

ГСД Продакшен

GDS Production

**ОБЗОР
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ РЕШЕНИИ
ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И
ИНЖЕНЕРНЫХ ЗАДАЧ**

Авторы:

Владов М.Л.

Старовойтов А.В.

МОСКВА 1998 г.

Оглавление

Введение

Глава 1. Физические методы решения задач инженерной геологии, гидрогеологии и экологии.

Раздел 1. Сущность физических методов решения задач инженерной геологии, гидрогеологии и экологии

Раздел 2. Комплексование геофизических методов и роль фактора времени.

Раздел 3. Современное аппаратно-методическое и технологическое обеспечение геофизических методов (кроме георадиолокации).

Раздел 4. Примеры результатов работ при решении различных задач геофизическими методами.

Глава 2. Современная георадиолокация.

Раздел 1. Основные используемые теоретические положения.

Раздел 2. Аппаратура для георадиолокационных исследований.

Раздел 3. Примеры применения результатов георадиолокационных исследований при решении геологических задач.

Раздел 4. Георадиолокационные исследования в условиях многолетнемерзлых пород

Раздел 5. Примеры применения георадиолокационных исследований при поиске локальных объектов.

Раздел 6. Примеры применения георадиолокационных исследований для дефектоскопии инженерных

сооружений.

Заключение.

Введение

Цель настоящего обзора - дать представление о роли, возможностях и состоянии геофизических методов при решении задач инженерной геологии, гидрогеологии и геоэкологии с упором на георадиолокационные исследования, описания которых вынесены в отдельную главу.

В подавляющем большинстве случаев объекты исследований при решении задач инженерной геологии, гидрогеологии и геоэкологии приурочены к интервалу глубин от нуля до первых десятков метров. Этот интервал глубин или область вблизи поверхности земли весьма условно называют верхней частью разреза (ВЧР), хотя в большой (нефтяной, структурной) сейсморазведке под ВЧР понимают интервал глубин от поверхности до целевого горизонта.

Одним из важнейших условий успешного решения задач исследования верхней части разреза является выбор оптимального метода или комплекса методов исследований с учетом имеющихся и потенциальных возможностей каждого метода, в том числе и с точки зрения их информативности и совместимости разнородных данных.

Большую роль в этом оптимальном комплексе призвана сыграть группа наземных геофизических методов исследований, ориентированных на приповерхностную часть геологического разреза.

Геофизические методы исследований развились как методы прикладной физики применительно к весьма широкому кругу задач, в том числе, к задачам инженерной геологии, строительства, эксплуатации сооружений, гидрогеологии и т.д. По мере возрастания общих и узкоспециализированных интересов к строению, состоянию и процессам, протекающим в самой верхней части разреза - первых метрах и десятках метров, развивались и геофизические методы исследований. По мере их развития повышалась эффективность и информативность, детальность и разрешающая способность, развивалось аппаратно-технологическое обеспечение и теоретическая база. В настоящее время геофизические методы применяются практически во всех сферах человеческой деятельности, где требуется определение физических параметров и характеристик протекающих процессов в приповерхностной части разреза на суше или на акваториях.

Несколько особняком стоят задачи дефектоскопии, связанные с диагностикой инженерных сооружений, где используются самые высокочастотные и высокоточные разновидности геофизических наблюдений. В этих задачах типа обнаружения пустот, трещин или металлических элементов в бетонном, каменном или деревянном теле сооружения, где линейные размеры измеряются сантиметрами, необходимы и соответствующие длины волн зондирующих импульсов.

Глава 1. Физические методы решения задач инженерной геологии, гидрогеологии и экологии.

Под названием “физические методы исследований” понимается изучение физических полей и волн естественного или искусственного происхождения, несущих в себе информацию об объекте исследований. Название “геофизические методы” имеет более узкий смысл и обычно означает применение физических методов исследований к геологической среде.

Раздел 1. Сущность физических методов решения задач инженерной геологии, гидрогеологии и экологии [11 -17].

Этот раздел является по преимуществу ознакомительным для специалистов, связанных с изучением приповерхностной части разреза, и призван описать возможности физических методов изучения земли, развитых в разведочной геофизике.

Широкий спектр физических методов, развитых в разведочной геофизике можно подразделить на два основных класса- **активные** и **пассивные** методы. В активных методах объект подвергается воздействию внешнего поля и реакция на это воздействие дает информацию о свойствах объекта. В пассивных методах изучается поле, создаваемое изучаемым объектом и по характеру этого поля определяются свойства такого объекта. Широко известным пассивным методом является сейсмология, в которой ведется регистрация и изучение упругих волн, генерируемых теми или иными зонами внутри земной коры.

В разведочной геофизике к **пассивным** методам относятся:

- **Гравиразведка**, в которой изучается поле силы тяжести.
- **Магниторазведка**, в которой изучается магнитное поле земли.
- **Радиационная съемка**, в которой измеряется интенсивность альфа, бета или гамма излучений.
- **Метод естественного электрического поля**, в котором измеряется напряженность электрического поля, возникающего при протекании электрохимических процессов в породах, насыщенных флюидами
- **Метод регистрации естественного сейсмического поля земли** - микросейсмология.

Существуют и другие физические методы исследований, например, регистрация поля широкополосных радиостанций вблизи поверхности земли или методы, основанные на перекрестных эффектах типа сейсмoeлектрического, когда измеряется электрическое поле, возникшее от упругого воздействия типа взрыва или удара. Однако обсуждение этих

экзотических, хотя и весьма перспективных методов, выходит за рамки данного обзора.

К **активным** методам относятся:

- **Сейсморазведка**, в которой производится возбуждение упругих волн на поверхности земли, в воде, в скважинах или шахтах и изучается интенсивность и времена прихода возникающих при этом волн.
- **Электроразведка**, в которой индуктивным или кондуктивным способом возбуждаются токи в земле и изучается распределение напряженности электрического поля над изучаемым объектом.
- **Георадиолокационная съемка**, при которой изучаемый объект облучается электромагнитными импульсами и измеряются интенсивность и время прихода отраженных электромагнитных волн.

Как правило технические средства, используемые в пассивных методах по размеру и весу и быстрдействию имеют на порядки меньшие значения, чем в активных методах.

По мере увеличения глубинности исследования размер, сложность и стоимость технических средств в активных методах быстро возрастают в то время как в пассивных методах такого роста практически не имеется.

По объему информации, получаемой при проведении разведки, деление на пассивные и активные методы отходит на второй план и существенным оказывается лишь характер возбуждаемого или измеряемого поля. По этому признаку все методы разделяются на волновые и неволновые, потенциальные или квазипотенциальные. Объем первичной информации, получаемой при использовании волновых методов (активная и пассивная сейсморазведка, радарная съемка) на три порядка и более превышает объем информации, получаемой при использовании потенциальных методов и соответственно возрастает объем операций при обработке.

В принципе каждый из упомянутых выше методов разведочной геофизики имеет одну и ту же задачу- определить распределение в пространстве одного или нескольких свойств изучаемой трехмерной области. В случае гравиразведки имеется всего один параметр среды - плотность как скалярная функция координат. В случае магниторазведки изучаемое свойство - намагниченность. Вектор намагниченности, зависит по величине и направлению от пространственных координат и соответственно изучаться могут либо отдельные компоненты напряженности магнитного поля, либо скалярная величина- модуль полного вектора.

В случае электроразведки на постоянном токе изучается распределение в пространстве электрической проводимости, которая может быть скаляром для изотропных сред или тензором для анизотропных. В электроразведке на переменном токе физическими свойствами среды являются как проводимость, так и диэлектрическая проницаемость.

В случае сейсморазведки изучается распределение в пространстве скоростей распространения продольных и поперечных волн.

В случае метода естественного электрического поля изучается напряженность электрического поля, возникающая в том числе и за счет движения воды по системе капилляров в водопроницаемых породах.

В методе георадарной съемки изучается положение границ, на которых скачкообразно изменяется диэлектрическая проницаемость или проводимость.

Таким образом в принципе можно ставить задачу об определении многих разнородных параметров среды. Каждый из параметров, каждое свойство, имеет свою физическую или физико-химическую природу и отражает либо форму и состояние объекта, либо процессы, проходящие в нем или вокруг него.

Очевидно, что перечисленные выше параметры изучаемых объектов в теоретическом плане являются функциями не только пространственных координат, но и времени. Однако в практическом отношении, по скорости изменения этих параметров во времени, не все параметры равнозначны. Так, например, влажность почвы может резко измениться за несколько минут, приводя к повышению ее электропроводности и диэлектрической проницаемости, тогда как средняя плотность приповерхностного слоя мощностью в несколько метров изменится на пренебрежимо малую величину. В указанном почвенном слое изменится и распределение скоростей распространения упругих волн, но не изменится намагниченность. Сезонные колебания температуры воздуха приведут к сезонному колебанию электропроводности и диэлектрической проницаемости, скорости распространения продольных и поперечных волн и плотности.

Электрометрические методы и радарная съемка способны обнаружить произошедшие изменения электрических свойств, а сейсмические методы позволяют проследить изменения скоростей распространения продольных и поперечных волн, в то же время обнаружить изменение плотности методами гравиметрии практически невозможно.

Выбор геофизического метода для решения практической задачи, кроме того свойства объекта, на который реагирует метод, определяется его чувствительностью, глубиной и разрешающей способностью по глубине и в плане. Разрешающая способность в плане для всех потенциальных методов сравнима с глубиной до изучаемого объекта, т.е. два объекта, расположенные на данной глубине H на расстоянии $L < H$ друг от друга будут приняты за один. В случае волновых методов разрешающая способность по глубине и в плане пропорциональна корню квадратному из глубины, умноженной на длину волны. В принципе это означает, что изменяя длину волны можно изменять разрешающую способность метода. Однако пределы уменьшения длины волны как в сейсморазведке, так и в радарной съемке не безграничны. Реальные породы обладают по-

глощающими свойствами и вследствие этого глубинность исследований при уменьшении длины волны всегда падает, невозможно одновременно повышать как глубинность, так и разрешающую способность волновых методов.

Диапазон изменения физических свойств объектов, представляющих интерес с практической точки зрения различен для различных свойств. Так плотность пород изменяется от 1.2 г/см^3 до 3 г/см^3 , т.е. менее, чем в три раза.

Если включить сюда металл, то изменение достигнет 6 раз. Скорость распространения продольных упругих волн изменяется в большинстве случаев от 300 м/сек до 5000 м/сек , т.е. чуть больше, чем на порядок. В то же время удельное электрическое сопротивление пород изменяется от 1 ом до 10000 ом , т.е. на четыре порядка даже для неметаллических объектов. Однако диэлектрическая проницаемость пород и возможных включений техногенной природы изменяется от 4-5 до 15-20, т.е. скорость распространения электромагнитных свойств пород изменяется всего в 2 - 2,3. В сравнимом с электропроводностью диапазоне изменяется и магнитная восприимчивость объектов, представляющих практический интерес.

Диапазон изменения тех или иных свойств горных пород не связан непосредственно с типом пород и их свойствами, например, прочностью. Так, хотя плотность пород изменяется в очень узком диапазоне, породы с плотностью порядка $1,4 - 1,7 \text{ г/см}^3$ всегда будут резко отличаться по прочностным характеристикам от пород с плотностью $2, - 2,4 \text{ г/см}^3$, а последние - от пород с плотностью $2,6 - 2,7 \text{ г/см}^3$. Близкая ситуация имеет место и с упругими свойствами. Породы со скоростью распространения продольных волн порядка $400 \text{ м/сек} - 1000 \text{ м/сек}$ по прочностным характеристикам будут существенно отличаться от пород со скоростью распространения продольных волн порядка $2500 \text{ м/сек} - 3000 \text{ м/сек}$. В то же время, в диапазоне скоростей распространения упругих волн $1400 \text{ м/сек} - 1800 \text{ м/сек}$ могут оказаться водонасыщенные пески, вплоть до плавунцов, глины, суглинки и трещиноватые известняки. Однако, если одновременно со скоростями распространения продольных волн измерять скорость распространения поперечных волн, то можно уверенно отличать водонасыщенные пески от пород другого типа.

Электропроводность, в отличие от плотности и упругих параметров пород, может изменяться на несколько порядков не за счет изменения состава или прочностных свойств пород, а за счет водных растворов солей, присутствующих даже в малых количествах в свободном или связанном виде в порах и микротрещинах.

Имея в виду верхнюю часть разреза и задачи, возникающие при его изучении в связи с проблемами землепользования и экологии использовать различие в магнитной восприимчивости пород для определения их

литологии или прочностных свойств практически невозможно. Однако, во многих случаях имеет место ситуация, когда во вмещающих породах с малой или мало изменяющейся в плане и по глубине магнитной восприимчивостью заключены объекты техногенного происхождения, магнитная восприимчивость которых значительно превосходит магнитную восприимчивость вмещающих пород. Стальные газо-, нефте- и водопроводы, канализационные железобетонные сооружения, погребенные стальные конструкции, скопления строительных материалов из обожженной глины и т.д.

Изучая распределение в пространстве того или иного физического свойства целевого объекта соответствующим методом, мы получаем информацию, которую можно использовать либо для структурных построений - определения геометрических характеристик объекта - его формы и положения в пространстве, либо для определения его свойств и состояния.

Например, в первом случае нас может интересовать только факт наличия погребенной речной долины и мы определяем ее форму, размеры и положение под поверхностью земли.

Во втором случае нас интересует с какой глубины толща песка оказывается водонасыщенной или какова соленость подземных вод. В большинстве случаев, но не всегда, геометрические параметры изучаемого объекта при жизни одного поколения практически не изменяются и в этом смысле их можно считать независимыми от времени.

Состояние же объекта - влагонасыщенность, соленость, температура, прочность могут значительно измениться за год, сезон и даже часы. Подтопление, засоление, выщелачивание, суффозия с образованием карстовых полостей, протаивание вечно мерзлых пород - хорошо известные примеры этого рода.

Сильное изменение состояния объекта может в ряде случаев привести к изменениям формы объекта с катастрофическими последствиями. Оползни, обвалы, сели, техногенные землетрясения при заполнении водохранилищ и истощении нефтяных месторождений, лавины - это изменение геометрических параметров объекта вследствие изменений его свойств.

Изучая естественное электрическое поле или естественное поле упругих волн мы переходим к изучению процессов, протекающих в интересующем нас объекте или вокруг него.

В том случае, когда основной интерес представляет состояние объекта или протекающие в нем процессы, изучаемые физические свойства и поля принципиально становятся функцией пространственных переменных и времени. Возникает проблема режимных наблюдений и появляются временные ряды, опираясь на которые можно проводить мониторинг того или иного характера.

Исходя из вышесказанного все геофизические методы можно в самых общих чертах описать по характеру поставляемой информации об объекте исследований.

Традиционная *сейсморазведка* дает наиболее точную и полную информацию структурного характера в случае, когда объекты имеют вид локальных замкнутых тел, хотя сложные площадные наблюдения позволяют изучать и строение сложных по форме объектов. При этом поверхность земли над исследуемым объектом должна быть свободна от каких-либо сооружений.

Методы скважинной сейсмической томографии позволяют изучить строение и прочностные свойства пород, расположенных под сооружением, используя скважины, расположенные по внешнему периметру сооружения.

Метод георадиолокационных исследований по своим физическим основам и возможностям схож с простейшей модификацией сейсморазведки - так называемым одноканальным методом вертикального времени, хотя его глубинность в большинстве случаев не превышает первых 10 - 20 метров. Георадарная съемка поверхности земли с самолета позволяет оценить влажность, засоленность, промерзание или оттаивание почвы до глубины порядка 2 - 3 метров.

Гравиразведка позволяет обнаружить тела замкнутой формы типа карстовых воронок и больших полостей искусственного происхождения, если они залегают на глубинах 20 – 30 метров, их размер соизмерим с глубиной залегания и имеется заметное различие в плотности этих тел по сравнению с плотностью вмещающих пород. Форма этих тел при этом определяется в крайне генерализованном приближении.

Магниторазведка позволяет обнаружить объекты из стали, железобетона и иных магнитных материалов, если размеры этих тел сравнимы с глубиной их залегания, однако форма обнаруженных объектов как и в случае гравиразведки, может быть только оценена. Так, например, стержень и трубы различного диаметра будут опознаваться как тела, длина которых много меньше диаметра.

Активные варианты электроразведки позволяют получить картину распределения свойств, характеризующих литологию и состояние среды - влагонасыщенность, соленость воды, положение зеркала грунтовых вод, мощность зоны сезонного протаивания многолетне мерзлых пород, засоление почв, выявить зоны трещиноватости.

Изучение естественного электрического поля особенно при съемках на акваториях позволяет обнаружить те участки на дне водоема, в плотине или бортах водохранилища или реки, в которых имеет место утечка или приток воды и оценить расход воды.

Изучение поля естественных упругих волн позволяет следить за изменением напряженного состояния массива горных пород или крупно-

го сооружения и предсказать возможность развития опасных деформаций.

Как следует из перечисленных выше возможностей каждого из геофизических методов, использование нескольких методов для изучения одного и того же объекта позволяет получить сведения как о геометрических характеристиках объекта, так и о его свойствах и некоторых процессах, протекающих в самом объекте или вокруг него. Набор методов будет различным при решении различных задач, при различных требованиях к разрешающей способности и глубинности, при различных финансовых возможностях и допустимых затратах времени на решение поставленной задачи.

Опуская перспективные возможности перечисленных выше методов приведем краткий перечень задач, решение которых проверено на практике как в нашей стране, так и за рубежом:

1. Определение положения погребенных речных долин и древних русел как на суше, так и на акваториях рек, озер, водохранилищ и на шельфе морей.

2. Выявление зон тектонических нарушений, скрытых под современными отложениями.

3. Оценка сохранности (нарушенности) пород скального типа как выходящих на поверхность, так и перекрытых другими породами.

4. Поиски полостей, углублений и выемок искусственного происхождения, перекрытых различными отложениями рыхлых пород.

5. Выявление зон развития карстовых воронок и полостей.

6. Оценка состояния и прочностных характеристик пород под крупными промышленными сооружениями.

7. Оценка состояния насыпных грунтов под шоссейными и железными дорогами, выявление каверн и пустот малого размера непосредственно под асфальтовым покрытием.

8. Оценка прочностных свойств искусственных и искусственно закрепленных грунтов, в том числе применительно к задачам сейсмостойкого строительства.

9. Поиски погребенных остатков сооружений и отдельных частей, содержащих стальные, железные и железобетонные элементы.

10. Проведение опережающей разведки при проходке транспортных тоннелей в опасных гидрогеологических условиях.

11. Выявление зон подтопления грунтов.

12. Выявление зон притоков и утечек воды из пресноводных водоемов: рек, озер, прудов-охладителей АЭС, водохранилищ.

13. Определение положения нефте- и газопроводов на участках речных переходов, в том числе перекрытых в той или иной мере речными отложениями.

14. Выявление участков нефте- и газопроводов, на которых нарушена гидроизоляция и идут интенсивные процессы коррозии.

15. Определение рельефа коренных пород и оценка их прочности применительно к инженерно-геологическим изысканиям под строительство мостов на реках, буровых платформ на шельфе морей и крупных промышленных сооружений, устанавливаемых на морское дно.

16. Обнаружение и оценка объемов затопленной древесины на лесосплавных реках.

17. Поиск подземных вод и оценка их солености.

18. Выявление зон протаивания вечномерзлых пород как на суше, так и на шельфе северных морей.

19. Непрерывное прослеживание в плане и по глубине прочностных свойств, состава, литологии и иных параметров пород в межскважинном пространстве на основе данных, полученных при бурении.

20. Поиск локальных объектов под поверхностью земли - кабелей, трубопроводов, контейнеров различного происхождения, захоронений, археологических объектов и т.п.

21. Определение толщины и состояния конструктивных слоев покрытий дорог, аэродромов, стен, перекрытий и оснований инженерных сооружений.

22. Оценка факторов геологического риска при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений и жилых зданий.

23. Выявление характера и степени техногенных воздействий в зоне крупных промышленных объектов, включая локализацию зон углеводородного заражения почвы, подпочвенных грунтов и подземных вод.

24. Изучение характера и интенсивности наведенной сейсмической активности, источником которой являются крупные карьеры, крупные шахты, крупные искусственные водохранилища, эксплуатируемые месторождения нефти и газа.

Раздел 2. Комплексование геофизических методов и роль фактора времени

Наиболее полно предпосылки и принципы комплексования геофизических методов при решении инженерных задач сформулированы и описаны в работе [14]. Разнообразие и сложность изучаемых объектов в верхней части разреза в ряде случаев делают невозможным полную их характеристику по данным одного геофизического метода. Например, при изучении карстовых явлений необходимо получить сведения о границах распространения растворимых пород, их трещиноватости, мощности и фильтрационных свойствах перекрывающей толщи, направлении и скорости движения подземных вод, размещении в массиве карстовых полостей и др. Каждая из этих характеристик может быть получена по данным различных методов - электро-, сейсмо-, магнито- и гравиметрии. Для адекватного отображения изучаемого явления или процесса необходимо сочетание нескольких геофизических методов, позволяющих его наиболее полно выделить и описать.

Одной из основных причин использования не одного, а нескольких видов геофизических исследований, является неоднозначность получаемых результатов, а следовательно, и неопределенность конечных выводов. Особенно отчетливо неоднозначность проявляется при изучении верхней части разреза, в которой свойства и состояние объектов являются ярко выраженными функциями пространственных координат и времени.

Необходимость комплексования геофизических методов ярко проявляется, например, при определении уровня залегания грунтовых вод - задаче, имеющей универсальное практическое значение. Определить положение поверхности, отделяющей зону аэрации от зоны полного водонасыщения, можно или по данным электрических зондирований, или по результатам малоуглубинной сейсморазведки на преломленных волнах. При этом в песках и других крупнопористых средах зона полного водонасыщения обнаруживается по падению правой ветви кривой электрического сопротивления. Но такой же эффект может быть связан с влиянием глинистого водоупора, тоже имеющего пониженные сопротивления. В результатах сейсморазведки на продольных волнах возникнет неоднозначность такого же рода - в сравнении с перекрывающими песками и поверхность водонасыщения и подстилающий водоупор будут иметь повышенные значения скоростей. Вопрос может быть решен путем дополнительных сейсмических наблюдений на поперечных волнах, скорость которых не реагирует на влагонасыщение и, напротив, существенно возрастают при переходе от песка к глине.

Таким образом, под геофизическим комплексом понимается сочетание геофизических методов, направленное на выделение или количественную характеристику изучаемых объектов.

Принципы комплексирования геофизических методов можно свести к нескольким наиболее общим положениям: 1) каждый из используемых методов должен обнаруживать присутствие данного объекта; 2) данные разных методов должны обнаруживать не только сходство, но и различие качеств изучаемого объекта; 3) задачи, стоящие перед комплексом, и методы исследований должны быть согласованы между собой.

Комплексирование может производиться на разных стадиях исследований. Например, на стадии получения полевых данных, когда передвижная полевая лаборатория или судно оборудованы общей системой сбора данных различных методов в параллельном или последовательном режиме.

Другой уровень комплексирования на стадии обработки результатов полевых или лабораторных измерений, когда в обработку результатов измерений данным методом включаются данные других методов, например, в обработку данных геохимического опробования включаются данные о динамике грунтовых вод или сведения об электропроводности грунтов.

Еще более высокий уровень комплексирования на стадии интерпретации данных разных методов, когда результативные материалы, например карты и разрезы, нагружаются данными различных методов исследования.

Дистанционные, контактные, точечные и профильные методы, их совместимость, неразрушающие методы исследований.

подавляющее большинство геофизических методов исследований могут быть отнесены к дистанционным. Объект исследований находится на удалении от измерительной установки, которая в свою очередь может размещаться на поверхности земли или воды, в воздухе на различных высотах над поверхностью земли или воды от первых сантиметров до сотни метров (группа аэрогеофизических методов, рассмотрение которой выходит за рамки данного обзора). При этом объектом исследований служит, как правило, приповерхностная толща земли мощностью от первых метров до первых десятков метров. Таковы полевые методы - сейсмоакустические, электрометрические, магнитные, гравитационные и радиометрические.

Среди перечисленных методов есть методы контактные и бесконтактные. К контактным методам относятся практически все модификации сейсмоакустических исследований на суше и на акваториях, активная и пассивная электроразведка и некоторые модификации радиационных на-

блюдений. То есть, источники возбуждения упругих волн и сейсмоприемники, приемные и питающие электроды, приемные элементы радиометрических зондов должны быть размещены на поверхности почвы или внедрены в нее на глубины от первых сантиметров (сейсмоприемники, электроды) до первых десятков сантиметров (приемник эманометра). К бесконтактным методам относятся, например, магнитометрия и георадиолокация - высокочастотная модификация электромагнитных активных измерений. В этих случаях излучающие и приемные датчики и антенны располагаются в воздухе над поверхностью земли в руках оператора или транспортном средстве (тележке, санях, автомобиле).

Строго говоря, все геофизические исследования проводятся по заранее намеченным профилям. Тем не менее, для оценки мобильности и технологичности того или иного метода, а также с точки зрения возможности его комплексирования с другими методами исследований на стадии полевых измерений, необходимо обращать внимание на то, как непосредственно в натуральных условиях собираются данные. Так, малоглубинные сейсмоакустические наблюдения на суше проводятся на расстановках приборов в десятки метров с помощью многоканальных сейсмостанций, то есть один акт возбуждения и приема упругих волн предоставляет сведения о разрезе длиной в десятки метров, а уже на стадии обработки эти расстановки сшиваются в протяженные профили, которые в свою очередь могут покрывать сеть некоторую площадь. В активной электроразведке на суше фиксированная измерительная установка также занимает десятки метров, однако результат посылки и приема сигнала относится к некоторой окрестности точки центра расстановки и уже на стадии обработки из данных по этим точкам собирается электрометрический профиль. Иначе дело обстоит в методах, где основной способ измерений - пешеходная съемка. Так например, в магнитометрии и георадиолокации съемка производится в движении, где скорость движения и скорость регистрации определяют объем информации, получаемой в единицу времени или на погонный метр профиля. При эманометрии измерения проводятся в заранее намеченных точках профиля и объединяются в профиль лишь на стадии обработки. Сходное положение и при проведении сейсмоакустических и электрометрических исследований на акваториях, где, как правило, точечные излучающие и приемные датчики располагаются вблизи поверхности воды и буксируются за движущимся судном.

Важнейшим фактором, определяющим возможность комплексирования методов, в том числе и геофизических, является их совместимость на стадии полевых исследований. Первым вопросом при этом становится вопрос об активности или пассивности метода.

Принципиально все пассивные методы совместимы. Активные методы между собой и с пассивными методами могут быть плохо совместимы из-за взаимных помех чаще всего электромагнитной природы. На-

пример, активная и пассивная электроразведка, некоторые виды сейсмоакустических наблюдений и электрометрия и т.д. Поэтому, в каждом конкретном случае построения комплекса методов исследований необходимо учитывать не только технологичность проведения измерений с точки зрения производительности, например, но и принципиальную возможность одновременных измерений физических полей разной природы.

Все современные геофизические методы исследования малых глубин с поверхности являются неразрушающими и экологически чистыми. Под этим понимается то, что в процессе измерений естественное состояние объекта исследований, почва и грунт не разрушаются, в них не вносятся какие-либо инородные элементы - физические, химические или биологические. Последствия наблюдений на суше в виде ямок объемом в первые кубические дециметры и отверстий в почве уничтожаются по мере прохождения профиля.

Фактор времени в результатах геофизических исследований.

По временному признаку геофизические исследования делятся на те, результаты которых позволяют оценить состояние среды и указать место проявления, направленность и характеристики некоторых процессов и те, по результатам которых можно строить прогноз изменения состояния среды и прогнозировать образование или протекание процессов. К первым относятся все единовременные исследования и среди них, прежде всего, методы, дающие картину строения геологической среды, поскольку положение геологических слоев, их строение и состав не изменяются в течение долгого времени. Другие методы позволят локализовать положение грунтовых вод, места утечек и водопритоков, укажут источники подтопления, причины изменения положений береговых линий и т.д. Методы и способы их применения, ориентированные на повторные или режимные наблюдения, позволяют судить не только о факте, но и строить прогноз для принятия превентивных мер по предотвращению нежелательных и опасных геоэкологических явлений. Например, пространственно-временная структура естественного электрического поля может указать на активизацию карстово-суффозионных процессов или существенные нарушения режима водопользования и т.д.

Таким образом, геофизические методы исследований могут использоваться при решении вышеперечисленных задач как самостоятельные методы и как составные части проблемно-ориентированных комплексов исследовательских методов на всех уровнях комплексирования, а также для повторных и режимных наблюдений при выяснении временной структуры физических полей.

Раздел 3. Современное аппаратно-методическое и технологическое обеспечение геофизических методов (кроме георадиолокации).

Сколько-нибудь полный каталог современной геофизической аппаратуры, методик и способов обработки материалов представляет собой многостраничный труд, уже по объему выходящий за рамки данного обзора. Сведения о характеристиках геофизических исследований отечественного производства можно получить из соответствующих разделов "Справочника геофизика" последних лет издания. Поэтому для формирования представления о положении дел в этой области ниже приводятся лишь краткие описания имеющегося и, в основном разработанного, на кафедре сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета Московского государственного университета обеспечения каждого из методов тех, с помощью которых решались некоторые из вышеперечисленных задач.

Сейсмоакустические исследования на суше [1,13-17,19,20].

Многоканальная цифровая станция на базе системы сбора E330 производства фирмы "L-card" и портативного компьютера типа "notebook", обеспечивающая прием колебаний в 32 точках поверхности земли от одного акта возбуждения упругих волн. Предназначена для работы по методам отраженных, преломленных и рефрагированных волн.

Источники колебаний: а) ударного типа - кувалда, падающий груз; б) электроискрового типа, реализующий электрогидравлический эффект преобразования электрической энергии в упругую волну .

Приемники колебаний электродинамического или пьезоэлектрического типа, размещаются вдоль профиля на поверхности земли и реагируют на скорость (велосиметры) или ускорение (акселерометры).

Производительность при производстве работ по методикам мало-глубинной высокоразрешающей сейсморазведки составляет от 20-30 до 300-400 метров профиля за рабочую смену в зависимости от детальности работ и сейсмогеологических условий.

Глубинность при этом составляет 15 - 20 метров, а разрешающая способность не хуже 1 метра по грунту.

Источник питания - аккумуляторные батареи 12 вольт.

Станция малогабаритная, переносится вместе с источником, приемниками и соединительной магистралью (сейсмической косой), либо монтируется на легковом автомобиле.

Разработка кафедры сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета МГУ.

Сейсмоакустические исследования на акваториях [5-7,15].

Одноканальная цифровая станция. Предназначена для работы по методу t_0 отраженных волн - локации отражений от дна водоема и границ между поддонными слоями.

Источники колебаний - электроискровой (спаркер) или электродинамический (бумер).

Приемник колебаний - плавучая пьезокоса длиной 5-10 метров. Источник и приемник колебаний буксируются вблизи поверхности воды за движущимся судном.

Производительность работ определяется скоростью хода судна и частотой актов "возбуждение-прием", что, в свою очередь, зависит от требуемой детальности работ. Средняя производительность за 10-ти часовую смену составляет до 40 километров профиля.

Глубинность при этом составляет 15 - 20 метров, а разрешающая способность не хуже 0.5 метра по грунту.

Источник питания – 220 В/50 Гц. мощностью до 1кВт (бортовая сеть судна или переносной бензоэлектрический агрегат).

Станция монтируется на маломерных судах и требует для размещения не более 2 кв. метров площади.

Разработка кафедры сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета МГУ.

Сейсмоакустические исследования в скважинах [2,4,13,16-18].

Четырехканальная цифровая станция. Предназначена для работы по методу каротажа (источник и приемники размещаются в одной скважине) и по методу межскважинных просвечиваний - томографии (источники и приемники размещаются в различных скважинах).

Источник колебаний - электроискровой (спаркер) скважинной конструкции не нуждается в прижиме к стенке водонаполненной скважины.

Приемники колебаний - скважинные пьезоприемники, не нуждаются в прижиме к стенке водонаполненной скважины.

Производительность работ за 10-ти часовую смену составляет до 100 точек измерений.

Глубина исследуемых скважин до 100 метров, а максимальные расстояния между соседними скважинами до 50 метров. Разрешающая способность не хуже 0.5 метра.

Источник питания – 220 В/50 Гц. мощностью до 1кВ (переносной бензоэлектрический агрегат).

Станция монтируется на автомобиле типа УАЗ.

Разработка кафедры сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета МГУ.

Активная электроразведка на акваториях [6,21].

Многоканальная цифровая станция. Предназначена для работы по методу сопротивлений.

Источник электрического тока - генераторная группа станции. Питающие и приемные электроды специальной конструкции плавающего типа и объединены в плавучую косу, длина которой определяется требуемой глубиной исследований, буксируются за движущимся судном.

Производительность работ за 10-ти часовую смену составляет до 40 километров профиля и определяется требуемой детальностью работ и скоростью хода судна.

Глубинность исследований составляет 15-20 метров по грунту. Разрешающая способность результирующего геоэлектрического разреза не хуже 2 -3 метров.

Источник питания – 220 В/50 Гц. мощностью до 1кВ (бортовая сеть судна или переносной бензоэлектрический агрегат).

Станция монтируется на маломерных судах и требует для размещения не более 2 кв. метров площади.

Разработка кафедры сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета МГУ.

Измерения естественного электрического поля на акваториях [6 - 10].

Четырехканальная цифровая станция. Предназначена для работы по методу измерения пространственных компонент градиента потенциала естественного электрического поля.

Приемные неполяризующиеся электроды специальной конструкции плавающего типа, буксируются за движущимся судном на удалении до 30-40 метров.

Производительность работ за 10-ти часовую смену составляет до 40 километров профиля и определяется требуемой детальностью работ и скоростью хода судна.

Разрешающая способность при локализации мест утечек и водопритоков не хуже 10 метров по профилю. Чувствительность к изменениям электрического поля не хуже 0.2 милливольт.

Источник питания - аккумуляторная батарея 12 вольт.

Станция монтируется на маломерных судах и требует для размещения не более 2 кв. метров площади.

Разработка кафедры сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета МГУ.

Примечание.

Все аппаратно-методические и технологические разработки кафедры сейсмометрии и геоакустики снабжены пакетами оригинальных программ сопровождения процесса сбора полевой информации, ее хранения, обработки и представления результатов.

Очевидно, что вследствие длительного времени (около 30 лет) разнообразных работ и разработок, проводимых на кафедре сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета МГУ по решению представленных выше задач, накоплен большой опыт не только в виде фактического материала, но и различных приборов, методик и программ, находящихся в различной степени завершения и готовности для непосредственного использования. Весь этот инструментарий можно крупно разделить на три группы:

- готовые к производству конкретных работ;
- нуждающиеся в доработке и опробовании в натуральных условиях;
- разработки, имеющие теоретическое и идеологическое обоснование и стоящие на очереди в ожидании непосредственного заказа.

В то же время, эти группы включают в себя неравнозначные элементы. Так например, метод **сейсмоакустических исследований на акваториях** полностью может быть использован для решения конкретных задач, некоторые узлы приемно-излучающих буксируемых устройств, варианты полевых методик и специфические приемы обработки данных могут нуждаться в доработке, применительно к задаче и условиям ее решения. В методе **измерения естественного электрического поля** при составлении результирующих карт утечек и водопритокков через ложе акватории желательнее произвести **непосредственные замеры скоростей фильтрации** в местах выделенных аномалий. Соответствующий прибор и методика измерений разработаны и созданы, но нуждаются в дополнительной доработке и полевых опробованиях.

К третьей группе можно отнести, например, полевые методики **использования поверхностных волн** в наземной сейсморазведке и способы извлечения информации о свойствах приповерхностного слоя пород, **систему обработки и интерпретации комплексных полевых исследований**, включающих в себя большое число разнородных методов при проведении мониторинга и т.п.

Раздел 4. Примеры результатов работ при решении различных задач геофизическими методами.

Представленные ниже примеры призваны дать общее впечатление о проведенных работах и их результатах. Более подробные сведения об использованной при проведении работ, аппаратуре, методиках и приемах интерпретации можно найти в представленном списке литературы.

Сейсмоакустические исследования на акваториях.

1) На рисунке 1.4.1 представлен фрагмент сейсмоакустического профиля (а) и результат его геологической интерпретации (б), полученного на Терском шельфе Белого моря. Целью сейсмоакустических исследований было картирование в плане и по глубине четвертичных отложений и изучение рельефа кровли коренных пород для поисков россыпных месторождений. На временном разрезе видны оси синфазности отраженных волн от границ раздела между осадками различного происхождения и состава. Континентальные и морские осадки хорошо выделяются по различиям в волновой картине.

Работы проводились с помощью электроискрового источника упругих волн и плавучей пьезокосы с непрерывно движущегося судна со скоростью 7 - 10 км/час.

2) На рисунке 1.4.2 (б) представлен пример сейсмоакустического профиля на реке Волге, полученный при изысканиях под строительство моста. Цель сейсмоакустических наблюдений - определить геометрию и свойства придонных осадков (волнистые, близкие к горизонтальному положению оси синфазности отраженных волн) и определить положение и характер выходов коренных пород (наклонные оси синфазности отраженных волн, соответствующие косослоистому разрезу коренных пород).

Работы проводились с помощью электроискрового источника упругих волн и плавучей пьезокосы с непрерывно движущегося судна со скоростью 3 - 5 км/час.

3) На рисунке 1.4.2 (а) представлен сейсмоакустический профиль на реке Волге, полученный при обследовании трубопроводов, проложенных по дну. Местоположение трубопровода определяется на сейсмограмме как вершина гиперболы - оси синфазности дифрагированных волн. Видно, что трубопровод Т2 "висит" над поверхностью дна, а трубопровод Т3 покрыт слоем осадков. Скорость в покрывающих трубу осадках и мощность покрывающего слоя определяются путем подбора теоретической гиперболы с заданными параметрами, совпадающей на временном разрезе с осью синфазности дифрагированных волн.

Работы проводились с помощью электроискрового источника упругих волн и плавучей пьезокосы с движущегося в старт-стопном режиме судна со скоростью не более 2 км/час.

4) На рисунке 1.4.3 представлен фрагмент сейсмоакустического профиля в нижнем течении р. Оки. Цель работ - изучение строения разреза до глубин 25 - 30 метров под дном реки при изысканиях под строительство трубопровода способом горизонтального бурения на глубине порядка 20 - 25 метров. На разрезе выделяется толща рыхлых осадков, залегающая на коренных породах - гипсах и ангидритах. Коренные породы неоднородны по составу, степени разрушения и т.д., что выражается соответствующими осями отраженных волн на временном разрезе. Четко видно тектоническое разрывное нарушение (разлом). Все эти факторы используются при выборе трассы будущего трубопровода и проектировании глубины и режимов бурения.

Работы проводились с помощью электроискрового источника упругих волн и плавучей пьезокосы с непрерывно движущегося судна со скоростью 7 - 10 км/час.

5) На рисунке 1.4.4 представлен один из временных разрезов по сети профилей в прибрежной части Женевского озера. Цель работ - изучение строения подводной части оползня-обвала для проектирования берегозащитных мероприятий. На разрезе четко прослеживаются оси синфазности отраженных волн от границ между зеркалами скольжения разновозрастных частей в теле оползня, хорошо видна тыловая часть с хаотическим навалом каменного крупнообломочного материала. Пересчет временного разреза в глубинный в данном случае возможен с использованием гиперболических осей дифрагированных волн от неоднородностей в теле оползня.

Работы проводились с помощью высокочастотного электроискрового источника упругих волн и плавучей пьезокосы по высокоразрешающей методике с медленно движущейся гребной лодки.

Сейсмические малоглубинные исследования с поверхности земли.

1) **Пример изучения сейсмических свойств искусственно закрепленных грунтов.** Задача состояла в получении значений скоростей упругих волн в массиве илов, закрепленном с помощью технологии образования илоцементных свай на площадке грузового причала порта Темрюк. Цель работ - на основании результатов сейсмических исследований оценить, во-первых, степень увеличения жесткости закрепленного массива грунтов в сравнении с незакрепленными илами, и во-вторых, определить степень однородности закрепленного массива по упругим свойствам.

Анализ сейсмогеологических условий района работ, пробные наблюдения и обработка их результатов позволили выработать методику исследований. Наблюдения велись пол сети профилей на закрепленном массиве и незакрепленных грунтах. Модель среды - вертикально-неоднородная среда с увеличением скорости распространения упругих волн с глубиной. В соответствие с этим применялась фланговая система наблюдений с максимальными базами "источник-приемник" до 54 метров и шагом наблюдений 3 метра. Это соответствует максимальным глубинам проникновения сейсмических лучей до 20 метров в данных условиях и детальности определения скоростей по глубине порядка 1 метра.

Обработка проводилась с помощью комплекса программ решения прямой и обратной задач сейсмологии, разработанных на кафедре сейсмологии и геоакустики Геологического факультета МГУ.

На рисунке 1.4.5 приведена типичная полевая сейсмограмма, где выделяются импульсы продольной (P) и поперечной (S) волн. После обработки графиков зависимостей времен прихода волн от положения источника и приемников на профиле (годографов) получены для каждого профиля зависимости изменения скоростей продольных и поперечных волн с глубиной. Примеры этих зависимостей приведены на рисунке 1.4.6.

В итоге получены следующие результаты:

а) среднее значение скорости продольных волн в массиве закрепленных грунтов в 1.43 раза выше, чем в незакрепленных илах, а поперечных волн выше в 1.62 раза;

б) степень закрепленности грунта - увеличение несущей способности - возрастает с глубиной до отметок 12 метров в среднем в 1.5 раза;

в) сейсмические работы позволили выделить более и менее успешно закрепленные участки массива в плане и по глубине.

2) Пример изучения состояния грунтового массива в основании резервуаров с нефтью.

Резервуары - вертикальные цилиндры диаметром 45 метров и высотой 20 метров, располагаются на тонком (до 1.5 метров мощностью) фундаменте, который опирается на естественные песчано-глинистые грунты с высокой степенью влагонасыщения. При многолетней эксплуатации образуются деформации собственно резервуаров и трещины в отбортовке фундамента. В соответствие с классической задачей о штампе в приложении к механике грунтов, наибольших напряжений следует ожидать именно по периметру резервуара. В этой же зоне следует искать и изменения в грунтах, вызванные техногенной нагрузкой.

Задачей сейсмических наблюдений являлось нахождение неоднородных по упругим свойствам участков в разрезе грунтов до глубин 10-12 метров по периметру резервуаров.

Применявшаяся методика работ состояла в многоканальной регистрации волн от удара кувалдой. Шаг наблюдений по кольцевому профилю вокруг резервуаров составлял 2 метра. Смещение пункта возбуждения также составляло 2 метра.

Это позволило построить разрезы в изолиниях значений скоростей продольных и поперечных волн с детальностью не хуже 2 метров. На участке работ имелись данные бурения с определениями плотности пород и значений инженерно-геологического параметра - модуля объемной деформации для всех литологических разностей пород в разрезе. На основании сведений о плотности по значениям скоростей продольных и поперечных волн были построены разрезы по сейсмическому параметру - динамическому модулю Юнга, а затем с помощью корреляционных связей перестроены в непрерывные разрезы инженерного модуля объемной деформации по кольцевым профилям вокруг резервуаров (рис. 1.4.7). Дальнейшее сравнение результатов с требованиями строительных норм для пород данного типа позволило выделить аномальные участки разуплотнений - резких понижений значений модуля объемной деформации по глубине и в плане вокруг резервуаров (рис. 1.4.8).

Эти планы и разрезы являются материалом для инженерно-эксплуатационной службы резервуарного парка по выяснению причин таких аномалий, степени их опасности и разработки способов их ликвидации.

3) Пример картирования кровли закарстованных известняков в г. Москве.

Задачей проведения сейсморазведочных работ являлось картирование нарушений карстово-суффозионной или тектонической природы, а также ослабленных и трещиноватых зон в известняках перхуровской толщи верхнекаменноугольного возраста по периметру здания.

В качестве геоподосновы были предоставлены разрезы скважин в районе работ и ряд образцов-кернов карбонатных пород из этих скважин.

Полученные материалы позволили произвести предварительные расчеты методик наблюдений и прогнозировать ожидаемый результат сейсмических работ с точки зрения решения поставленной задачи. Расположение здания и других сооружений, ограждений и проезжих частей оживленных улиц, высокий уровень сейсмического шума от транспорта и строительных работ в непосредственной близости от объекта исследований вместе с данными о характере сейсмической границы - поверхности известняков привели к отказу от многоканальных методик наблюдения, например, по методу преломленных волн.

Несмотря на то, что соотношение скоростей распространения упругих волн вполне благоприятно для применения метода МПВ, необходи-

мость длинных расстановок и устройства выносных пунктов возбуждения с удалениями точек приема в несколько десятков метров, отмеченные условия работ сводят на нет все преимущества этого традиционного и хорошо отработанного метода малоглубинной сейсмоки.

Альтернативой являются различные варианты методик наблюдения на отраженных волнах по способу “ t_0 ” - совмещенного источника и приемника или наблюдения на постоянной базе, когда расстояние между источником и приемником в несколько раз меньше глубины до целевой отражающей границы (“сонар” на суше, непрерывное сейсмическое профилирование и эхолотирование на акваториях). В этом случае установка с одним или несколькими приемными каналами и пунктом возбуждения имеет размеры в первые метры и может целиком перемещаться по линиям наблюдений с любым заданным шагом. Лучевая схема проста - сигнал от источника практически вертикально падает на отражающую границу, претерпевает отражение и возвращается к приемнику практически в ту же точку, откуда он вышел. Сильные (метод “прямого видения”, отсутствие большого пространственного осреднения, точное восстановление геометрии границ, возможности использования динамических характеристик сейсмической записи для изучения свойств пород и т.д.) и слабые стороны (невозможность получения сведений о скоростях распространения волн непосредственно из сейсмических наблюдений без привязки к скважинным данным и т.д.) подробно описаны в литературе, относящейся к сейсмическим исследованиям на акваториях, например, в книге [5].

На суше такие наблюдения не имеют широкого распространения из-за их трудоемкости и необходимости “настройки” всего цикла наблюдений и обработки на каждый конкретный объект, однако, в настоящее время развитие аппаратуры и вычислительной техники приводит к увеличению объемов сейсмических наблюдений такими способами, что в конечном счете позволяет получить разрез геологической среды на профилях длиной от первых метров в условиях высокого уровня помех всех видов и без использования простейших моделей среды [20], что особенно важно для районов городской многовековой застройки с чрезвычайно сложно устроенной приповерхностной частью разреза.

При использовании методик типа “ t_0 ” возникает проблема, связанная с высокой амплитудой и длительностью поверхностных волн, возбуждаемых поверхностными источниками типа ударников разного рода. Как известно, 80% энергии удара по поверхности уходит с поверхностной волной. При этом длительность волны Релея или ее производных волн составляет десятки миллисекунд и меняется в широких пределах в зависимости от конкретного устройства приповерхностной части разреза. Очевидно, что интервал записи с целевыми отражениями от границ на глубинах в 5 - 15 метров при скоростях выше границы порядка 1000 м/с и

менее не превысит 50 мс, а в большинстве случаев и 20 мс. Переход на специальные высокочастотные источники колебаний иностранного производства стоимостью в десятки тысяч долларов с целью уменьшения длительности и интенсивности поверхностных волн, как правило, нерентабелен [19].

Был выбран другой путь решения этой проблемы - переход на наблюдения на поперечных волнах горизонтальной поляризации (SH-волны). Работы в этом направлении не имеют широкого распространения в настоящее время, но частично описаны в литературе, например в работах [1,16].

Во-первых, рождаемая горизонтальным воздействием поверхностная волна Лява или ее производные волны имеют меньшую длительность при том же спектре возбуждаемых колебаний.

Во-вторых, скорость распространения поперечных волн в среде примерно на 40% меньше, чем продольных волн, то есть увеличивается временной интервал до прихода целевого отражения, увеличивается интервал времени между приходами отражений от кровли и подошвы слоя и т.д.

В-третьих, поверхностные волны горизонтальной поляризации при распространении в среде не превращаются в волны других типов и при выполнении некоторых методических приемов, о которых будет сказано ниже, можно получить на записи волновую картину, состоящую из волн только этого типа.

Таким образом, на основании вышеизложенного была выработана следующая методика наблюдений на объекте “Балчуг”.

Производились двухканальные записи от одной точки возбуждения при двух видах возбуждения - вправо и влево от направления профиля.

Расстояние между источником и каждым из приемников составляло 1 метр.

Расположение приемников по отношению к источнику - 1 метр назад и 1 метр вперед по линии профиля.

Вся расстановка перемещалась по линиям наблюдения с шагом 1 метр.

На каждом пункте возбуждения и при каждом из двух направлений возбуждения производилось по 50 записей сигналов для последующей редакции и суммирования.

В результате получены записи отраженных поперечных волн горизонтальной поляризации с центральной частотой 80 герц с детальностью наблюдений по профилю в один метр, пространственной разрешающей способностью вдоль поверхности известняков (возможностью различить два объекта вдоль профиля, находящихся на данном расстоянии) не хуже 3 метров с учетом половины зоны Френеля на поверхности известняков и

разрешающей способностью в толще выше известняков не хуже 1 метра с учетом четверти длины волны на центральной частоте отражений.

При производстве работ использовалась многоканальная система сбора информации E-330 производства фирмы "L-Card" с портативным серийным компьютером "ROVER" (Pentium 100), горизонтальные сейсмоприемники СГ-10 и молоток массой 1,25 кг.

После цифровой обработки сейсмические данные были представлены в виде временных разрезов, записанных методом переменной плотности (рис. 1.4.9). Степень почернения показывает интенсивность отраженной волны - чем больше амплитуда волны, тем больше почернение. По горизонтали указано расстояние в метрах, по вертикальной оси - времена прихода отраженных волн. Для выделения и изучения целевого горизонта - карбонатной перхуровской толщи, использовалась методика интерпретации, получившая название сейсмической стратиграфии. На основании таких профилей по периметру здания и привязки отражений к глубинам кровли известняков по скважинным данным были построены глубинные разрезы с изображением кровли известняков со всеми особенностями рельефа, разрывными нарушениями и т.д. Пример такого разреза представлен на рисунке 1.4.10.

Сейсмоакустические исследования в водонаполненных скважинах.

Такие наблюдения имеют своей целью получение данных о скоростях и амплитудах различных упругих волн, которые связаны с литологией, строением и состоянием пород в верхней части разреза. В отличие от поверхностных сейсмических наблюдений, измерения во внутренних точках среды имеют ряд преимуществ. Одно из важнейших состоит в том, что все измерения точно привязаны к объекту и глубине исследований. Другим важным преимуществом является возможность обследования части грунтового массива, недоступной с поверхности, например, под сооружениями. Третьим важным преимуществом является возможность работы по принципу просвечивания, на прямых волнах, непосредственно распространяющихся от источника к приемнику через исследуемый массив пород и несущих информацию о его упругих свойствах.

Источником колебаний при таких скважинных исследованиях является электроискровой источник, расположенный на поверхности, соединенный с излучателем кабелем-магистралью. Собственно излучатель представляет собой контейнер с гибкими стенками диаметром не более 50 мм. и длиной не более 1 метра. Внутри контейнер заполнен раствором NaCl и содержит разрядные электроды. При подаче напряжения на разрядные электроды происходит разряд с образованием области повышенного давления и через гибкие стенки контейнера, заполняющую скважи-

ну жидкость и стенки скважины упругая волна давления начинает распространяться в среде.

Приемник или приемники волн давления представляют собой пьезоэлементы, смонтированные на кабеле, ведущем к регистрирующей цифровой станции на поверхности.

Таким образом, источник и приемники могут независимо перемещаться в скважинах и располагаться на заданных глубинах.

Методики скважинных наблюдений принципиально делятся на две части - наблюдения в одной скважине, типа разнообразных каротажей на постоянных и переменных базах или наблюдения при размещении источника и приемника в разных скважинах (просвечивания).

Результаты работ в одной скважине представляют собой разнообразные кривые характеристик волнового поля в масштабе глубин, которые коррелируются со свойствами пород. Результаты работ по методике просвечиваний представляют собой, как правило карты в изолиниях значений скоростей упругих волн в плоскости разреза между скважинами. По аномалиям скоростей судят о степени неоднородности массива, выделяют локальные неоднородности различного происхождения, например, зоны разуплотнения, карстовые полости, трещиноватые зоны и т.д.

В настоящее время, проводя полевые измерения в паре скважин по системе многократных пересечений лучей, результаты наблюдений обрабатывают по системе томографии.

а) На рисунке 1.4.11 представлен пример каротажных результатов в водонаполненной скважине вместе с данными бурения. Здесь V_p и A_p скорости и амплитуды объемной продольной волны, а V_h и A_h скорости и амплитуды гидроволны - специфической волны в водонаполненной скважине, скорость которой напрямую связана с динамическим модулем сдвига пород в стенке скважины. Хорошо видна тесная корреляция характеристик волн с литологией разреза.

б) Рисунок 1.4.12 иллюстрирует корреляцию амплитудной кривой объемной волны с распределением трещиноватых, то есть имеющих меньшую акустическую жесткость, зон в известняках, являющихся зонами водопритока, определенных гидрогеологическими методами.

в) На рисунке 1.4.13 представлена типичная волновая картина, регистрируемая при межскважинном просвечивании. По совокупности подобных картин и после соответствующей обработки строится разрез в изолиниях скорости, как на рисунке 1.4.14. Здесь представлен скоростной разрез перехода от глин (значения скоростей волн 1400-1700 м/с) к закарстованным известнякам (значения скоростей в наименее разрушенной карстом части более 2400 м/с). Заштрихована область карстовой пустоты, обнаруженной по провалу бурового инструмента и оконтуренной в разрезе по сейсмическим данным.

Измерения естественного электрического поля на акваториях.

1) На рисунке 1.4.15 представлена карта нижнего течения реки Оки, на которую нанесены места аномалий естественного электрического поля с определением их природы и типа. Карта представляет собой результат рекогносцировочных экологических работ по международной программе “Голубой мост”.

На карте четко выделяются участки реки с максимальной техногенной нагрузкой - крупные промышленные агломерации г.г. Павлово, Дзержинск и Нижний Новгород, к которым приурочена большая часть аномалий естественного электрического поля, отражающих специфику водообмена в ложе акватории. Большинство из этих аномалий утечки связано с активизацией карстово-суффозионных процессов в ложе акватории, вызванных сбросом и просачиванием через породы активных вод от производств и городского хозяйства (аномалии естественного электрического поля, связанные с водопритоками). На участках реки с меньшей техногенной нагрузкой более ярко проявляются аномалии геологической природы. Так установлено последующими работами, что аномалия утечки в районе первого поворота реки вниз по течению от города Павлово связана с тектоническим нарушением в коренных породах - пораженных карстом карбонатах.

2) На рисунке 1.4.16 показаны аномалии X-(a) и Y-компонент (b) градиента потенциала естественного электрического поля и восстановленный потенциал (c) в месте притока минерализованных вод с крупного предприятия на реке Москве. По карте векторов естественного электрического поля (d) можно определить место водопритока даже находящееся в стороне от профиля наблюдений.

На рисунке 1.4.17 показаны прослеженные в течение нескольких лет аномалии X-градиента потенциала естественного электрического поля над местом утечки воды из русла реки Москвы в просадочную карстовую воронку. Измерения указывают на заметную активизацию карстово-суффозионного процесса в данном месте акватории.

На рисунке 1.4.18 показаны записи градиента потенциала естественного электрического поля на участке реки Москвы до и после работы земснаряда. Выемка грунта и разрушение естественной водонепроницаемости дна открыли доступ в ложе реки мощному потоку грунтовых вод, что выразилось в интенсивной положительной аномалии естественного электрического поля.

Такого рода наблюдения производятся с движущегося судна (вплоть до весельной лодки) со скоростью, на которую способно плавсредство, и используются при решении экологических и инженерных задач, где необходимо определить места водопритоков или утечек из ложа

акватории естественного (тектонического, карстово-суффозионного т.п.) или техногенного (сбросы вод, просачивания через тела плотин, завесы, из отстойников и захоронений и т.п.) происхождения, оценить интенсивность процесса и его направленность во времени.

Активная электроразведка на пресноводных акваториях.

Принцип действия этого метода состоит в возбуждении в водной среде электрического поля на низких частотах или постоянном токе и регистрации градиента или потенциала этого поля с помощью групп приемных электродов. Характеристики регистрируемого поля несут информацию о проводимости водного слоя и поддонных слоев в средних геологических условиях до глубин порядка $1/3$ максимального разноса питающих электродов.

Электроустановка и цифровая система сбора устанавливаются на плавсредстве - речном судне, возможно маломерном, а питающие и приемные электроды в виде плавающей косы буксируются за судном. Работа происходит в процессе движения судна и при скорости порядка 7 км/час точка вертикального электрического зондирования приходится на каждые 20-25 метров профиля.

После довольно сложной цифровой обработки полевых материалов строятся глубинные разрезы кажущихся сопротивлений и удельных сопротивлений. Геологическая интерпретация геоэлектрических разрезов позволяет строить разрезы и карты, на которых выделяются литологически различные слои, нарушения в слоях, структурные особенности разреза - разломы, карст, результаты древней эрозии, обводненные участки разреза и т.д.

В качестве примера приводятся результаты электрометрических работ на реке Москве в пределах города.

Одной из наиболее важных геологических задач геофизических исследований в русле реки Москвы является картирование древних доюрских и доледниковых палеодолин реки. Эти долины в большой степени контролируют гидрорежим реки и подземных вод, а также целый ряд опасных геологических процессов - карста, суффозии, утечек воды, подтоплений прилегающих территорий особенно в тех местах, где размыты юрские глины и образовались гидрогеологические "окна".

На рисунке 1.4.19 представлены в качестве примера разрез кажущихся сопротивлений и разрез удельных сопротивлений по участку русла реки длиной 1 километр в районе Лужников, а на рисунке 1.4.20 реконструкция некоторого объема среды с привлечением результатов бурения на прилегающей к реке территории.

Активная электроразведка на суше в условиях города.

Изучение подземных труб и кабелей в условиях города. Трубопроводы являются системами жизнеобеспечения общества. По трубам приходит нефть и газ, питьевая и техническая вода, вода для отопления, отводятся бытовые и промышленные стоки. При длительном взаимодействии труб с окружающим их грунтом возникает коррозия труб, просадки грунта вызывают напряжения и механические деформации труб, приводят к образованию трещин. Утечки из нефтяных и газовых труб происходят относительно редко, но очень опасны. Утечки из системы водоснабжения не столь опасны, но происходят настолько широко, что их характеризуют в процентах потерь от общего объема воды. В разных странах эти потери составляют от 6-8 до 25-30%. Постоянные утечки воды из труб способствуют усилению коррозии труб, просадке фундаментов и разрушению зданий, процессам суффозии и карста, приносят и ощутимый прямой ущерб, так как чистая вода стоит немалых денег. Электроразведкой могут решаться разные задачи: установление местоположения и глубины залегания труб, оценка их состояния и поиск мест утечек воды из труб. Трубы в условиях города находятся в земле, поверхность которой закрыта асфальтом. Для изучения труб в городе требуются бесконтактные методы. Для оценки местоположения трубы в плане и по глубине очень удобны наблюдения с магнитной антенной (рис.1.4.21). Для этого можно применить несколько методик:

1). Выявление положения трубы на частоте 50 Гц (пассивное обнаружение), на частоте 100 Гц (если труба находится под катодной защитой). Если к одной или двум точкам трубы можно заземлиться, по ней пропускают ток 625 Гц. На рисунке 1.4.22 показан вид аномалии электромагнитного поля при проходе над трубой.

2). Если к трубе подключиться нельзя, то возможно индуктивное возбуждение трубы от длинного кабеля (рис. 1.4.23). В этом случае график горизонтальной составляющей магнитного поля имеет максимум над “длинным кабелем” и несколько меньший по величине максимум над трубой.

Наблюдения такого типа вдоль труб позволяют по характерным видам аномалий электромагнитного поля выявить места утечек из трубопроводов и места повышенной коррозии металла трубопровода.

Список литературы к главе 1.

1. Гинодман А.Г., Литвиненко А.П., Ермакова Б.Д. Некоторые результаты испытаний импульсных поверхностных источников поперечных волн. "Геология и геофизика", №9, 1986 г.

2. Калинин А.В., Владов М.Л., Стручков В.А., Жигалин А.Д. Проблемы межскважинного сейсмоакустического просвечивания при изучении карстово-суффозионных процессов на территории крупных городов. “Инженерная геология”, N2, 1983 г.
3. Калинин А.В., Владов М.Л., Стручков В.А., Шалаева Н.В. О строении зоны малых скоростей в условиях водонасыщенных песчано-глинистых отложений. “Вестник Московского университета”, серия “Геология”, N1, 1987 г.
4. Калинин А.В., Владов М.Л., Мусатов А.А., Шалаева Н.В., Кузуб Н.А. О комплексном изучении характеристик волнового поля в скважине с целью расчленения разреза по инженерно-геологическим свойствам пород. ДАН СССР, т. 299, N2, 1988 г.
5. Калинин А.В., Калинин В.В., Пивоваров Б.Л. Сейсмоакустические исследования на акваториях. Москва, Недра, 1983 г.
6. Калинин А.В., Калинин В.В., Владов М.Л., Мусатов А.А., Модин И.Н. Методика, техника и результаты комплексных геофизических исследований на акватории р. Москвы. В сб. “Геологические проблемы Московской агломерации”, издательство Московского университета, 1991 г.
7. Калинин А.В., Калинин В.В., Владов М.Л., Мусатов А.А., Кульницкий Л.М., Кузуб Н.А., Шалаева Н.В. Комплексные геофизические исследования на реках и пресноводных акваториях применительно к задачам геоэкологии. “Вестник Московского университета”, серия “Геология”, N2, 1994 г.
8. Калинин А.В., Калинин В.В., Белашов Г.В., Владов М.Л. Изучение пространственной структуры естественного электрического поля на акватории как экспресс-метод геоэкологической рекогносцировки. Издательство Всероссийского института экономики минерального сырья, Москва, 1995 г.
9. Калинин А.В., Калинин В.В., Кульницкий Л.М., Владов М.Л., Шалаева Н.В. Выделение зон экологически опасных процессов на акваториях методом естественного электрического поля. “Вестник Московского университета”, серия “Геология”, N1, 1996 г.
10. Карус Е.В., Калинин А.В., Владов М.Л., Демура Г.В., Кузьмина Э.Н., Богословский В.А., Белашов Г.В. Комплексные эколого-геофизические исследования на территории и акваториях Московского региона.

“Вестник Московского университета” серия “Геология”, N1,
1993 г.

11. Логачев А.А., Захаров В.П. Магниторазведка. Ленинград, Недра, 1979г.
12. Никитин А.А. Теоретические основы обработки геофизической информации. Москва, Недра, 1986 г.
13. Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмологии. Москва, Изд-во МГУ, 1981 г.
14. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. Москва, Недра, 1990 г.
15. Ляховицкий Ф.М., Хмелевской В.К., Яценко З.Г. Инженерная геофизика. Москва, Недра, 1989 г.
16. Пузырев Н.Н. и др. Сейсмическая разведка методом поперечных и обменных волн. Москва, Недра, 1985 г.
17. Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка. т.т.1 и 2. Москва, Мир, 1987г.
18. Электроискровой источник упругих волн для целей наземной сейсморазведки. Под редакцией Калинина А.В. Москва, издательство Московского университета, 1989 г.
19. Miller D.R., Pullant S.E., Waldner J.S., Haeni F.P. Field comparison of shallow seismic sources. *Geophysics*, v. 51, N11, 1986.
20. Robertsson J.O.A., Holliger K., Green A.G. Source-generated noise in shallow seismic data. *European Journal of environmental and engineering geophysics*, v.1, N2, 1996.
21. Shevnin V.A., Modin I.N., Bolshakov D.K., Kolarov D., Vladov M.L., Sapognikov B.G. Electrical prospecting in urban regions. Conference of engineering geophysics, Nantes, France, 1996.

Глава 2. Современная георадиолокация.

Несмотря на заявленную в научной и рекламной литературе практически безграничную область применения георадиолокации, в использовании георадара четко прослеживаются три основных направления.

1. Решение инженерно-геологических задач:

- картирование геологических структур - восстановление геометрии относительно протяженных границ, изучение поверхности коренных отложений под наносами, изучение уровня грунтовых вод и границ между слоями с различной степенью водонасыщения, поиск и картирование линз песка, глин и гравия для строительных целей и т.д.;
- определение свойств различных отложений по скорости распространения электромагнитных волн в них, опираясь на связь искомых свойств с диэлектрической проницаемостью пород;
- определение мощности водного слоя, толщины ледяного покрова, мощности органических осадков на дне, картирование поддонных слоев;
- определение мощности зоны сезонного промерзания, оконтуривание островов вечной мерзлоты, таликов и т.д.

2. Поиск локальных объектов (неоднородностей) естественного или искусственного происхождения. Сюда относится весь круг археологических задач, поиск и трассирование трубопроводов, кабелей, подвалов и выработок, карстовых полостей, депрессионных воронок. Все чаще георадар привлекают к решению задач экологии - картирование разного рода загрязнений, поиск погребенных отходов, захоронений, границ рекультивированных земель и т.д.

3. Дефектоскопия, то есть в основном поиск нарушений штатной ситуации при обследовании разного рода сооружений типа железных и автомобильных дорог, аэродромов, шахт, тоннелей, плотин, фундаментов, стен и перекрытий, свай и т.д.

Очевидно, что многие практические задачи представляют собой комбинации нескольких позиций из перечисленных направлений использования георадиолокации.

Раздел 1. Основные используемые теоретические положения [1-9].

Распространение электромагнитных волн в породах.

Практически все вещества кроме чистого металла могут быть отнесены к классу диэлектриков с конечной проводимостью. В связи с этим вводится комплексная относительная (относительно вакуума, где диэлектрическая проницаемость равна ϵ_0) диэлектрическая проницаемость $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$, где ϵ - комплексная относительная проницаемость, ϵ' - действительная часть, связанная с поляризацией диэлектрика под дейст-

вием приложенного поля, а ε'' - мнимая часть, связанная с конечной проводимостью диэлектрика (в Ом/м): $\sigma = \omega \varepsilon'' \varepsilon_0$

где ω - частота приложенного электромагнитного поля.

Диэлектрические потери характеризуются тангенсом угла - отношением мнимой и действительной частей относительной диэлектрической проницаемости: $\operatorname{tg} \delta = \varepsilon'' / \varepsilon' = \sigma / \omega \varepsilon' \varepsilon_0$;

Большое значение для радарных исследований в широком диапазоне частот имеет дисперсия диэлектрической проницаемости, то есть ее зависимость от частоты приложенного электромагнитного поля. Это весьма сложная зависимость, если учесть различные способы поляризации компонент, которые составляют агрегат породы. Для практического использования эта зависимость определяется экспериментально. К сожалению, в настоящее время таких определений очень немного и в основном для минералов или мономинеральных пород, например, льда.

Скорость распространения электромагнитной волны в диэлектрике зависит от его диэлектрической и магнитной проницаемостей, однако, для большинства горных пород значение магнитной проницаемости близко к 1 и не зависит от частоты поля. С учетом этого, фазовая скорость распространения волны будет: $V = c / \operatorname{Re} \sqrt{\varepsilon} = c / \sqrt{\varepsilon'}$, где c - скорость распространения электромагнитных волн в вакууме. Это одно из наиболее важных для радарных исследований соотношение, поскольку V - измеряемая величина, а ε' - свойство вещества.

При этом коэффициент затухания будет $\alpha = (\omega / c) \operatorname{Im} \sqrt{\varepsilon}$;

Длина волны в среде будет равна $\lambda = c / \omega \sqrt{\varepsilon'}$; Отсюда удельное затухание, то есть затухание волны на единицу длины пути в децибелах на метр (дБ/м) будет $\tilde{A} = (54,6 / \lambda) \operatorname{Im} \sqrt{\varepsilon}$.

Для практического использования эту формулу с погрешностью менее 1% разбивают на две - для случаев с малыми диэлектрическими потерями $\operatorname{tg} \delta < 0,3$ и с большими диэлектрическими потерями.

В первом случае $\tilde{A} = (27,3 / \lambda) \sqrt{\varepsilon'} \operatorname{tg} \delta$, а во втором случае $\tilde{A} = (38,6 / \lambda) \sqrt{\varepsilon' \operatorname{tg} \delta}$. Таким образом, имея сведения о проводимости среды можно прогнозировать затухание волн и оценивать глубинность будущих георадарных исследований.

Распространение электромагнитных волн метрового диапазона, характерного для георадарных исследований, рассматривается в рамках законов геометрической оптики соответственно для плоских волн на больших удалениях от источника и для сферических волн на малых удалениях от источника. Предполагается, что в рамках допустимых погрешностей в определении скоростей распространения и амплитуд волн действуют принципы Ферма, Гюйгенса, Френеля и закон Снеллиуса. Предпо-

лагается, что в изотропной среде луч перпендикулярен фронту волны и возможны геометрические построения путей волн в среде с последующим вычислением параметров среды по измеренным кинематическим и динамическим характеристикам записей волн (радарограмм) практически также, как это делается в сейсморазведке. Отсюда, коэффициент отражения при нормальном падении волны на границу двух слоев 1 и 2 с различной диэлектрической проницаемостью будет: $K_{отр.} = (\sqrt{\epsilon'_1} - \sqrt{\epsilon'_2}) / (\sqrt{\epsilon'_1} + \sqrt{\epsilon'_2})$;

Электрические свойства горных пород.

Весь диапазон изменения диэлектрической проницаемости составляет $\epsilon' = 5 - 60$.

Воздух 1.
Вода 81.
Лед 3 - 4.

Конкретно по литологическим разностям:

	естественной	
	влажности	водонасыщенные
пески различной зернистости	4 - 9	16 - 25
супеси	6 - 16	16 - 25
суглинки	5 - 15	16 - 30
глины	16 - 30	20 - 36
валунно-галечниковые отложения с песчаным заполнителем	4 - 9	10 - 20
валунно-галечниковые отложения с глинистым заполнителем	6 - 16	10 - 25
песчано-глинистые отложения с гравием, галькой, валунами	4 - 16	10 - 25
мергели	20 - 30	нет данных
другие скальные	4 - 10	нет данных
лесс	нет данных	нет данных
торф	нет данных	60 - 70

Отдельно необходимо рассматривать случай газонасыщенных болотных отложений с разлагающейся органикой, которые сами хорошо выделяются на записях геолокатора, но являются мощным экраном для нижележащей толщи.

Таким образом, подводя итог первому разделу, необходимо сделать следующие выводы:

- основным признаком для расчленения толщи искусственных или естественных слоев является их контраст по диэлектрической проницаемости;

- для решения инженерных задач необходимо установить связи между диэлектрической проницаемостью и требуемыми характеристиками вещества - влагонасыщенностью, литологией, агрегатным состоянием и т.д., что может быть сделано в каждом конкретном случае с помощью параметрических наблюдений, скважин, лабораторных измерений и т.п.

Поскольку при положительной температуре максимальный контраст в диэлектрических проницаемостях между воздухом (1) и водой (81), их соотношение в породе и будет в основном определять диэлектрическую проницаемость слоя. Невлагонасыщенные, сухие, монолитные, слаботрещиноватые породы будут иметь низкие значения диэлектрической проницаемости, а влагонасыщенные, проницаемые, пористые, трещиноватые породы будут иметь высокие значения диэлектрической проницаемости и низкие значения скорости распространения электромагнитных волн. Иначе складывается ситуация в условиях мерзлоты (см. ниже).

Раздел 2. Аппаратура для георадиолокационных исследований.

В георадиолокационном приборостроении в настоящее время существуют две тенденции - построение многоцелевых приборов с набором антенн для исследований в общем диапазоне частот от 50 до 2000 МГц и создание узкоспециализированных аппаратов для решения конкретных задач, зато в больших объемах, более технологично и с большим успехом. Для обзора прежде всего интерес представляют приборы с широким диапазоном возможностей.

Канадская фирма SENSOR & SOFTWEAR, Inc. выпускает приборы с маркой "pulse ЕККО"

Все приборы этой фирмы переносные, предназначенные для пешеходной съемки, снабжены компьютером, программным обеспечением для сбора полевой информации и обработки.

1. "pulse ЕККО-1У"

Динамический диапазон 155 дБ. Программируемый интервал записи 32 - 2048 наносекунд. Возможность накопления до 2048 сигналов. Вес прибора с батареями 12 вольт и без антенн 9 кг.

Сменные антенны:

25 МГц размером 10,5 x 368 x 0,8 см и массой 4 кг;

50 МГц размером 10,5 x 184 x 0,8 см и массой 2 кг;

100 МГц размером 10,5 x 92 x 0,8 см и массой 1,5 кг;

200 МГц размером 10,5 x 46 x 0,8 см и массой 1 кг;

Глубинность исследований на минимальных частотах до 20 метров и разрешающей способностью до 0.5 метров в средних условиях. Вид прибора и пример материала показаны на рисунке 2.2.1.

2. “pulse ЕККО-100”

Более современный вариант прибора с расширенным динамическим диапазоном до 170 дБ и широким использованием оптического волокна для передачи информации. Улучшена конструкция и расширен набор антенн: 12,5 МГц размером 11,4 x 736 x 1,6 см и массой 7,2 кг; 25 МГц размером 11,4 x 368 x 1,6 см и массой 3,6 кг; 50 МГц размером 11,4 x 184 x 1,6 см и массой 1,8 кг; 100 МГц размером 11,4 x 92 x 1,6 см и массой 1,2 кг; 200 МГц размером 11,4 x 46 x 1,6 см и массой 0,8 кг; Общий вид прибора показан на рисунке 2.2.2.

3. “pulse ЕККО-1000”

Высокочастотный прибор для детальных высокоразрешающих исследований до глубин в 2 - 3 метра по грунту и обследования конструкций. Динамический диапазон 133 дБ. Программируемый интервал записи 10 - 250 наносекунд. Возможность накопления до 2048 сигналов. Вес прибора с батареями 12 вольт без антенн 6,4 кг.

Сменные антенны:

225 МГц размером 40 x 23 x 7 см и массой 1 кг;

450 МГц размером 23 x 16 x 6 см и массой 0,7 кг;

900 МГц размером 23 x 16 x 6 см и массой 0,7 кг;

Стоимость приборов “pulse ЕККО” в зависимости от конфигурации 30000 долларов US.

Общий вид прибора и примеры материалов, полученных с этим прибором представлены на рисунке 2.2.3.

Американская фирма Geophysical Survey Systems, Inc. выпускает приборы с маркой “SIR”

“SIR SYSTEM-2” современный многоцелевой радар с чрезвычайно широким спектром применения. В этой аппаратуре использованы практически все достижения современной техники: мощный компьютер с цветным экраном, оптическое волокно, технологичный дизайн, комплект математического обеспечения для сбора и обработки материалов. Динамический диапазон 144 дБ с программируемой регулировкой. Программируемое окно записи от 5 до 2000 наносекунд. Накопление максимум 2048 сигналов. Скорость сбора информации от 8 до 64 трасс в секунду, что особенно важно при работе с автомобиля в движении. Размеры прибора без антенн 29x27x14 см. , вес прибора с батареями 6 кг. Климатика: температура рабочая 0 ± 40 , для хранения -25 ± 60 , влажность 0 - 100%.

Применяемые антенны различаются по типу и центральным частотам возбуждаемых электромагнитных волн:

-дипольные нещелевые - 15, 20, 30, 40, 80, 120 МГц;

-дипольные щелевые - 100, 200, 300, 500, 900, 1000 МГц;

-дипольные моностатические - 80, 100, 120, 300, 500, 900, 1000 МГц;

-дипольные бистатические - 15, 20, 30, 40, 80, 100, 120, 300 МГц;

-бистатические нещелевые - 1,0 ГГц и 2,5 ГГц.

На базе этой аппаратуры фирма выпускает специализированные радары, в том числе для работ на железных дорогах и автодорогах с относительно большими скоростями перемещения более 10км/час.

Стоимость приборов “SIR SYSTEM” лежит в пределах 60 000 - 120 000 долларов US в зависимости от конфигурации и комплектации прибора.

Общий вид аппаратуры и примеры получаемых материалов, в том числе на дорогах представлены на рисунках 2.2.4 - 2.2.7 .

Шведская фирма “MALO GeoScience” выпускает георадар с маркой “RAMAC/GPR” с компьютером, математическим обеспечением сбора и обработки информации.

Технические характеристики прибора следующие:

- динамический диапазон 150 дБ;

- программируемое окно записи 128 - 2048 наносекунд;

- скорость сбора информации 20 - 50 трасс в секунду;

- рабочая температура при оснащении специальным компьютером “Husky” - от-20 до +60 градусов;

- размеры прибора 35х25х13 см.;

- вес прибора с батареями 4,9 кг.

Георадар снабжен сменными антеннами на 50, 100, 200 и 400 МГц. Антенны в зависимости от целевого назначения оформлены в виде, удобном для транспортировки по поверхности изучаемой толщи.

Общий вид прибора, варианты его использования и примеры результатов наблюдений представлены на рисунках 2.2.8 и 2.2.9.

Английская фирма “ERA TECHNOLOGY” выпускает георадары марки “SUPERSCAN” с компьютером, математическим обеспечением сбора и обработки информации.

Георадары “SUPERSCAN 2D” и “SUPERSCAN 3D” различаются технологическими усовершенствованиями и имеют близкие характеристики. Динамический диапазон >130 дБ с программируемой регулировкой. Программируемое окно записи от 12,5 до 820 наносекунд. Скорость сбора информации до 50 трасс в секунду. Размеры прибора без антенн 33,5х23,5х17,6 см. , вес прибора с батареями 5,5 кг. Климатика: температура рабочая ± 40 , влажность 0 - 90%.

Выполнен в водонепроницаемом корпусе.

Применяемые антенны различаются по типу и центральным частотам возбуждаемых электромагнитных волн:

-Дипольная параллельная щелевая 100 МГц размером 102 x 23 x 23 см и массой 13 кг;

-Дипольная крестовая щелевая 100 МГц размером 102 x 102 x 23 см и массой 12 кг;

-Дипольная параллельная щелевая 250 МГц размером 60 x 60 x 21 см и массой 8 кг;

-Дипольная крестовая щелевая 250 МГц размером 20 x 60(диаметр) см и массой 7,5 кг;

-Дипольная параллельная щелевая 500 МГц размером 39 x 39 x 25 см и массой 2,5 кг;

-Дипольная крестовая щелевая 500 МГц размером 22 x 44(диаметр) см и массой 2 кг;

Стоимость прибора от 30000 до 60000 долларов US.

Общий вид прибора и антенн показан на рисунках 2.2.10 и 2.2.11.

Упомянутые выше фирмы и марки приборов не исчерпывают все многообразие выпускаемой за рубежом аппаратуры для георадиолокации, но являются типичными по характеристикам и стоимостям. Например, за пределами рассмотрения осталась продукция таких фирм как японская "OYO" и американская "ATLAS ELEKTRONIK".

Ниже приводится описание приборов отечественного производства и из ближнего зарубежья.

Латвийская фирма "Radar Inc." (г.Рига) производит георадар "ZOND - 12" многоцелевого назначения. При работе с прибором используется компьютер типа "notebook", математическое обеспечение сбора информации производства фирмы "Radar Inc." и система обработки производства "GSD Production" (кафедра сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета МГУ).

Технические характеристики прибора следующие:

- динамический диапазон 120 дБ;
- программируемое окно записи 50 - 2000 наносекунд;
- скорость сбора информации 14 трасс в секунду;
- рабочая температура от 0 до +40 градусов;
- размеры прибора 35 x 30 x 5.5 см.;
- вес прибора с батареями 3 кг.

Георадар снабжен сменными антеннами на 25 -150, 300, 500, 900, 1000 и 2000 МГц:

25 - 150 МГц линейный размер от 2 до 6 м и вес от 2 до 7 кг в зависимости от настройки на конкретную центральную частоту;

300 МГц размером 98 x 52 x 4 см и массой 10 кг;

500 МГц размером 69 x 32 x 4 см и массой 4 кг;
900 МГц размером 43 x 22 x 4 см и массой 2 кг;
1000 МГц размером 17 x 30 x 20 см и массой 4 кг;
2000 МГц размером 13 x 27 x 13 см и массой 1.5 кг.
Стоимость прибора 18 000 долларов US.

Общий вид прибора и пример получаемых материалов представлены на рисунке 2.2.12.

Латвийская фирма “Radar Inc.” (г.Рига) производит георадар “PYTHON-02”, в основном для исследований, требующих большей глубинности, чем при обычных георадиолокационных исследованиях (до 100 метров и более).

Глубинность исследований в сухом песке достигает 250 метров.

При работе с прибором используется компьютер типа “notebook”, математическое обеспечение сбора информации производства фирмы “Radar Inc.” и система обработки производства “GSD Production” (кафедра сейсмометрии и геоакустики Геологического факультета МГУ).

Технические характеристики прибора следующие:

- амплитуда излучения на нагрузке 200 Ом. равна 200 В;
- динамический диапазон 120 дБ;
- программируемое окно записи 200 - 3200 наносекунд;
- скорость сбора информации 7 трасс в секунду;
- рабочая температура от 0 до +40 градусов;
- размеры электронного модуля (размещен на антенне) 29 x 9 x 5 см.;
- вес прибора зависит от длины антенн и лежит в пределах 4 - 13 кг.

Георадар снабжен сборной антенной-монолыжей шириной 16 см., длина которой зависит от настройки на конкретную центральную частоту;

190 МГц длиной 0.8 м;

95 МГц длиной 1.6 м;

63 МГц длиной 2.4 м;

47 МГц длиной 3.2 м;

38 МГц длиной 4.0 м;

31 МГц длиной 4.8 м;

27 МГц длиной 5.6 м;

24 МГц длиной 6.4 м.

Стоимость прибора 10 000 долларов US.

Общий вид прибора изображен на рисунке 2.2.13.

В качестве примера получаемых материалов на рис.2.2.14 показан фрагмент профиля, выполненного с помощью радара “PYTHON-02”, с антенной 60 МГц. Возможности данной модификации радара еще мало изучены, тем не менее проведенный небольшой объем опытно-методических работ на Воробьевых горах показал, что глубинность исследований составила около 50 метров с данным типом антенны. На этом рисунке по-

казан профиль, выполненный и обработанный с целью выделения глубоких горизонтов, в том числе уровня грунтовых вод. Разрез до глубины 50 м сложен суглинками и песками, в которых по данным бурения на глубине 42 метров обнаружен УГВ. По годографам дифрагированных волн была оценена скорость распространения электромагнитных волн (6 см/нс), что позволило интенсивные оси синфазности отраженной волны на временах 1400 нс сопоставить с уровнем грунтовых вод. Выше по разрезу на временах около 1200 и 1300 нс (35 и 40 м соответственно) также отчетливо выделяются отражающие горизонты, которые располагаются в толще песков и обусловлены, по-видимому, изменением гранулометрического состава.

Фирма "ЛогиС" (НИИПриборостроения, г. Жуковский) выпускает георадары высокого разрешения для детального изучения приповерхностной части разреза. Приборы компьютеризированы, информация отображается на экране специального дисплея. Приборы различаются центральными частотами излучаемых сигналов - 400 и 800 МГц. Снабжены математическим обеспечением для сбора и обработки информации. Для георадара на 400 МГц разрешающая способность 0,3 м. и глубинность исследований 5 - 10 метров. Для георадара на 800 МГц разрешающая способность 0,1 м. и глубинность исследований 2 - 4 метров. Антенны георадара оформлены в ручном варианте и в виде буксируемых по поверхности конструкций. Диапазон рабочих температур от -20 до +40 градусов. Вес прибора с батареями 10 - 15 кг в зависимости от конфигурации. Стоимость прибора 9000 долларов US. Общий вид прибора и пример получаемых материалов представлены на рисунке 2.2.15.

Правдинский завод радиорелейной аппаратуры производит георадары марки "ЛОКАС", разработанные в научно-производственном объединении ЛОКАС (ВНИИРТ г. Москва).

ЛОКАС2М и ЛОКАС3П состоят из антенно-передающего и антенно-приемного модулей, которые размещены в герметизированных корпусах из стеклопластика, и модуля управления, отображения и регистрации, построенного на базе ЭВМ, совместимой с семейством IBM PC. В георадиолокаторах осуществляется адаптация параметров изделия к условиям геологической обстановки. Процессы отображения, регистрации и документирования автоматизированы. Аппаратура ЛОКАС2М размещена в кузове-фургоне, обеспечивающем необходимые условия для ее работы и работы обслуживающего персонала, и установленном на самоходном шасси повышенной проходимости ЗИЛ-131. Георадиолокатор ЛОКАС3П - переносной.

Технические характеристики:

-динамический диапазон 110 дБ;

- центральная частота возбуждаемых колебаний 75 МГц;
 - глубинность исследований до 50 метров (в сухом песке или в вечной мерзлоте);
 - разрешающая способность не хуже 0,5 метров;
 - максимальная скорость исследований 2 метра в секунду;
 - диапазон рабочих температур от -30 до +40 градусов.
- Общий вид прибора, антенн и пример получаемых материалов показан на рисунке 2.2.16.
- Стоимость прибора определяется заводом-изготовителем по договору с заказчиком.

Раздел 3. Примеры применения результатов георадиолокационных исследований при решении геологических задач.

Пример 1. [50]

Картирование поверхностных грунтовых вод в песчано-гравийных отложениях с удельным сопротивлением пород выше уровня воды порядка 100 омм.

Использовался несерийный георадар с центральной частотой излучения в воздухе в 80 мегагерц. Антенны располагались на тележке на расстоянии в 30 метров от автомобиля с приемной аппаратурой. Скорость движения автомобиля была около 1 метра в секунду. Методика наблюдений - непрерывное профилирование в движении.

Электрометрические измерения в скважинах и на образцах показали, что диэлектрическая проницаемость пород выше уровня грунтовых вод (УГВ) менялась в пределах 4-9 и достигала значений 15 в водонасыщенной зоне. На рисунке 2.3.1 приведен фрагмент временного разреза, а справа расположена диаграмма для определения глубины залегания границы, если известна диэлектрическая проницаемость вышележащей толщи. Практически привязка уровня грунтовых вод проводилась по результатам гидрогеологических измерений в скважинах. На рисунке видны четкие интенсивные оси синфазности волн, отразившихся от уровня воды на глубине 3.9 метра (по скважинным измерениям), что дало возможность определить среднюю диэлектрическую проницаемость вышележащей толщи. Хорошо видны отражения от холмообразной структуры, максимум которой располагается на пикете 65 метров выше уровня грунтовых вод, и впадины с минимумом пикете 20 метров ниже УГВ. Прерывистые и искривленные оси синфазности, выполняющие основной фон временного разреза интерпретируются как индикатор строения отложений в данной осадочной толще.

На рисунке 2.3.2 показан другой участок того же профиля с особенностью, которая интерпретируется как почти изометричная выемка,

заполненная осадками, с центром на пикете 825 метров. Здесь тоже можно видеть отражения от уровня грунтовых вод между пикетами 740 и 840, но здесь их трудно выделить, так как УГВ располагается на глубине всего 1.7 метра и отражения от него маскируются отражениями от приповерхностных границ в осадочной толще. До времени 26 наносекунд располагается "мертвая зона" и уверенно выделить отражения от неглубоко залегающих границ очень трудно. Образующиеся при неуверенной корреляции ошибки в определении времен приводят к очень большим погрешностям при вычислении диэлектрической проницаемости.

На рисунке 2.3.3 виден эффект выхода профиля с грунтовой дороги на дорогу с асфальтовым покрытием на пикете 1675 м. Заметно ослабление записи за счет появления слоя асфальта, хотя основные оси синфазности на временах около 50 нс. и отражения от УГВ на временах около 170 нс еще прослеживаются.

На рисунке 2.3.4 представлен участок профиля, записанный при тех же условиях наблюдений, но на большей развертке. В верхней части, как и на предыдущих фрагментах можно видеть отражения от УГВ, затем, примерно до половины интервала записи, видны плохо коррелируемые отражения о внутренних границ в толще осадков. И, наконец, в нижней части записи видны плохо коррелируемые оси синфазности отражений от кровли и подошвы алевролитов и оси синфазности интенсивных отражений от кровли сланцев.

Пример 2 [20].

Картирование поверхности сохранных кристаллических пород в Швейцарии.

Марка георадара не указана. Применялась методика 14-ти кратного перекрытия по методу общей глубинной точки (ОГТ). Обработка проведена по сейсмическому графу с помощью системы ITA-Seismic Processing System. На рисунке 2.3.5 представлены два варианта одного временного разреза длиной 25 метров - до миграции и после нее. На верхнем рисунке (до миграции) хорошо видны оси синфазности дифрагированных волн, затем удаленные с помощью миграции (нижний рисунок). В нижней части записи видны слабонаклонные оси синфазности волн, отраженных от более сохранныго кристаллического блока. В средней части записи видны отражения от поверхности воды, заполняющей трещиноватую зону. Отмечено, что трудоемкие работы по методике ОГТ нужны лишь для максимально точного (до 15%) определения скорости распространения волн, а рекогносцировочное картирование можно вести гораздо быстрее и дешевле с помощью профилирования в движении при фиксированном расстоянии между антеннами.

Пример 3 [43,44].

Мониторинг уровня грунтовых вод (рис. 2.3.6). Георадар использован для картирования водоносного горизонта, лежащего на маломощном глиняном водоупоре в передовой морене (толще сильно перемятых песчано-глинистых отложений). Проблема состояла в том, что этот водоупорный слой имеет ступенчатое строение с преградами для свободного перетока воды. Измерения по сети наблюдательных и водозаборных скважин не давали возможности восстановить всю гидрогеологическую картину. Только непрерывное профилирование с георадаром позволило нарисовать всю структуру водоупора и увязать между собой данные замеров по скважинам и спроектировать режим работы водозаборов. Работы велись георадаром Pulse Echo 1V с использованием антенн 100 МГц (верхние рисунки) и 25 МГц (нижний рисунок).

Пересчет временного георадарного разреза в глубинный велся с помощью привязки отражений к данным замеров по скважинам. На рисунке 2.3.6 представлены два участка профиля. На временном разрезе, полученном с антенной 25 мегагерц видны четкие отражения от поверхности воды на временах до 500 наносекунд, что в данном случае соответствует глубинам более 20 метров.

Пример 4 [36].

Картирование водоносного горизонта в перемятых ледниковых отложениях. В данном случае картирование с помощью 20-ти метровых скважин оказалось слишком дорогим и малоэффективным, а корреляция между скважинами затрудненной. Использовался георадар Pulse Echo 1V с набором антенн 25, 50, 100 и 200 мегагерц. На рисунке 2.3.7(а) представлены годографы (записи на переменной базе от 1 до 28 метров), а также участок георадарного профиля. На записях с переменной базой видны отражения на временах до 400 нс. На профиле с постоянной базой хорошо выделяются отражения от поверхности грунтовых вод (первая интенсивная волна) и кратные отражения между поверхностью земли и поверхностью воды. В отмеченной работе обращается внимание на проблему многократных отражений, которые могут маскировать отраженные волны от границ ниже уровня грунтовых вод. Предлагается решение задачи путем постановки наблюдений по методу общей глубинной точки (ОГТ) и последующей обработки аналогично хорошо известной процедуре в сейсморазведке.

Пример 5.

Опытно-методические работы по картированию неглубоко залегающего уровня грунтовых вод (УГВ) в песчано-глинистых отложениях. Разрез представлен сверху маломощными суглинками, перекрывающими водоносные пески. На исследуемой площади имелся питьевой колодец,

где поверхность воды находилась на отметке 5.2 метра. Работы проводились фирмой “Локас”, обработка проводилась на кафедре сейсмометрии и геоакустики Московского государственного университета. Применялся георадар “Локас 2” с антеннами 75 мегагерц. Наблюдения производились в движении с антеннами на постоянной базе 1 метр.

На рисунке 2.3.8 приведены четыре варианта одного из георадарных профилей, проходящих вблизи колодца.

На рисунке 2.3.8 (а) представлен необработанный профиль длиной 17 метров, где колодец располагался на пикете 10 м. - полевая запись при развертке 300 нс. с задержкой 35 наносекунд.

На рисунке 2.3.8 (б) этот же профиль после процедуры вычитания скользящего среднего для удаления синфазной аппаратной помехи. Заметно резкое ослабление сигналов в толще покровных суглинков. После этого применено автоматическое выравнивание амплитуд для сжатия динамического диапазона записи - рисунок 2.3.8 (в).

На рисунке 2.3.8 (г) представлен результат низкочастотной фильтрации. Здесь отчетливо видна кровля песков - 1 и поверхность УГВ в песках -2. В районе расположения колодца УГВ “подтянут” вверх к искусственной дрене, что характерно для такой ситуации. Средняя скорость распространения электромагнитных волн от поверхности до УГВ составляет 7.5 см/нс, что соответствует влажным суглинкам и пескам.

Пример 6 [27].

С помощью георадиолокации проводилось изучение строения ледниковых отложений в Канаде. Целью работ было изучение различных форм ледниковых отложений - озов, камов и морен, картирование границ между крупнообломочными и песчано-глинистыми отложениями, а также определение положения уровня грунтовых вод.

Применялся георадар Pulse Ekko IV с набором антенн 50, 100 и 200 мегагерц. Основная доля наблюдений проводилась по методике непрерывного профилирования на постоянной базе при довольно высоких скоростях движения до 2 м/сек. Для определения скоростей распространения электромагнитных волн в отложениях использовалась методика общей глубинной точки (ОГТ) с начальным разносом антенн 0.5 метра и шагом перемещения при получении годографов тоже 0.5 метра. Полученные скорости для приповерхностной части разреза лежат в пределах 11 - 16 см/нс. Обработка проводилась с помощью математического обеспечения георадара. В граф обработки были включены накопление, автоматическая регулировка амплитуд, статические поправки за превышения рельефа и миграция. Параметры процедур не указаны.

На рисунке 2.3.9 представлен георадарный временной разрез со шкалой глубин (справа) в соответствии с определенной средней скоростью волн в данной ледниковой толще 13см/нс. Профиль получен с ан-

тенной 100 мегагерц. Самая нижняя протяженная ось синфазности на временах, соответствующих глубинам 15 - 18 метров в пределах профиля, интерпретируется как отражение от основания эскера - ледникового образования из гравия - поверхности глин. Однако, в отсутствие заверочного бурения остается вероятность, что искомое основание на разрезе не видно, а указанное отражение произошло от поверхности грунтовых вод в гравийной толще.

На рисунке 2.3.10 можно видеть сходную ситуацию в другом районе Канады, где основание такой же ледниковой формы залегает на меньших глубинах.

Георадарные исследования проводились точно так же, средняя скорость распространения волн составила 16 см/нс.

На рисунке 2.3.11 представлен георадарный разрез в грубозернистых песчаных моренных отложениях. Исследования проводились с антенной 50 мегагерц. Протяженные оси синфазности интерпретируются как отражения от толщ песка различного гранулометрического состава. По распределению этих границ в моренной толще сделаны выводы о стадийности процессов осадконакопления ледниковых отложений в этом регионе. Средняя скорость распространения волн определена в этом разрезе как 15 см/нс. Особый интерес представляет то, что оси синфазности прослеживаются до глубин порядка 40 метров. Это позволяет говорить о соответствующей глубинности георадарных исследований в песчаных влагонасыщенных отложениях на частотах около 50 мегагерц.

Пример 7.

Целью георадиолокационных исследований на Боровицкой площади было изучение геологического строения верхней части разреза до глубины 8-10 метров для проектирования музейного комплекса. Использовался георадар Зонд-10 с антенной 75 МГц. Для интерпретации привлекались данные бурения неглубоких скважин, одна из которых изображена в левой части рисунка 2.3.12. Разрез представлен песчано-глинистыми отложениями различной степени увлажнения. В правой части рисунка показаны рассчитанные значения диэлектрической проницаемости и скорости распространения электромагнитных волн для различных слоев. На радарограмме отчетливо выделяются культурный слой и слой песка со значительной примесью гравия, песчаная толща с резко пониженной интенсивностью записи (интервал 75-175 нс) и два интенсивных отражающих горизонта в кровле и подошве плотных ледниковых суглинков (на 175 и 240 нс). В толще песка на временах около 120-130 нс хорошо выделяются оси синфазности отраженных волн, соответствующие кровле водонасыщенных отложений, что подтверждается данными бурения.

Пример 8.

На рис.2.3.13 показан фрагмент георадиолокационного профиля, полученного группой Московского государственного университета на одном из участков шоссе Тула - Венев. Целью георадарных исследований было изучение состояния дорожного полотна для выработки рекомендаций по его укреплению. При проведении работ применялся радар Зонд-10 с антенной 75 МГц. Фрагмент профиля расположен на участке дороги, проходящем через верховья оврага. Ниже по склону в тальвеге оврага наблюдается выход подземных вод. На этом участке дороги регулярно отмечается деформация дорожного полотна, что предположительно связывалось с близким уровнем подземных вод. Георадарные работы показали наличие здесь на глубинах до 1.5-2 метров границы сильного изменения увлажнения (отражающий горизонт А-А на рисунке 2.3.13). В центральной части профиля на пикетах 250-530 метров выделена линза грунтовых вод, что подтверждается интенсивным дугом кратных отражений на этом интервале разреза ниже границы А-А. На пикетах 300-450 м выше границы А-А отмечается капиллярное поднятие куполовидной формы, достигающее практически поверхности дорожного полотна. Очевидно, что верховья оврага являются водосборной площадью и в его центральной части, через которую проходит георадарный профиль (и где расположена дорога), происходит подъем подземных вод. Для укрепления дорожного полотна на этом участке необходимо устройство дренажной системы.

Пример 9.

Георадиолокационное профилирование начинает применяться и для изучения строения верхней части разреза на реках и озерах. На рис. 2.3.14 показан фрагмент георадарного профиля через реку Угру, полученный группой Московского государственного университета. Использовался радар Зонд-10 с антенной 75 МГц. Максимальная глубина воды на этом участке около 2 метров. Аппаратура располагалась на резиновой лодке. На профиле (см. рис.) точками показана интенсивная поддонная граница, причем на пикетах 30-47 метров отчетливо видно палеоруло. Следует отметить, что возможности применения георадара с водной поверхности в настоящее время мало изучены.

Пример 10.

На рис. 2.3.15 показан фрагмент радарограммы, полученной с антенной 75 МГц на нефтеперерабатывающем заводе в г. Москве группой Московского государственного университета. Целью исследований являлось изучение нефтезагрязнений толщи грунтов. Разрез сложен разнообразными песчано-глинистыми отложениями, залегающими на юрских глинах (см. рис.). На глубине около 5 метров находится уровень грунто-

вых вод (УГВ). На радарограмме были выделены оси синфазности отраженных волн, затем были рассчитаны скорости распространения электромагнитных волн и значения диэлектрической проницаемости для всех выделенных горизонтов (см. рис.). Для слоев, залегающих между отражающими горизонтами 1 - 2 и 2 - 2а значения диэлектрической проницаемости равны 5,8 и 39 соответственно. На этом основании было сделано предположение о том, что понижение значения диэлектрической проницаемости в слое 1-2 обусловлено наличием в нем углеводородов (ϵ в нефти имеет значения 2-3). Таким образом, нефтезагрязненный слой мощностью около 2 метров залегает на водонасыщенных отложениях слоя 2-2а. Полученные данные были также подтверждены электрометрическими наблюдениями.

Пример 11.

На рис. 2.3.16 изображен фрагмент георадарного профиля, полученного фирмой “ДИГЭР” (г. Ноябрьский) в условиях Западной Сибири. Использовался георадар «ЛУЧ» (непромышленный вариант георадара “ЗОНД-10”) с антенной 75 МГц. Целью работ было картирование кровли коренных пород (т.е. выделение «минерального дна») для определения мощности торфа на высохшем болоте. На представленной радарограмме «минеральное дно» (показано стрелками) выделяется интенсивными протяженными осями синфазности на временах 260 - 340 нс (около 14-16 м, см. рис. 2.3.16).

Пример 12.

Георадиолокационное профилирование эффективно применяется при изучении глубины залегания уровня грунтовых вод. На рис. 2.3.17 представлен фрагмент радарограммы, полученной у пос. Торгили (недалеко от г. Тюмень) группой Московского государственного университета. УГВ находится на глубине около 50 см, что подтверждено данными изучения разреза в неглубоком шурфе рядом с профилем и наличием в непосредственной близости от профиля болота со свободной поверхностью воды. Амплитуды отраженной от УГВ волны на порядок превышают амплитуды сигнала от других границ раздела. На этой интенсивной границе (показана на радарограмме точками) формируется интенсивный цуг кратных волн, что резко ограничивает глубинность исследований, особенно при работах с высокочастотными антеннами. Приведенная радарограмма была получена радаром Зонд-12 с антенной 500 МГц. Глубинность исследований в данном случае составила около 0,5 метра, тогда как при отсутствии сильноувлажненных пород в верхней части разреза глубинность при работах с этой антенной достигает, как правило, 4 - 6 метров. Осложняющим фактором при проведении радарных исследований в этом районе является довольно монотонный разрез - песчано-глинистые

отложения мощностью в первые десятки метров, т.е. отсутствие других интенсивных границ, кроме УГВ.

Раздел 4. Георадиолокационные исследования в условиях многолетнемерзлых пород

Основной задачей георадиолокационных работ в этих условиях традиционно является определение границы между мерзлыми и немерзлыми породами.

Физическим основанием для этого является резкая разница в диэлектрических проницаемостях льда и воды. Для частот 50 - 100 мегагерц это 3,3 и 80 соответственно. Такой контраст обеспечивает появление на записях интенсивных отраженных волн, по положению осей синфазности которых и картируется граница между мерзлыми и тальми породами. В работе [11] показана возможность картирования таких границ в интервале 3 - 30 метров по глубине. Существуют опытные образцы аэроварианта метода и проведены работы по определению толщины материкового льда в Гренландии и на Аляске.

Отечественный опыт включает в себя зондирование мерзлых песчаных грунтов на речной косе и промерзшее на глубину до 2 метров торфяное болото [8] зондирование зон сезонного промерзания грунтов на севере Западной Сибири. Здесь верхний слой составлял снег до 1,5 метров мощностью, фирн, торф и супесь общей мощностью до 5 метров и нижний слой - суглинок. В пределах зоны мерзлоты картировалась поверхность суглинка. Значения диэлектрической проницаемости для верхней части и суглинка были определены как 6 и 9-16 соответственно. В районе газопровода Надым - Уренгой проводилось картирование линз вечной мерзлоты на глубинах 2 - 10 метров. Проведено картирование зон распространения жильных льдов на глубинах до 10 метров на полуострове Ямал.

При работе в наземном варианте часто проводится сравнение с электроразведочными данными, сопоставление расчетных значений диэлектрической проницаемости с результатами измерений на образцах. Так в работе [48] приводятся результаты, полученные на частоте 100 мегагерц на севере Канады в дельте реки Маккензи. Оттаявший слой имел диэлектрическую проницаемость 24 - 64, а этот же слой в промерзшем состоянии имел диэлектрическую проницаемость примерно 3, что соответствует скорости распространения электромагнитных волн почти 18 сантиметров в наносекунду.

Образцы вечной мерзлоты в Западной Сибири были отобраны в песчано-глинистых отложениях с глубины в 12 метров. Прямые измерения диэлектрической проницаемости в мерзлой (-8 С) и немерзлой (>0 С)

породе показали значения диэлектрической проницаемости 4,1 и 16,4 соответственно.

Из вышеизложенного можно сделать следующий вывод. Основным элементом, обеспечивающим контрастность слоев по диэлектрической проницаемости в условиях вечной мерзлоты является наличие замерзшей воды. Чем ее больше, тем ниже значения диэлектрической проницаемости и выше значения скорости распространения электромагнитных волн. ПРИМЕЧАНИЕ: при температуре выше 0°C соотношения противоположны - чем больше содержание воды в породе, тем выше значение диэлектрической проницаемости и ниже скорость распространения волн. Высокие значения удельного сопротивления мерзлых грунтов обеспечивают меньшее затухание зондирующего сигнала с глубиной и большую глубинность метода нежели в таком же разрезе, но при положительных температурах.

Георадиолокационные исследования широко применяются и при изучении геологического строения в районах развития многолетнемерзлых пород. На рис.2.4.1(а) показан фрагмент георадарного профиля, пройденного недалеко от г. Мирный (Якутия). Использовался георадар Зонд-10 с антенной 75 МГц. На рис. 2.4.1(б) представлен геологический разрез по профилю по данным бурения. Как было показано выше, глубинность исследований в условиях вечной мерзлоты при прочих равных условиях возрастает в 2-2,5 раза по сравнению с районами где она отсутствует. Георадиолокационный профиль проходит по полю развития долеритов, в которых обнаружен врез (палеодолина), выполненный песчаниками пермского возраста. На радарограмме отчетливо выделяется эта палеодолина и многочисленные оси синфазности отраженных волн в толще долеритов (рис.2.4.1(а)). Природа отражающих границ в вулканогенных породах (долеритах) в настоящее время не ясна. Глубинность исследований составила в этом районе около 25-30 м. Проведенные работы показали, что предварительное георадарное профилирование позволило бы в данных условиях существенно сократить объем разведочного бурения.

Раздел 5. Примеры применения георадиолокационных исследований при поиске локальных объектов.

Пример 1[14].

Математическое моделирование радарограмм в случае наличия пустоты в однородном грунте - задача типичная для инженерных изысканий и археологии. Моделируется ситуация падения импульса заданной формы на поверхности однородной среды с пустотой прямоугольного сечения.

Представленная на рисунке 2.5.1 трасса является интерференцией многократных отражений от верхней границы пустоты и поверхности. Отсюда делается вывод о том, что появление участков “звенящих записей” на радарных профилях может служить картировочным признаком наличия пустот в грунте.

Сделанный вывод - качественная характеристика картировочного признака пустот. Для наполнения его количественным содержанием необходима постановка исследований для ответа на вопросы о:

- а) выделении отражения от нижней границы пустоты;
- б) влиянии поглощения в толще над пустотой;
- в) краевых эффектах для определения размеров пустоты в плане;
- г) соотношениях мощности покрывающего слоя и размеров пустоты с длинами волн зондирующего импульса.

Пример 2 [45].

Физическое моделирование локального объекта - стальная пластина в форме диска диаметром 0.6 метра закопанная в песок на глубину 1 метр. С помощью георадара Pulse Ekko 1V с антеннами 200 мегагерц пройдены профили вправо и влево от проекции диска на поверхность. При этом излучающая антенна была неподвижной над диском, а приемная антенна перемещалась. Обработка проводилась по полному сейсмическому графу. На рисунке 2.5.2 представлены два варианта записей - до двумерного преобразования Радона (слева) и после. Обращается внимание на распределение энергии в зоне расположения объекта и вне ее. Авторы работы считают, что таким образом сформирован образ локального объекта на радарограмме.

Пример 3 [35].

На рисунке 2.5.3 представлены обработанные картины для целого набора сложных объектов под поверхностью в индустриальном районе. Основная идея работы - попытка восстановления не только положения, но и размеров объекта по результатам скоростного анализа георадарных записей. Авторы работы утверждают, что для решения этой задачи более подходит некоторая специальная E-миграция, чем обычная миграция Кирхгофа. Однако обоснование этого подхода и способы решения конкретных задач в работе не приводятся. Обращает на себя внимание образование гиперболических осей синфазности дифрагированных волн от кабелей под напряжением. Геометрические расчеты не позволяют надеяться получить на записях динамически выраженные дифрагированные волны от кабеля диаметром 30-40 мм при излучении волн на порядок большей длины. Скорее всего речь может идти об эффективном сечении электромагнитного поля с цилиндрическими изолиниями напряженности, коаксиально окружающего проводник с током.

Пример 4.

Применение георадиолокационных исследований в комплексе с высокоточной микромагнитной съемкой для картирования мест захоронений жертв репрессий в п. Бутово.

Перед георадиолокационной съемкой стояла задача обнаружения и прослеживания на местности засыпанных траншей. Основанием для применения этого метода является различие в типах записи поля отраженных электромагнитных волн для массива грунта в естественном залегании (ненарушенного) вне траншей и для массива перемешанного (нарушенного) грунта в траншеях. Подобная задача успешно решалась, например, зарубежными исследователями при поиске захоронений в Австралии [46] с использованием прибора, обладающего характеристиками близкими к характеристикам георадара латвийского производства, использованного при данных работах.

При проведенных исследованиях применялся георадар "Зонд-10" производства НПО "Радар" (г. Рига) со следующими техническими характеристиками:

- диапазон частот 20 - 120 мегагерц;
- длительность развертки 50 - 1000 наносекунд;
- напряжение питания 12 В постоянного тока;
- потребляемый ток 1,8 А;
- амплитуда выходного импульса на нагрузке 200 ом - 100 В;
- частота запуска 25 килогерц;
- чувствительность приемника 300 микровольт;
- частота следования выходных сигналов 50 герц.

При наблюдениях использовались антенны длиной 2 метра, обеспечивающие центральную частоту излучения в воздухе 75 МГц, и расстоянием между ними в 1 метр. Антенны перемещались над поверхностью земли на высоте 0,1 метра. Съемка производилась в движении по профилям длиной 38 метров, пересекающим место захоронения через каждые два метра. Скорость передвижения обеспечивала плотность наблюдения в 2-3 сантиметра по профилю. В результате полевых наблюдений получены радарограммы по 20 профилям, пересекающим место захоронения. Большинство из них длиной 38 метров и 4 профиля длиной 20 метров, так как часть площадки была недоступна из-за кустов и шурфа с отвалами.

На рисунке 2.5.4 представлен пример обработанной записи в масштабе времени (левая шкала в наносекундах). Справа приведена шкала глубин в метрах при средней скорости распространения электромагнитных волн в грунте в 10 см/нс, что характерно для моренных суглинков Московского региона.

Обращает на себя внимание заметное различие в типах записи над грунтом в естественном залегании с естественной микрослоистостью и над траншеей с перемешанным грунтом.

Поле отраженных волн в ненарушенном грунте с естественной микрослоистостью, сформировавшейся не менее 1 миллиона лет назад, отличается регулярностью и периодичностью с относительно узким частотным спектром. Поле отраженных волн в перемешанном грунте рассеянное, отличается хаотичностью по профилю и по глубине с более широким частотным спектром, обогащенным высокими частотами.

Для подчеркивания этого факта проведена линия, разделяющая эти два типа записи. Практически эту линию можно считать профилем траншеи. Необходимо отметить возможную ошибку: привязка к глубине зависит от точности знания скорости распространения волн. От места к месту эта скорость может меняться на 10-20%. Поэтому точность глубинных построений не может быть выше, чем 0,5-1 метр. На этом же рисунке видно отражение от уровня грунтовой воды. Поверхность воды выпуклая в сторону траншей как искусственного дренажа.

По этому пути с опорой на выбранный картировочный признак обработаны все полученные материалы. По серии таких разрезов построена карта захоронения в изолиниях глубин ненарушенного грунта (рис. 2.5.5). Сложный рисунок бортов траншей связан с двумя причинами: точность пространственных построений при работе с двухметровыми антеннами не лучше, чем квадрат 2х2 метра, а борта траншей возможно разрушались пока они были открыты.

В качестве независимого метода на этих же профилях были поставлены высокоточные микромагнитные измерения. Наблюдения проводились по сетке 2х2 метра с протонным магнитометром. Для учета вариаций фонового магнитного поля во времени во время съемки работала вариационная станция. На фоне слабомагнитных пород в естественном залегании суммарный магнитный момент в перемешанном грунте приобретает аномальные значения. На рисунке 2.5.6 представлена карта магнитного поля, где аномальные значения показаны темными тонами, и чем больше амплитуда аномалии, тем она темнее. Легко заметить, что рисунок магнитометрической карты практически повторяет рисунок изолиний глубин ненарушенного грунта на рис. 2.5.5.

Таким образом, во-первых, применение метода георадиолокационного подповерхностного зондирования с георадаром решает задачу картирования захоронений и может быть рекомендовано для поиска и разведки подобных объектов, и, во-вторых, результаты высокоточной магнитометрии подтвердили данные георадиолокации - наличие и расположение рвов искусственного происхождения.

Пример 5.

Задача георадиолокационных исследований состояла в поиске остатков фундаментов городской усадьбы прошлого века, снесенной при перепланировке территории вблизи Страстного бульвара в Москве. Работы проводились группой Московского государственного университета.

Применялось профилирование обследуемой площадки с георадаром “ЗОНД-12” и антенной 900 мегагерц. Сеть профилей была спроектирована по архивным планам усадьбы.

На рисунке 2.5.7 представлены два фрагмента георадарных профилей, пересекающих два различных участка ленточного фундамента. На рисунке 2.5.7(а) каменная кладка выражается появлением на относительно высокочастотной записи участка с более, чем на порядок, низкой преобладающей частотой волн. Верхняя кромка выделяется по началу первой отрицательной фазы низкочастотного колебания. При скорости распространения волн в приповерхностном слое в данном месте профиля 14 см/нс глубина верхней кромки 90-100 см. На рисунке 2.5.7(б) картина прямо противоположная. Верхняя кромка фундамента на глубине 50 см. выделяется на записи относительно низкочастотных колебаний по появлению участка с преобладанием примерно в пять раз более высокочастотных волн.

Необходимо отметить, что и в первом и во втором случае ширина аномальных зон в масштабе профиля - 70 см., что соответствует действительной ширине ленты фундамента.

Различие в изображениях данного объекта в поле георадара для разных участков небольшой площадки можно попытаться объяснить разной степенью высыхания грунта и фундамента после длительного периода дождей из-за расположения существующих зданий, наличия или отсутствия кустов и больших деревьев. Более обоснованное объяснение отмеченного явления в настоящий момент отсутствует.

Пример 6 [17].

Целью исследований было изучение карстовых пещер и пустот в Испании, где карстовые явления представляют серьезную опасность для человеческой деятельности и распространены более, чем на 50% территории. Разнообразные способы поиска и исследований пещер развивались и развиваются в настоящее время. Георадар признан одним из наиболее перспективных методов как бесконтактный и неразрушающий, обладающий достаточными глубинностью и разрешающей способностью, автономный и мобильный, не требующий больших затрат времени на собственно полевые измерения, пригодный и для пешеходной съемки и для работы с транспортного средства. В работе был использован прибор Pulse Ekko IV с набором антенн от 25 до 200 мегагерц.

На рисунке 2.5.8 приводятся примеры изображения пещер и пустот на георадарных разрезах в различных геологических условиях, На рисунке 2.5.8(а) показана незаполненная пустота в вулканогенных отложениях (антенна 100 МГц). Отмечено, что только тщательный анализ ряда сходных ситуаций и заверка позволяют "узнать" на записи полость. На рисунке 2.5.8(б) показан профиль над краем неглубоко залегающей пещеры в известняках Наварры. Отчетливо выделяется край свода пещеры. Расположенные ниже почти горизонтальные оси синфазности связываются с отражениями от пола пещеры. Размеры пещеры 2x1.5x5.5 метров.

На рисунке 2.5.8(в) представлен профиль через пещеру в известняках Соррии, полученный с антенной 100 мегагерц и шагом между трассами 0.1 метра. Справа от разреза приведена шкала глубин для скорости распространения волн 12см/нс, определенной по методу общей глубинной точки.

На рисунке 2.5.8(г) представлен георадиолокационный разрез с отражениями от кровли карстовой пещеры в известняках, заполненной глинистым материалом. Контрастная по диэлектрической проницаемости граница между известняком и глиной дает кратные отражения на временах 300 и 450 наносекунд соответственно.

Иначе выглядит ничем не заполненная пещера - результат выщелачивания гипсов. Георадиолокационный профиль представлен на рисунке 2.5.8(д). Видны криволинейные оси синфазности отраженных от кровли волн и субгоризонтальные оси отражений от пола пещеры.

На основании вышеизложенного в работе делается вывод о применимости радара для картирования пещер различного происхождения в различных породах, а также о необходимости набора материала и типизации изображений различных пещер на георадиолокационных профилях.

Пример 7.

Опытно-методические исследования проводились группой Московского государственного университета с целью выяснения возможности использования георадиолокации для определения длины железобетонной сваи в грунте.

Использовался георадар "ЗОНД-12" с антенной 500 мегагерц. Методика работ - непрерывное профилирование вплотную к оголовку сваи. В качестве опытного объекта бала выбрана 12-ти метровая свая квадратного сечения 300x300 мм вертикально забитая в грунт на глубину 9 метров. Другие объекты в радиусе 30 метров отсутствовали. На рисунке 2.5.9 представлен фрагмент георадиолокационного профиля вблизи сваи. Интенсивные оси синфазности оканчиваются на временах 180-200 наносекунд, что при скоростях распространения волн в московском приповерхностном разрезе 10-11 см/нс может быть идентифицировано как

конец сваи. Обращает на себя внимание характерный рисунок разреза - резкое ослабление записи при прохождении антенны непосредственно вблизи сваи. Ширина этой зоны соответствует 20 сантиметрам - стороне арматурного квадрата внутри сваи. Объяснение полученной картины с точки зрения чисто волновых процессов распространения волн не представляется возможным. Скорее всего, объяснение необходимо искать в решениях соответствующих уравнений для ближней зоны с образованием эффективного источника из антенн, арматуры сваи и прилегающего грунта. Однако продвижение в решении практической задачи может идти параллельно эмпирическим путем, то есть путем набора картин-масок для разных свай известной длины в различных условиях.

Пример 8.

Опытно-методические исследования проводились группой Московского государственного университета с целью выяснения возможности использования георадиолокации для обследования приповерхностной части разреза на площадках нефтеперекачивающих станций в условиях Западной Сибири. Одной из задач было картирование разнообразных трубопроводов.

Для исследований использовался георадар "ЗОНД-12" в том числе и с антенной 500 мегагерц. Методика работ - непрерывное профилирование. В качестве опытного объекта был выбран профиль поперек целой группы труб различного назначения. В условиях песчано-глинистой толщи, практически полностью водонасыщенной, с низким удельным электрическим сопротивлением порядка 100 ом. и высокой степенью затухания электромагнитных волн, глубинность радара с антенной 500 мегагерц падает до 1.5 - 2 метров. Однако, даже в этих неблагоприятных для георадиолокации условиях, можно картировать различные трубы, даже малых диаметров неглубокого заложения.

На рисунке 2.5.10 представлена необработанная запись по профилю длиной 40 метров. Вершины характерных гиперболических осей синфазности дифрагированных волн помечены буквой Т. Хорошо видно, что чем мельче залегает труба, тем более четко прослеживаются ветви гипербол. Если же заложение трубы находится на пределе глубинности исследований в данном случае, еле видна лишь верхняя часть гиперболы. Необходимо отметить, что вторая слева гиперболическая ось синфазности дифрагированных волн принадлежит единственной на этом профиле трубе не с нефтепродуктами или водой, а с пучком токоведущих линий - кабелей. Возникает вопрос о том, с чем связана особенность этой дифрагированной волны, выраженная в меньшем видимом периоде колебаний (большей частоте) и многофазности колебаний в сравнении с другими. Не имея обоснованного ответа на этот вопрос в настоящее время, можно

тем не менее использовать отмеченный факт для разбраковки дифрагирующих объектов на трубопроводы и токоведущие линии.

Пример 9.

Опытно-методические исследования проводились группой Московского государственного университета на опытном полигоне НииЖТ с целью выяснения возможности использования георадиолокации для обследования приповерхностной части разреза под железнодорожным полотном. Одной из задач был поиск металлических предметов на небольших глубинах под железнодорожным путем. Для исследований использовался георадар "ЗОНД-12" с антенной 1 ГГц.

Участок полигона представлял собой отрезок стандартного железнодорожного полотна с деревянными шпалами, в песчаную подушку под которыми были закопаны разнообразные металлические предметы. На рисунке 2.5.11 представлен фрагмент георадарного профиля после обработки и с задержкой 10 наносекунд. Цифрой 2 помечена вершина гиперболической оси синфазности дифрагированных волн от железной пластинки размером 20x20 см., закопанной на глубину 0.5 метра горизонтально. Цифрой 1 помечена вершина гиперболической оси синфазности дифрагированных волн от железной пластинки размером 40x40 см., закопанной на глубину 1 метр наклонно. Обращает на себя внимание различие в динамическом выражении ветвей гиперболы в этих двух случаях. При дифракции на горизонтальной пластине гипербола динамически симметрична, а при дифракции на наклонной пластине волны на ветви гиперболы, направленной в сторону наклона пластины, оказываются гораздо более интенсивными.

Необходимо отметить, что поставленная задача практически не решается с помощью индукционных металлоискателей из-за несоизмеримости масс металла рельсов и искомых предметов.

Раздел 6. Примеры применения георадиолокационных исследований для дефектоскопии инженерных сооружений.

Пример 1.

Георадиолокационные исследования для обнаружения дренажных труб и кабельных переходов под искусственным покрытием взлетно-посадочных полос на аэродромах.

Работы проводились с георадаром "Локас-2", производства фирмы "Локас" (ВНИИРТ, г. Москва). Использовались дипольные антенны с центральной частотой излучения в воздухе 75 мегагерц в режиме непрерывного перемещения антенн на базе 1 метр вдоль поверхности взлетно-посадочной полосы (ВПП).

Покрытие ВПП на данном участке представлено (сверху вниз):

1. Цементно-бетон со стыковыми соединениями толщиной 0.24 метра;
2. Песчано-гравийная смесь толщиной 0.76 метра;
3. Тканевый гидроизолятор толщиной менее 0.02 метра.

Таким образом, суммарная толщина искусственного покрытия, лежащего на уплотненном естественном грунте составляет, как правило, 1 метр.

Дренажная система состоит из асбоцементных или керамических труб диаметром 200 мм., уложенных в траншеи шириной 1 метр, заполненные песком, на глубине 1 - 1.5 метра в верхней части уплотненного естественного грунта.

Кабельные переходы под ВПП устроены следующим образом: в траншее размером 2.6 м. по горизонтали и глубиной 1 метр, считая от поверхности уплотненного естественного грунта, уложены две связки по 12 асбоцементных труб диаметром 100 мм. в каждой, в которых находятся кабели.

На рисунке 2.6.1 показан фрагмент георадарного профиля через систему дренажных труб под ВПП. На временах около 24 наносекунд (глубине в 1.4 метра при скорости распространения электромагнитных волн 12 см/нс) отчетливо выделяются субвертикальные зоны резкого изменения конфигурации горизонтальных осей синфазности отраженных волн с характерными фрагментами гиперболических осей синфазности дифрагированных волн на больших временах. Расстояния по горизонтали между дренажными трубами 5.5 метра, что соответствует проектной документации.

На рисунке 2.6.2 показан фрагмент георадарного профиля над кабельным переходом под ВПП. На временах более 25 наносекунд (глубине около 1.5 метра при скорости распространения электромагнитных волн 12 см/нс) отчетливо выделяется прямоугольная зона резкого ослабления записи, на “углах” которой присутствуют характерные фрагменты гиперболических осей синфазности дифрагированных волн.

Одним из результатов этой опытно-методической работы является вывод о возможности изучения массива естественных грунтов под железобетонным покрытием с помощью георадиолокации в метровом диапазоне волн.

Пример 2.

Задача георадиолокационных исследований в данном случае состояла в возможно более точном определении толщины слоя асфальтобетонного покрытия автодорог, лежащего на уплотненной песчано-гравийной подушке. Опытные-методические работы проводились группой Московского государственного университета совместно с группой СО-ЮЗДОРНИИ. Применялся георадар “Зонд-12” с антенной 1 ГГц.

Методика наблюдений - непрерывное профилирование со скоростью перемещения и накоплением сигналов при записи, обеспечивающими получение трассы на каждый сантиметр профиля. Для привязки отражений и определения скорости распространения волн на пикете 0 профиля был пробурен шпур с отбором керна и замерена толщина асфальтобетонного покрытия. При скорости распространения волн 10 см/нс и частоте излучения 1 гигагерц длина волны составит 10 сантиметров. Точность определения толщины покрытия в половину длины волны - 5 см. (50% средней проектной толщины покрытия) очевидно недостаточна для решения производственной задачи. С целью повышения разрешающей способности к исходным материалам была применена операция деконволюции, которая позволила “сжать” импульс, формирующий запись и добиться разрешающей способности в 1 см., удовлетворяющей требованиям задачи.

На рисунке 2.6.3 представлен георадиолокационный разрез после обработки. Начальная часть записи до целевой границы - подошвы асфальтобетона резко ослаблена. Граница выделяется по первой интенсивной (черной) фазе отражений. Заметны неровности границы, связанные с проникновением горячей массы асфальтобетона в пространства между отдельными кусками гравия при укладке. Ниже границы - на больших временах на временном разрезе запись отражает структуру уплотненной песчано-гравийной подушки - отсутствие протяженных осей синфазности, множество вершин слабых динамически гипербола, связанных с дифракцией на отдельных кусках гравия.

Таким образом, показана принципиальная возможность решения поставленной производственной задачи с помощью георадара.

Пример 3.

Опытно-методические работы по определению возможностей высокочастотной георадиолокации при обследовании стен. Работы проводились группой Московского государственного университета совместно с группой фирмы “РИТА”, производящей укрепление стен и фундаментов зданий буронабивными сваями и шпурами с применением разрядно-импульсной технологии.

Применялся георадар “Зонд-12” с антенной 1 ГГц. Методика наблюдений - профилирование по поверхности стены, толщина и устройство которой известны.

На рисунке 2.6.4 представлен фрагмент георадарного профиля по стене толщиной 82 см. в основном старой кирпичной кладки (г. Москва, Гостинный двор), в которой по линии профиля пробурены наклонные шпуры диаметром 50 мм. На записи, где удалены синфазные помехи, связанные с прямой волной, видны гиперболы дифрагированных волн от

шпуров. Интенсивная отраженная волна на временах 12 -15 наносекунд обрывается дальней поверхностью стены.

Обращает на себя внимание различие в форме оси синфазности отраженных волн от дальней поверхности стены на большей части профиля и правой его части, где в стене была ниша, заложенная современным кирпичом в относительно недавнее время. Ось синфазности отраженных волн от поверхности старой кладки неровная, слабоизогнутая. Это связано не с неровностью поверхности (она доступна визуальному осмотру и вполне ровная), а с ее структурой - внешний ряд кирпичей и цемента между ними покрыт сетью микротрещин и немного выщерблен. Это приводит к неравномерному повышению объема воздуха в приповерхностной части кладки и соответственному уменьшению скорости распространения волн, что на временном разрезе создает эффект "неровности" оси синфазности отражений. Относительно свежая кладка лишена этих дефектов и скорость распространения волн более выдержана в приповерхностном слое, что и выражается в ровной оси синфазности.

На этом примере хорошо выражен некий общий поисковый признак выделения или идентификации на георадарной записи отражений от поверхности раздела между любым материалом и воздухом - с отрицательным коэффициентом отражения, близким к единице. Если исходный посылаемый в среду импульс начинался с положительной фазы (положительного полупериода синуса, "черной полосы"), то искомое отражение будет начинаться с отрицательной фазы (отрицательного полупериода синуса, "белой полосы") и будет самым интенсивным среди других возможных отражений в среде.

На рисунке 2.6.5 представлен фрагмент необработанной записи по профилю вдоль кирпичной стены толщиной 40 см., покрытой с двух сторон арматурной сеткой и тонким слоем штукатурки. Отчетливо видны вершины гипербола дифрагированных волн от пересекаемых профилем прутков арматуры с ближней к антенне стороны стены.

Основная цель этого примера - показать, что несмотря на наличие вблизи антенн большого объема металла и формальное "закорачивание" антенн, удастся выделить даже на полевой записи слабые гиперболы дифрагированных волн от арматуры на дальней поверхности стены и слабые отражения от дальнего края стены.

Список литературы к главе 2.

1. Афанасьев И.И., Золотарев В.П., Кофман Л.М. Решение обратной задачи подповерхностного радиолокационного зондирования на основе годографов электромагнитных волн. В сборнике: "Теория и техника радиолокации, радионавигации и радиосвязи в гражданской авиации" Рига, РКИИГА, 1988, стр. 38 – 46.

2. Баев Ю.В., Золотарев В.П., Кофман Л.М. К оценке затухания зондирующего сигнала и глубинных возможностей аппаратуры радиолокационного профилирования торфяных месторождений. В сборнике: "Теория и техника радиолокации, радионавигации и радиосвязи в гражданской авиации" Рига, РКИИГА, 1988, стр. 46 - 50.
3. Золотарев В.П., Кофман Л.М., Сычев Г.Н., Финкельштейн М.И. Измерение глубины залегания уровня грунтовых вод в песчаных отложениях методом радиолокационного зондирования. Водные ресурсы, 1982г., N 4, стр. 176 - 179.
4. Золотарев В.П., Кофман Л.М. Экспериментальные исследования практических возможностей импульсного радиолокационного метода для изучения тонкослоистой структуры земных недр. В сборнике: "Теория и техника радиолокации, радионавигации и радиосвязи в гражданской авиации" Рига, РКИИГА, 1985, стр. 64 - 69.
5. Кофман Л.М. Экспериментальное определение электрических характеристик сред с большим водосодержанием по результатам радиолокационного зондирования торфяных месторождений. В сборнике: "Теория и техника радиолокации, радионавигации и радиосвязи в гражданской авиации" Рига, РКИИГА, 1984, стр. 42 - 45.
6. Теория, техника и методика подповерхностных радиолокационных исследований - руководство к приборам серии "Зонд". НПО РАДАР, Рига, 1993.
7. Финкельштейн М.И., Мендельсон В.А., Кутев В.А. Радиолокация слоистых земных покровов. М, Сов. Радио, 1977, 176 с.
8. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М, Недра, 1986, 128 с.
9. Финкельштейн М.И., Карпухин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н. Подповерхностная радиолокация. М, Радио и Связь, 1994, 216 с.
10. Al-Chalabi M. An analysis of stacking, RMS, average, and internal velocities over a horizontally-layered ground. Geophysical Prospecting, v.22, N3, 1974, pp.458-475.
11. Annan A.P., Davis J.L. Impuls radar sounding in permafrost. Radio Science, v.11, N4, pp. 383-394.
12. Bano M. Modeling of dielectric losses and inverse Q imaging of ground penetrating radar waves. M013, EAGE 58-th Conference and Technical Exhibition, 3-7June, Amsterdam, 1996.
13. Baum C.E. Technology for Transient and Broad-Band Analysis and Synthesis of Antenna and Scatterers. Proc. IEEE, vol. 64, N11, Nov. 1976, pp.1598-1616.
14. Campbell T., Tealby J.M., Giannopoulos A. Signal Analysis of GPR Data of Voids in Archaeology. EAEG, 55 Meeting, Stavanger6 Norway, 7-11 June, 1993.

15. Campbell T., Tealby J.M. Resonance based target recognition for ground penetrating radar. EAEG, 56 Meeting, Vienna, Austria, 6-10 June, 1994.
16. Carcione J.M. GPR forward modeling applied to archaeological and engineering problems. M019, EAGE 58-th Conference and Technical Exhibition, 3-7 June, Amsterdam, 1996.
17. Casas A., Lazaro R., Vilas M., Busquet E. Detecting Karstic cavities with Ground Penetrating Radar at different geological environments in Spain 6th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 96) September 30-October 3, 1996, Sendai, Japan.
18. Cook J.C. Radar transparencies of mine and tunnel rocks. *Geophysics*, 1975, v. 40, N5, pp. 865-885.
19. Davis J.L., Killey R.W.D., Annan A.P., Vanghan C. Surface and Borehole Ground-Penetrating Radar Surveys for Mapping Geological Structure. NWWA/EPA, conf., 1984, San-Antonio, Texas, Feb. 7-9, pp. 681-712.
20. Davis J.T., Annan A.P. Ground-penetrating Radar for High-resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. *Geophysical Prospecting*, 1989, v. 37, pp. 531-552.
21. Fisher E., McMechan C.A., Gorman G.A., Cooper A.P.R., Aiken C.L.V., Ander M.E., Zumberg M.A. Determination of bedrock tomography beneath the Greenland ice sheet by 3-D imaging of radar sounding data. *Journal of Geophysical Research*, 1989, v. 94, pp. 2874-2882
22. Fisher E., McMechan C.A., Annan A.P. Acquisition and processing of wide-aperture Ground-penetrating Radar Data. *Geophysics*, 1992, v. 57, pp. 495-504.
23. Fokkema J.T., Van den Berg P.M. *Seismic Application of Acoustic Reciprocity*. Elsevier, Amsterdam.
24. Fruhwirth R., Mueller R. Application of Ground Penetrating Radar to Geotechnical Problems. EAEG, 56 Meeting, Vienna, Austria, 6-10 June, 1994.
25. Giannopoulos A., Tealby J.M., Tsokas G. Ground Probing Radar - a Brief Account of its Merits and Limitations Based on Case Histories in Northern Greece. 2nd Symposium of the Greek Archaeometry Society, Thessaloniki, 26-27 March, 1993.
26. Grasmuneck M., Horstmeyer H. Seismic processing on single- and multi-offset ground penetrating radar. European Association of Exploration Geophysicists 56 Meeting, Vienna, Austria, 6-10 June 1994.
27. Harry M.J., Young R., Fisher T.G., Smith D.G., Meyers A.R. Ground penetrating radar of Eskers, Kame traces, and Moraines: Alberta and Saskatchewan, Canada. 6th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 96) September 30-October 3, 1996, Sendai, Japan.
28. Hoekstra P., Deloney A. Dielectric properties of soil at UHF and microwave frequencies. *Journal of Geophysical Research*, v. 79, N11, 1974, pp. 1699-1708.
29. Houck R.T. Measuring Moisture Content Profiles Using Ground-Penetrating Radar. NWWA/EPA conf. 1984, San-Antonio, Texas, Feb. 7-9,

pp. 637-653.

30. Liang Zie Hu. Imaging Pipelines in 3-D by Ground-Penetrating Radar. SEG, 62 Meeting, October 25-29, 1992, pp.352-355.
31. De Vore. National Park Service Training in Geophysical Techniques for Archaeology. SEG, 62 Meeting, October 25-29, 1992, pp. 364-366.
32. Oelsner C., Donner F., Forkmann B., Gote W. Localization of common graves by integration of resistivity, EM and GPR data. C008, EAGE/EAPG 57-th Conference and Technical Exhibition, Glasgow, 1995.
33. Rocca F., Cafforio C., Prati C. Synthetic aperture radar: A new application for wave equation techniques. *Geophysical Prospecting*, v. 37, 1989, pp. 809 - - 830.
34. Roberts R.L., Daniels J.J. 3-Data Collection and Analysis for High-Resolution GPR Studies. SEG, 62 Meeting, October 25-29, 1992, pp.360-363.
35. Stole C., Ristow D., Nick K-P. Eccentricity - migration for the imaging of Pipes in Radar reflection Data. EAEG 56 Meeting, Vienna, Austria, 6-10 June 1994.
36. Scheffers B.C., Csonka M. Georadar surveys in ice-pushed Morain areas in the Netherlands - processing and interpretation. EAEG 56 Meeting, Vienna, Austria, 6-10 June 1994.
37. Smith D.G., Jol H.M. Ground-penetrating Radar investigations of a Lake Bonneville delta, Provo level, Brigham City, Utah. *Geology*, v.20, 1992, pp.1083-1086.
38. Stoffa P.L., Fokkema J.T., de Luna Freire R.M., Keissinger W.P. Split-step Fourier migration. *Geophysics*, v. 55, 1990, pp. 410-421.
39. Ter Doest P.J., Vercrujisse P.A., Fokkema J.T. Biangular Decomposition of Seismic Data. SEG, 63 Meeting, Washington, D.C., USA, pp. 222-225.
40. Tillard S., Hollender F., Jullien F. Dispersion of GPR waves. M018, EAGE 58-th Conference and Technical Exhibition, 3-7 June, Amsterdam, 1996.
41. Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P. Electromagnetic determination of soil water content. Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, v. 16, N3, 1980, pp. 574-582.
42. Underwood J.E., Eales J.W. Detecting a Buried Crystalline Waste Mass with Ground-Penetrating Radar. NWWA/EPA conf. 1984, San-Antonio, Texas, Feb. 7-9, pp.654 - 655.
43. Van Overmeeren R.A. Georadar for hydrogeology. EAEG 55 Meeting, Stavanger, Norway, 7-10 June 1993.
44. Van Overmeeren R.A. Monitoring of a water well field by Georadar. EAEG 56 Meeting, Vienna, Austria, 6-10 June 1994.
45. Vercrujisse M., Vermaas J.W., Schoolmeesters and Csonka M. Ground penetrating radar data interpretation in the Radon Space. EAEG 56 Meeting, Vienna, Austria, 6-10 June 1994.

46. Vernon C. Wilson, Cris I.P. Frampton and Peter Randolph. Location of burial sites using ground- penetrating radar surveys in Rottnest Island, Western Australia. SEG International Exposition and 64 Meeting, October 23-28, 1994 Los-Angeles, NS 1.5 . p. 563.
47. Weymouth J.M. Archaeological site surveying at the University of Nebraska. Geophysics, v. 51, 1986, pp. 538-552.
48. Wong J., Rossiter J.R., Olhoeft G.R. Permafrost: electrical properties of the active layer measured in situ. Canadian Journal of Earth Science, 1977, v. 14, N4 (Part 1), pp. 582-586.
49. Wood Legh, Kerry Hennon. Parameter testing of GPR for Geological Investigations in Poor-Data Area. SEG 63 Meeting, Washington, USA, September 26-30 1993.
50. Wright D.L., Olhoeft G.R., Watts R.D. Ground-Penetrating Radar Studies on Cape Cod. NWWA/EPA conf. 1984, San-Antonio, Texas, Feb. 7-9, pp. 666-680.
51. Wynn J.C. Archaeological prospection: an introduction to the special issue. Geophysics, v. 51, 1986, pp. 533-537.

Заключение.

В заключение этого далеко не полного обзора геофизических методов исследований приповерхностной части естественного разреза и инженерных сооружений необходимо подчеркнуть еще раз перспективность применения в основном бесконтактных и неразрушающих технологий исследований.

1. Основные искомые особенности строения и состояния грунтов и инженерных сооружений в той или иной степени отражаются в результатах геофизических исследований одним методом или комплексом методов.

2. Инженерная геофизика решает, по крайней мере, основную задачу геофизики вообще - корреляция свойств и особенностей строения среды между скважинами или опорными точками, где эти свойства и особенности определены инженерно-геологическими методами.

3. В подавляющем большинстве случаев геофизика дает непрерывный разрез среды - конфигурацию границ раздела и некоторые количественные характеристики среды.

4. Скорость сбора полевой информации во много раз превышает скорость сбора информации другими способами.

5. Стоимость геофизических исследований во много раз меньше стоимости бурения.

Тем не менее, востребованность геофизических методов при решении задач, связанных с изучением верхней части геологического разреза и инженерных сооружений в настоящее время все еще ограничена и в нашей стране и, в меньшей степени, за рубежом. Среди многих причин такого положения, на наш взгляд, можно выделить три основных.

1. Геофизические методы - косвенные методы исследований, их результаты в принципе не могут вызывать такое же доверие как, например, результаты бурения, которые можно “пощупать”.

2. Результаты геофизических методов, несмотря на достаточно разработанный физический аппарат с количественными решениями соответствующих математических задач, после цифровой обработки по многим характеристикам неоднозначны и нуждаются в интерпретации, то есть объяснении связи между полученными изображениями объекта и его характеристиками в физическом поле и параметрами собственно объекта. Для этой процедуры требуется опытный специалист-интерпретатор, а сам процесс интерпретации несет иногда большую долю субъективных решений.

Здесь прослеживается аналогия с рентгеноскопией, томографией и УЗИ в медицине, где не вызывают ни вопросов, ни недоверия “мутные картинки” для неспециалистов и необходимость во враче-рентгенологе,

способном эти картинки объяснить, то есть провести процесс интерпретации.

3. Большим тормозом для внедрения геофизических исследований в инженерную практику являются не оправдавшиеся, хотя и необоснованные, надежды заказчиков геофизических исследований на некий подземный телевизор, способный дать точное изображение исследуемого объекта с точным указанием его свойств при сохранении низкой стоимости и самого телевизора и работ с его применением.

Авторы обзора выражают надежду, что эта работа будет способствовать более широкому внедрению, то есть по определению “движению с преодолением сил сопротивления”, геофизических методов изучения приповерхностной части разреза и инженерных сооружений в практику инженерно-геологических и инженерных исследований.