинные геофизические наблюдения).

Методика и принципы обработки данных геофизических методов гидромелиоративных и почвенных исследованиях практически такие же, как и при стандартных геофизических исследованиях.

12. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Геофизические методы уже давно и широко применяли и применяют для обоснования проектов гидротехнических сооружений. В последние 10–15 лет роль геофизических методов резко возросла и на стадии строительства и на стадии эксплуатации гидротехнических сооружений. На различных стадиях проектирования и строительства требуется решение большого числа задач, что, в свою очередь, предполагает использование многих геофизических методов и их модификаций.

По специфике инженерно-геологических изысканий можно выделить следующие гидротехнические сооружения: плотины, дамбы, здания ГЭС и линейные сооружения типа каналов. Первые три объекта являются весьма ответственными в экономическом, социальном и экологическом отношениях и характеризуются высокими требованиями к устойчивости основания и показателю фильтрации.

12.1. Изучение основания плотин

Прочность и надежность крупного гидроузла, каким являются плотины, господствующего над густозаселенной долиной имеют большое значение. Разрушение таких сооружений по своим экономическим, социальным или иным последствиям может обернуться национальным бедствием. Вероятность такого события должна быть достаточно малой. Это означает, что при проектировании и строительстве таких сооружений должны быть предусмотрены все возможные факторы, влияющие на их устойчивость.

В соответствии с существующими нормами исследования для обоснования проектов плотин проводят в три стадии: технико-экономической документации (ТЭД); технического проекта (ТП); рабочей документации (РД). В ТЭД можно выделять два подраздела: технико-экономический расчет (ТЭР)

и технико-экономическое обоснование (ТЭО). На стадии ТЭД, как правило, освещаются вопросы, связанные с общим геологическим строением участка. При разработке технического проекта, наряду с уточнением геологического строения исследуемого района, определяют физико-технические характеристики отдельных комплексов пород и изучают сейсмичность исследуемого района. На стадии рабочей документации проводят специальные исследования для решения отдельных возникающих во время проектирования вопросов, детально изучают физико-технические характеристики пород (определяют уточненные расчетные показатели).

В районах, подверженных сильным землетрясениям, построено и планируется строительство многих гидротехнических сооружений, в т. ч. ряда больших плотин из местных строительных материалов. Хотя они построены в соответствии с действующими нормами, однако эти нормы не могут охватывать все стороны столь сложных воздействий, какими являются сейсмические, и поэтому при проектировании ответственных гидросооружений выполняются специальные сейсмические исследования.

На стадии ТЭД геофизические исследования должны предварять геологические, чтобы при проведении бурения положение скважины было задано с учетом результатов геофизических работ. При двух вариантах расположения плотины или более геофизические исследования выполняют на всех конкурирующих участках возможного расположения створа плотины. Максимальный объем работ проводят на наиболее перспективном участке. Задачами исследования является изучение:

1) геолого-тектонического строения разведуемого участка;

2) свойств и состояния горных пород в массиве;

3 гидрогеологических условий;

4) физико-геологических явлений.

На стадии технического проекта со значительно большей детальностью исследуют перечисленные вопросы и, кроме того, проводят специальные исследования для изучения свойств

и состояния горных пород, а также исследования по изучению сейсмичности района. При изучении геолого-тектонического строения участка решают следующие задачи:

а) литологического расчленения разреза;

б) выявления и оконтуривания переуглубленных долин;

в) выявления и оконтуривания интрузивных и эффузивных тел;

г) выявления и трассирования зон тектонических нарушений и зон повышенной трещиноватости;

д) определения мощности зоны выветривания.

Для расчленения по литологическому составу скальных пород основными методами являются различные модификации ВЭЗ, сейсморазведка МПВ и геофизические исследования скважин. При расчленении песчано-глинистого разреза применяют метод ВЭЗ, ВЭЗ–ВП, ВЭЗ–МДС (ВЭЗ по методу двух составляющих), электропрофилирование (различные модификации), геофизические исследования скважин, в отдельных случаях профилирование по методу двух составляющих. При выявлении и оконтуривании переуглубленных долин рекомендуются в первую очередь различные модификации электропрофилирования, ВЭЗ, МПВ, реже магниторазведка и гравиразведка. При выявлении и оконтуривании интрузивных и эффузивных тел применяются те же методы, что и при выявлении переуглубленных долин, но эффективнее при этом магнито- и гравиразведка. При выявлении и трассировании зон тектонических нарушений и зон повышенной трещиноватости рекомендуются исследования электропрофилированием комбинированной и дипольной установками (КЭП и ДЭП), ВЭЗ, МПВ, сейсмическим профилированием. Всегда комплекс применяемых методов должен быть таким, чтобы методы дополняли друг друга, и каждый давал дополнительную, имеющую практическое значение информацию.

При изучении свойств и состояния горных пород в массиве решают следующие задачи:

а) определение физико-механических, динамических и статических упругих параметров, а также модулей деформации;

б) изучение анизотропии, неоднородности и трещиноватости горных пород;

в) оценка напряженного состояния горных пород в массиве;

г) изучение прочностных показателей на образцах горных пород и в естественном залегании.

При изучении *гидрогеологических условий* исследуемого участка основными вопросами являются:

а) определение положения уровня грунтовых вод;

б) выявление обводненности трещиноватых зон;

в) детализация мест разгрузки и поглощения подземных вод;

г) определение направления и скорости движения подземного потока.

Возможности геофизических методов и рекомендуемого комплекса для решения этих вопросов рассмотрены выше в соответствующем разделе.

При изучении физико-геологических явлений в основном рассматривают три вопроса, имеющие большое практическое значение:

а) изучение закарстованности пород;

б) исследование оползней; следует отметить, что при исследовании оползней в скальных породах положительные результаты дает сейсморазведка, поскольку в нарушенной зоне скального массива напряженность значительно меньше, чем в целиковом массиве, и, следовательно, скорости продольных и поперечных волн в ней будут ниже;

в) геокриологические исследования; при этом определяют мощности многолетнемерзлых пород и положение их кровли, мощность зоны сезонного протаивания, оконтуривание подземных льдов, островной мерзлоты, таликов и зон высокотемпературной мерзлоты, если возможно – литологическое расчленение толщи мерзлых пород; работы выполняют различными модификациями электроразведки и сейсморазведки.

Особое значение имеют работы, связанные с контролем основания плотин. Особенно это касается высотных плотин, когда дополнительные нагрузки от сооружений и дополнительное пластовое давление за счет воды в водохранилище могут вы-

звать различные нежелательные явления (фильтрация, осадка основания и др.). С целью такого контроля разработана методика режимных геофизических наблюдений. В основании сооружения размещают регистрирующую аппаратуру, позволяющую проводить повторные измерения параметров (скорости, электрического сопротивления и др.) на постоянной базе с высокой точностью. Результаты этих исследований позволяют выявить достаточно заметные изменения указанных параметров, связанных как с давлением от сооружений и заполнением водохранилища, так и с сезонными климатическими изменениями.

12.2. Изучение трасс каналов

При изучении трасс каналов целесообразно комплексное применение электро- и сейсморазведки. Из-за большой протяженности участков исследований необходимо наиболее экономичным образом сочетать указанные методы, чтобы заменять, где возможно, более дорогую сейсморазведку электроразведкой. Пример таких исследований – работы по каналу Иртыш – Караганда. Здесь на пенепленизированной поверхности кристаллического палеозойского фундамента залегают в долинах рек и во впадинах маломощные палеогеновые, неогеновые и четвертичные отложения (пески, суглинки, глины). Стоимость проходки канала в этих породах значительно меньше, чем в скальных, поэтому выбор наиболее экономичного варианта канала в значительной степени определялся соотношением объемов выемки указанных категорий пород. По геофизическим данным определяли глубину залегания фундамента, мощность зоны выветривания, расчленяли рыхлые отложения и прослеживали в них уровень грунтовых вод.

Геофизические методы (МПВ и ВЭЗ) последовательно применяли на всех стадиях изысканий. На стадии ТЭД следовало получить данные для оценки двух конкурирующих вариантов по распространенности мягких и скальных пород. В основном оценивали глубину залегания кристаллического

фундамента, а другие задачи решали попутно. Наблюдения проводили не вдоль какой-либо из трасс, а, как правило, по отдельным поперечникам, освещавшим строение всего данного участка (долины, впадины и т. д.), с тем, чтобы при изменениях трассы иметь сведения для нового направления.

На стадии технического проекта исследования вели по выбранному варианту. Для всестороннего изучения геологических условий на участках расположения ответственных узлов – плотин, насосных станций – исследовали несколько профилей для освещения строения всего участка.

На стадии рабочей документации изыскания сосредоточились на окончательно выбранной трассе канала. Необходимо было осветить геологическое строение узкой полосы вдоль трассы. Поэтому геофизические профили располагали вдоль оси канала. С помощью сейсморазведки изучали участки с поверхностным залеганием фундамента, расположение которых уже было примерно установлено по предыдущим исследованиям. Детальное изучение зоны выветривания фундамента непрерывно по профилю давало сведения для составления технического проекта проходки канала и для определения угла откоса, коэффициента фильтрации и др.

Решение основной задачи – определение глубины залегания палеозойских пород – увереннее (и однозначно) решалось по данным МПВ. Это позволяло при совместном использовании данных ВЭЗ и МПВ анализировать кривые ВЭЗ, сложные для интерпретации. В большинстве случаев эти сложности были связаны с переменной и часто весьма повышенной минерализацией грунтовых вод. Были также выявлены участки, благоприятные для постановки ВЭЗ (области распространения павлодарских глин и суглинков). Данные ВЭЗ существенно дополняли сейсмические материалы, позволяя расчленять четвертичные породы на глинистые и гравийно-песчаные горизонты. По сейсмическим данным эта задача не решалась. Такие преимущества электроразведки, как быстрота исследования и автономность, особенно сказывались на

первых стадиях изысканий, когда с помощью ВЭЗ в течение одного сезона были изучены сотни километров трасс конкурирующих вариантов.

На последнем этапе ВЭЗ применяли в меньшем объеме на участках с благоприятным геоэлектрическим разрезом и главным образом в помощь МПВ для расчленения кайнозойских отложений. На стадии технического проекта применение ВЭЗ обычно ограничивалось отдельными замерами вдоль выбранной трассы между профилями МПВ на участках, где палеозойский фундамент был прикрыт молодыми отложениями и залегал глубже «врезки». Здесь достаточно было определить глубину залегания фундамента с меньшей точностью. Совместное использование данных МПВ и ВЭЗ позволило построить непрерывный разрез вдоль выбранной трассы канала (рис. 12.1).

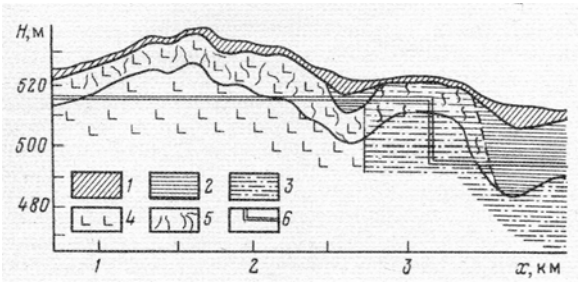


Рис. 12.1. Геолого-геофизический разрез по данным МПВ и ВЭЗ по трассе канала: *1 – суглинки; 2 – глины; 3 – песчаники; 4 – порфириты; 5– зона выветривания; 6 – дно проектируемого канала («врезка»)*

13. ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

13.1. Изыскания под трассы железных и автомобильных дорог

Сферу применения геофизических методов при исследованиях, связанных с железными и автомобильными дорогами, можно разделить на две части: изыскания под строительство новых дорог и обследования построенных эксплуатируемых дорог. Общими особенностями этих исследований, обусловленными главным образом линейным характером дорожных объектов и их большой протяженностью, являются следующие: проведение работ в протяженной и относительно узкой полосе, ограниченной шириной дороги и зоной безопасности ее эксплуатации; многообразие инженерно-геологических и гидрогеологических условий; подвижной характер работ ввиду быстрого продвижения по трассе; относительно малый объем опорного бурения и других инженерно-геологических методов и соответственно повышение роли геофизических методов в общем комплексе исследований, особенно на начальных стадиях; повышенные требования к портативности и мобильности полевой аппаратуры.

Наибольшее распространение в практике транспортных изысканий получили следующие геофизические методы: электроразведка, сейсморазведка МПВ, магниторазведка и различные методы ГИС. Глубина исследований обычно не превышает 20–30 м. Типичные задачи изысканий: определение глубины залегания скальных пород; картирование мерзлых пород, уровня воды; оценка прочностных свойств пород.

13.2. Исследования эксплуатируемых дорог

В настоящее время, несмотря на проводимые на сети железных и автомобильных дорог мероприятия по обеспечению надежной работы земляного полотна, к сожалению, ещё есть

участки дорог, на которых его состояние не соответствует современным, а тем более перспективным требованиям. В первую очередь, это связано с увеличением интенсивности движения и воздействием на него природно-климатических факторов. Для обеспечения надежной работы земляного полотна необходимо своевременное получение достоверной информации о его фактическом состоянии. Применяемые в настоящее время традиционные методы обследования не всегда позволяют своевременно и качественно оценить фактическое состояние земляного полотна. Использование геофизических методов в комплексе с традиционными позволяет значительно повысить качество контроля состояния земляного полотна. Состав рационального комплекса методов диагностики земляного полотна определяется характером решаемых инженерно-геологических задач. Учитывая то, что большинство болезней земляного полотна связано с избыточным увлажнением его грунтов, использование метода электромагнитного сканирования в качестве основного в комплексе с другими методами позволит получать непрерывную, достоверную информацию о наличии ослабленных деструктивных зон земляного полотна, представляющих угрозу безопасности движения транспортных средств. В связи с этим очевидно, что совершенствование метода электромагнитного сканирования применительно к решению задач диагностики земляного полотна весьма актуально.

Задачей геофизических исследований на эксплуатируемых дорогах является диагностика состояния земляного полотна с точки зрения его надежности и устойчивости, в т. ч. выделение ослабленных по прочности зон и характеристика слагающих их грунтов. Проведение работ на эксплуатируемых дорогах имеет дополнительные особенности, как правило, усложняющие исследования. К ним относятся: большой объем работ на крутых откосах насыпей и выемок; высокий уровень электрических и механических помех от системы сигнализации и движения транспорта; повышенная опасность работ на эксплуатируемом

земляном полотне, особенно на верхней площадке дороги; высокие требования к точности и надежности получаемых данных.



Рис. 13.1. Причудливый изгиб железнодорожного пути при землетрясении



Рис.13.2. Разрушение автомобильной дороги при Нефтегорском землетрясений 1995 г.

Важной задачей в городских агломерациях является неразрушающий контроль над состоянием и ремонтом автомобильных дорог, а также выяснение причин деформаций их полотна.

Для решения этих задач наиболее эффективным методом является георадиолокационный, который проводится, как правило, на двух частотах. Высокочастотная антенна (1500–1700 МГц) используется для обследования детального строения жестких покрытий, а дорог с разрешающей способностью – по вертикали в первые сантиметры. Целью этих работ является определение толщин конструктивных слоев и их соответствие проектному заданию, контроль над выполнением ремонтных работ и т. д. Низкочастотные антенны (90–300 МГц) применяются для обследования полотна дорог на глубину в первые метры, т. к. зачастую причины деформаций обусловлены процессами, протекающими ниже слоев дорожного покрытия – суффозией, просадками, повышенным увлажнением и т. д. [27].

Геофизические методы, применяемые на эксплуатируемых дорогах, должны обладать повышенной помехоустойчивостью, высокой информативностью и обеспечивать высокую точность и надежность определений. На практике хорошо зарекомендовали себя сейсмический метод (МПВ), некоторые модификации электрического метода, радиационные и различные скважинные методы.

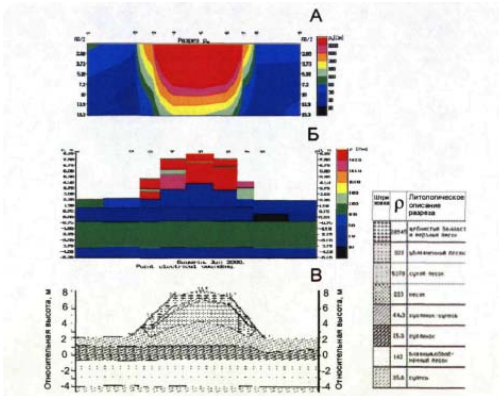


Рис. 13.3. Пример построения геолого-геофизического разреза через железнодорожную насыпь: *А – разрез кажущегося сопротивления; Б – геоэлектрический разрез; В – геолого-геофизический разрез*

Задачей геофизических работ является детальное обследование состояния грунтов насыпи и особенно суглинистой ее части с целью обнаружения ослабленных по прочности мест, связанных, как правило, с повышенной влажностью и разрыхленностью грунта. Для решения этой задачи может быть использована сейсморазведка МПВ, выполнявшаяся по системе профилей, расположенных вдоль насыпи на разных ее уровнях. В результате сейсмической разведки в песчано-гравийной толще и в суглинистом теле насыпи выделяются слои с различной скоростью v_P. Наличие слоя с низкой скоростью 250–320 м/с может свидетельствовать о малой прочности грунтов. Здесь возможно сползание откоса и для повышения устойчивости насыпи необходимо сооружение контрбанкета.

При георадарных исследованиях используются георадары ZOND–12 (Radar System Inc., г. Рига, Латвия). Для излучения и приема обычно применяются экранированные антенны, что позволяет практически полностью избавиться от боковых помех. Рабочая частота составляла 300 МГц.

13.3. Изучение трасс трубопроводов

Геофизические исследования при изысканиях под трассы трубопроводов различного назначения мало отличаются от рассмотренных выше исследований при дорожном строительстве. Специфической является оценка коррозионных свойств грунтов. С этой целью вдоль трассы выполняют профилирование при разносах АВ = 10–15 м. Определяют значение $\rho_к$ и величину естественного электрического поля U_E при том же разносе. По значениям $\rho_к$ и U_E (используют специальные таблицы) вдоль изучаемой трассы выделяют участки с различной коррозионной активностью.

Среди методов обследования трасс трубопроводов преобладают трассоискатели и георадарные исследования. На наш взгляд, комплекс методов должен включать метод сопротивлений в модификациях электрических зондирований и профили-

рований, измерение потенциалов катодной защиты и наблюдения с магнитной антенной (индукционным датчиком) за электромагнитным полем, возбужденным в трубе полем промышленных помех, током катодной защиты или специальным искусственным источником. Аппаратура ЭРА–МАХ, выпускаемая в Санкт-Петербурге, позволяет выполнять все эти виды работ с одним комплектом приборов.

13.4. Изучение трасс линий электропередач (ЛЭП)

При изучении трасс ЛЭП основное внимание обращают на исследование площадок под опоры ЛЭП. Используют электроразведку (ВЭЗ), сейсморазведку МПВ и ГИС. Вдоль трассы выполняют электропрофилирование. Основная задача геофизических исследований – получение данных для оценки устойчивости оснований опор. Кроме того, данные электроразведки используют для определения сопротивления заземлению опор и для оценки сопротивления растеканию тока с электрических проводов. Кажущееся сопротивление поверхностного слоя определяют с учетом напряжения проектируемой ЛЭП: чем больше напряжение, тем больше должна быть мощность изучаемой толщи.

14. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ПРОМЫШЛЕННЫХ И ГРАЖДАНСКИХ СООРУЖЕНИЙ

14.1. Геофизические исследования при промышленном и гражданском строительстве

Проектирование зданий – это один из важных этапов, поскольку от точного, учитывающего все факторы проекта зависит прочность и надежность строящегося здания.

Любое здание состоит из двух частей, расположенных выше и ниже дневной поверхности. Видимая часть здания над дневной поверхностью называется его наземной частью. Ниже дневной поверхности находится фундамент, который может быть выполнен в виде опор, стенок, плит, столбов, кессонов и других форм. Чтобы правильно спроектировать фундамент, инженер должен хорошо знать грунтовые и геологические условия стройплощадки. Эти данные получают путем бурения скважин и изучения отобранных образцов грунта, а также путем комплекса инженерно-геофизического «просвечивания» приповерхностной части стройплощадки, различными геофизическими методами.

Проектирование и строительство зданий и сооружений в сейсмических районах регламентируются Нормами и правилами сейсмостойкого строительства. В разных странах нормы и правила сейсмостойкого строительства различны, поскольку учитывают местные геологические, сейсмические, природные и климатические особенности, специфику строительных материалов и т. д. В Казахстане с 2006 г. действуют строительные нормы и правила строительства в сейсмических районах Казахстана (СНиП РК 2.03–30–2006).

Инженерно-геофизические исследования проводят на всех трех стадиях изысканий под промышленное и гражданское строительство: стадии предпроектной документации; стадии проекта; стадии подготовки рабочих документов. На первой стадии устанавливаются общие характеристики инже-

нерно-геологических и гидрогеологических условий участка предполагаемой застройки. В случае необходимости (слабая изученность, сложные условия) указанные методы дополняются геофизическими исследованиями. На второй стадии геофизические исследования проводят в наибольшем объеме, желательно с проходкой горных выработок с тем, чтобы размещение последних задавалось с учетом геофизических результатов.

Основной вид геофизических исследований на стадии проекта – площадная съемка. В зависимости от характера решаемых задач используют все виды электроразведки, сейсморазведку МПВ и МОВ, магнитометрию (микромагнитную съемку), ГИС. Густота сети геофизических профилей изменяется обычно в пределах 100–500 м. В сейсмических районах, как указывалось выше, проводят сейсмическое микрорайонирование изучаемой площади.

На стадии рабочей документации проводят специальные виды геофизических работ с привязкой к конкретным сооружениям: изучение коррозионных свойств грунтов, агрессивности подземных вод к бетону. Завершают режимные геофизические наблюдения, которые начинают на стадии проекта. Для особо ответственных сооружений и в условиях третьей категории сложности можно проводить межскважинное просвечивание упругими или электромагнитными волнами. В этом случае возможны повторные геофизические исследования с продолжением профилей по периметру проектируемого сооружения.

14.2. Изыскания под тепловые электростанции

Проектирование тепловых электростанций, а, следовательно, и изыскания, проводят по трем стадиям: ТЭО; проект; рабочая документация. На всех стадиях изысканий совместно с геологической съемкой, разведочными работами и геотехническими исследованиями применяют и геофизические исследо-

вания. Из геофизических методов наиболее широко применяют все модификации электроразведки, сейсморазведку, при благоприятных условиях магниторазведку, реже метод радиокип, непременно каротаж скважин в различных модификациях (в т. ч. радиоактивный).

На стадиях ТЭО и проекта решают с различной детальностью комплекс инженерно-геологических задач – литологическое расчленение разреза, выделение закарстованных зон, обнаружение тектонических нарушений, определение глубины залегания грунтовых вод и др.

На стадии проекта изучают физико-механические свойства отдельных разностей пород, их деформационные характеристики, определяющие устойчивость пород в основании будущего сооружения. Эти задачи решают при помощи сейсмоакустических, ультразвуковых исследований на образцах и в скважинах и каротажа скважин.

14.3. Изыскания под атомные электростанции (АЭС)

В соответствии с существующими нормами проектирование АЭС проводят по трем стадиям: ТЭО, проект, рабочая документация. Соответственно указанным стадиям ведут и изыскания. При изысканиях под атомные электростанции вместе с традиционными инженерно-геологическими и геотехническими исследованиями довольно широко используют и различные модификации геофизических методов. Естественно, что при геофизических изысканиях строгих границ между стадиями нет и разделение на стадии несколько условно. Одним из основных вопросов на первой стадии исследований является выбор площадки для размещения АЭС. При этом очень важно выбрать и проследить тектонические нарушения различных порядков, которые могут оказать влияние на локальное изменение сейсмичности разведуемого участка. Задачу решают преимущественно электроразведкой и сейсморазведкой, при благоприятных условиях используют магниторазведку. При разведке района, в кото-

ром можно предполагать развитие карстовых процессов, выполняют электроразведочные работы для поиска и оконтуривания зон предположительной закарстованности и зон повышенной трещиноватости. Решают задачу литологического расчленения пород. При этом используют электроразведку, сейсморазведку и выполняют каротаж в пробуренных скважинах.

На стадии проекта с большей детальностью решают перечисленные задачи. Работы в основном сосредоточивают на выбранной площадке или на двух–трех конкурирующих площадках. Проводят расчленение разреза с выделением самых тонких слоев и прослоев по данным каротажных исследований, в т. ч. радиоактивного каротажа. При исследовании разреза, наряду с электроразведкой и сейсморазведкой, выполняют сейсмическое и радиоволновое просвечивание целиков между скважинами. Применяют в отдельных случаях гравиметрию. Детально исследуют верхнюю часть разреза. При изучении рыхлых грунтов выделяют участки распространения песков (с расчленением на крупно- и мелкозернистые), суглинков. Определяют их деформационные характеристики. При расположении площади АЭС на полускальных и скальных породах при помощи сейсморазведки и каротажа определяют деформационные характеристики пород.

При составлении рабочей документации выполняют исследования по дополнительно возникающим при проектировании вопросам или уточняют отдельные вопросы. На основании сейсмоакустических и ультразвуковых исследований, выполненных на образцах (в комплексе с геотехническими), в скважинах и по просвечиваниям определяют прочность отдельных разностей пород. При расположении АЭС на рыхлых грунтах по данным сейсморазведки определяют глубину залегания грунтовых вод. Определяют пористость, плотность и влажность пород. При этом используют различные модификации каротажа (главным образом радиоактивного). При определении свойств сухих рыхлых грунтов дают по имеющемуся опыту и статистическим данным прогноз о тех же свойствах этих пород в случае их ув-

лажнения и обводнения (например, подъема грунтовых вод по тем или иным причинам).

При исследованиях под атомные электростанции обязательно изучают сейсмичность исследуемого района, сейсмические свойства грунтов и пород, определяют скорости продольных и поперечных волн, декременты затухания сейсмических волн для различных литологических разностей (по глубине и в плане) с целью учета этих данных в расчетах. Особое внимание обращают на изыскания по участку хвостохранилищ. Начинают работу с выбора места хвостохранилища по имеющимся геологическим данным. При этом основным является вопрос возможной фильтрации, поскольку в хвостохранилищах нельзя допускать утечек. После выбора места определяют ложе хвостохранилища и исследуют его фильтрационные свойства. В основном используют методы инженерно-геологических изысканий. Из геофизических методов главным образом применяют различные модификации каротажа и расходометрию.

14.4. Изучение сейсмичности районов строительства

Одним из важных направлений применения инженерной геофизики, значение которого непрерывно возрастает, является сейсмическое районирование для решения задач проектирования сейсмостойких гражданских, промышленных и энергетических сооружений.

Для принятия мер по минимизации ущерба от возможных землетрясений при минимуме затрат на антисейсмические мероприятия необходимо располагать информацией о сейсмической опасности. Она должна содержать как пространственно-временное распределение землетрясений, так и характеристики сейсмических колебаний. Эти оценки могут быть получены в результате проведения трех видов сейсмического районирования, различающихся по задачам и объектам исследования [3–5].

Общее сейсмическое районирование (ОСР) служит для целей планирования развития народного хозяйства в масшта-

бах республик. При ОСР рассматриваются лишь крупные геолого-геофизические явления, определяющие сейсмичность районов (землетрясения не ниже с М = 6,1). Основным элементом карты ОСР является сейсмическая интенсивность в баллах, т. е. макросейсмический эффект воздействия землетрясения на земную поверхность [6].

***Детальное сейсмическое районирования (ДСР*)** имеет задачей выявление и оценку характеристик сейсмогенерирующих зон, сейсмические события в которых представляют опасность для проектируемых объектов. Под объектом понимается как отдельное сооружение, так и комплекс сооружений, населенный пункт или район перспективного народнохозяйственного освоения. В задачи ДСР входит и оценка сейсмических воздействий, которые необходимы для принятия антисейсмических мер активного характера.

Сейсмическое микрорайонирование (СМР) имеет задачей оценить влияние местных условий на очаговое сейсмическое воздействие. Под местными условиями понимаются особенности рельефа, состав и строение среды, наличие грунтовых вод и другие факторы, влияющие на сейсмический эффект.

Таким образом, ДСР и СМР совместно решают задачи антисейсмических мероприятий при строительстве конкретного объекта – обеспечивают выбор строительной площадки и оценку сейсмических воздействий на этой площадке. Принципиальная разница между ДСР и СМР в объектах изучения: при ДСР изучаются источники сейсмических колебаний, а при СМР – реакция среды на эти колебания.

Сейсмическое микрорайонирование для гражданских объектов

Сейсмическое микрорайонирование для гражданского строительства проводится в районах с сейсмичностью 7–9 баллов, т. е. в высокосейсмичных районах, которые составляют около 30 % территории нашей страны. Исходная сейсмичность определяется по действующей карте ОСР Казахстана [СНиП РК 2.03–30–2006]. Объектами сейсмического микрорайонирования,

как правило, являются территории городов и других населенных пунктов или участков их перспективного строительства. Сейсмическое микрорайонирование выполняют в масштабах 1:25 000, 1:10 000 или 1:5000. В результате должна быть построена карта сейсмического микрорайонирования в баллах шкалы MSK–64, которая служит для определения типов застройки, т. е. этажности зданий и необходимых мероприятий по их антисейсмическому усилению.

В связи с тем, что на карте ОСР Казахстана величина исходной сейсмичности отнесена условно к «средним» грунтовым условиям, при проведении СМР в качестве «эталонных», относительно которых вычисляют поправки на местные условия, рекомендуется принимать те группы, на которых в результате анализа местных макросейсмических данных была установлена какая-то реальная сейсмичность.

Опыт макросейсмического изучения последствий сильных землетрясений показывает, что наибольшее влияние на величину приращения сейсмической интенсивности оказывают различия в физических свойствах верхней толщи грунтов мощностью около 15–20 м. Этим и определяется минимально необходимая глубинность исследований при СМР для гражданских объектов, однако эта величина может изменяться в ту или иную сторону с учетом реальных инженерно-геологических условий. Как правило, исследования по СМР выполняют до первой жесткой границы.

Основным источником информации о сейсмических свойствах грунтов являются инструментальные исследования, включающие различные методы геофизики. В высокосейсмичных районах это, в первую очередь, регистрация землетрясений малых энергий и взрывов, изучение микросейсм, изучение скоростей распространения и декрементов поглощения упругих волн в грунтах. Пункты наблюдений и методика определяются с учетом результатов инженерно-геологического изучения территории. По полученным данным прогнозируют приращения интенсивности при сильных землетрясениях. В качестве эталонных стараются выбрать скальные (I категория) либо «средние»

(II категория) грунты. К последним, как правило, относят крупнообломочные грунты, кроме отнесенных к категории 1; пески гравелистые, крупные и средние крупности и т. д. (см. СНиП).

Для определения мощности нескальных грунтов, перекрывающих изверженные, метаморфические и осадочные коренные породы, т. е. для определения глубины первой жесткой границы, расчленения разреза на литологические слои, выявления фациальных неоднородностей, установления уровня грунтовых вод, прослеживания тектонических нарушений и зон высокой трещиноватости применяют комплекс сейсморазведочных и электроразведочных методов. С этой целью используют метод преломленных волн (МПВ), МОВ, вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП), сейсмокаротаж (СК), вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) симметричными, двусторонними трехэлектродными и дипольными установками, магнитометрию, термометрию и все виды ГИС.

Наиболее распространенным способом СМР в высокосейсмичных районах является регистрация землетрясений малых энергий на площадках с различными инженерно-геологическими условиями. При этом сравниваются амплитуды сейсмических колебаний на записях смещений, скоростей или ускорений или соответствующих амплитуд спектров Фурье или спектров действия с аналогичными величинами, полученными на грунтах, принятых в данном районе за эталонные. Принимают, что изменению в 2 раза максимальных амплитуд сейсмической записи соответствует изменение интенсивности колебаний грунта на 1 балл:

$$\Delta I = 3{,}3\lg(A_i/A_0), \qquad (14.1)$$

где ΔI – приращение интенсивности в баллах; A_o, A_i – средние значения амплитуды колебаний в пределах эталонного и исследуемого участков, соответственно.

При этом в каждом пункте регистрируют либо две горизонтальные, либо две горизонтальные и одну вертикальную составляющие колебаний. На каждом из типичных для участка грун-

товых комплексов должно быть не менее одного пункта наблюдений. Зависимость приращений балльности от частоты ΔI (f) определяют по отношениям спектров Фурье на исследуемом и эталонном участках в диапазоне частот от 0,5 до 10 Гц. Приращения на каждой частоте рассчитывают по формуле

$$\Delta I\,(f)= 3{,}3\mathrm{Lg}[\Phi_i(f)/\Phi_0(f)], \qquad (14.2)$$

где $\Phi_i(f)$, $\Phi_o(f)$ – спектральные плотности на данной частоте на уровне половины от максимума (в эффективной полосе спектров).

Подчеркнем, что оценки приращения балльности по землетрясениям малых энергий и взрывам основаны на допущении о линейной зависимости между динамическим напряжением и деформацией, т. е. о независимости отношения сравниваемых амплитуд колебаний от силы землетрясения, хотя такое допущение при сильных землетрясениях и в ближних к источнику зонах несправедливо. Из-за нелинейной зависимости интенсивности приходящего сигнала от энергии и спектрального состава источника ведут раздельные определения приращения балльности по записям близких землетрясений, удаленных землетрясений и взрывов (характеризующих высокочастотную область спектра).

Метод сейсмических жесткостей основан на сравнении сейсмических жесткостей изучаемых и эталонных грунтов с обязательным учетом поправок на резонансные явления и обводненность. Скорости распространения продольных и поперечных волн в грунтах определяют известными методами. Приращение сейсмической интенсивности $A/_c$ на исследуемом участке по сравнению с эталонными за счет изменения средних сейсмических жесткостей толщи грунтов мощностью 10 м (реже 20 м и более) ΔI_c рассчитывают по формуле

$$\Delta I_c= 1{,}67 \lg v_0\sigma_0/v_i\sigma_i, \qquad (14.3)$$

где $v_0\sigma_0$, $v_i\sigma_i$ – средняя сейсмическая жесткость на эталонном и изучаемом участках соответственно; v_0, v_i – средние скорости продольных и поперечных волн.

При изучении водонасыщенных грунтов следует использовать только значения скорости поперечных волн v_s. Для грунтовых толщ с несколькими слоями среднюю скорость вычисляют по формуле

$$v=H/\Sigma t_{i..} \qquad (14.4)$$

Приращение за счет резонансных явлений $\Delta I_{рез}$ приближенно оценивают по отношению m_i сейсмических жесткостей верхнего слоя и подстилающих пород и по отношению мощности слоя грунтов Н к преобладающей длине продольной или поперечной волны $\lambda_i = v_iT_i$ (где T_i – преобладающий период). Значение $S_i = H/v_iT_i$ рассчитывают для периодов волн от 0,1 до 0,6 с. Значение $\Delta I_{рез}$ оценивают по вычисленным и приведенным в работе соотношениям m_i и S_i, заданным в табличной форме, по значениям скоростей продольных и поперечных волн для слоя мощностью от 10 до 100–200 м. При этом в окончательном расчете используют максимальное значение приращения. Приращение сейсмической интенсивности за счет обводнения устанавливают по формуле

$$\Delta I_в=ke^{-0,04h2}, \qquad (14.5)$$

где κ – коэффициент, зависящий от литологического состава грунтов; h – расчетное положение уровня грунтовых вод. Для глинистых и песчаных грунтов принимают κ = 1 для крупнообломочных грунтов с содержанием песчано-глинистого заполнителя более 20 – 30 % и сильно выветрелых скальных грунтов k = 0,5; для плотных крупнообломочных грунтов с содержанием песчано-глинистого заполнителя до 20– 30 % и слабовыветрелых скальных грунтов к = 0. Суммарное приращение интенсивности определяют по формуле

$$\Delta I = \Delta I_c + \Delta I_{рез} + \Delta I_в. \quad (14.6)$$

Дополнительным к приведенным выше является метод изучения микросейсм. Считается, что в общем цуге колебаний, обусловленном микросейсмами, избирательно подчеркнуты периоды, соответствующие резонансным периодам грунта в точке наблюдений. Изучают преобладающие периоды микросейсм и их амплитудный уровень. Наблюдения можно проводить той же аппаратурой и в том же частотном диапазоне, что и при регистрации слабых землетрясений и взрывов.

14.5. Детальное сейсмическое районирование и сейсмическое микрорайонирование для гидротехнических сооружений

При расчетах на сейсмостойкость таких уникальных сооружений, как высокие плотины и атомные электростанции, требования к исходной сейсмологической информации резко возрастают. Помимо сейсмических воздействий в баллах, необходимы характеристики типов воздействия на строительной площадке в виде сейсмических записей (акселерограмм, велосиграмм, сейсмограмм). Без этих данных не могут быть выполнены динамические расчеты сейсмостойкости и учтена пространственная работа этих сложных сооружений, имеющих размеры, соизмеримые с длинами сейсмических волн. По карте общего сейсмического районирования условия размещения конкретного объекта и характеристики сейсмических воздействий на стройплощадке получить невозможно. Для перехода от карты масштаба 1:5 000 000 к сейсмическому микрорайонированию для ГЭС и АЭС, т. е. к масштабам 1:25 000 и крупнее, требуются промежуточные исследования в масштабах 1:500 000–1:200 000 – детальное сейсмическое районирование (ДСР).

Основными задачами детального сейсмического районирования, помимо уточнения региональных сейсмических условий района строительства, являются следующие [7]:

1) выявление зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) в районе стройплощадок; изучение этих зон (их протяженности, мощности, глубины заложения), расположение этих зон по отношению к стройплощадке, их конфигурация;

2) изучение ранее произошедших землетрясений, их интенсивности, энергии и механизмов очагов;

3) уточнение прогноза основных сейсмогеологических характеристик землетрясений, возможных в этих зонах: максимальных магнитуд $M_{мах}(\pm\delta M)$, их глубины ($H\pm\delta H$); наиболее вероятного характера подвижек в очагах (механизма землетрясений), определяемого по комплексу данных сейсмологии и тектоники;

4) определение «фоновой» сейсмичности в пункте строительства в баллах; получение основных динамических характеристик воздействий на стройплощадку и предварительных моделей воздействий в виде набора сейсмических записей, который должен быть потом скорректирован на местные условия с учетом сейсмического микрорайонирования.

Отметим, что одним из основных вопросов при ДСР и СМР для ГЭС и АЭС является также вопрос о возможности возникновения на участке строительства остаточных сейсмодеформаций, первичных или вторичных. При этом под первичными сейсмодеформациями понимают деформации, возникающие в очаге в процессе мгновенного снятия напряжения при землетрясении, под вторичными – те, которые образуются за пределами очага под воздействием сейсмических волн, излучаемых очагом.

На первом этапе работ изучают фондовые материалы, детальность проработки которых последовательно возрастает от периферии к площадке исследований. Например, для одних ГЭС крупные разрывные нарушения, являющиеся зонами возможных очагов землетрясений с магнитудами 6,75, могут рассматриваться в радиусе 100 км в связи с тем, что ими может быть обусловлен на площадке микросейсмический эффект, превышающий 7 баллов. Для зон, ближайших к площадке, такой же эффект будет обусловлен более слабыми очагами. Дальнейшие исследования по ДСР для таких ГЭС будут включать более полный анализ

фондовых материалов, изучение палеосейсмодислокаций, глубинное сейсмическое зондирование (ГСЗ) и изучение местной сейсмичности по материалам единой сети сейсмологических наблюдений (ЕССН) и региональной сети, а также по данным специально установленных в районе строительства стационарных сейсмологических станций.

Окончательные амплитуды колебаний для различных зон створа плотины определены с учетом сейсмомикрорайонирования участка строительства на основе его сейсмогеологической модели. При построении модели принимались во внимание геолого-структурные особенности, форма каньона, литологические характеристики пород, их трещиноватость и экспериментально полученные данные о скоростях распространения упругих волн. По совокупности этих данных в основании плотины Ингури ГЭС было выделено семь инженерно-геологических зон, различающихся по физико-механическим свойствам.

Основной принцип построения модели расчетного воздействия на уникальные гидротехнические и энергетические объекты, обоснованный при этих работах, можно сформулировать как сочетание детерминистского и вероятностного подходов. Детерминистский подход преобладает при определении зон ВОЗ и их параметров, вероятностный – при переходе от параметров зон ВОЗ (M_{max}, h, A) к параметрам колебаний на площадке строительства при воздействиях из конкретных зон. При этом были учтены особенности колебаний в ближних зонах сильных землетрясений и конкретная сейсмотектоническая и инженерно-геологическая обстановка на участке строительства при одновременном учете стохастического характера колебательного процесса при сильном землетрясении и вероятностной природы оценок всех необходимых параметров.

Еще одной особенностью сейсмического микрорайонирования для ГЭС является необходимость учета рельефа местности, в частности формы каньона. Так, в основании каньона происходит разуплотнение сейсмической энергии, приводящее к снижению макросейсмического эффекта, в то же время на по-

ложительных формах рельефа и у гребней плотин происходит фокусировка сейсмических лучей и интенсивность колебаний максимальна.

14.6. Детальное сейсмическое районирование и сейсмическое микрорайонирование для ответст венных энергетических сооружений

Особенности сейсмического микрорайонирования для ответственных энергетических сооружений (ОЭС), включая АЭС, крупные ТЭЦ, энергетические комплексы (ЭК), продиктованы повышенными требованиями к безопасности эксплуатации этих сооружений и их конструктивными особенностями. Их нельзя рассматривать как точечные объекты по сравнению с длинами сейсмических волн, а частотный диапазон, который необходимо учитывать при проектировании, расширяется, составляя от 30–50 до 0,1 Гц. При этом учитывают два уровня возможных сейсмических событий, характеризующихся различной вероятностью повторения на площадке: проектное землетрясение (ПЗ) и максимальное расчетное землетрясение (МРЗ). Средний период повторения воздействия в первом случае составляет 100 лет, во втором – 10 000 лет. ПЗ и МРЗ должны характеризоваться балльностью и наборами акселерограмм, аналоговых или синтезированных, моделирующих характерные типы вероятных сейсмических воздействий на площадку из окружающих зон.

Необходимость определения параметров сейсмических колебаний при сильнейших землетрясениях в этих зонах и их возможных проявлений на стройплощадке требует учета углов подхода сейсмических сигналов из каждой зоны и физических характеристик локального геологического разреза, иногда вплоть до глубин в несколько сотен метров. Таким образом, задачи СМР при исследованиях для ОЭС существенно расширяются и могут быть решены лишь совместно с задачами ДСР. Такая взаимосвязь задач и методов ДСР и СМР, общей и инженерной сейсмологии, региональной и детальной инженерной геоло-

гии и геофизики, полевых исследований с математическим моделированием является характерной особенностью специальных сейсмологических исследований для ОЭС и других уникальных энергетических и гидротехнических объектов [7].

На начальной стадии исследований проводят последовательный анализ серии карт масштабов от 1:2 500 000 до 1:500 000 и крупнее и всех других вспомогательных материалов (геолого-геофизических и геологических разрезов; карт новейших и современных тектонических движений; геофизических полей: гравитационных, магнитных, скоростных; карт эпицентров местных землетрясений и др.) с последовательно возрастающей по мере приближения к площадке ОЭС детальностью для составления тектонической карты масштаба 1:500 000–1:200 000, сейсмотектонической схемы и схемы зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ). В результате этих исследований необходимо обосновать размещение пункта ОЭС вне активных разломов и дать фоновые оценки ПЗ и МРЗ.

На следующем этапе исследования (масштабы 1:200 000–1:25 000 и крупнее) должна быть выбрана площадка ОЭС. Основные требования к площадке по сейсмическим условиям следующие:

1) размещение в едином целиковом блоке, т. е. отсутсвие под площадкой сейсмически или тектонически активного разлома;

2) удаление от окружающих зон ВОЗ, исключающее возникновение под площадкой остаточных сейсмодеформаций, первичных и вторичных;

3) невозможность превышения 8-балльного макросейсмического эффекта (если проектом или техзаданием не предусмотрена иная расчетная сейсмичность).

В связи с тем, что большинство ОЭС строят в малосейсмичных районах, основные методы исследований при ДСР для ОЭС следующие: дешифрирование данных дистанционной съемки; сейсмотектоническое обследование местности; гравиметрические, магнитометрические, электроразведочные исследования; сейсморазведка МОГТ, МПВ, ГСЗ, МОВЗ для выявления и уточнения расположения относительно пункта и площад-

ки строительства зон тектонических нарушений в осадочной толще, коре и мантии; регистрация местных землетрясений высокочувствительной сейсмологической или разведочно-сейсмологической аппаратурой типа «Земля» («Регион», «Черепаха» и др.) для выяснения вопроса о сейсмической активности тектонических нарушений на современном этапе и уточнения физических характеристик среды, наличия резких неоднородностей среды, приводящих к фокусировке или рассеянию сейсмической энергии, т. е. одновременно для решения задач ДСР и СМР (пример записи местного землетрясения аппаратурой «Земля» приведен на рис.14.1); комплексная интерпретация полученных данных для уточнения схемы зон ВОЗ и их параметров (M_{max}, h, Δ, I_0 и др.).

Одновременно с исследованиями ДСР начинают собственно исследования по СМР. Основными при СМР малосейсмичных районов являются метод акустических жесткостей и расчетные методы. Как вспомогательные могут быть использованы для этих целей результаты исследования динамических характеристик записей слабых местных землетрясений и взрывов аппаратурой типа «Земля» как по данным объемных, так и поверхностных волн (последнее целесообразно при достаточно детальной сети станций и четкой динамической калибровке всего тракта запись – воспроизведение), а также способ инженерно-сейсмометрических наблюдений с помощью взрывов.

Определение параметров расчетных сейсмических воздействий, как и при исследованиях для ГЭС, базируется на сочетании генетического и вероятностного подходов. Генетический подход является определяющим при выявлении зон ВОЗ и получении их основных характеристик (максимальных магнитуд возможных землетрясений, глубин их очагов, вероятного характера подвижек в этих очагах, повторяемости землетрясений в пределах каждой зоны, интенсивности и т. п.). Вероятностный подход преобладает при определении основных параметров, характеризующих возможные проявления на площадке строительства землетрясений, обусловленных очагами в этих зонах.

Узловые этапы определения расчетных сейсмических воздействий на площадку ОЭС следующие.

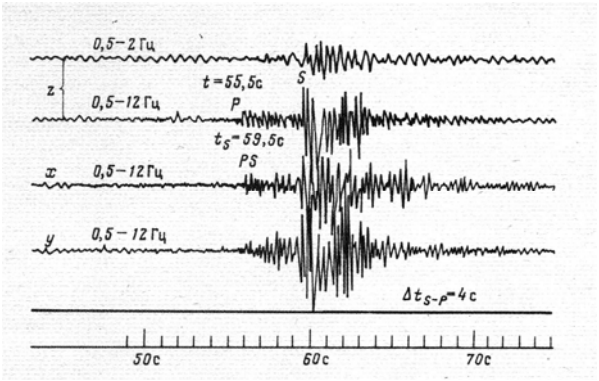


Рис. 14.1.Пример записи местного землетрясения (Δt_{s-p}< 10 с, скорость протяжки магнитной ленты ν = 30 мм/с)

1. В процессе ДСР по комплексу геолого-геофизических и сейсмологических данных выявляют зоны ВОЗ в районе АЭС, определяют их характеристики, указанные выше.

2. Необходимые параметры акселерограммы (сейсмограммы) устанавливают на основе названных характеристик зон ВОЗ, раздельно для воздействий из каждой зоны. Определяют уровень интенсивности, частотный состав и продолжительность колебаний x на основе соотношений типа x–f(M, R, Г), установленных в результате анализа фактических записей землетрясений.

3. Параметры акселерограмм устанавливают с учетом специфики ближних зон землетрясений.

4. Размеры «ближней» зоны $2\Delta_o$ (*км*) для коровых землетрясений при направлении на источник вдоль зоны и вкрест нее (в скобках) с некоторым «запасом» принимают в зависимости от магнитуд в заданных интервалах. Эти размеры установлены на основе комплексного анализа записей землетрясений, макросейсмических и геологических данных.

5. Для получения оценок в ближних зонах желательно ис-

пользовать вероятностные оценки и кривые распределения величин максимальных ускорений, периодов и продолжительности колебаний, а также гистограммы или интегральные кривые распределения этих величин, полученные в ближних зонах по записям землетрясений в регионах с сейсмотектоническими условиями, сходными с условиями в районе площадки ОЭС. При этом следует учитывать преобладающий характер подвижек в очагах сильнейших землетрясений, вводя соответствующие поправки.

6. При недостатке статистических данных по какому-то типу воздействий или параметру, а также при отсутствии необходимых данных по региону учитывают размах оценок, соответствующих известным ограничивающим условиям. Именно этот способ применяют при получении оценок параметров возможных колебаний при сильнейших подкоровых землетрясениях, на тех площадках ОЭС в европейской части бывшего СССР, где акселерограммы подобных землетрясений не регистрировались.

7. При получении фоновых оценок параметров колебаний на площадке с целью учета различий в затухании в разных направлениях можно использовать изосейсты известных аналогичных землетрясений.

8. Оценки параметров колебаний по балльности допустимы лишь на ранних стадиях проектирования ввиду большого многообразия типов реальных воздействий в пределах одного и того же балла. В качестве расчетных оценки по балльности могут применяться лишь в асейсмичных районах с фоновой интенсивностью воздействий менее 6 баллов на грунтах II категории.

Расчеты влияния местных условий на сейсмический эффект относятся непосредственно к кругу вопросов, решаемых при СМР на основе данных, полученных в результате полевых исследований и по фондовым материалам. При оценках влияния осадочной толщи на параметры сотрясений в основном используют методы расчета колебаний горизонтально-слоистых сред. Наиболее часто с этой целью применяют различные модификации программ Л. И. Ратниковой.

Краткие рекомендации по использованию этих методов в слабоактивных районах сводятся к следующему.

1. Полученные, как указано выше, фоновые оценки относятся, в зависимости от использованных соотношений, или к непригруженной горизонтальной уровенной поверхности и к «средним» грунтам, или к непригруженным скальным грунтам. При переходе на «прочные» скальные грунты (поверхность кристаллических или осадочных пород, пригруженных мощным ($H>\lambda$) слоем рыхлых отложений) исходные расчетные амплитуды внутри массива уменьшаются условно в 3 раза, при переходе на «непригруженные» монолитные скальные грунты (при $H<\lambda$) – в 2 раза. Эти предварительные поправки вводят обобщенно с некоторым «запасом» на основе расчетов, выполненных для разных районов и разрезов.

Названные оценки расчетных амплитуд принимают без учета осложнений основных колебаний высокочастотными помехами за счет мелкомасштабных неоднородностей, формирующих рассеянную компоненту. В первом приближении эти помехи можно рассматривать как аддитивные и учитывать наложением соответствующего высокочастотного случайного процесса на основной процесс.

2. Для расчетов прохождения сейсмического сигнала через осадочную толщу строят локальный геолого-геофизический разрез с указанием мощностей, плотностей, скоростей продольных и поперечных сейсмических волн v_P и v_s, акустических жесткостей пород разреза, а также коэффициентов поглощения P- и S-волн в рассматриваемом диапазоне частот.

3. Рассчитывают диапазоны углов подхода сейсмических волн к подошве осадочной толщи из каждой зоны ВОЗ с учетом параметров локального разреза, расположения зоны и вероятных глубин очагов.

4. Рассчитывают наиболее вероятные параметры колебаний на поверхности земли и у подошвы осадочной толщи (как указано выше, по соотношениям типа $A_{мах}$, $T_{мах}$, $\tau=f(M, h, \Delta)$); оценивают граничные частоты спектра $/_{min}$ и $/_{гаах}$, интенсивности

5. В соответствии с полученными оценками для каждого типа воздействия выбирают аналоговую акселерограмму или трансформируют аналог по амплитуде и (или) частоте для получения модели воздействия, характеризующей каждую зону ВОЗ.

6. Выделением основных фаз колебаний на записи землетрясения с заданными параметрами формируют расчетные импульсы для P- и SV-волн. Дальнейшие расчеты проводят в относительных единицах, импульсы предварительно масштабируют к значениям Амах = 1.

7. Рассчитывают влияние локального разреза на входные импульсы из каждой зоны при соответствующих диапазонах углов подхода волн по программам Л.И. Ратниковой. Пример влияния углов подхода сейсмических волн на максимальные амплитуды и соответствующие им периоды ускорений приведены на рис. 14.2.

8. Сопоставляют амплитуды и видимые периоды, а также спектры входного и выходного сигналов. Выясняют характер частотных и амплитудных искажений входного сигнала за счет фильтрующих свойств локального разреза раздельно для сигналов от землетрясений каждой зоны. Определяют коэффициенты относительного усиления k_{Pre} и $k_{Sr\ B}$ горизонтальной и вертикальной компонент P- и S-волн из различных очагов. Устанавливают резонансные периоды осадочной толщи.

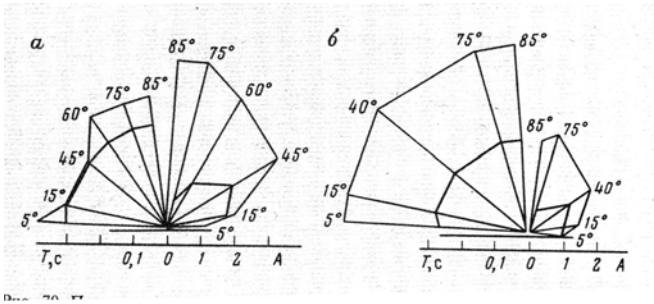


Рис. 14.2. Пример влияния углов подхода сейсмического сигнала на амплитуды А и периоды колебаний Т: *а – P-волна; в – SV-волна*

9. Осуществляют переход от относительных значений максимальных амплитуд ускорений к абсолютным и к приращению макросейсмического эффекта в баллах.

Модели характерных воздействий из окружающих зон используют для составления набора расчетных акселерограмм, т. е. для моделирования проектного землетрясения и максимального расчетного землетрясения.

Набор расчетных акселерограмм для конкретных площадок ОЗС должен содержать минимально возможное число записей с целью уменьшения объема последующих расчетов сейсмостойкости. В связи с этим при составлении набора каждый тип воздействия рекомендуется задавать одной или несколькими характерными трехкомпонентными записями так, чтобы их спектрами был перекрыт практически весь частотный диапазон оценок от $/_{min}$ до $/_{max}$ для данного типа воздействия. При этом из общего числа оценок A_{max} и т для этого типа воздействия выбирают затем максимальными (с заданной вероятностью). Если в пределах одного и того же частотного диапазона лежат оценки параметров для нескольких типов воздействий, то выбирают или моделируют характерную запись с максимальными значениями амплитуды и длительности в пределах' оценок для всех таких типов.

Этим достигают минимизации числа расчетных записей -в наборе при одновременном учете наиболее опасных ситуаций при установленных ограничивающих условиях. Такие ограничивающие условия определяются конкретной сейсмотектонической и инженерно-геологической обстановкой в районе и на площадке строительства. Отметим, что вопросы влияния техногенного обводнения и опасности разжижения рыхлых водонасыщенных грунтов должны рассматриваться особо.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Никитин В.Н.* Основы инженерной сейсмики. – М.: Изд-во МГУ. –1981.– 176 с.

2. *Верутин М.Г.* Инженерная геофизика. – Гомель, 1985. – 153 с.

3. Сейсмическое районирование территории СССР. – М.: Наука, 1980. – 307 с.

4. *Аптикаев Ф.Ф., Нерсесов И.Л.* Задачи детального сейсмического районирования // Сейсмическое микрорайонирование в инженерных изысканиях для строительства. – М.: ЦИНИС Госстроя СССР, 1979. – С.18 – 19

5. *Садовский М.А., Нерсесов И.Л., и др*. Основные принципы сейсмического микрорайонирования // Вопросы инженерной сейсмологии. – Вып.15. – М.: Наука, 1973. – С.3 – 5.

6. Строительство в сейсмических районах // СНиП РК 2.03–30–2006. – Алматы, 2006. – 80 с.

7. *Сувилова А.В., Ященко З.Г.* и др. Основные принципы детального сейсмического районирования для ГЭС и АЭС: В кн.Детальное сейсмическое районирование. – М.: Наука, 1980

8. *Ляховицкий Ф.М., Хмелевской В.К., Ященко З.Г.* Инженерная геофизика. – М.: Недра, 1989. – 252 с.

9. Каталог «Сейсморазведочная аппаратура» (http://geoget.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=103&Itemid=239)

10. *Девдариани Н.А., Кульницкий Л.М. и др*. Геологическое строение и новейшая тектоника юго-восточной части Чукотского моря по сейсмоакустическим данным // Вестн. МГУ. – 1976. – № 6. – С.104–108.

11. Калинин А.В. и др. Сейсмоакустические исследования на акваториях. М.: Недра, 1983. 202 с.

12. *Огильви А.А.* Основы инженерной геофизики. – М.: Недра, 1990. – 501 с.

13. Рекомендации по проведению георадиолокационных измерений для решения геологических задач. – Роменское: ООО «Логические системы», 2008. – 28 с.

14. *Замятин А.Л.* Изучение процессов карстообразования геофизическими методами. – Екатеринбург: Институт горного дела УрО РАН, 2008. – С.169 – 173.

15. *Манштейн А. К.* Малоглубинная геофизика. – Новосибирск, 2002. –135 с.

16. Инженерная геофизика на суше: Информационно-рекламный проспект. – Москва-Рига, 2009. – 7 с.

17. Рекомендации по геофизическому исследованию закарстованности территорий, предназначенных для строительства. – М.: РосглавстройНИИПроект. 1971 (сайт http://www.gostrf.com/Basesdoc/41/41586/index.htm)

18. *Богословский В.А., Жигалин А.Д., Хмеловской В.К.* Экологическая геофизика. – М.: Изд-во МГУ, 2000. – 256 с. Электроразведка. Справочник геофизика. В двух книгах. М., Недра. 1989. 376 с.

19. *Воскресенский Ю.Н.* Полевая геофизика. – М.: ООО «Недра», 2010. – 479 с.

20. *Хмеловской В.К.* Геофизические методы исследования. М.Недра.1988.392 с.

21. Георадиолокация: описание опыта, применение метода (сайт http://www.geo-engine.ru/)

22. *Зинченко В.С.* Петрофизические основы гидрогеологической и инженерно-геологической интерпретации геофизических данных. – М.-Тверь: Изд-во АИС, 2005. – 392 с.

23. *Никитин В.Н.* Инженерная сейсморазведка. – М.: МГУ, 1981.

24. *Сковородников И.Г.* Геофизические исследования скважин. – Екатеринбург, 2009. – 471 с.

25. Сейсморазведка. Справочник геофизика / Под ред. *И. Гурвича и В. Номоконова*. – М.: Недра. 1981. – 464 с.

26. *Ефимова Н.Н.* Применение георадиолокации при решении задач инженерной геофизики: Автореф. дис. канд. техн. наук, 1999. – СПб. –16 с.

27. *Мелкановицкий И.М.* Геофизические методы при региональных гидрогеологических исследованиях. М. Недра. 1984.176 с.

28. *Модин И.Н.* Электроразведка в технической и археологической геофизике. Автореф. дис. док.тех.наук, М. 2010.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ……..		3
ВВЕДЕНИЕ……..		5
Часть I. ОСНОВЫ И МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ……..		8
1.	ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ……...	8
2.	ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД…..	11
2.1.	Основные инженерно-геологические свойства горных пород……	12
2.2	Водно-физические свойства горных пород……..	15
2.3.	Электромагнитные свойства горных пород……..	17
2.4.	Другие электрические и тепловые свойства…….	24
2.5.	Магнитные свойства……	26
2.6.	Упругие и физико-механические свойства……..	26
2.7.	Термические свойства…….	29
2.8.	Ядерно-физические свойства……..	31
3.	КЛАССИФИКАЦИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ……	34
3.1.	Электромагнитные методы…….	34
3.2.	Методы сейсморазведки…….	53
3.2.1.	Сейсмические методы…….	61
3.2.2.	Геоакустические методы…….	75
3.2.3.	Ультразвуковые методы……..	88
3.3.	Метод георадиолокационного зондирования…...	92
3.4.	Аэрокосмические методы……...	102
4.	ДРУГИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ……..	107
4.1.	Гравиметрическая съемка……...	107
4.2.	Магнитная съемка……	109
4.3.	Термометрическая съемка …….	110
4.4.	Ядерно-физические методы……	112
4.5.	Наблюдения во внутренних точках геологической среды……	113

5.	АППАРАТУРА И ОБОРУДОВАНИЕ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОФИЗИКЕ……	122
5.1.	Инженерно-сейсмическая аппаратура……	122
5.2.	Электроразведочная аппаратура…….	127
5.3.	Аппаратура для скважинных наблюдений…….	128
6.	ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ МАТЕРИАЛОВ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОФИЗИКИ…….	135
6.1.	Общие принципы обработки и интерпретации……	135
6.2.	Сейсмические данные……	138
6.3.	Электроразведочные данные……	142
Часть II. ПРИМЕНЕНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЗАДАЧ…….		148
7.	ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ……..	148
8.	ИЗУЧЕНИЕ КАРСТОВЫХ И ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ……	172
8.1.	Изучение карста……	172
8.2.	Изучение оползневых процессов……	178
9.	АРХЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ……..	186
10.	ИЗУЧЕНИЕ ЛЕДНИКОВ И СНЕЖНОГО ПОКРОВА…….	196
10.1.	Изучение ледников……...	196
10.2.	Изучение снежного покрова……	197
11.	ГИДРОМЕЛИОРАТИВНЫЕ И ПОЧВЕННО-МЕЛИОРАТИВНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ……..	200
12.	ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ……...	202
12.1.	Изучение основания плотин……..	202
12.2.	Изучение трасс каналов……	206
13.	ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО…….	209
13.1.	Изыскания под трассы железных и автомобильных дорог……	209
13.2.	Исследования эксплуатируемых дорог……..	209

13.3. Изучение трасс трубопроводов……..... 213
13.4. Изучение трасс линий электропередач (ЛЭП)…… 214
14. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ПРОМЫШЛЕННЫХ И ГРАЖДАНСКИХ СООРУЖЕНИЙ…….. 215
14.1. Геофизические исследования при промышленном и гражданском строительстве…… 215
14.2. Изыскания под тепловые электростанции….. 216
14.3. Изыскания под атомные электростанции (АЭС)... 217
14.4. Изучение сейсмичности районов строительства... 219
14.5. Детальное сейсмическое районирование и сейсмическое микрорайонирование для гидротехнических сооружений…… ……. 225
14.6. Детальное сейсмическое районирование и сейсмическое микрорайонирование для ответственных энергетических сооружений…… 228
Библиографический список……..... 236

Учебное издание

Нурмагамбетов Алкуат
Кульдеев Ержан Итеменович

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОФИЗИКА

Учебное пособие

Нач. РО *З.А. Губайдулина*
Редактор *З.А. Губайдулина*
Компьютерная верстка *А.Б. Аришова*

Подписано в печать 24.12.2012 г.
Тираж 300 экз. Формат 60 х 84 1/16. Бумага офсетная.
Уч.-изд.л. 15,1. Усл. п.л. 14,0. Заказ № 2.

Издание Казахского национального технического
университета им. К.И. Сатпаева
Информационно-издательский центр КазНТУ,
г. Алматы, ул. Сатпаева, 22

ISBN 978-601-228-333-4

