

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины»

**А. П. ГУСЕВ**

**ТЕХНИЧЕСКАЯ  
И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОФИЗИКА  
ЧАСТЬ 1. ТЕХНИЧЕСКАЯ ГЕОФИЗИКА**

Рекомендовано учебно-методическим объединением  
по образованию в области горнодобывающей промышленности  
пособию «Техническая и экологическая геофизика.  
Часть 1. Техническая геофизика»

В 2 частях

Гомель  
ГГУ им. Ф. Скорины  
2024

УДК 550.3(076)  
ББК 26.20я73  
Г962

Рецензенты:

доктор геолого-минералогических наук А. Н. Галкин,  
кандидат геолого-минералогических наук А. М. Ефимов

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
учреждения образования «Гомельский государственный  
университет имени Франциска Скорины»

**Гусев, А. П.**

Г962      Техническая и экологическая геофизика. Часть 1. Техни-  
ческая геофизика : пособие / А. П. Гусев ; М-во образования  
Республики Беларусь, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. –  
Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2024. – 86 с.  
ISBN 978-985-32-0019-5

Пособие включает тематику занятий, вопросы для самостоятель-  
ной работы, практические работы по дисциплине «Техническая и эколо-  
гическая геофизика». В части 1 рассмотрены объекты и особенности  
технической геофизики, археологическая геофизика, сельскохозяй-  
ственная геофизика, геофизика подземных и наземных коммуникаций,  
геофизика технических систем.

Адресовано магистрантам специальности 1-51 80 04 «Геология».

**УДК 550.3(076)**  
**ББК 26.20я73**

**ISBN 978-985-32-0019-5**

© Гусев А. П., 2024  
© Учреждение образования  
«Гомельский государственный университет  
имени Франциска Скорины», 2024

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1 Объекты и особенности технической геофизики.....	7
1.1 Объекты технической геофизики.....	7
1.2 Особенности малоглубинных методов геофизики.....	9
2 Археологическая геофизика.....	25
2.1 Общие сведения.....	25
2.2 Геофизические методы в археологии.....	29
3 Сельскохозяйственная геофизика.....	38
3.1 Геофизические методы при изучении почвенного покрова..	38
3.2 Геофизика мелиоративных систем.....	43
3.3 Современные тенденции в сельскохозяйственной геофизике.....	45
4 Геофизика подземных и наземных коммуникаций.....	49
4.1 Геофизика подземных коммуникаций.....	49
4.2 Геофизика наземных коммуникаций.....	57
5 Геофизический контроль технических систем.....	61
5.1 Геофизические методы мониторинга зданий и сооружений.	61
5.2 Геофизические методы мониторинга плотин.....	67
6 Практические работы по технической геофизике.....	73
6.1 Микромагнитная съемка археологических объектов.....	73
6.2 Изучение движения грунтовых вод методом естественного электрического поля.....	74
6.3 Изучение поля техногенных блуждающих токов.....	75
6.4 Определение места коррозии трубопровода методами электроразведки.....	76
6.5 Определение трассы трубопровода и его глубины методом электрического профилирования.....	77
Литература.....	79
Приложение А. Физические свойства горных пород и грунтов..	82
Приложение Б. Геоэлектрические параметры почв.....	84

## ВВЕДЕНИЕ

Техническая и экологическая геофизика как дисциплина относится к направлению экологической геологии, которое изучает экологические свойства и функции литосферы, закономерности их формирования и пространственно-временного изменения под влиянием природных и техногенных факторов в связи с жизнью и деятельностью биоты и прежде всего человека. В рамках этого направления литосфера изучается как основной абиотический компонент экосистем. В структуре экологической геологии выделяют экологическую геофизику, которая решает задачи, связанные с изучением геофизических полей природного и техногенного происхождения, их отклонения от нормы и воздействие на биоту (Трофимов, Зилинг, 2002).

В этих исследованиях верхняя часть литосферы рассматривается как эколого-геологическая система, под которой понимается определенный объем литосферы с функционирующей непосредственно в нем или на его поверхности биотой, включая человека и продукты его труда. Эколого-геологическая система – многокомпонентная и динамическая система, включающая горные породы, подземные воды, нефть, газы, геохимические и геофизические поля, геологические процессы (Трофимов, Зилинг, 2002; Трофимов, 2013). Современное состояние эколого-геологических систем формировалось под влиянием нескольких групп факторов: геологического развития в прошлом и современного геодинамического режима, современного климата, антропогенных (техногенных) воздействий. При изучении эколого-геологических систем исследуются такие подсистемы, как литосфера-технические сооружения и литосфера-биота.

Эколого-геологические условия – обстановка, создаваемая комплексом современных факторов, влияющих на функционирование биоты, человека и его техники в рамках эколого-геологической системы. В общем случае этот комплекс включает ряд составляющих – факторов (компонентов) эколого-геологических условий: геологическое строение местности, рельеф, гидрогеологические условия, мерзлотные условия, геохимические условия, геофизические условия, ландшафтные условия, современные геологические процессы. Закономерное сочетание этих факторов формирует эколого-геологический облик любого региона (Трофимов, 2013).

Одним из важнейших инструментов изучения эколого-геологических условий выступает техническая и экологическая геофизика.

Техническая и экологическая геофизика относятся к малоглубинной геофизике – относительно новому научно-практическому направлению разведочной геофизики, которое занимается изучением приповерхностной части земной коры. Геофизические методы исследования долгое время применялись лишь как средство глубинного поиска и разведки залежей полезных ископаемых на основе различия их физических свойств от вмещающей среды. По А. К. Манштейну (2002) методы разведочной геофизики, обладая уникальными возможностями детального автоматизированного сбора измеряемых параметров естественных и управляемых искусственных физических полей в разных геосферах Земли, служат совершенным инструментом обязательной части изысканий для целей строительства и при изучении окружающей среды для ее охраны и контроля.

Особенностями исследований малоглубинной геофизики являются:

- небольшие глубины и резкая неоднородность изучаемой геологической среды;

- влияние природных экзогенных и антропогенно-техногенных процессов;

- наличие обширного класса решаемых задач в рамках геологических и технических дисциплин (гидрогеологии, почвоведения, инженерной геологии, горного дела, мерзлотоведения, гляциологии, технических средств изучения погруженных объектов, археологии и др.) с хорошо разработанными прямыми методами исследований (Хмелевский и др., 2005).

Особенностью методов исследований малоглубинной геофизики является использование полей и методов небольшой, но разной глубинности:

- геофизические методы «близкого действия» (ядерные, скважинные);

- аэрокосмические методы видимого, инфракрасного, радиотеплового и более высоких диапазонов частот (тепловые, радиометрические);

- малоглубинные методы (радиоволновые, сейсмоакустические);

- микросъемка глубинных полей (гравитационного, геомагнитного, сейсмического, постоянного электрического) на небольших участках (Хмелевский и др., 2005).

При наземных малоглубинных исследованиях используют множество геофизических методов: сейсмо-, электро- и магниторазведку, ядерную геофизику, термометрию. Особенности малоглубинных исследований по сравнению с другими видами разведочной геофизики

связаны со спецификой решаемых задач и условиями проведения работ. Целью малоглубинных исследований является изучение состояния и свойств горных пород как компонентов окружающей среды. Малоглубинную геофизику широко применяют для контроля различных операций, выполняемых в строительстве и обслуживании сооружений.

Малоглубинные геофизические исследования выполняются в специфических условиях верхней части разреза, характеризующейся резкой вертикальной и горизонтальной изменчивостью свойств пород и их анизотропией, а также невыдержанностью границ, значительными температурными градиентами и переменным фазовым составом заполнителя. В работах предъявляются повышенные требования к точности построения границ и оценке свойств пород. Результаты интерпретации оперативно контролируются горными работами. Указанные требования и условия привели к созданию и применению специальных методических приемов, способов обработки, а также интерпретации материалов. Малоглубинная геофизика – продукт своеобразного изменения разведочной геофизики, развивающейся, как и любая другая наука, по следующей схеме: новые задачи → новые технологии (Манштейн, 2002).

# 1 ОБЪЕКТЫ И ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ

## 1.1 Объекты технической геофизики

Объектами исследования технической геофизики являются строительные конструкции, геотехнические сооружения, природные и техногенно-преобразованные грунты, а также физические поля техногенного происхождения. Высокая интенсивность техногенных полей может приводить к изменению свойств грунтов и материалов и ускорять течение ряда неблагоприятных процессов и явлений, таких как суффозия, склоновые процессы, просадки и др. Развитию технической геофизики способствовали ряд положений СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства», устанавливающие общие технические требования и правила, состав и объемы инженерно-геологических изысканий, выполняемых на соответствующих этапах (стадиях) освоения и использования территории: разработка предпроектной и проектной документации, строительство (реконструкция), эксплуатация и ликвидация (консервация) предприятий, зданий и сооружений (Капустин, Владов, 2020).

Методы технической геофизики используются для решения широкого круга различных задач при обследовании наземных и подземных транспортных систем, гидротехнических сооружений, нефте- и газопроводов и других линейных сооружений, зданий различного назначения и т. д.

Техническая геофизика и ее составляющая – археологическая геофизика – предназначены для выявления в верхней части геологического разреза искусственных древних и современных сооружений, погруженных в землю, как правило, на небольшую глубину (Никитин, Хмелевской, 2012). Вмещающей средой для них является та часть верхней части разреза, которая сильно изменена деятельностью человека и называется культурным слоем. Культурный слой – это, с одной стороны, исторически сложившаяся система многовековых напластований, образовавшихся в ходе жизнедеятельности древних людей, а, с другой стороны, это могут быть современные антропогенные и техногенные осадки, появившиеся как результат накопления отходов производства при эксплуатации промышленных объектов и перепланировки местности при строительстве.

Мощность культурного слоя может составлять от первых десятков сантиметров до 10–15 м. Мощности современных антропогенных

отложений в виде хвостохранилищ (резервуары для хранения ядовитых отходов химического производства) или хранилищ золоотвалов (отходы теплоэлектростанций) может достигать 15–25 м.

Изучение культурного слоя и объектов, расположенных внутри него, осложняется наличием переработанных грунтов с резко неоднородными физическими свойствами, а также высоким уровнем природных и особенно техногенных помех (электромагнитных, вибрационных, акустических, магнитных, ядерных, тепловых). Кроме этого, существенную роль играют вещественные загрязнения, обусловленные химической засоренностью растворимой части отходов. Как показывают А. А. Никитин и В. К. Хмелевской (2012), на территории г. Москвы достаточно часто встречаются зоны с сопротивлением грунтов порядка 1 Ом·м, хотя самые низкие удельные сопротивления в этом геологическом регионе у юрских глин (порядка 5–15 Ом·м). Поэтому объяснить такие высокие проводимости можно только химическим загрязнением. Кроме того, физические свойства объектов поиска (археологических памятников, подземных сооружений, труб, кладов и т. п.) порою бывают недостаточно изучены и могут меняться в огромных диапазонах. Например, относительная магнитная проницаемость ( $\mu$ ) природных образований, как правило, не бывает больше 1,5–2 (магнитный железняк). Искусственные же объекты, как правило, имеют  $\mu$  более 500. Если к этому добавить расчлененность рельефа, неудобия в виде отгороженных друг от друга и захламленных участков земли, наличие дорог с твердым покрытием и интенсивным транспортным движением, наземные сооружения, мешающие проведению исследований, то становится ясно, что перед геофизиками стоит очень сложная задача. Такую задачу можно представить как «рассмотрение объектов, расположенных под толстым слоем разбитого стекла или волнующейся поверхностью моря» (Никитин, Хмелевской, 2012).

Кроме этого, указывают А. А. Никитин и В. К. Хмелевской (2012), из-за малых глубин залегания искомых объектов, наиболее яркие, выявленные аномалии практически всегда проверяются путем проверочных раскопок, что накладывает дополнительную ответственность на специалиста-геофизика, который всегда находится под внимательным контролем археологов или инженеров-эксплуатационников.

Для характеристики возможностей малоуглубинных геофизических методов (в сфере технической геофизики) приведем список решаемых этими методами задач, сведения о которых приводят в научной литературе:

– поиск полостей, углублений, выемок техногенного происхождения, перекрытых рыхлыми породами;



- оценка нарушенности массивов скальных грунтов;
- выявление зон развития карстовых и суффозионных процессов;
- оценка состояния прочностных свойств массива грунтов под инженерными сооружениями разного типа;
- оценка состояния насыпных грунтов под автомобильными и железными дорогами;
- выявление каверн и пустот под асфальтовым полотном;
- оценка прочностных свойств искусственных и искусственно закрепленных грунтов;
- поиски погребенных остатков сооружений и отдельных частей, включающих стальные, железные, железобетонные элементы;
- проведение опережающей разведки при проходке транспортных тоннелей в опасных инженерно-геологических условиях;
- выявление зон подтопления грунтов;
- выявление зон притоков и утечек воды из пресноводных водоемов – рек, озер, прудов-охладителей, прудов-шламонакопителей, водохранилищ;
- определение положения (трассировка) трубопроводов на участках рек;
- выявления участков нефте- и газопроводов, на которых нарушена изоляция и идет процесс коррозии;
- обнаружение и оценка объемов затопленной древесины на лесосплавных реках;
- изучение условий залегания подземных вод;
- оценка направления движения подземных вод;
- оценка минерализации подземных вод;
- выявления зон протаивания «вечной мерзлоты»;
- поиск локальных объектов в подземном пространстве – кабелей, трубопроводов, захоронений, археологических артефактов и т. д.;
- определение толщины и состояния конструктивных слоев покрытия дорог, аэродромов, стен, перекрытий, оснований инженерных сооружений;
- оценка факторов геоэкологического риска при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений и жилых зданий.

## 1.2 Особенности малоглубинных методов геофизики

Под малоглубинной геофизикой понимают совокупность геофизических методов изучения строения верхней части разреза на глубины до первых сотен метров.

Основные задачи применения методов малоглубинной геофизики:

- оценка состояния геологической среды;
- оценка состояния техногенных объектов;
- оценка и прогноз состояния наземных инженерных сооружений;
- оценка и прогноз состояния подземных инженерных сооружений;
- решение археологических задач;
- оценка и картографирования загрязнения почв и грунтов зоны аэрации;
- оценка и картографирование загрязнения подземных вод;
- мониторинг загрязнения геологической среды и т. д.

Как отмечает К. С. Сергеев (2018), в малоглубинной геофизике, по сравнению с нефтяной и рудной, активно применяется гораздо больше методов. Основной (базовый) комплекс, как правило, включает в себя сейсморазведку и электроразведку; к вспомогательным методам относятся: геофизические исследования скважин (ГИС), георадиолокация, микромагнитная и микрогравиметрическая съемки, методы радиометрии и ядерной геофизики.

Современная малоглубинная геофизика представляет собой сочетание новейшей цифровой аппаратуры и мощного математического аппарата. С точки зрения аппаратуры, в малоглубинной сейсморазведке стали применяться многоканальные линейно-телеметрические или полностью телеметрические многокомпонентные системы, которые ранее были введены в практику нефтяной сейсморазведки. В малоглубинной электроразведке около 10–15 лет назад появился новый метод – электротомография, который включает в себя уникальную методику проведения работ, обработки и интерпретации данных. С точки зрения программно-вычислительных комплексов, благодаря персональным компьютерам (ПК) и серверам, способным обрабатывать и хранить большие объемы данных, обработка и интерпретация перешли в двумерную и трехмерную область. Сейсморазведка, чье широкое применение связано с решением структурных задач картирования геологического разреза в нефтяной отрасли, постепенно стала использоваться и в малоглубинной геофизике для решения различных задач. В настоящее время методики проектирования и проведения полевых работ, аппаратура, алгоритмы обработки и интерпретации сейсмических данных успешно применяются при изучении строения геологической среды (Сергеев, 2018).

В малоглубинной сейсморазведке применяются современные линейные и телеметрические сейсмостанции. На рынке существуют

довольно много моделей станций отечественного и зарубежного производства, которые могут быть укомплектованы различными косами и приемниками. Среди станций российского производства можно выделить телеметрическую систему «ТЕЛСС-3» и линейную систему «ЭЛЛИСС» (производство «Геосигнал»), линейную станцию «Лакколит ХМ-3» (производство «Логис»). К зарубежным аналогам можно отнести станции компании “Geometrics” («Геометрикс», производство США), “АВЕМ” («АБЕМ», производство Швеция) и много других.

Особенностями малоглубинной сейсморазведки по сравнению с нефтяной являются:

1) специфика строения геологической среды, связанная с геологией современных отложений;

2) малый шаг по пунктам возбуждения и пунктам приема (от 0,5 до 10 м);

3) тип источника (маломощное вертикальное или горизонтальное возбуждение колебаний, как правило, невзрывное) и, как следствие, – частотный состав записи;

4) тип регистрируемых волн (продольные и поперечные);

5) техногенные и геологические помехи, их характер и учет при проектировании методики работ;

6) тип сейсмостанции по конструктивным особенностям (линейные, линейно-телеметрические, телеметрические);

7) ограниченность числа каналов (в зависимости от типа сейсмостанции);

8) наличие нескольких методов (МПВ, МОГТ, “MASW”) для построения изображения среды, а соответственно технологий обработки и интерпретации исследований.

В малоглубинной сейсморазведке часто используются линейные станции, что обусловлено их низкой ценой. К достоинствам данных станций относятся мобильность и малый вес. К недостаткам – ограниченность числа каналов как в сейсмической косе, так и в самой активной расстановке, что приводит к практически полному отсутствию коммутации во время измерений. Линейно-телеметрические и телеметрические станции, применяемые в малоглубинной сейсморазведке, позволяют подключать большое число каналов и проводить коммутацию внутри расстановки во время проведения работ. Это позволяет более гибко проектировать полевые системы наблюдения для выполнения различных задач.

Современные станции (с использованием 3С-приемников) позволяют регистрировать одновременно три компонента:  $Z$ ,  $X$  и  $Y$ . По

сравнению с нефтяной сейсморазведкой регистрация трех компонент позволяет сразу получить представление об обменных волнах и формировании волнового поля в целом. Однако регистрируемые поперечные волны зачастую являются более информативными в малоуглубинной сейсморазведке, так как имеют более низкие скорости и позволяют получить большую разрешенность записи (Сергеев, 2018).

Обычно в малоуглубинной сейсморазведке используется шаг по пунктам приема и пунктам возбуждения 0,5, 1 и 2 м при проведении работ методом общей глубинной точки (МОГТ); 2, 5 или 10 м при проведении работ методом преломленных волн (МПВ). Такая величина шага выбирается в зависимости от детальности проведения работ, латеральной изменчивости разреза и выбранного объекта изучения.

Основным методом малоуглубинной сейсморазведки является МПВ в модификации первых вступлений, это обусловлено относительной простотой проведения полевых работ, обработки и интерпретации данных. В методе используются преломленные или рефрагированные волны для построения глубинно-скоростных моделей среды. МПВ является довольно быстрым и эффективным, соответственно, он может применяться для экспресс-разведки (Сергеев, 2018).

При проведении полевых работ используются классические типы расстановок. Шаг по пунктам приема и пунктам возбуждения составляет 2, 5 или 10 м. Глубинность метода определяется мощностью источника и длиной расстановки и в подавляющем большинстве случаев не превышает 30–50 м. В случае сложного строения разреза необходимо большое количество наблюдений для увеличения детальности и качества.

При наличии сложных границ и анизотропии скоростей разреза необходимо наличие дополнительных пунктов возбуждения как выносных, так и в пределах профиля, что позволяет учесть конфигурацию границ и корректно восстановить скоростную модель среды. Все более активно при проведении обработки данных МПВ применяется томографический подход, который основывается на построении сеточной модели с заданным градиентом скоростей и подборе геометрии луча. Данный подход позволяет довольно точно восстановить скоростную модель среды и учесть различные неоднородности верхней части разреза (ВЧР). К недостаткам томографического подхода в МПВ можно отнести градиентную скоростную модель как результат обработки, а значит неоднозначный переход от градиентной модели среды к пластовой (Сергеев, 2018).

Второй основной метод малоуглубинной сейсморазведки – метод общей глубинной точки (ОГТ), в основе которого лежит регистрация,

обработка и интерпретация отраженных волн. По сравнению с МПВ, метод ОГТ позволяет при сопоставимых условиях возбуждения и приема обеспечить несколько большую глубинность (до 100–200 м). Результатом метода ОГТ являются суммарные разрезы (во временной и глубинной областях), выделенные геологические границы, карты. Преимуществом метода являются разрезы с высокой детальностью. Это обеспечивается использованием шага по пунктам приема и пунктам возбуждения 0,5, 1 или 2 м. По данным разрезам довольно точно прослеживается конфигурация границ и выделяются их различные изменения, которые могут быть связаны с различными литологическими неоднородностями и техногенными объектами.

Недостатком метода являются более трудоемкие и дорогие с экономической точки зрения полевые работы; проведение полевых работ, обработка и интерпретация данных ОГТ требуют специализированного программного обеспечения и необходимых профессиональных навыков.

Итогом проведения полевых работ в малоглубинной сейсморазведке являются сейсмограммы общего пункта возбуждения (ОПВ) и сформированные файлы геометрии (для пунктов приема, пунктов возбуждения и коммутации расстановки).

Обработка данных МОГТ в малоглубинной сейсморазведке основывается на тех же теоретических моделях и зависимостях, что и обработка данных нефтяной сейсморазведки. Некоторые процедуры, такие как деконволюция и миграция, не применяются из-за особенностей строения ВЧР и ограниченного частотного состава данных.

Типовой граф обработки включает:

- 1) формирование единого файла, содержащего подборки ОПВ для каждого профиля;
- 2) определение геометрии (координаты, альтитуды) сейсмическим записям;
- 3) редактирование трасс;
- 4) регулировку амплитуд;
- 5) фильтрацию материалов (включая корректирующую и обратную) для повышения соотношения сигнал/помеха и улучшения прослеживания первых вступлений;
- 6) дополнительные процедуры шумоподавления;
- 7) скоростной анализ;
- 8) ввод кинематических поправок;
- 9) суммирование по общей средней точке;
- 10) постобработку суммарных разрезов, включая коррекцию статических сдвигов (Сергеев, 2018).

Особенностью волнового поля в малоглубинной сейсморазведке является разный по уровню и амплитуде сигнал от трассы к трассе и от пункта возбуждения к пункту приема. Это связано с самим строением геологической среды, которая, как правило, формируется довольно молодыми и разуплотненными породами, это может приводить к разному амплитудному и частотному составу данных. Малоглубинная сейсморазведка проводится в условиях высокого количества техногенных помех, которые также «зашумляют» запись. Поэтому во время проведения обработки особое внимание необходимо уделять поверхностно-согласованным регулировкам амплитуд и различным частотным фильтрациям. При ознакомлении с сейсмограммами стоит провести анализ волнового поля и его частотного состава, а также определить характер и возможные причины помех, чтобы оптимально спланировать процедуры помехоподавления (Сергеев, 2018).

Для восстановления скоростной модели среды по поверхностным волнам в малоглубинной геофизике иногда используют метод мультиканального анализа поверхностных волн “MASW”. Основными данными для метода являются рэлеевские волны. Данная волна, распространяющаяся в реальной среде, имеет дисперсию скорости (изменение фазовой скорости с изменением частоты). На основе частотно-временного анализа волнового поля происходит построение дисперсионных кривых. Далее в ходе инверсии подбирается теоретическая дисперсионная кривая, которая имеет наиболее высокий коэффициент корреляции с практической. Результатом вычислений является глубинно-скоростной разрез поперечных волн (Сергеев, 2018).

Современная электроразведка насчитывает довольно много методов, основанных на постоянном или переменном токе. В малоглубинной электроразведке наиболее широко используемыми из методов постоянного тока являются:

- ВЭЗ (вертикальные электрические зондирования);
- ЭП (электрические профилирования);
- ЭТ (электрическая томография).

Классические ВЭЗ и методику проведения работ можно представить следующим образом. Установка состоит из 4-х электродов, два из которых – приемные, два – питающие. Приемные электроды принято обозначать  $M$  и  $N$ , питающие –  $A$  и  $B$ . В зависимости от расстояния между питающими электродами изменяется глубина исследования. К питающим электродам подключают источник тока (генератор, батарея и т. д.), таким образом, создавая в данной линии ток, силу ко-

торого измеряют амперметром. В то же время, на приемных электродах появляется разность потенциалов, которую, в свою очередь, измеряют вольтметром. При увеличении разноса увеличивается глубина исследований. По полученным данным вычисляется кажущееся и удельное сопротивление горных пород. Основным результатом метода ВЭЗ является геоэлектрический разрез.

Основными параметрами, характеризующими методику ВЭЗ, являются:

- максимальный разнос и шаг по разносам;
- длина и направление профилей;
- расстояние между профилями при площадных работах;
- шаг между точками ВЭЗ по профилю;
- азимут разносов;
- количество приемных линий и их размеры.

При этом учитываются следующие условия:

- поставленная геологическая задача, формулированная на языке технического задания, и требуемая детальность исследований;
- условия местности (горы, лес, водные преграды, дороги, городские условия и т. п.);
- уровень электромагнитных и промышленных помех;
- бюджет и временные рамки работ.

Интерпретация данных ВЭЗ осуществляется согласно схемы, приведенной на рисунке 1.

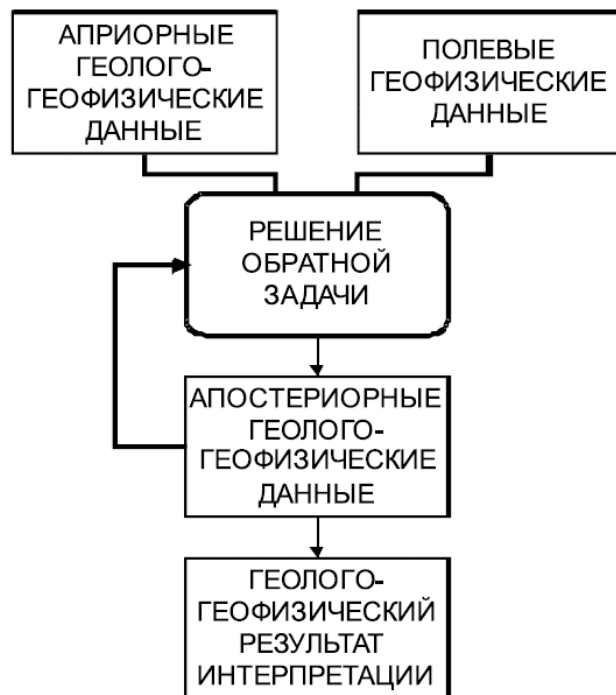


Рисунок 1 – Схема интерпретации данных ВЭЗ

При электропрофилеировании (ЭП) установка перемещается по профилю без изменения своей конфигурации. Поскольку геометрия установки не меняется, то глубина исследования остается примерно постоянной.

Важными методическими параметрами являются шаг по профилю и расстояние между профилями. Они определяются масштабом съемки. При этом должен выполняться следующий общий принцип. Расстояние между пикетами в масштабе отчетной карты должно составлять от 2 до 10 мм, а анизотропия сети (отношение расстояния между профилями к расстоянию между пикетами) не должна превышать 10 раз. Таким образом, при работе в масштабе 1:10000 оптимальным является шаг по профилю 40 м, а расстояние между профилями – порядка 100–200 м (Электроразведка..., 2013).

Методика электропрофилеирования предназначена для картирования горизонтальных неоднородностей геоэлектрического разреза. Типичными для ЭП являются следующие задачи: картирование границ литологических комплексов, исследование изменчивости грунтов в дамбах, плотинах и дорожных насыпях, поиски археологических памятников (захоронений, остатков фундаментов домов и крепостных стен) и др.

Для изучения среды с азимутальной анизотропией используют круговые (азимутальные) измерения (профилеирование и зондирование). В этом случае в каждой точке проводятся измерения при различных направлениях оси установки (ее азимута).

Однако, большинство классических модификаций метода сопротивлений предполагает приближенное одномерное или двумерное строение среды. При изучении сложно построенных трехмерных геоэлектрических сред такими методами в результатах измерений возникают искажения. Они влекут за собой некорректную интерпретацию и неверное геологическое истолкование результатов. Для получения корректного результата необходимо либо совершенствовать способы подавления этих искажений, либо развивать трехмерные методы исследования, в которых искажения будут нести полезную информацию.

Трехмерная структура геологической среды часто встречается:

- при археологических изысканиях;
- при инженерных геофизических изысканиях в городском ландшафте;
- при изучении гидротехнических сооружений;
- при изучении объектов, расположенных вблизи каналов, рек и т. д.;
- при проведении работ в условиях сложного рельефа земной поверхности.



Как считает А. М. Павлова (2014), актуальным являются как двумерные, так и трехмерные методики малоуглубинной электроразведки. Двумерные методики измерений в общем случае лучше развиты, проще в реализации, дешевле и производительнее трехмерных. К тому же они имеют меньше ограничений по расположению сети наблюдений. Поэтому исследования эффектов от трехмерных неоднородностей в двумерных данных дают возможность улучшить результат интерпретации и минимизировать вероятность ошибочных выводов без перехода к более сложной трехмерной методике измерений или при сложных полевых условиях с ограничением сети наблюдений.

Трехмерные методики изучения, очевидно, лучше подходят для изучения трехмерных сред при необходимой высокой детальности и точности. Поэтому их разработка и оптимизация также актуальна в настоящее время. Такие методики предполагают: трехмерные сети наблюдений (в общем случае, площадные), 3D-аппаратуру и оборудование для ускорения измерений, алгоритмы автоматической 3D-инверсии для решения обратной задачи. В настоящее время геофизики во всем мире активно разрабатывают специализированную аппаратуру и работают над оптимизацией существующих алгоритмов решения обратной задачи в трехмерном варианте (Павлова, 2014).

Самыми удачными попытками оптимизации электроразведочных измерений для изучения трехмерных сред стали методики, в основе которых лежит метод ЭТ. ЭТ – это методика, направленная на изучение двумерно-неоднородных сред, т. е. 2D-электротомография, выполняемая по профилю. Она является наиболее эффективной технологией в методе сопротивлений, используемой при детальных исследованиях (Павлова, 2014).

Метод ЭТ появился относительно недавно и завоевал популярность в России и за рубежом. Данный метод является модификацией классических ВЭЗ. С точки зрения аппаратуры, в методе используются схожие с ВЭЗ измерители и генераторы и добавляется коммутатор, который позволяет переключать пары питающих и приемных электродов внутри косы, которая, в свою очередь, подключена к станции. Таким образом, электроразведочная аппаратура для ЭТ является многоэлектродной. Есть модификации аппаратуры, которые являются еще и многоканальными, которые могут измерять значения разности потенциалов ( $dU$ ) несколько пар приемных электродов одновременно (Сергеев, 2018).

Для достижения максимальной эффективности при проведении полевых работ применяется специальная аппаратура с программируемой автоматической коммутацией электродов (многоэлектродная аппаратура). Многоканальная многоэлектродная аппаратура коммутирует заданные электроды с генератором и измерителем и позволяет

параллельно проводить измерения на нескольких приемных линиях или каналах. Такой подход обеспечивает кратное увеличение скорости измерений, что принципиально сократило время измерений, позволив отрабатывать одну расстановку за 10–30 минут. Эта технология измерений обеспечила увеличение скорости полевых наблюдений по сравнению с классической аппаратурой при многократном сгущении сетки наблюдений.

В настоящее время имеется множество станций для проведения работ данным методом как отечественных, так и зарубежных. В качестве примеров можно привести следующие аппаратные решения для ЭТ:

- АВЕМ (Terrameter, LUND Imaging System, Швеция);
- AGIUSA (Supersting, США);
- ERA-MULTIMAX (НПЦ ЭРА, С.-Петербург);
- Омега-48 (производство Россия);
- СКАЛА-48 (Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Новосибирск);
- Syscal Pro Switch-72 (Франция).

Указанная аппаратура позволяет производить съемку профиля длиной в 1 000–2 000 м с шагом по электродам (по косе) 5 м за 6–9 ч.

Принципиальная схема многоэлектродной и многоэлектродной многоканальной аппаратуры представлена на рисунке 2.

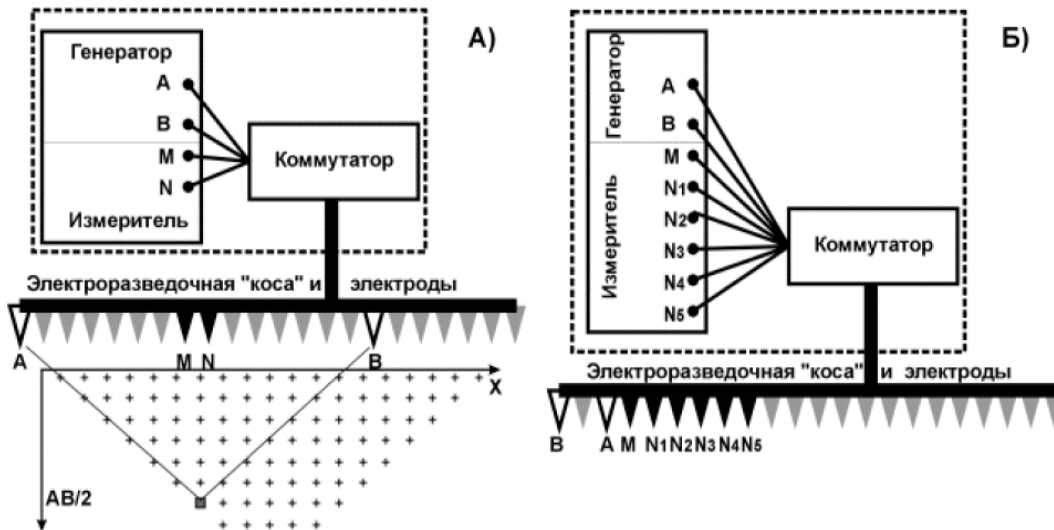


Рисунок 2 – Принципиальная схема многоэлектродной аппаратуры (А) и многоканальной многоэлектродной аппаратуры (Б)

Параметры расстановки, шаг по профилю и иные характеристики системы наблюдения определяются проектной глубиной исследований и характером пород верхней части разреза. Типовые расстояния между электродами составляют 0,5, 1, 2, 5 и 10 м. Число электродов у разных станций колеблется от 48 до 144 шт.

Методика проведения полевых работ включает расстановку электродов по профилю с требуемым шагом, зависящим от проектной глубины исследования. При определении шага используются эмпирические зависимости (глубинность исследований методом ЭТ, как правило, составляет от 1/10 до 1/4 максимального разноса) и тестовые (опытные) наблюдения. Далее электроды подсоединяют к косе, а косы, в свою очередь, к станции, и после чего проводят измерения. Эти измерения на станциях электротомографии проводят по протоколу (сценарию), под которым понимают последовательность назначения тех или иных электродов питающими или приемными. От выбора пары питающих электродов зависит разнос, положение точки записи на профиле, а соответственно, и глубина исследований. От расстояния между электродами зависит плотность наблюдений и максимальный разнос. В результате проведения полевых работ получается разрез кажущихся сопротивлений. Обработка данных ЭТ происходит в 2D-пространстве с помощью двумерной инверсии. Результатом обработки являются разрезы удельного электрического сопротивления (Сергеев, 2018).

ЭТ включает несколько разновидностей (по Павловой, 2014):

1 Электротомография как площадная 2D-съемка. Это съемка по 2D-профилям с последующей 2D-инверсией по каждому. Трехмерная модель в этом случае строится преимущественно графическими или интерполяционными методами. Например, в работе Y. L. Ekinci и M. A. Kaaya (2007) описаны результаты съемки над археологическими объектами – захоронениями, где было сделано несколько параллельных профилей 2D-электротомографии, и каждый был проинтерпретирован в рамках 2D-модели, а трехмерная модель была построена интерполяционными методами с использованием математических функций для осреднения данных.

2 Электротомография как 3D-съемка (собственно трехмерная электроразведка). Такая съемка представляет собой измерения сигнала на приемных линиях разного азимута для разных положений питающего электрода. 3D-съемка физически наиболее корректна при исследованиях трехмерных сред, а получение геоэлектрической модели среды осуществляется по результатам 3D-инверсии. Исследования в этой области показывают, что 3D-съемка подразумевает огромное количество измерений и требует много времени на измерения и последующую обработку. Кроме того, могут возникать проблемы с измерением очень низких сигналов при использовании в площадном протоколе измерений нелинейных измерительных установок (Павлова, 2011).

3 Электротомография как псевдо-3D-съемка. Этот подход подразумевает съемку по 2D-профилям и последующую 3D-инверсию по всему объему данных. Чаще всего, хотя и не всегда, псевдо-3D-съемка подразумевает систему параллельных 2D-профилей, что упрощает выполнение измерений и обработку. Благодаря относительной простоте методики, которая почти не отличается от методики двумерной томографии, подобные исследования широко распространены и в настоящее время активно развиваются (Павлова, 2014).

Еще один популярный метод малоглубинной геофизики – георадиолокация. Метод георадиолокационного подповерхностного зондирования (георадар) основан на изучении распространения электромагнитных волн в среде. Идея метода заключается в излучении импульсов электромагнитных волн и регистрации сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства.

Блок-схема георадара показана на рисунке 3.

Георадиолокация позволяет получать результаты практически в режиме реального времени. Этот метод относят и к электромагнитным методам, и к сейсмическим; данный метод сочетает в себе принципы распространения и регистрации электромагнитных волн, при этом само формирование отраженных сигналов основывается на контрасте электрических свойств горных пород (Сергеев, 2018).

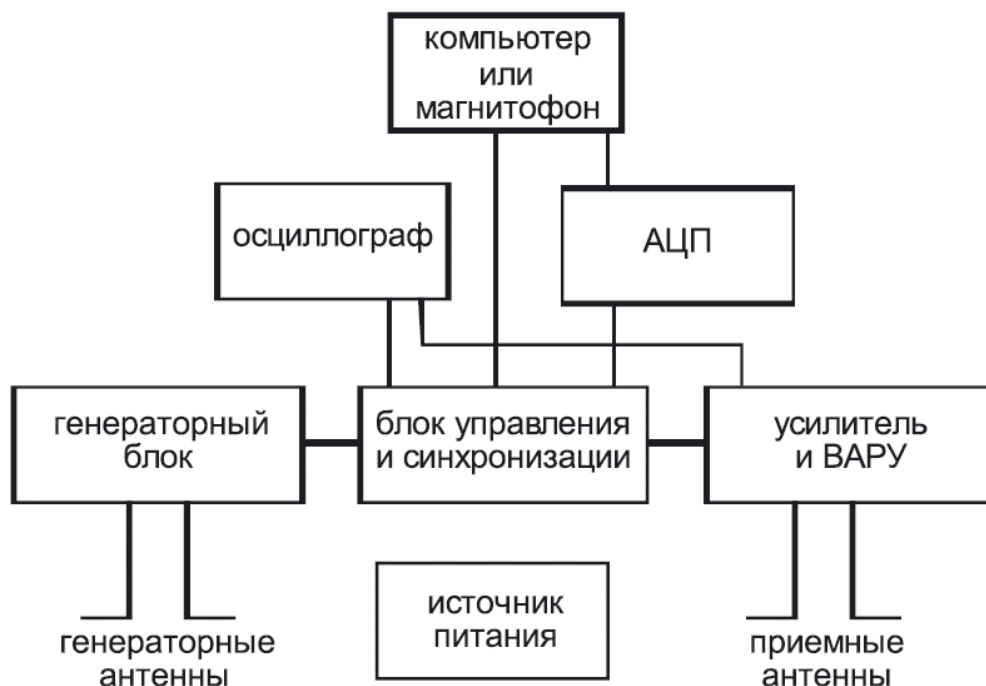


Рисунок 3 – Блок-схема георадара (Электроразведка..., 2013)

*Глубинностью георадиолокационных исследований* называется *максимальная глубина отражающего объекта*, которая проявляется на радарограмме. Глубинность исследований тем больше, чем ниже центральная частота возбуждаемых электромагнитных колебаний и выше удельное сопротивление разреза. Разрешающей способностью по глубине называют *минимальное расстояние по глубине*, на котором могут быть различимы два отражающих объекта или их детали. Она определяется длиной волны, которая прямо пропорциональна скорости и обратно пропорциональна частоте электромагнитных волн в среде (Электроразведка..., 2013).

Разрешающая способность по горизонтали определяется размером первой зоны Френеля. Размеры первой зоны Френеля зависят от глубины объекта и центральной частоты зондирующего импульса. Чем меньше глубина и выше частота, тем меньше размер I зоны Френеля и, следовательно, выше разрешающая способность по горизонтали. При понижении частоты падает разрешающая способность, но увеличивается глубинность исследований (Электроразведка..., 2013).

Георадиолокация дает отличные результаты (структурные планы) при применении на небольшие глубины (до 10 м) при обследовании полотна дорожной одежды, неглубоких водоемов, снежно-ледяного покрова, бетонных сооружений и т. д. Суть метода заключается в возбуждении электромагнитной волны и регистрации ее отражения от границы раздела сред. Георадиолокацию можно рассматривать как своего рода сейсмическое профилирование, осуществляемое электромагнитными волнами.

Георадар, как правило, состоит из одного источника, одного приемника, блока управления и записи данных (рисунок 3). В мире существует множество различных георадаров и антенных блоков (АБ) с различными параметрами и характеристиками. На практике используют несколько антенных блоков с различной центральной частотой для обследования одного профиля, так как от центральной частоты зависит длина волны, разрешающая способность и глубинность исследований. Оптимально использовать антенный блок с высокой частотой (1 200–2 000 МГц) для изучения строения самого верхнего слоя (до 1 м), антенный блок со средней частотой (700–1 200 МГц) для исследования до глубин 1–2 м и антенный блок с низкой частотой (25–700 МГц) для исследования на глубины более 2–5 м.

Результатом георадиолокационной съемки являются временные разрезы (радарограммы), на которых по горизонтали указано расстояние в метрах, а по вертикали – напряженность электрического поля в

зависимости от времени и положения установки на профиле. Задачей обработки и интерпретации радарограмм является выделение и прослеживание осей синфазности отраженных волн от различных границ раздела (отражающих границ или горизонтов) волн и их сопоставление с гидрогеологическими особенностями разреза. Признаками, по которым объект распознается на радарограммах в процессе обработки, могут служить различные характеристики волнового поля (участки с различными типами записи).

Немаловажным для обеспечения корректности малоуглубинных геофизических исследований является тщательное проведение топогеодезических работ. Для небольших по объему работ достаточно использовать тахеометр, для крупных проектов – GPS или GNSS – дифференциальные системы, состоящие из базовой станции и ровера. На пересеченных местностях используют сочетание приборов (GPS или GNSS + тахеометр). Данные работы помогают получить данные о пространственном расположении профилей на объекте и высотные отметки точек наблюдения – что является немаловажным для многих из методов малоуглубинной геофизики. Рельеф оказывает влияние на структуру волновых полей (данных), искажая их, и должен учитываться соответствующим образом на этапе обработки и интерпретации данных (Сергеев, 2018).

Для малоуглубинной геофизики требуется большая точность определения планового и высотного положения пунктов геофизических наблюдений. Современные тахеометры позволяют вести угловые измерения с точностью до трех угловых секунд, а измерения расстояний с точностью до 0,5–1 мм на км. Точность же дифференциальных систем наблюдений (при использовании поправок) достигает 8–10 мм в плане и 10–15 мм по высоте.

Особую группу методов технической геофизики формируют методы неразрушающего контроля состояния технических объектов и их частей. Так, широко распространены методы акустического контроля, включающие ультразвуковой и частотный.

1 *Ультразвуковой метод* использует волны ультразвукового диапазона, для возбуждения и приёма которых требуется наличие пьезопреобразователя. Для лучшей передачи волн и устранения воздушных зазоров, влияющих на точность показаний прибора, при проведении измерений необходимо использовать специальную жидкость, в роли которой зачастую выступает глицерин.

2 *Частотный метод* – волны звукового диапазона возбуждаются не только посредством пьезокристаллов, но и особыми ударными устройствами, а для их приёма требуются микрофоны.

Помимо этого, все методы акустического контроля классифицируются по характеру взаимодействия с исследуемым объектом. Таким образом, различают пассивные методы (вибрационный и шумовибрационный), а также активные, перечень которых гораздо шире:

1 *Эхолокация* – пьезопреобразователь посылает импульс, который отражается либо от внутренней стенки объекта, либо от дефекта. Данная методика особенно популярна в сферах, где требуется проведение исследований качества сварных швов и заготовок из различных металлов, включая всевозможные сосуды и трубы.

2 *Спектральный метод* подразумевает использование специального оборудования, благодаря которому можно проанализировать спектр частот собственных колебаний материала, возникающих после того, как по изделию был нанесён удар определённой силы.

3 *Эмиссионный метод* подразумевает использование упругих ультразвуковых волн, которые появляются по причине изменения структуры материала. Чтобы иметь возможность воспользоваться такой методикой, нужно задействовать сразу несколько приёмников и преобразователей ультразвуковой волны. Координаты дефекта определяются исходя из времени поступления сигнала от источника к каждому приёмнику.

4 *Резонансный метод* определяет толщину объекта по резонансным частотам, а при наличии дефекта, показания прибора будут ниже номинального значения.

5 *Теневого метод*: чтобы провести исследования с помощью такого метода, нужно обеспечить двусторонний доступ к объекту, ввиду того, что сигнал отправляется с одного пьезопреобразователя, а принимается другим. Методика пригодна лишь для поверхностной (неточной) оценки качества изделия.

6 *Импедансный метод* позволяет определить твёрдость и плотность материала, а также наличие или отсутствие дефектов внутри него. Если дефект есть, то амплитуда колебаний генератора ультразвуковых волн неизбежно увеличивается.

7 *Зеркально-теневого метод* имеет свои преимущества: ему безразлично качество поверхности и не требуется обеспечение двустороннего доступа. Но и недостатков он не лишён: с его помощью невозможно определить точные координаты дефекта, зато он явственно укажет на его наличие. Самостоятельно подобный метод исследований применяется крайне редко, только в комплексе с другим, более точным.

Работа всех методов акустического контроля основывается на звуковых и ультразвуковых колебаниях, с фиксацией их параметров, и благодаря им, можно выявить дефекты любых размеров на любых поверхностях, в том числе, и скрытых.

К широко используемым методам диагностики технических систем относится тепловой метод, основанный на измерении температуры поверхности. В настоящее время имеется огромный выбор ИК-тепловизоров – приборов, позволяющих измерять температуру дистанционно. Распределение температуры выводится на дисплей в виде цветового поля. Тепловизоры работают в широком диапазоне температур и различаются по чувствительности (от 0,1 до 1–2 °С). Тепловизоры могут оснащаться лазерным целеуказателем и радиометрическим дальномером. Точечные измерения температуры осуществляют инфракрасными или оптическими пирометрами (дистанционно измеряют температуру на значительном расстоянии от поверхности). Инфракрасные пирометры измеряют тепловое излучение, идущее от поверхности и оснащены лазерным указателем для точного позиционирования цели. Оптические пирометры функционируют в видимом и инфракрасном диапазонах. Они определяют температуру по интенсивности излучения или сопоставления яркости различных участков спектра. Точность измерения температуры пирометром может составлять 0,1–0,2 °С.

## **Вопросы для самоконтроля**

- 1 Укажите объекты малоглубинной геофизики.
- 2 Перечислите задачи малоглубинной геофизики.
- 3 Назовите особенности методов малоглубинной геофизики.
- 4 Дайте характеристику методу малоглубинной сейморазведки.
- 5 Назовите задачи решаемые малоглубинной сейсморазведкой.
- 6 Дайте характеристику методам малоглубинной электроразведки.
- 7 Что такое вертикальное электрическое зондирование, электрическое профилирование и электрическая томография?
- 8 Назовите задачи, решаемые малоглубинной электроразведкой методами сопротивлений.
- 9 Назовите задачи, решаемые георадиолокацией.
- 10 Какие методы используют для неразрушающего контроля технических объектов?



## 2 АРХЕОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОФИЗИКА

### 2.1 Общие сведения

Археологическая геофизика изучает скрытые под поверхностью земли объекты историко-культурного наследия:

1) археологические объекты и комплексы, содержащиеся внутри культурных напластований, например, гончарные и металлургические печи;

2) археологические памятники и комплексы, утратившие внешние отличительные признаки; грунтовые могильники или фундаменты несохранившихся архитектурных сооружений;

3) древние гидросооружения в виде заполненных грунтом каналов или подземных тоннелей-каналов, а также объекты, затонувшие на дне рек, озер, болот и морей;

4) умышленно спрятанные объекты-склады и другие сокрытия.

При разведке археологических памятников геофизическими методами в основном появляется возможность решения следующих задач:

1) реконструкция границ и планировки археологических памятников;

2) пространственное распределение (расположение) археогеофизических объектов;

3) разведка археологических объектов на локализованных территориях (Джахуташвили, 2006).

Выделяют четыре периода развития археологической геофизики:

– экспериментальный (1950-е – начало 1960-х гг.);

– методический (1960-е гг.);

– производственный (1970-е – начало 1980-х гг.);

– исследовательский (начиная с середины 1980-х гг.).

Первые три периода объединяются утилитарным подходом к археологической геофизике, направленным на повышение производительности работ. Для исследовательского этапа характерны следующие тенденции:

1) многоцелевое исследование археологических памятников с получением не только археологических, но и количественных геофизических данных об объектах;

2) углубленное изучение физических свойств археологических материалов с привлечением смежных наук;

3) создание количественных археологическо-геофизических реконструкций;

- 4) специальные высокоточные съемки эталонных памятников;
- 5) разработка теории количественной интерпретации геофизических аномалий от археологических объектов;
- 6) оптимальное комплексирование методов и средств исследования;
- 7) освоение новых типов объектов историко-культурного наследия, ранее не изучавшихся геофизическими методами;
- 8) активное использование математических методов на разных этапах исследований (Станюкович, 1997).

Геофизические методы исследований являются неразрушающими, что позволяет создавать кадастры археологических памятников и карты охранных историко-археологических зон без вскрытия. Следует иметь в виду, что тотальные археологические раскопки приводят, как правило, к полному разрушению археологического памятника, поэтому сочетание результатов геофизических исследований с раскопками небольшой его части позволяет законсервировать культурный слой на большей территории для будущих более совершенных методов исследований. Кроме этого, встречаются такие уникальные ситуации, когда, кроме геофизики, другие, так называемые контактные виды исследований применять невозможно из-за опасности взрыва или возможного вскрытия ядовитых веществ.

Как указывает М. Н. Джахуташвили (2006), главное и действительно решающее преимущество использования геофизических методов для разведки археологических памятников состоит в том, что, во-первых, появляется возможность выявления различных погребенных комплексов без разрушения поверхности почвы и самого объекта, а также изучения (съемки) достаточно обширных территорий за короткий промежуток времени и малыми затратами. Контрастность археологических объектов и окружающей среды является предпосылкой использования геофизических методов. Во-вторых, существенным преимуществом является глубинное изучение геологической среды. В процессе решения археогеофизических задач глубина уже не ограничивает изыскателя. Следует отметить, что проведение геофизических исследований на начальном этапе строительных работ позволяет предотвратить повреждение или даже уничтожение археологических памятников в процессе строительства.

Общая схема развития геофизических исследований в археологии показана на рисунке 4.



Рисунок 4 – Схема геофизических исследований в археологии (Журбин, 2004)

По А. А. Никитину и В. К. Хмелевскому (2012) даже комплексные, детальнейшие, многометодные геофизические исследования являются во много раз более дешевыми, чем археологические раскопки. Актуальность проведения геофизической разведки особенно возрастает при экстренных исследованиях большой территории перед застройкой или в процессе строительства. В этом случае очень часто случается, что раскопки на данном участке не запланированы, или по каким-либо причинам затруднены, или невозможны по причине огромного объема земляных работ. В такой ситуации геофизика является единственным приемом проведения исследований в сжатые сроки. Кроме этого, геофизические методы активно применяются в случаях, когда ни в рельефе местности, ни в растительности, ни в подъемном материале нет каких-либо признаков погребенных объектов. В этом случае археологи вынуждены выполнять планомерные рутинные раскопки, которые часто бывают неэффективными. В то же

время геофизики с помощью своих методов указывают на наиболее яркие аномалии, соответствующие археологическим памятникам, и определяют таким образом тактику последующих раскопок. Поэтому археологи заинтересованы в использовании геофизических методов, чтобы заменить сплошные раскопки выборочными.

Предпосылками применения геофизических методов в археологии по А. А. Никитину и В. К. Хмелевскому (2012) являются:

- контрастность физических свойств объектов поиска и вмещающей среды;

- достаточно большие или хотя бы соизмеримые размеры объекта относительно глубины его залегания;

- заметное превышение величины аномального поля, возбуждаемого объектом, над уровнем промышленных и геологических помех.

Несмотря на то, что глубины археологических объектов невелики и, как правило, не превышают 1–2 м, археологическая геофизика не имеет серьезных преимуществ перед другими областями применения. Скорее наоборот, в силу очень высокого уровня шумов за счет неоднородности вмещающего разреза (особенно на многослойных памятниках) и сравнительно небольших размеров, археологические объекты оказываются весьма трудными для изучения геофизикой. Однако, как считают А. А. Никитин и В. К. Хмелевский (2012), у археологической геофизики есть три неоспоримых преимущества:

- 1) геофизические исследования обладают высокой детальностью, и объекты размером более 0,5 м так или иначе проявляются в различных физических полях (железные изделия проявляются в магнитном поле при размерах уже в первые сантиметры);

- 2) практически все виды геофизических съемок осуществляются гораздо быстрее раскопок, например, в течение одного дня бригада геофизиков, состоящая из двух человек, может отработать магнитной съемкой до 10 планшетов размером 20×20 м по сети 1×1 м, обеспечив таким образом археологов работой на много лет вперед;

- 3) из-за малых глубин расположения объектов выборочная проверка геофизических аномалий может быть выполнена с небольшими материальными затратами;

- 4) привязка точек наблюдения на местности может осуществляться с помощью системы спутниковой навигации (GPS).

Для изучения археологических объектов могут применяться разнообразные геофизические методы и другие виды дистанционных исследований: аэрофотосъемка, тепловая съемка, высокоточная дифференциальная съемка с помощью приемников GPS.

## 2.2 Геофизические методы в археологии

По А. А. Никитину и В. К. Хмелевскому (2012) основными методами археологической геофизики являются: магниторазведка, электроразведка, георадар, гравиразведка, сейсморазведка и ядерно-физические методы. Хорошо зарекомендовали себя в археологии каппаметрия (изучение магнитных свойств верхнего слоя грунта) и металлоискатели – приборы, аналогичные армейским миноискателям. Однако применение металлоискателей в последние годы сильно сдерживается негативным отношением самих археологов, которые ведут многолетнюю, изнурительную борьбу с грабителями, получившими свободный, нелегальный доступ к этой аппаратуре. Несмотря на большое число геофизических методов, наиболее универсальными и эффективными для археологических целей являются магниторазведка и электроразведка.

Выбор метода зависит как от археологических объектов, так и от возможностей собственно метода. В таблице 1 показаны археологические объекты и наиболее часто используемые для их изучения геофизические методы.

Таблица 1 – Методы археологической геофизики (Станюкович, 1997)

Объекты	Методы					
	1	2	3	4	5	6
Геологическая вмещающая среда	+	–	+	+	+	–
Оборонительные сооружения	+	+	+	–	+	–
Культурный слой	+	+	+	–	–	–
Архитектурные остатки	+	+	+	–	–	–
Подземные пустоты	+	+	+	–	+	–
Печи, очаги, кострища	+	+	–	–	–	+
Металл, шлаки	–	+	–	–	–	+
Захоронения	–	–	–	–	–	–
Затонувшие объекты	–	+	–	+	–	+

Примечание: 1 – электроразведка; 2 – магниторазведка; 3 – сейсморазведка; 4 – эхолокация; 5 – гравиразведка; 6 – индикация металлов.

В рамках докторской диссертации И. Н. Модин (2010) выполнил анализ геофизических публикаций по археологической тематике. Для сравнения взяты два временных интервала: с конца 60-х гг. прошлого века до 1996 г. За этот период нам известно 148 публикаций. В течение этого периода преобладали работы по магниторазведке (60 % всех

исследований). Второе место занимала электроразведка (28 % всех исследований). Все остальные методы – менее 12 %. Второй интервал – это только один 2005 г. (128 работ, из которых число магниторазведочных работ составляет 42 % от общего числа публикаций, а электроразведка и георадар занимают по 26 % от общего числа публикаций). Основной комплекс, который применяется в археологической геофизике – магниторазведка + электроразведка, составляет 16 % от всех геофизических работ. Таким образом, электроразведка остается одним из основных методов археологической геофизики. Вместе с георадаром электроразведка превысила применение магниторазведки (Модин, 2010).

Металлоискатель – один из наименее дорогих геофизических приборов. Детектор металлоискателя реагирует на электрическую проводимость объектов. Все металлоискатели работают по одному и тому же общему принципу, и базовая конфигурация включает в себя ручку, поисковую катушку, кабель и металлический ящик, в котором находится аккумулятор и блок управления. Поисковая катушка содержит плоскую круглую намотку провода (антенну), которая генерирует электромагнитное поле. Когда металлические предметы находятся рядом с этой катушкой, создаются вихревые токи, которые обнаруживаются устройством и преобразуются в визуальное цифровое или аналоговое представление и (или) излучаются в виде звукового сигнала.

Археологические исследования с использованием металлодетекторов продемонстрировали, что в сочетании с традиционными методами визуального обследования, зондированием лопатами и пробными раскопками металлодетекторы являются ценными инструментами. Они могут помочь в установлении распределения металлических обломков на участке, что может помочь археологу в установлении границ участка, обнаружении захороненных отложений, мусора и обнаружении захороненных останков.

Металлодетекторы могут использоваться для идентификации объектов даже при отсутствии поверхностных свидетельств. Они могут помочь определить границы участка, установив объем металлического мусора, связанного с деятельностью человека. При систематическом использовании их можно использовать для поиска артефактов, которые могут быть легко пропущены при классических работах, а металлоискатели можно использовать для изучения закономерностей распределения металлических артефактов по участку, не прибегая к дорогостоящим и трудоемким раскопкам. Металлоискатели могут помочь в планировании тестирования и стратегий раскопок, поскольку они могут обнаруживать за-

хороненные отдельные металлические артефакты или скопления металлических артефактов, тем самым предоставляя информацию в дополнение к инвентарным данным и документальным свидетельствам, которые регулярно используются при планировании раскопок.

Основные преимущества использования металлоискателя на объектах, где могут присутствовать металлические артефакты:

- металлоискатели являются относительно недорогим инструментом дистанционного зондирования;
- металлоискатели наиболее полезны для обнаружения неглубоких захоронений (25–30 см) металлических предметов;
- металлоискатели легко освоить в использовании и эксплуатации.

Первое применение магниторазведки в археологических целях относится к концу 1950-х гг. прошлого века, наиболее активный этап начинается с 1990-х гг. Магниторазведка успешно выявляет такие археологические объекты, как:

- печи, горны, объекты производства;
- фундаменты и фрагменты сооружений, инфраструктура;
- крупные металлические объекты;
- ямы, рвы, колодцы и иные почвенные неоднородности;
- крупные полости.

Физико-археологическое обоснование магнитометрических исследований базируется на трех составляющих:

- 1) теоретические положения метода;
- 2) описание характерных особенностей археологических памятников как объектов магнитометрических исследований;
- 3) количественные оценки, которые основаны на анализе магнитных свойств искомым археологических объектов.

По мнению И. П. Кошелева (2005), только по совокупности всех трех компонентов может быть сделан окончательный вывод относительно степени обоснованности применения данного метода исследований, ожидаемого уровня его археологической информативности и эффективности.

Важным обобщением всех названных компонентов физико-археологического обоснования магнитометрических исследований является формирование представления о физико-археологических моделях, которое широко используется на всех стадиях работ – от проектирования до археологического истолкования магнитометрических данных (Кошелев, 2005).

Принцип магниторазведки для поиска погребенных исторических памятников заключается в измерении естественного магнитного

поля Земли с очень маленьким шагом и при минимальной высоте расположения датчика. При таких условиях съемки начинает работать необыкновенно чувствительный механизм, а именно, сказывается присутствие в погребенных объектах различного количества магнитных окислов железа. Железо является прекрасным и наиболее чутким индикатором практически любого вида человеческой деятельности. В природе, в естественном состоянии, железо распределено в земной коре в количестве 5–7 %, и присутствует в почвах и глинах в виде немагнитных гидроокислов. Но повседневная и преобразовательская активность людей по обеспечению обогрева жилища, приготовления пищи, строительства домов из дерева, камня, кирпича, и, наконец, производственная деятельность человека, связанная с применением огня – все это на невидимом микроуровне приводило к превращениям немагнитных гидроокислов железа в магнитные и сильномагнитные окислы. Подобные же превращения происходили в почве также и в результате другого экзогенного процесса (т. е. с испусканием энергии) – гниения органических остатков. Еще один природный механизм увеличения магнитной восприимчивости верхнего микрослоя почвы – итог многократных смен теплого сухого и влажного холодного времен года. Частицы верхнего почвенного слоя с годами сносятся ветром и водой в искусственные и природные углубления (ямы, канавы, рвы, колодцы и т. п.), накапливаются там и вызывают, таким образом, повышенную намагниченность их заполнения. Необходимо также учитывать деятельность магнитных бактерий (Смекалова и др., 2007).

Аномалии от археологических объектов или горных пород и минералов обуславливаются в основном за счет присутствия самого часто встречающегося магнитного материала, магнетита,  $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ , или связанных с ним минералов. Обычно горные породы содержат некоторое количество магнетита: от долей процента до нескольких процентов (Смекалова и др., 2007).

Аномалии магнитного поля Земли вызываются индуцированной или остаточной намагниченностью. Индуцированная намагниченность означает, что объект становится намагниченным из-за воздействия на него геомагнитного поля. Во время нагрева, особенно при высоких температурах, небольшие области, называемые доменами, переориентируются и при охлаждении имеют тенденцию располагаться более или менее по направлению современного геомагнитного поля. Они выстраиваются параллельно друг другу и создают намагниченность, жестко привязанную к объекту. Оба вида магнетизма играют важную роль при археологических исследованиях. Индуцированная намагниченность прямо пропорциональна интенсивности окружающего поля (Смекалова и др., 2007).



Способность материала увеличивать локальное поле называют *магнитной восприимчивостью*. Магнитная восприимчивость – это мера, выражающая насколько легко порода намагничивается геомагнитным полем. Разница в магнитной восприимчивости между верхним слоем почвы, подпочвой и материковыми слоями (верхний слой почвы обычно более магнитен, чем подпочва) позволяют обнаруживать канавы, ямы, колодцы, которые были выкопаны в древнее время и затем заносились частичками верхнего слоя почвы ветром или водой. Они создают положительные магнитные аномалии. Наоборот, кладки из менее магнитного материала, находящиеся в слабомагнитной почве, например, известняковые стены, могут быть найдены по отрицательным магнитным сигналам за счет вычитающего эффекта (Смекалова и др., 2007).

Термоостаточная намагниченность возникает при нагревании: либо при естественном, как в случае вулканических пород, либо при искусственном, как в случае глинобитных печей, керамической посуды, кирпичей, черепицы и других объектов, часто находимых на археологических памятниках. Остаточная намагниченность может быть в 10 и более раз больше, чем индуцированная намагниченность. Поэтому такие объекты, как глинобитные обжигательные печи, металлургические горны, крупные керамические сосуды создают очень сильные магнитные аномалии. Если эти объекты не смещались со времени остывания после последнего обжига, то их можно датировать по измеренным значениям направления и величины остаточной намагниченности, соответствующим параметрам древнего магнитного поля (археоманитная датировка). Эти параметры можно также получить путем анализа магнитных аномалий над объектами.

На археологическом памятнике обычно наблюдается достаточно сложная картина магнитного поля, состоящая из сильных и слабых отрицательных и положительных магнитных аномалий от различных археологических структур. Рвы, колодцы, ямы создают локальные магнитные аномалии в диапазоне до 20 нТл. Более редкие, обожженные структуры – 10–1 000 нТл. Еще более редкие железные археологические предметы, а также шлаки от выплавки железа – создают аномалии величинами от 20 до 2 000 нТл (Смекалова и др., 2007).

Магниторазведка используется в поселенческой, погребальной, военной археологии. При анализе результатов магниторазведочных работ важно понимать, что магнитное поле не отражает в явном виде информации о составе или форме аномалообразующего объекта: подобные заключения есть и редко бывают однозначны. Основными помехами для магниторазведки являются всевозможные металлические

объекты (автомобили, заборы, сооружения и т. д.), линии электропередач, подземные коммуникации и т. д., что существенно снижает эффективность магниторазведки, например, в условиях техногенного или урбогенного ландшафта.

Геофизические методы могут применяться для построения детальных планов погребенных древних сооружений: фундаментов зданий и оборонительных стен, рвов и валов, а также поисков скоплений керамического и железного материала, очагов, зольников, гончарных и металлургических печей, различных погребений (в грунтовых могилах, склепах и курганах). Отдельной интересной и важной проблемой является археомагнитная датировка. Многие археологические объекты с высокой термоостаточной намагниченностью (очаги, печи, горны) «запоминают» направление и амплитуду внешнего магнитного поля Земли, существовавшего во время их последнего нагрева и последующего остывания.

Так как магнитное поле в течение всей истории развития Земли много раз меняло свое направление вплоть до инверсии полюсов, то определение амплитуды и направления вектора магнитного поля позволяет соотнести памятник с соответствующим этому полю историческим периодом. Однако абсолютная палеомагнитная датировка является однозначной только для некоторых исторических эпох, так как одинаковые значения элементов геомагнитного поля периодически повторяются. Поэтому методически более правильным является относительная привязка, когда возраст объекта известен с точностью до одного столетия и требуется сделать лишь уточнение. В палеомагнитном методе используются вырезанный из массива горной породы ориентированный образец правильной формы, который исследуется в лабораторных условиях. При этом определяется вектор остаточной намагниченности, который с высокой точностью для подавляющего большинства горных пород совпадает с направлением вектора древнего магнитного поля.

Несмотря на то, что магниторазведка известна как метод изучения археологических объектов, способный дать весьма ценную, часто – уникальную археологическую информацию, недоступную другим методам исследований, при небольших затратах на ее проведение, ее использование ограничено. По мнению И. Н. Кошелева (2005), наиболее вероятная причина ограниченного использования магнитометрических исследований в археологической практике кроется, очевидно, в недостаточной информированности специалистов-археологов относительно сущности метода, физико-археологических предпосылок его применения, технологии проведения полевых работ, а также о способах обработки и археологического истолкования магнитометрических данных, а глав-

ное – о возможностях магнитной разведки. В качестве другой возможной причины отрицательного отношения археологов к вопросам внедрения магниторазведки можно предположить существовавшую до недавнего времени некоторую недоработку метода, в частности, несовершенство средств, методов и приемов обработки и археологической интерпретации магнитометрических данных. Этот недостаток был в значительной мере устранен за счет совершенствования технологии полевых магниторазведочных работ, основанной на современной аппаратурной базе, разработки комплексной компьютерной обработки и археологической интерпретации магниторазведочных данных.

При археологических исследованиях широко применяется электроразведка, что связано с существенной дифференциацией археологических объектов и вмещающей геологической среды по электрическим свойствам (таблица 2).

С помощью электроразведки решают такие задачи, как:

- 1) картирование древних рвов, дамб, горных выработок;
- 2) поиски и разведка могильников и некрополей;
- 3) изучение древних городов и поселений.

Используются методы сопротивлений (ВЭЗ, электропрофилирование, электротомография), естественного электрического поля, вызванной поляризации, георадиолокации и др. Особенность работ – шаг измерений – от первых метров до десятков сантиметров.

Важную роль в археологических работах играет георадиолокация. В научной литературе имеется множество статей, которые иллюстрируют использование георадара для обнаружения и картографирования погребенных археологических объектов, для изучения древних построек, мостов, колонн и статуй, для исследования фресок, мозаик и украшений, а также для исследования внутреннего строения других объектов, представляющих историческую ценность.

Таблица 2 – Дифференциация археологических объектов по удельному электрическому сопротивлению (Электроразведка. Справочник..., 1989, с изменениями)

Археологический объект	Вмещающая среда	Удельное электрическое сопротивление объекта относительно вмещающей среды
1	2	3
Культурный слой	Почва	Повышенное
	Песчаная почва	Одинаковое
	Горные породы	Пониженное

Окончание таблицы 2

1	2	3
Ров, заполненный землей	Рыхлые породы	Пониженное, иногда повышенное
Могильники, выложенные камнями	Пахотная почва	Повышенное
Могильники, вырытые в туфах	Почва, туф	Повышенное
Каменная кладка	Почва	Повышенное
Подземные сооружения	Почва	Повышенное
Скопления древесного угля	Песчаная почва	Пониженное

Георадиолокация стала применяться в археологии в 1970-х гг. Георадарные археологические исследования начались как маломасштабные исследования для детектирования погребенных объектов и оценке их основных геометрических и физических свойств. В последние годы, благодаря технологическим достижениям, чувствительность и разрешающая способность георадиолокационных систем значительно возросли; более того, появление многоканальных радиолокационных систем, оснащенных антенными решетками, позволило повысить эффективность съемки и разрешение пространственной выборки.

Важной задачей, решаемой георадиолокацией, является превентивное обнаружение объектов военной истории в местах текущих или будущих строительных работ; такая ситуация довольно распространена в городских районах, где в связи с развитием города могут потребоваться различные инженерные работы в районах проведения боевых действий в прошлом. Таким образом проведение георадарной съемки перед строительством предпочтительно ввиду возможного нахождения боеприпасов, оружия, взрывчатых веществ или военной техники в подповерхностном пространстве.

Как правило, георадиолокация сочетается с другими методами съемки, такими как дистанционное зондирование (например, гиперспектральная съемка и лазерное сканирование), магниторазведкой, электротомографией и т. д.

Возможность применения малоглубинной сейсморазведки в археологии основывается на том, что древние захороненные сооружения и фундаменты, изготовленные из поделочного камня (известняки, доломиты), представляют собой акустически контрастные локальные неоднородности, расположенные в терригенных горных породах, и

должны создавать аномалии в наблюдаемом волновом поле. Культурные слои, насыщенные продуктами человеческой деятельности, должны отличаться упругими модулями от нижележащих геологических слоёв. На этом основано картирование поверхности раздела между культурным слоем и нижележащей геологической толщей (Степанов, Головцов, 2013).

## **Вопросы для самоконтроля**

- 1 Назовите типичные объекты археологической геофизики.
- 2 Назовите типичные задачи археологической геофизики.
- 3 Дайте характеристику этапов развития археологической геофизики.
- 4 Какие преимущества дают геофизические методы в археологии?
- 5 Перечислите основные геофизические методы, используемые в археологических исследованиях.
- 6 Какие археологические задачи решает магниторазведка?
- 7 Какие археологические задачи решает электроразведка?
- 8 Какие археологические задачи решает георадиолокация?

## 3 СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ГЕОФИЗИКА

### 3.1 Геофизические методы при изучении почвенного покрова

С 1990-х гг. в США, Австралии и в ряде стран Европы применение электромагнитных методов и методов сопротивлений для оценки бонитета почв и концентрации минеральных удобрений носит массовый и регулярный характер. Только по одним данным электропроводности почв изучаются физические и химические свойства почв (объемная масса, содержание глины, содержание органического вещества), а также биологические свойства почв (микробная биомасса *C* и *N*, минерализующийся азот).

Отмечено, что основными потребителями аппаратуры электромагнитного картирования являются сельскохозяйственные компании, фермеры, и компании, специализирующиеся на оценке земель сельскохозяйственного назначения.

На основе использования геофизических методов возможно определение следующих почвенных параметров:

- 1) температуры почв на поверхности и фиксированных глубинах;
- 2) мощности генетических горизонтов вплоть до материнской почвообразующей породы;
- 3) плотности генетических горизонтов;
- 4) влажности почвы послойно, а также по генетическим горизонтам;
- 5) глубины залегания карбонатов, солевого горизонта и зеркала грунтовых вод;
- 6) уровня залегания мерзлого слоя и его мощности;
- 7) мощности снежного покрова и его плотности;
- 8) уровня залегания дренажных систем;
- 9) глубины залегания глинистого слоя;
- 10) мощности песчаного слоя;
- 11) коэффициентов распределения гербицидов в почве.

Методы геофизического картирования двухмерного и объемного распределения электропроводности грунта позволят получить вероятностную картину распределения параметров почвы в пределах всей исследуемой площади, а не «точечно», как исследовалось до недавнего времени.

Для получения больших и качественных урожаев необходимо знать не только новые сорта выращиваемых культур, но и большинство свойств почв, так как урожайность на 80 % зависит от этих свойств.

В условиях активного антропогенного пресса, приводящего к негативным последствиям и даже полному разрушению почв, необходимо использование современных дистанционных методов исследования, позволяющих дать быструю оценку состояния почв и окружающей среды на большой площади. Наиболее перспективным для этих целей является метод частотного зондирования. Будучи адаптированным для почвенных задач, этот метод может быть весьма эффективным при прямых почвенных исследованиях и мониторинге состояния и свойств почв. Данный аппаратно-программный комплекс особенно полезен еще и потому, что позволяет без нарушения почвенного покрова (без массовой закладки почвенных разрезов, полуюм и прикопок), при минимальных затратах времени проводить почвенную съемку любого заданного масштаба. При этом увеличивается точность определения пространственных смен почв, ликвидируются ошибки в проведении границ, обособляемых на карте контуров.

Самые ранние исследования в области сельскохозяйственной геофизики относятся к 1930–1940-м гг., и эти работы были сосредоточены в области изучения содержания воды в почве посредством измерения электрической проводимости грунтов с помощью методов сопротивления. Работы по определению содержания воды в почве, используя методы сопротивления, а затем методы электромагнитной индукции и георадиолокации могут обеспечить решение задач оценки результатов ирригационного планирования и контроля за дренажом на сельскохозяйственных полях.

Начиная с 1960 г. применение геофизических методов в сельском хозяйстве получает дополнительный импульс, особенно с момента начала применения методов удельного сопротивления для оценки засоленности почв. Применение методов удельного сопротивления, а теперь и индукционных методов, позволило успешно внедрить геофизические методы для изучения степени засоленности почвы, чтобы начатые мероприятия по осушению не наносили вред будущему урожаю вследствие повышения солености почвы. Одной из самых ярких разработок в геофизики для определения солености является зондирование с воздуха для оценки рисков засоленности почвы и принятия управленческих решений для больших сельскохозяйственных площадей.

Начиная с конца 1970-х и начала 1980-х гг. получает развитие разработка георадаров, а также общественная программа картирования различных параметров. В этом отношении георадар в то время оказался чрезвычайно ценным в части сокращения времени зондирования почвы, обеспечивая более точное картирование объектов.

В середине 1990-х гг. картирование электропроводности с помощью методов сопротивления и электромагнитной индукции становится

все более важным инструментом сельского хозяйства. Точность показателей сельского хозяйства – это развивающийся сельскохозяйственный тренд, сочетающий в себе геопространственные базы данных, современные сельскохозяйственные технологии, географические информационные системы и приемники системы глобального позиционирования (GPS). Эти технологии необходимы для пространственного контроля внесения удобрения на полях, проведения мероприятий по улучшению почвы, определения содержания пестицидов и даже проведения пахотных работ. Фермеры могут извлекать следующую выгоду от использования этих методов: повышение урожайности или уменьшение затрат. Дополнительное преимущество – эффективная защита окружающей среды. Так как точный расчет в сельском хозяйстве дает возможность внесения оптимального количества удобрений, пестицидов и прочих агрохимикатов в различные части полей, меньшее количество агрохимикатов и осадков будет проходить через подпочвенный дренаж и поверхность почвы. В свою очередь, уменьшение веществ, загрязняющих почву, и осадков снижает неблагоприятное экологическое воздействие на водную систему. Так, в основном, применение высокоточной разведки позволяет разделять сельскохозяйственные поля на различные управленческие зоны, чтобы в полной мере оптимизировать экономическую выгоду и мероприятия по защите окружающей среды.

Горизонтальные пространственные изменения в электропроводности обычно хорошо коррелируют с горизонтальными изменениями в плодородности и свойствами почвы. Как следствие, картирование электропроводности с применением методов сопротивления и геофизических методов электромагнитной индукции может зачастую использоваться для картирования распространения свойств почвы, которые изменяются в процессе различных воздействий. Карты электропроводности могут использоваться для разделения сельскохозяйственных полей на различные управленческие зоны (применение различных доз химикатов), чтобы оптимизировать использование земель и защитить окружающую среду. Следует заметить, что развитие в 1990-х гг. доступности персональных компьютеров, технологий для обработки и хранения больших объемов данных, системы глобального позиционирования и геоинформационных систем позволило широко применять в сельском хозяйстве геофизические методы и методы точного прогнозирования.

В последние 15 лет наметилась тенденция к расширению исследований, связанных с потенциальным применением геофизики в сельском хозяйстве. Большинство этих научных исследований опять были сосредоточены на исследовании метода сопротивлений, индукционных методов и метода георадиолокации; однако, теперь проводятся



исследования возможности использования в сельском хозяйстве других геофизических методов, таких как магнитометрия, метод естественного поля и сейсмика.

Помимо контроля грунтовых вод, оценки засоленности, картографии обследования почвы и прогнозируемого земледелия – геофизические методы теперь используются в более широком диапазоне для решения дополнительных сельскохозяйственных задач, включая лесное хозяйство, возделывание высококачественных зерновых культур, управление отходами животноводства, описание гидрологических характеристик почвы, а также локализация и оценка подземной инфраструктуры, и т. д.

Геофизические методы могут быть важным инструментом для решения различных сельскохозяйственных задач. В прошлом в сельскохозяйственной геофизике использовались только методы сопротивлений, электромагнитной индукции и георадиолокации для контроля содержания влаги в почве, оценки солености почвы, картографии почвы и точного земледелия. В настоящее время сельскохозяйственные применения методов удельного сопротивления, индукционных методов и георадиолокации продолжают быстро развиваться, кроме того, такие геофизические методы как магнитометрия, метод естественного поля и сейсмики начинают находить сельскохозяйственное применение.

Имеется практический опыт решения следующих сельскохозяйственных задач геофизическими методами:

- картирование и оценка дренажных системы – электроразведка методом сопротивлений;
- определение глубины глинистого слоя – электроразведка методом электромагнитной индукции, частотное индукционное зондирование;
- картирование песчаного слоя – электроразведка методом электромагнитной индукции, частотное;
- определение коэффициентов распространения гербицидов в почве – электроразведка методом электромагнитной индукции, частотное индукционное зондирование;
- определение уровня грунтовых вод – георадиолокация;
- оценка корневой биомассы деревьев – георадиолокация;
- определение плотности почв – сейсмика;
- мониторинг питательных веществ после внесения удобрений – электроразведка;
- оценка минерализации грунтовых вод и мониторинг движения грунтовых вод – электроразведка методом сопротивлений, методом электромагнитной индукции, георадиолокация;

– поиск и локализация коммуникаций, в том числе дренажных систем в сельскохозяйственном ландшафте – георадиолокация, магнитометрия, электроразведка методом электромагнитной индукции.

В почвоведении изучение электрических полей в почвах интенсивно началось в 70-е гг. XX в. в основном на кафедре физики и мелиорации почв МГУ им. М. В. Ломоносова. Методы сопротивлений в почвоведении также достаточно активно начали применять с 70-х гг. на кафедре физики и мелиорации почв факультета почвоведения МГУ. Путем прямых наблюдений для реально-функционирующих почв обнаружены и детально изучены естественные электрические поля, изучены также природа и процессы их формирования.

За последние 20–30 лет были исследованы зональные почвы основных генетических типов России – подзолистые, серые лесные, черноземы различных фаций и разных областей, каштановые почвы, интразональные почвы (засоленные, торфяные). Исследовались также почвы ряда стран СНГ: каменистые почвы и пески юга Украины и Крыма, сероземы Узбекистана и почвы некоторых районов Казахстана. Практически для всех перечисленных почв установлены электрические параметры, зависимости электрического сопротивления от ряда основных свойств почв (рисунок 5).

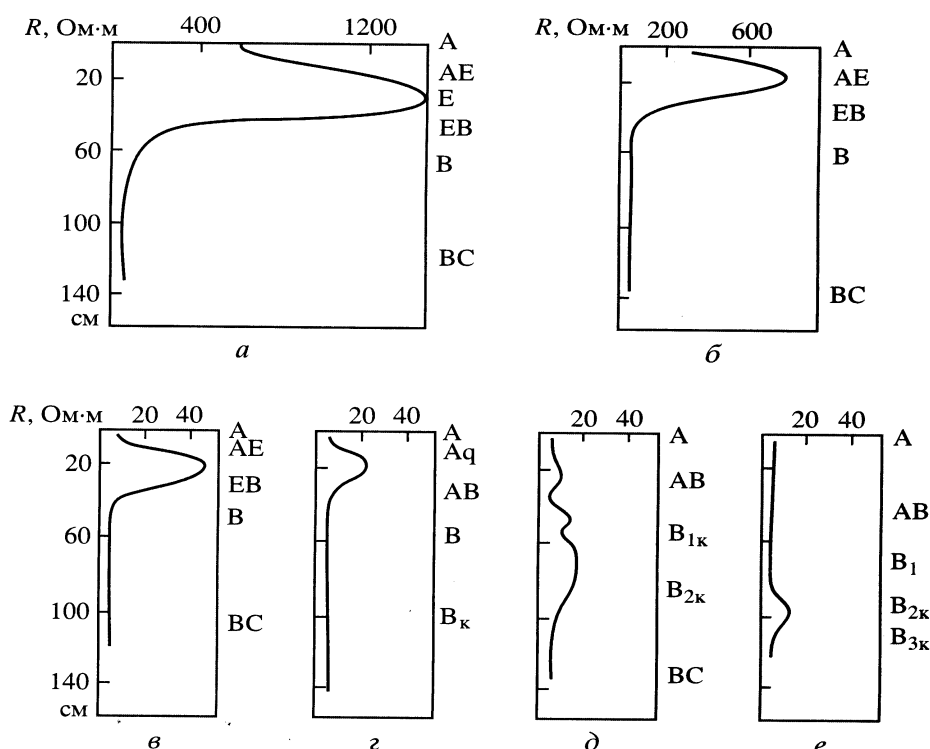


Рисунок 5 – Изменения кажущегося электрического сопротивления по профилю разных типов почв: *а* – дерново-подзолистые песчаные; *б* – дерново-подзолистые суглинистые; *в* – серые лесные; *г* – темно-серые лесные целинные; *д* – черноземы; *е* – светло-каштановые почвы (Поздняков, Позднякова, 2004)

Применение метода сопротивлений для оценки состояния почв (содержания солей) стало активно развиваться с начала XXI в., когда появились разнообразные портативные устройства, позволяющие оперативно измерять электрическую проводимость почв. Так, фирмой LANDVISER (США) с участием фирмы ASTRO GROUP (Россия) разработан прибор для проведения электрических параметров почв и, в первую очередь, электрического сопротивления, который позволяет проводить как лабораторные исследования сопротивления проб почв, паст, суспензий, растворов, вод, так полевые измерения.

### **3.2 Геофизика мелиоративных систем**

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

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

- определение литологии верхней (5–10 м) толщи пород и почвенное картирование;
- определение глубины залегания уровня грунтовых вод, регионального водоупора, мощности и взаимосвязи различных водоносных горизонтов между собой и с поверхностными потоками;
- изучение физико-механических и водных свойств горных пород зоны аэрации и полного водонасыщения (определение коэффициентов пористости, влажности, проницаемости, фильтрации, водопроницаемости, минерализации вод, засоленности и заболоченности почвенного покрова).

Решение этих задач только методами почвенных, гидрогеологических и инженерно-геологических исследований (проходка скважин, шурфов и наблюдения в них) трудоемко, дорого и носит точечный характер. При использовании геофизических методов можно не только получить информацию о разрезе, но и повысить ценность точечных гидрогеологических обследований, так как водно-физические свойства, определенные в параметрических (опорных) точках, легко увя-

зять с площадными электрическими, экстраполировав их на всю изучаемую площадь. При этом необходимы дешевые, ускоренные геофизические съемки, которые проводят следующими методами:

– среднemasштабными дистанционными электромагнитными исследованиями – инфракрасной (радиотепловой) съемкой с помощью тепловизоров и высокочастотной радиотелеметрией, активной радиолокацией с помощью радиолокаторов миллиметрового и сантиметрового диапазона волн;

– крупномасштабными электромагнитными профилированиями, используя поля сверхдлинноволновых радиостанций (СДВР) или портативных передатчиков при дипольном профилировании (ДИП), а также методами ЭП, ЕП, ВП и зондированиями (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП), радиоволновыми (РВЗ) и радиолокационными (георадар);

– скважинными наблюдениями с помощью электрических, нейтронных, термических методов.

Так, электроразведка при гидромелиоративных и почвенно-мелиоративных исследованиях решает следующие задачи:

1) литологическое расчленение разреза и определение глубины залегания регионального водоупора;

2) изучение строения и состава зоны аэрации и водоносных горизонтов;

3) изучение глубины залегания грунтовых вод;

4) изучение взаимосвязи между различными водоносными горизонтами;

5) определение коэффициента фильтрации, коэффициента водопроводимости, влажности, минерализации подземных вод.

Метод заряда применяется для определения направления и скорости течения подземных вод по одной скважине (рисунок 6). В скважину опускается питающий электрод *A* и мешок с солью. Второй питающий электрод *B* помещается в «бесконечность». Под действием потока соль вымывается из скважины и образуется зона электролита, вытянутая в сторону течения подземных вод. Передняя граница этой зоны перемещается со скоростью равной скорости потока вод.

Движение зоны изучают на поверхности земли путем съемки замкнутых эквипотенциальных линий в разные моменты времени. Эквипотенциальные линии вытягиваются в сторону потока со скоростью, равной скорости перемещения электролита. Скорость определяется по формуле  $V = \frac{\Delta R}{\Delta t}$  (Матвеев, 1990).

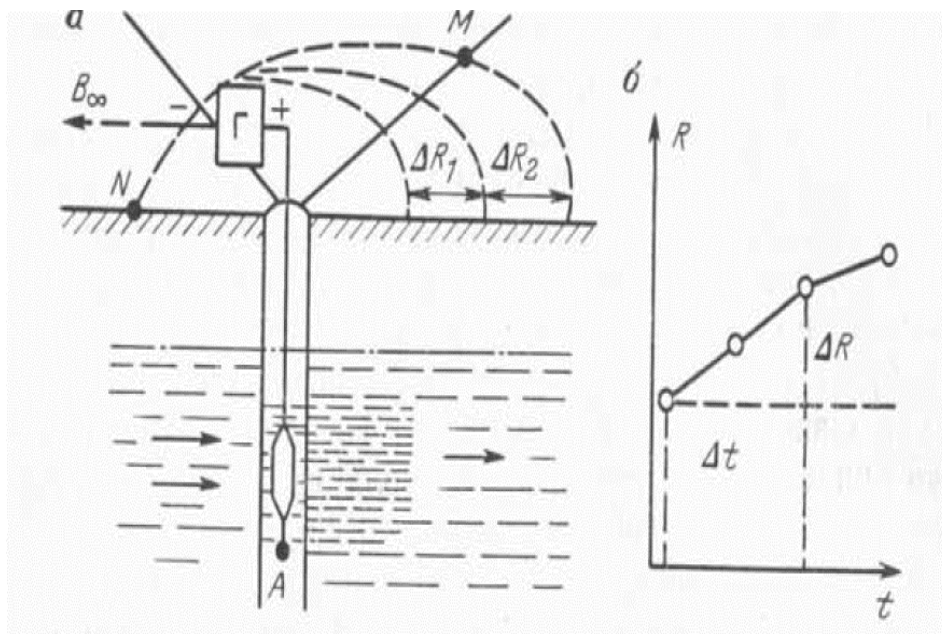


Рисунок 6 – Определение направления и скорости движения подземных вод методом заряда: *a* – схема изолиний потенциала; *б* – результаты обработки в виде графика зависимости смещений изолиний вдоль потока от времени; Г – генератор (Матвеев, 1990)

Для решения мелиоративных задач широко используются дистанционные (аэрокосмические) методы – радиолокационная или радиотепловая съемка, инфракрасная съемка. Такие съемки позволяют определять литологию земной поверхности, влажность и засоленность почвенного покрова.

В целом при почвенном картировании применяют такие геофизические методы, как радиоволновое профилирование, радиолокационную и инфракрасную съемки, радиометрическую съемку, метод сопротивлений в разных модификациях.

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

### 3.3 Современные тенденции в сельскохозяйственной геофизике

Современными тенденциями использования малоглубинной геофизики в сельском хозяйстве являются следующие:

1 Открытие новых областей применения геофизических методов, которые уже используются в сельском хозяйстве (метод сопротивлений, индукционные методы, георадиолокация).

2 Геофизические методы, традиционно не используемые в прошлом в сельскохозяйственных целях, найдут себе применение в будущем. Геофизические методы, которые, вероятнее всего, будут использоваться в сельском хозяйстве – магнитометрия, метод естественного поля, сейсмика. Также существует возможность применения в сельском хозяйстве таких геофизических методов, как ядерный магнитный резонанс, метод вызванной поляризации и т. д.

3 Использование приемников системы глобального позиционирования (GPS) станет нормой, особенно это может касаться систем позиционирования в реальном времени. GPS позволят проводить геофизические измерения с максимальной горизонтальной и вертикальной точностью в несколько сантиметров или меньше. Вспомогательные приборы на основе систем видеонаблюдения за процессами или даже приблизительным расчетом расстояния интервала между поперечными разрезами, объединенные с точной системой глобального позиционирования GPS, смогут обеспечить эффективное проведение геофизических исследований на больших сельскохозяйственных полях без размещения маяков сетки измерения на земной поверхности. Для некоторых геофизических методов компьютерные процедуры обработки, используемые для горизонтальной картографии измерений, могут потребовать некоторой модификации для ввода данных, собранных вдоль профилей с нерегулярными ориентациями и шагом между точками измерений.

4 Геофизическая съемка комплексом методов станет стандартом благодаря разнообразию полевой информации, требуемой для принятия правильных управленческих решений в области сельского хозяйства. Мультисенсорные системы, основанные на единичном геофизическом методе, уже разработаны, и эти системы, конечно, выгодны для сельского хозяйства. Примеры – системы на основе электромагнитной индукции, включая системы многочастотного индукционного зондирования, и георадиолокационные системы, имеющие более одного набора антенн, работающих на более чем одной частоте; а также аппаратуру, реализующую методы сопротивлений, содержащие более четырех электродов. В будущем для сельскохозяйственных целей должны развиваться системы, базирующиеся на нескольких геофизических методах. Эти системы могут быть непосредственно интегрированы с сельскохозяйственной техникой что позволит оперативно принимать точные сельскохозяйственные решения.

5 Комплексование геофизических методов, объединенных и анализируемых совместно с другой геопространственной информацией, может обеспечить сельскохозяйственный обзор, который невозможно получить, анализируя результаты каждого метода в отдельности. Геостатистические аналитические методы могут быть особенно полезными в этом отношении. Географические информационные системы (ГИС) практически очень хорошо адаптированы к интеграции и геостатистическому анализу многократных геофизических и негеофизических пространственных наборов данных. Следовательно, ГИС будет играть все большую и большую роль в анализе геофизических данных, собранных в агроэкосистемных установках. Кроме того, в то время как практика точного земледелия будет расти, ожидается увеличение потребности ввода данных в ГИС для принятия надлежащих управленческих решений в отношении различных областей сельского хозяйства.

6 Программное обеспечение экспертной системы будет разрабатываться для конкретных сельскохозяйственных применений, для обеспечения автоматического анализа и интерпретации геофизических данных.

7 Вероятнее всего, будет существенное увеличение использования программного обеспечения для моделирования инверсии и средств визуализации данных, предназначенных для анализа сельскохозяйственных геофизических данных.

8 Будет развиваться томографическое направление геофизики применительно к сельскому хозяйству. Обычно проведение геофизических исследований на полях в течение сельскохозяйственного сезона затруднено из-за роста и развития растений. Томографические процедуры сбора данных и анализа – потенциальное решение этой проблемы, доступ к исследованиям в пределах полевого горизонтального пространственного образца будет определяться информацией, полученной геофизическими датчиками, находящимися над полем. Томографические процедуры сбора данных и их анализа могут также предоставить ценную геофизическую информацию для сценариев меньшего масштаба.

## **Вопросы для самоконтроля**

1 Какие параметры почвенного покрова могут определяться геофизическими методами?

2 По каким физическим свойствам можно определить важные, с точки зрения сельского хозяйства, характеристики почв?

3 Какие задачи решают геофизические методы в сельском хозяйстве?

4 Какие из геофизических методов наиболее часто используются для решения сельскохозяйственных задач?

5 Какие задачи решает геофизика при гидромелиоративных изысканиях?

6 Какие геофизические методы могут использоваться при гидромелиоративных изысканиях?

7 Назовите современные тенденции сельскохозяйственной геофизики и дайте их краткую характеристику.



## 4 ГЕОФИЗИКА ПОДЗЕМНЫХ И НАЗЕМНЫХ КОММУНИКАЦИЙ

### 4.1 Геофизика подземных коммуникаций

Подземные коммуникации – трубопроводы, силовые кабели и провода связи являются системами жизнеобеспечения, без которых не может нормально функционировать высокоразвитое общество. С начала века сотни тысяч километров различных труб и кабелей были уложены в землю на глубину до 5–6 м. Большая их часть концентрируется в городах и особенно на территории крупных промышленных предприятий. По трубам на предприятия приходит нефть и нефтепродукты, питьевая и техническая вода, вода для отопления, отводятся бытовые и промышленные стоки. Большая часть труб погружена в землю. При длительном взаимодействии труб с окружающим их грунтом возникает коррозия металла. Просадки грунта вызывают напряжения и механические деформации труб, что приводит к образованию трещин в гидроизоляции.

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

- исследование трасс под строительство трубопроводов;
- картирование отдельных труб и кабелей;
- оценка состояния гидроизоляции труб;
- построение схем подключения и трехмерного расположения подземных коммуникаций на сложных технологических участках;
- оценка состояния гидроизоляции и выявление корродируемых участков труб;
- локализация мест утечек жидкого или газообразного наполнителя через повреждения в трубах;
- оценка состояния дниц нефтеналивных резервуаров;
- выявление и картирование подземных тоннелей;
- оценка глубины погружения свайных конструкций.

Для защиты металла от коррозии на магистральных трубопроводах применяют катодную защиту постоянным током низкого напряжения (около –1,5 в). При катодной защите на трубу подается отрицательный потенциал, в то время как положительный полюс (анод) относится в сторону от трубы и заземляется с помощью специальных скважин. В местах нарушения изоляции на трубу натекает электрический ток, который предохраняет металл от коррозии. При нарушении слоя гидроизоляции скорость коррозионного процесса сильно зависит

от удельного электрического сопротивления окружающих пород – чем ниже сопротивление вмещающего грунта, тем больше тока может протекать из трубы и, следовательно, выше коррозионная опасность.

Трубы в земле имеют ограниченный срок эксплуатации: порядка 25 лет. Многие из них находятся под действием насосных станций, которые расположены через каждые 40–60 км, под внутренним повышенным давлением (в магистральных нефтепроводах поддерживается давление от 20 до 50 атмосфер), и содержат опасные для человека горючие и токсичные вещества.

Отклонения в состоянии трубопроводов могут привести к авариям, которые приносят колоссальный экономический и экологический ущерб. Так или иначе, для принятия инженерных решений необходимо знать реальное состояние подземных коммуникаций на данный момент. Замена труб по истечении срока эксплуатации является особенно дорогостоящей операцией. При эксплуатации трубопроводов необходимы постоянные наблюдения за их состоянием, своевременное выявление различных нарушений в состоянии труб и их ремонт.

Отдельная проблема утечки воды из системы водоснабжения. Система трубопроводов охватывает большинство техногенных ландшафтов. Потери воды не представляют такой опасности, как утечки газа. В то же время чистая питьевая вода является ценным продуктом, а ее потери приводят к большим убыткам. Кроме этого, избыточное увлажнение грунтов вблизи мест утечек и повышения уровня грунтовых вод приводит к так называемому подтоплению территорий. Оценки потерь воды из водопроводных сетей в разных странах осуществляются по разным методикам и оцениваются от 5 до 40 %. Например, в благополучных западноевропейских городах по данным на 1997 г. скорость утечки воды из городских водопроводных сетей составляет в Лондоне до 25 %, Риме – 27 %, Париже – 10,6 %, Мюнхене – 10 %, Роттердаме – 9 %.

Как отмечалось выше, геофизические методы могут помочь при решении многих задач контроля состояния труб. Первая задача – это тщательное изучение трассы под строительство трубопровода, особенно в наиболее ответственных местах, например, на пересечениях рек. В последнее время, в первую очередь с точки зрения экологии, укладка труб под рекой осуществляется с помощью скважин наклонного бурения, которые проходят в слое с наилучшими прочностными свойствами на глубинах 15–30 м. При изысканиях в местах переходов трубопровода через реки можно использовать комплекс акваториальных и наземных геофизических методов: речная сейсмоакустика, вертикальные (ВЭЗ) и сплошные (СЭЗ) электрические зондирования, исследования с георадаром, бурение опорных скважин на суше и на акваториях.

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

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

Если гидроизоляция трубы идеальна, то между анодом и катодом не будет тока, а потенциал трубы не будет передаваться в окружающую среду. Над трубой в местах нарушения изоляции появляются отрицательные аномалии потенциалов катодной защиты (ПКЗ): аномалии амплитудой до  $-10$  мВ можно не учитывать, аномалии ПКЗ от  $-10$  до  $-50$  мВ соответствуют участкам слабого нарушения изоляции, участки со средними повреждениями изоляции дают аномалии  $-50 \dots -200$  мВ, а участки сильных повреждений – отрицательные аномалии ПКЗ от  $-200$  до  $-1\ 000$  мВ.

Определение глубины свай является одной из важных технических задач при исследовании состояния фундаментов различных сооружений. При строительстве не всегда сваи заглубляются на проектную и документированную глубину. Поэтому возникает проблема оценки глубины их заложения. Определение глубины можно произвести только для хорошо проводящих свай – стальных и железобетонных. Данная технология основана на изучении распространения электрического тока в земле при использовании сваи в качестве заземления. Считая сваю хорошо проводящей ток за счет металлической арматуры и увлажненного бетона и зная распределение потенциала на земной поверхности, по известным в теории электроразведки формулам для сопротивления заземления вертикального стержня можно рассчитать его глубину.

При геофизическом обследовании нефте- и газопроводов решаются следующие задачи:

– измерение защитных потенциалов системы катодной защиты трубопроводов;

- поиск локальных дефектов и интегральная оценка качества электроизоляции протяженных участков подземных трубопроводов;
- трассирование трубопроводов и определение глубины их залегания;
- определение наличия гальванического контакта подземных трубопроводов в местах их пересечения;
- определение силы и направлений защитных токов установок катодной защиты в разветвленных цепях;
- изучение геоэлектрических разрезов по трассам трубопроводов и анодным заземлениям.

Для решения указанных задач используются:

- метод измерения защитных потенциалов на стационарных контрольно-измерительных пунктах и между ними;
- метод измерения поляризационных потенциалов трубопровода на стационарных контрольно-измерительных пунктах с помощью датчиков электрохимического потенциала;
- метод трассирования трубопровода по магнитному полю основной гармоники защитных токов (100 Гц);
- метод поперечного градиента электрического поля основной гармоники защитных токов (100 Гц);
- метод бесконтактного определения (по магнитному полю) силы и направления постоянного защитного тока трубопровода;
- метод интегральной оценки переходного электрического сопротивления трубопровода;
- метод естественного электрического поля (рисунок 6);
- метод заряда;
- метод сопротивлений (профилирование и зондирование).

Коррозия трубопроводов возникает при разных электрических потенциалах отдельных частей данного сооружения. Разность потенциалов связана с изменением качества обработки металла, изменением напряжения при сжатии и растяжении металла, с воздействием внешних физико-геологических процессов (утечки токов, пониженное сопротивление грунтов). Трубопровод имеет существенно более высокую проводимость, чем окружающая геологическая среда, поэтому концентрирует в себе большую часть блуждающих токов и канализирует их до места с низким электрическим сопротивлением. В таких местах (анодных зонах) ток стекает с трубопровода в окружающую среду, что вызывает вынос ионов металла и ведет к разрушению трубопровода. Взаимодействие металлических конструкций с минерализованными водами (электролит) приводит к возникновению

контактных электродвижущих сил положительного знака за счет перехода ионов металла в окружающую среду. В результате над местами коррозии возникают положительные аномалии потенциала естественного электрического поля (рисунок 7).

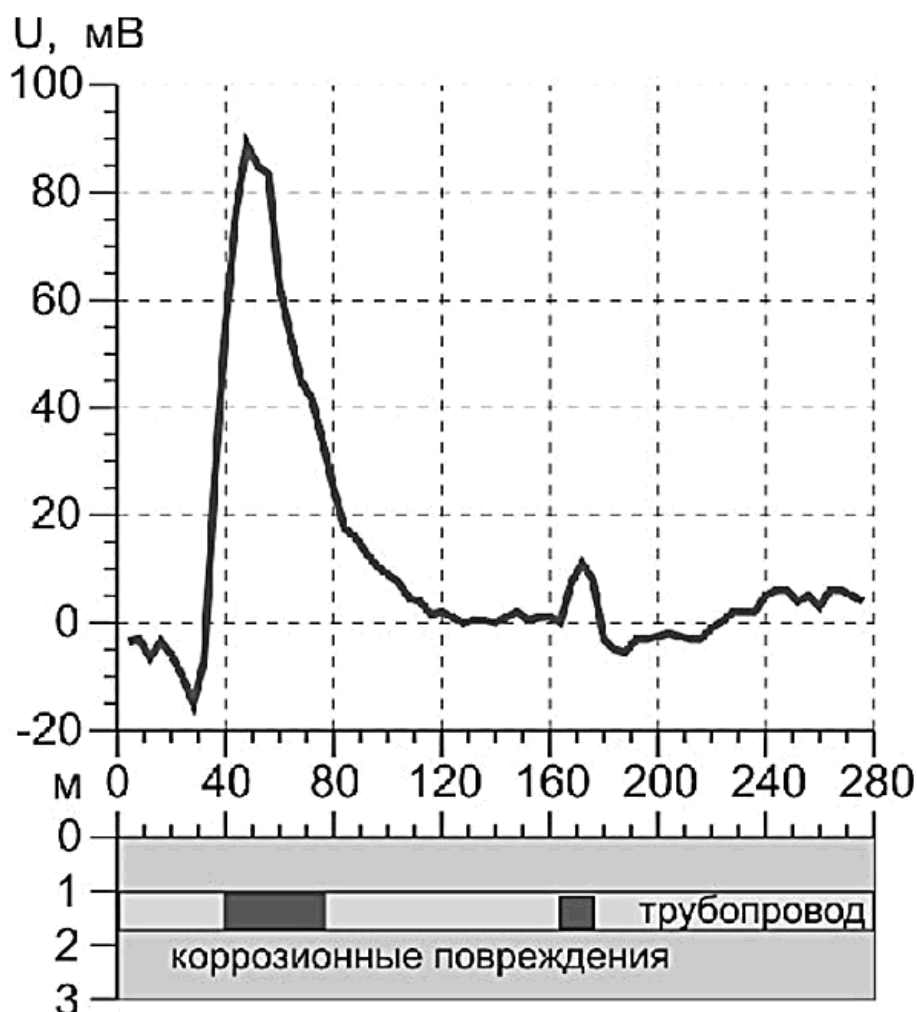


Рисунок 7 – Диагностика коррозионного повреждения трубопровода методом естественного электрического поля

При проектировании трасс трубопроводов техническая геофизика, как правило, решает две задачи:

- 1) изучение распределения потенциала естественного электрического поля;
- 2) изучение электрического сопротивления грунтов.

Обводненность грунтов и минерализацию подземных вод определяют косвенно по величине электрического сопротивления и диагностируют степень коррозионной опасности (таблица 3).

Электромагнитные методы при наблюдениях трубопроводов с поверхности могут решать три задачи: найти положение трубы

в плане, глубину залегания трубы и качество изоляции. Для проявления трубы в ЭМ-поле обычно подключают к трубе генератор переменного тока (625 Гц), пропускают по трубе ток и измеряют переменное магнитное поле от этого тока (по закону Био – Савара) с помощью магнитной антенны ЭРА (МА). В определенных случаях также измеряют электрическое поле  $E_y$ , прямо связанное с токами утечки из трубы в местах нарушения изоляции (рисунок 8).

Таблица 3 – Зависимость коррозионности от удельного электрического сопротивления грунтов

Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Степень коррозионной опасности
Более 100	Низкая
100–20	Средняя
20–10	Повышенная
10–5	Высокая
Мнее 5	Очень высокая

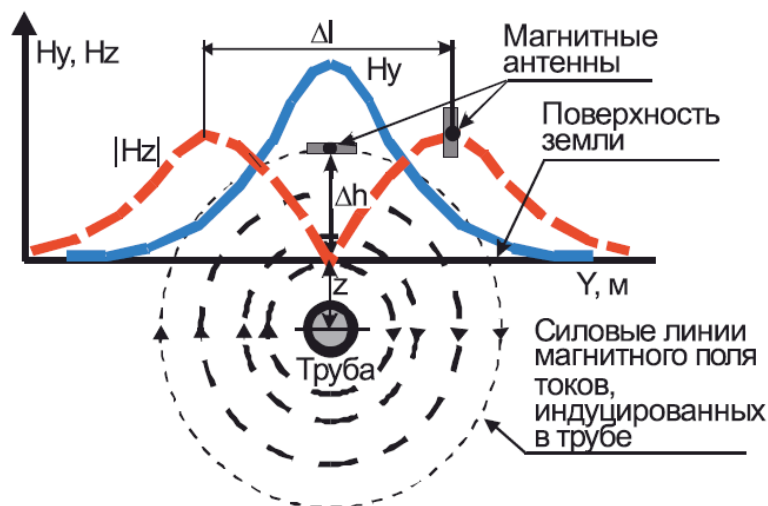


Рисунок 8 – Аномалии компонентов  $H_y$  и  $H_z$  под трубопроводом

Важным фактором, негативно воздействующим на металлические подземные коммуникации, являются техногенные блуждающие токи. Основными источниками этих токов являются рельсовые сети электрифицированной железной дороги, а также линии электропередач постоянного тока (и катодные установки). Наиболее мощными и распространенными из названных источников блуждающих токов являются линии электрифицированных железных дорог. Так как электроснабжение их принципиально одинаково, то и процессы возникновения в земле блуждающих токов от этих источников одинаковы.

Известно, что положительный полюс источника питания на электрических железных дорогах постоянного тока подключается к контактному проводу, а отрицательный к ходовым рельсам. При такой схеме тяговый ток от положительной шины тяговой подстанции по питающей линии поступает в контактный провод, а оттуда через токоприемник к двигателям электровоза или мотор-вагонной секции и далее через колесные пары, рельсы и землю в отсасывающую линию к минусовой шине. Величина стекающего в землю тока, который и называют блуждающим, тем больше, чем меньше переходное сопротивление между рельсами и землей и чем больше продольное сопротивление рельсов. В некоторых случаях величина блуждающих токов в земле может достигать 70–80 % от общей величины тягового тока.

Наиболее значительные токи утечки наблюдаются на участках станционных путей электрифицированных железных дорог, где имеются малые переходные сопротивления между рельсами и землей и значительные величины тяговых токов. Блуждающие токи, возникающие при этом, могут распространяться на большие расстояния. Отмечены случаи, когда влияние блуждающих токов было зарегистрировано на расстоянии до 30 км от линии железной дороги.

Распределение блуждающих токов в земле зависит от потенциалов металла рельс относительно окружающей земли. На всех источниках блуждающих токов имеются участки, где ток стекает в землю, и участки, где ток возвращается к источнику тока.

Процесс коррозии металла в поле блуждающих токов является процессом электролитическим. Металл подвержен действию электролиза. Скорость процесса коррозии, как это следует из закона Фарадея, определяется количеством электричества, протекающего между анодами и катодами уложенного в грунт трубопровода, и зависит от электрического сопротивления грунта и природы процессов, происходящих на анодных и катодных участках нефтепровода. Следовательно, если кроме почвенной коррозии трубопровод подвергается дополнительному воздействию блуждающих токов, то в местах, где складывается электролитическое действие этих токов с токами гальванических пар, может произойти резкое увеличение скорости коррозионных процессов.

Для всех металлических сооружений такими местами являются зоны стекания блуждающих токов в окружающую среду. При достаточно больших потенциалах блуждающих токов последние подавляют ток катодной цепи микропар, возникающих в процессе почвенной коррозии, распространяя разрушение на все микроучастки сооружения в анодной зоне блуждающих токов (рисунок 9).

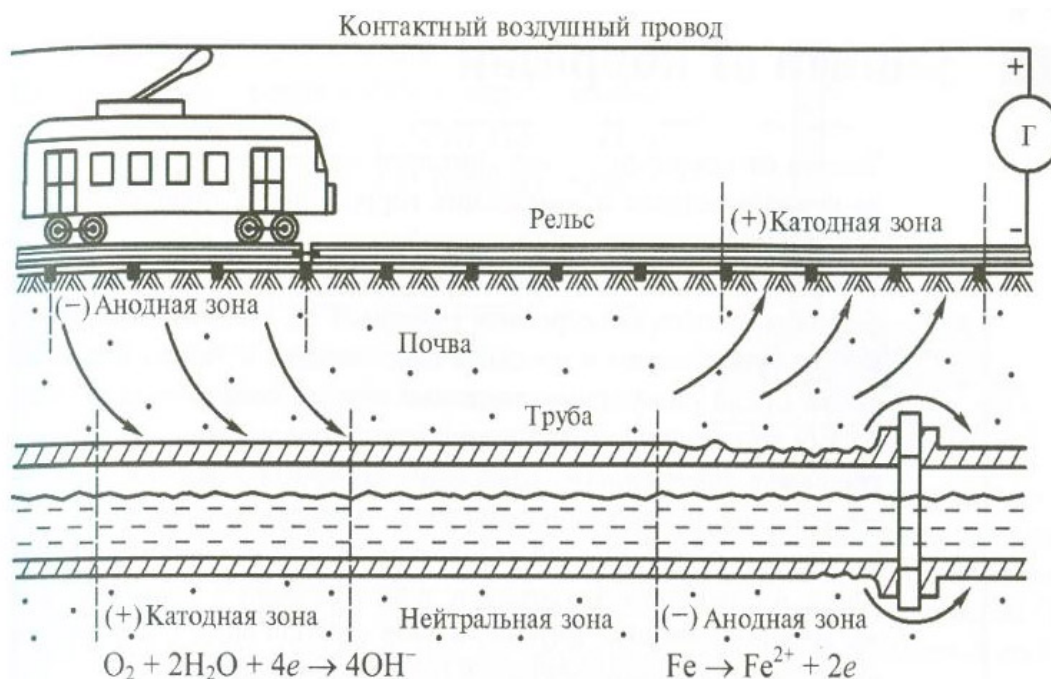


Рисунок 9 – Схема развития коррозии, связанной с техногенными блуждающими токами

Рабочий ток электрифицированных дорог, работающих на постоянном токе, имеет временную зависимость. Колеблющиеся при этом блуждающие токи искажают результаты измерений потенциалов, так как они являются причиной падения напряжения в грунте. Периодичность этих колебаний составляет от нескольких секунд (начало движения и торможение на железной дороге) до 24 ч (расписание движения). По этой причине при измерении потенциала труба/земля целесообразно регистрировать значения в периоде от 0,5 до 24 ч самопишущими измерительными приборами. Для этого используются обычные самописцы. Однако сегодня на рынке представлены измерительные приборы, которые наряду с записью результатов измерений допускают и их обработку, такую как определение среднего значения и выявление минимальных и максимальных значений.

Недостаточно определять значение потенциалов труба/земля исключительно в период отсутствия блуждающего тока, так как их величина в этом случае часто значительно отличается от значений при наличии блуждающего тока. Эти отклонения обосновываются тем, что во время эксплуатации на протяжении всего периода для тока имеются преимущественные направления.

Таким образом, техногенные блуждающие токи опасны, прежде всего, своей электрохимической активностью, которая приводит к ускоренной коррозии подземных металлических сооружений, в том числе трубопроводов и газопроводов.



Определение наличия блуждающих токов производится в полевых условиях методом естественного поля. Методика работ реализуется согласно ГОСТ 9.602-89 и ГОСТ 9.602-2005. В работе используются неполяризующиеся электроды, представляющие собой пористый керамический сосуд, в который заливается насыщенный раствор медного купороса, а в раствор погружается стрежень. Контакт в такой электроде осуществляется фильтрацией раствора медного купороса в землю через пористую поверхность электрода. Для проектируемого сооружения разность потенциалов на трассе проектируемого сооружения измеряют между двумя точками земли через каждые 1 000 м по двум взаимно перпендикулярным направлениям при разносе измерительных электродов – 100 м. Значение разности потенциалов в каждой точке регистрируют через каждые 10 с в течение 10 мин. Результатом обработки данных является заключение о наличии/отсутствии блуждающих токов в каждой точке измерения. Если измеряемое значение превышает 0,040 В или разность наибольшего и наименьшего значений во времени превышает 0,040 В, то в данном пункте измерения регистрируют наличие блуждающих токов.

## **4.2 Геофизика наземных коммуникаций**

Одним из наиболее распространенных объектов технической геофизики являются насыпи автомобильных и железных дорог. Насыпь – сооружение из насыпного грунта, получаемого обычно при разработке выемок или забираемого из карьеров и резервов. Центральная часть насыпи, на которой укладывают железнодорожный путь, называемая ядром насыпи, ограничена по бокам откосами. Ширина насыпи зависит от числа путей, ширины междупутий, предполагаемых скоростей движения и др. Высота может достигать 12–20 м. Вдоль насыпи устраивают водоотводные канавы и различные защитные сооружения. Когда железнодорожная линия проходит по затопляемым местам, возникает необходимость создания фильтрующей насыпи. В настоящий момент часть насыпей находится в плохом состоянии, подвержена сильным вибрациям, из-за которой скорость прохождения поездов искусственно понижается для уменьшения дальнейшего расшатывания сооружения. При этом особое внимание уделяется высокоскоростным трассам, где интенсивность движения и соответствующие нагрузки на насыпь особенно велики (Модин, 2010).

Железнодорожное полотно представляет собой комплекс грунтовых сооружений, получаемых в результате обработки поверхности

земли и предназначенных для укладки верхнего строения пути, обеспечения устойчивости пути и защиты его от воздействия атмосферных и грунтовых вод. Конструкция земляного полотна принимается в зависимости от категории дороги, типа дорожной одежды и местных природных условий, в том числе от условий увлажнения, состояния и свойств грунтов основания, с учетом деления территории России на дорожно-климатические зоны. Существует множество основных типовых конструкций насыпей. Для выявления реальной ситуации железнодорожные насыпи должны быть разбурены через каждый километр поперечным профилем из девяти скважин. Однако на практике число скважин составляет 1–2 скважины на каждые 2–3 км насыпи. В большинстве случаев процедура бурения насыпи сталкивается с непреодолимыми организационными проблемами. Между тем очевидно, что для того, чтобы поезд сошел с рельс, нужен дефект в насыпи размером до 1–2 м, и только геофизические методы исследования позволяют работать с высокой степенью детальности и выявлять такие неоднородности (Модин, 2010).

Задачи, решаемые геофизическими методами, следующие: 1) лежит ли насыпь на естественном грунте; 2) какова мощность балластного слоя щебня; 3) какие грунты слагают насыпь и какова их мощность; 4) лежит ли грубообломочный материал в основании насыпи и на какой глубине; 5) какова влажность грунтов; 6) есть ли карст под полотном; 7) какова морфология мерзлоты под насыпью; 8) существуют ли плывунные отложения под насыпью (Модин, 2010).

Особенностями геофизических исследований при изысканиях под строительство железных и автомобильных дорог являются линейный характер; большая протяженность; ограниченная ширина и зона безопасности; многообразие инженерно-геолого-гидрогеологических условий; подвижной характер; малый объем бурения и других инженерно-геологических методов; усиление роли геофизических методов на начальных стадиях; повышенные требования к портативности и мобильности геофизической аппаратуры и оборудования.

Полевые геофизические работы выполняются в труднодоступных районах с плохой транспортной сетью при малой информативности о строении разреза, физических параметрах пород и условиях проведения работ. В практике транспортных изысканий важное значение имеют электро-, сейсмо-, магниторазведка и геофизические исследования скважин. Глубина исследований обычно не превышает 30 м. Задачи изысканий методами технической геофизики в этом случае будут:

- оценка глубины залегания скальных пород;
- картирование мерзлых пород;

- определение уровня грунтовых вод (УГВ);
- оценка прочностных характеристик пород (Шувалов, 2011).

На эксплуатируемых дорогах геофизическими методами изучают земляное полотно, по надежности и устойчивости которого выделяют ослабленные (по прочности) зоны и дают характеристику слагающих их грунтов. Исследования на эксплуатируемых дорогах осложнены следующими особенностями: необходимостью выполнения работ на крутых откосах насыпей и выемок; высоким уровнем электрических и механических помех от систем сигнализации и движения транспорта; повышенной опасностью работ на эксплуатируемом земляном полотне; высокими требованиями к точности и надежности данных. Геофизические методы, применяемые на эксплуатируемых дорогах, должны иметь высокую помехоустойчивость, информативность, точность и надежность. Для этого используют МПВ, электрические методы, радиометрию и геофизические исследования в скважинах (Шувалов, 2011).

Важной задачей мониторинга автомобильных дорог является оценка состояния дорожного покрытия, земляного полотна, водоотвода. Это связано с тем, что до появления видимых разрушений дорожного покрытия (трещин, просадок) внутри «дорожной одежды» или земляного полотна происходят негативные процессы – переувлажнение грунта, образование суффозионных пустот, подтопление грунтовыми водами. Часто разрушение автомобильной дороги случается из-за недооценки инженерно-геологических и гидрогеологических условий. Для диагностики состояния дороги широко используется георадарный метод. Георадар позволяет определять толщину конструктивных слоев земляного полотна, степень влажности и плотности грунтов земляного полотна и подстилающего основания, положение уровня грунтовых вод, пространственное расположение подошвы грунтов основания под телом насыпи, местоположение зон разуплотненных грунтов, пустот, зон инфильтрации подземных вод. Для решения этих задач применяются георадарные установки, различающиеся по типам антенн, работающие на разных частотных диапазонах.

На рисунке 10 показан пример обнаружения участка повышенной влажности в дорожной насыпи с помощью электрического профилирования на постоянном токе. Повышение влажности (в результате разуплотнения дорожной насыпи) диагностируется снижением кажущегося электрического сопротивления.

Еще один объект технической геофизики – линии электропередач (ЛЭП). При изучении трасс ЛЭП основное внимание обращают на

площадки под опоры ЛЭП. Используют ВЭЗ, МПВ и геофизические исследования в скважинах. Вдоль трассы выполняют электропрофилирование. Основная задача геофизики – получение данных для оценки устойчивости оснований опор. Данные электроразведки используют для оценки кажущегося сопротивления заземления опор и сопротивления растеканию тока с электрических проводов. Кажущееся сопротивление поверхностного слоя определяют с учетом напряжения проектируемой ЛЭП: чем больше напряжение, тем больше должна быть мощность изучаемой толщи (Шувалов, 2011).

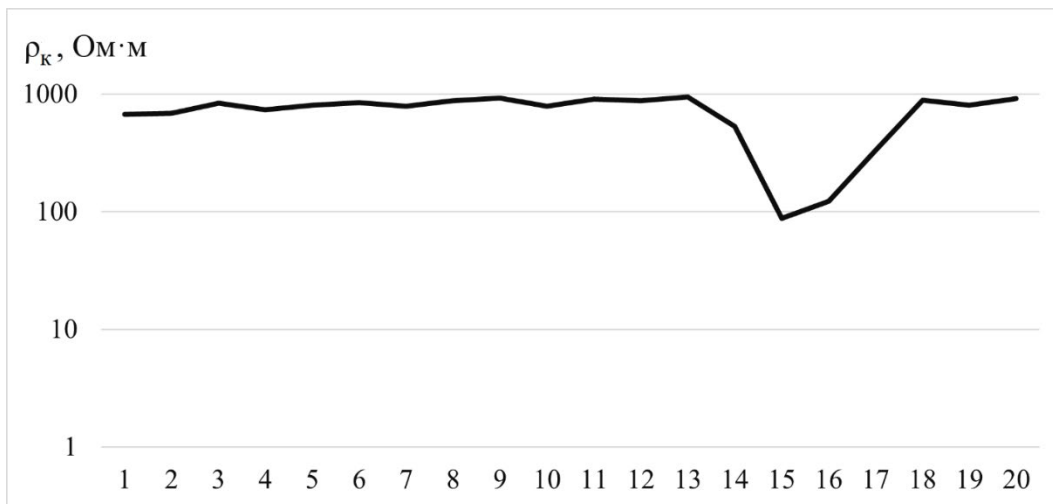


Рисунок 10 – Аномалия кажущегося сопротивления, связанная с повышенной влажностью на участке разуплотнения дорожной насыпи, по данным электрического профилирования вдоль дороги

## Вопросы для самоконтроля

- 1 Какие задачи решаются геофизическими методами при мониторинге подземных коммуникаций?
- 2 Какие геофизические методы используются при оценке состояния нефте- и газопроводов?
- 3 Какие задачи решаются геофизическими методами при мониторинге железных дорог?
- 4 Какие задачи решаются геофизическими методами при мониторинге автомобильных дорог?

## **5 ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

### **5.1 Геофизические методы мониторинга зданий и сооружений**

Развитие современных строительных технологий и методов проектирования способствовало созданию крупных объектов промышленного, транспортного и жилищного строительства. Возведение современных объектов и их дальнейшая эксплуатация часто сталкиваются с решением довольно сложных инженерных задач, связанных с условиями взаимодействия сооружения и геологической среды. Во многих случаях требуется получить информацию о внутреннем строении и свойствах строительных материалов, геотехнических объектов или техногенно-измененного грунтового массива. Для решения этих задач широко применяются неразрушающие инструментальные методы, т. е. методы геофизических исследований.

Наиболее часто встречающиеся в мониторинге зданий и сооружений задачи диагностики строительных конструкций, решаемые с помощью методов геофизики:

- определение геометрических характеристик технических объектов (толщина стен, перекрытий, плит, длина и периметр свай, дефекты свай, дефекты стен, плит и т. д.);
- оценка физико-механических свойств грунтов основания (деформационные характеристики, прочностные характеристики, влажность, трещиноватость, просадочность);
- оценка внутреннего строения (сплошность, армирование, особенности конструктивных элементов);
- оценка состояния контактов (контакты между строительными конструкциями, контакт с грунтами основания).

При обследовании строительных конструкций обычно применяется комплекс методов: ультразвуковые, акустические и георадарные. Каждый из методов имеет свои недостатки и преимущества.

Примером применения геофизических методов является технология контроля качества бетонных свай поверхностным акустическим методом. В методах исследования бетонных свай, использующих скважинные наблюдения, применяется ультразвук, сейсмоакустика, георадарные и появившиеся термометрические наблюдения. Термо-

метрический метод основан на измерении температуры тела конструкции в процессе твердения бетона (реакции гидратации цемента). Комплекс данных методов позволяет проводить контроль качества отдельностоящих свай, свайных фундаментов и т. д.

На рисунке 11 показаны геофизические методы контроля свай: *a* – сейсмоакустический; *b* – межскважинный ультразвуковой; *c* – однокважинный ультразвуковой; *d* – параллельный сейсмический.

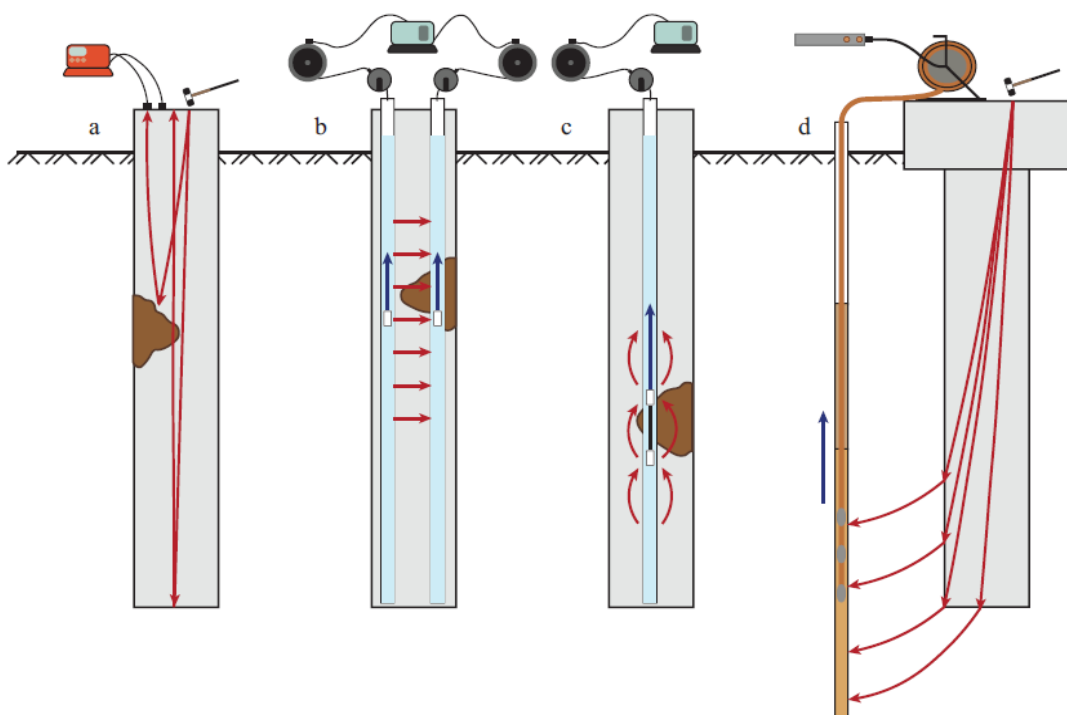


Рисунок 11 – Геофизические методы контроля свай (Капустин, Владов, 2020)

Важной задачей является контроль фундаментных плит. При обследовании фундаментных плит применяется, как правило, комплекс геофизических методов: ультразвуковые, акустические и георадарные. При геофизическом обследовании фундаментных плит проводится определение толщины, распределения прочности бетона, оценка контактных условий, наличия дефектов, характера армирования и др. Используемые при оценке прочности бетона стандартные методы являются точечными: выбуривание и испытание кернов, отрыв со скалыванием, склерометрия, ультразвук и т. п. Получаемый при этом параметр прочности определяется свойствами небольшого объема среды и, по существу, относится к физической точке. Выполнение измерений прочностных характеристик монолитных конструкций большой площади целесообразно выполнять в два этапа: на первом оценивать одно-

родность бетона и разбивать площадь конструкции на зоны с однородным бетоном, а на втором этапе в пределах каждой выделенной зоны определять прочность бетона стандартными методами с минимальным количеством испытаний. В результате такого подхода может существенно снизиться трудоемкость обследования и повыситься достоверность получаемых результатов свай (Капустин, Владов, 2020).

Георадиолокационные исследования на фундаментных плитах проводятся для решения целого ряда связанных между собой задач. Сюда относятся: определение толщины плиты, степень ее однородности в плане и по толщине, поиск пустот под плитой, заполненных воздухом или водой, распределение мощности и однородности подготовительной отсыпки. Георадиолокационные наблюдения проводятся при перемещении антенн георадара по поверхности плиты при движении оператора пешком со скоростью около 0,5 м/с. Возможность такой скорости перемещения радара позволяет осуществлять детальную съемку фундаментных плит довольно больших размеров свай (Капустин, Владов, 2020).

Среди скрытых дефектов конструкций тоннелей особую роль играют неоднородности, расположенные за обделкой тоннелей. Происхождение этих полостей, зон понижения плотности вмещающих грунтов может быть различным. Чаще всего это локальные нарушения сплошности массива связующих растворов, нагнетаемых при проходке за обделку тоннеля. Нагнетание растворов за обделку тоннелей производится с целью заполнения остающихся за ней в процессе строительных работ пустот и зазоров твердеющими растворами, которые обеспечивают совместную работу обделки с окружающим грунтом. Нагнетание растворов улучшает статическую работу, уменьшает деформации обделки, предупреждает осадки земной поверхности, обеспечивает повышение водонепроницаемости конструкций и, как следствие, уменьшает их коррозию и повышает долговечность сооружений (Капустин, Владов, 2020).

Контроль качества нагнетания растворов за тоннельную обделку, относящихся к скрытым работам, должен производиться систематически на всех этапах проведения работ. Обследование конструкций тоннелей и метрополитенов включает в себя визуальное и инженерно-инструментальное обследование с проведением геофизического (сейсмоакустического) обследования заобделочного пространства тоннелей и грунтового массива и геодезическо-маркшейдерские работы. Объектами контроля являются:

– обделки железнодорожных, автодорожных тоннелей, тоннелей метрополитена – перегонных и станционных притоннельных и станционных сооружений, пересадочных узлов, пешеходных переходов;

- конструкции вентиляционных комплексов (шахтные стволы, нижние и верхние вентиляционные коллекторы);
- внутренние несущие конструкции станционных комплексов, притоннельных и пристанционных сооружений (колонны, пилоны, прогоны, перекрытия, стены, подплатформенные коллекторы);
- конструкции подземных и надземных вестибюлей;
- заобделочное пространство сооружений (состояние контактного слоя «грунт – обделка»);
- грунт в основании сооружений и за обделками тоннелей.

Контроль качества заполнения заобделочного пространства широко применяется при строительстве тоннелей метро. При обследовании протяженных участков тоннелей рекомендуется использовать комплекс сейсмоакустических и георадарных методов. Основным методом, применяемым в настоящее время для оценки контактных условий, является акустический метод (Капустин, Владов, 2020).

Акустические методы позволяют оценить интегральные характеристики обделки и оценить состояние контакта между конструкциями тоннеля и заобделочным пространством. Акустический метод может применяться в двух модификациях: импакт-метод и виброакустический метод (метод регистрации изгибных колебаний). Поскольку данные методы работают в разных частотных диапазонах (виброакустический – в низкочастотном, импакт-метод – в высокочастотном), они имеют разную разрешающую способность в плане.

Виброакустический метод применяется для обнаружения крупных нарушений контакта (от 1 м в плане и более), импакт-метод позволяет обнаруживать дефекты, размер которых в плане составляет десятки сантиметров и поэтому используется для детальных работ. Для оценки состояния контакта обделки с вмещающим грунтом выполняется анализ динамических параметров акустического отклика колебательной системы. В качестве определяемых параметров используются добротность, энергия нормированного сигнала, средневзвешенная частота, площадь нормированного спектра (Капустин, Владов, 2020).

Тепловизионная инфракрасная диагностика строительных сооружений включает в себя:

- 1 Определение частичных и общих теплопотерь.
- 2 Определение скрытых дефектов строительства.
- 3 Оценку сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций.

Тепловые аномалии отображаются на термограммах в виде областей повышенной или пониженной температуры и соответствуют:

- архитектурным деталям;
- неоднородностям коэффициента излучения поверхности;



- неоднородностям теплообмена с окружающей средой;
- различного рода дефектам.

Количественную оценку тепловых аномалий производят с целью оценить степень их опасности для нормального функционирования объекта.

Основными видами строительных дефектов, обнаруживаемых с помощью ИК-термографии, являются:

- места протечек воздуха и воды;
- мостики холода и тепла;
- ухудшение сопротивления;
- дефектные панели ограждающих конструкций;
- отслоение штукатурки, облицовки и других покрытий.

Обнаружение скрытых дефектов основано на использовании принципа сравнения текущей зоны контроля с эталонной (бездефектной) зоной. Обнаруживать скрытые дефекты строительства тепловизионным методом можно внутри и снаружи помещений. Наружный осмотр более пригоден для оценки общих теплопотерь зданий и сопротивления теплопередаче, включая анализ эффективности архитектурных решений, а также для выявления существенных дефектов, которые значительно искажают поверхностное температурное поле. Качество строительства большинства производственных зданий, в частности, главных корпусов тепловых станций, энергообъектов, возведенных в 1960–1970-е гг., было невысоким, поэтому по мере их эксплуатации интенсивно ржавеют металлические соединения стеновых панелей, что может привести к выпадению отдельных фрагментов стен наружу или внутрь помещений. Интенсивность коррозии связана с промаканием панелей, что хорошо идентифицируется с помощью тепловидения.

Наилучшие результаты инфракрасная тепловая съемка показывает при использовании цветных и черно-белых термограмм, которые оператор анализирует на основе своего опыта и критериев изложенных ниже. Черно-белые изображения имеют более естественный вид и наиболее пригодны, когда тепловую аномалию обнаруживают на фоне множества «тепловых отпечатков», носящих шумовой характер. Цветное представление термограмм эффективно, если анализируемая тепловая аномалия по температуре отличается от окружающего температурного фона незначительно. Цветовые термограммы также используются при документировании результатов (Михайлова и др., 2016).

Диагностика железобетонных конструкций устанавливает:

- прочность, проницаемость, однородность и сплошность бетона;
- состояние антикоррозионной защиты;

– химический состав агрессивных сред, влияющих на состояние цементного камня;

– вид, степень и глубину коррозии бетона (карбонизация, сульфатизация, проникновение хлоридов);

– причины, характер, ширину и глубину раскрытия трещин;

– наклон, перекосы, сдвиги и вертикальные перемещения бетонных и железобетонных конструкций;

– степень коррозии арматуры, закладных деталей и сварных швов;

– фактические нагрузки и эксплуатационные воздействия.

Для решения ряда указанных задач применяются методы технической геофизики, позволяющие осуществлять неразрушающий контроль железобетонных конструкций. Неразрушающие методы обследования бетона:

1 *Ультразвуковой метод*. С использованием ультразвуковых приборов можно измерять скорость распространения ультразвуковых волн в бетоне. Этот метод неразрушающий и позволяет определить прочность бетона.

2 *Радарная томография*. Радары способны сканировать бетон и создавать его изображение с разными глубинами проникновения. Этот метод позволяет выявить внутренние дефекты.

3 *Тепловая съемка*. Этот метод включает в себя тепловизионное сканирование для обнаружения внутренних проблем в бетоне на основе тепловых различий.

4 *Ультразвуковой метод* использует звуковые волны для определения прочности бетона. Он работает путем измерения времени, которое требуется ультразвуковым волнам для прохождения через бетонную конструкцию. Более высокая скорость звука указывает на более высокую прочность бетона. Этот метод обычно применяется для измерения прочности бетона внутри структуры.

5 *Магнитометрический метод*. Магнитометрический метод основан на измерении магнитных свойств бетона. Магнитные свойства бетона могут быть связаны с его прочностью и структурой. Этот метод может использоваться для оценки прочности бетонных конструкций и обнаружения дефектов. Магнитный метод контроля регламентируется ГОСТ 22904-93. Этот метод позволяет установить величину защитного слоя, выявить расположение верхнего ряда стержневой арматуры и закладных, а также при неизвестном защитном слое примерно оценить диаметр арматуры. Использование магнитного метода дает возможность уточнить соответствие исполнения железобетонных конструкций проектным решениям в части соответствия диаметра и

положения использованной арматуры; восстановить утраченную проектную документацию по армированию; оценить взаимное расположение арматуры и трещин, выходящих на поверхность конструкции.

6 *Метод вихревых токов.* Метод использует вихревые токи, индуцированные переменным магнитным полем, для оценки прочности бетона. Эти токи реагируют на структуру и состав бетона, и их измерение может предоставить информацию о его прочности и состоянии.

7 *Нейтронная радиография.* Нейтронная радиография включает в себя использование нейтронов для изучения структуры бетона. Этот метод может использоваться для обнаружения внутренних дефектов и оценки состояния бетонных конструкций.

## 5.2 Геофизические методы мониторинга плотин

При мониторинге плотин решаются следующие задачи:

– анализ состояния бетонных конструкций (локализация мест переувлажнения, наличие и состояние армирующего каркаса, определение положения арматуры, наличия трещин, расслоений, дефектов);

– анализ состояния массива грунтовых плотин (локализация зон переувлажнения, оценка состояния подводной части, поиск погребенных в теле плотины объектов);

– изучение гидрологических условий (выяснения профиля дна водоема, оценка осадконакопления, определение мощности рыхлых осадков, локализация мест наибольшей фильтрации через тело плотины);

– изучение гидрогеологических условий (определение глубины залегания уровня грунтовых вод, определение глубины залегания и мощности водоупоров, определение фильтрационных свойств массива грунтов);

– изучение инженерно-геологических процессов и явлений (определение мощности и строения зоны выветривания, выявление тектонических нарушений, зон трещиноватости, развития суффозии, карста);

– сейсмический мониторинг естественной и техногенной сейсмичности.

Главной задачей эксплуатационного контроля за состоянием как земляных, так и бетонных плотин является обеспечение их надежности. Задачи мониторинга: определить по данным натурных наблюдений наиболее ослабленные и чувствительные к изменению нагрузок места в сооружении (подземный контур, напорная грань, отдельные секции, отметки и т. д.); установить наличие, характер и причины необратимых явлений, возможность прогноза их развития; выбрать диагностические

параметры и признаки, которые характеризовали диагностируемое состояние (устойчивость, прочность и долговечность, а также обосновывали необходимость ремонта или изменения условий эксплуатации).

Грунтовые плотины – одни из самых распространенных гидротехнических сооружений. Грунтовые плотины экономичны при строительстве, но наиболее подвержены частичному или полному разрушению, что может привести к катастрофическим последствиям. Плотины находятся под постоянным гидравлическим напором, поэтому с течением времени происходит разрушение насыпи, в основном из-за неоднородности используемого природного грунта, нарушений технологии строительства грунтового гидротехнического сооружения (ГТС) и несвоевременно выявленных изменений в теле насыпи.

Контроль за состоянием плотин осуществляется инженерно-геологическими методами. Изучаются физические свойства грунтового материала, взятого из пробуренных скважин. Эти исследования самые достоверные, но дают точечную информацию и разрушают целостность насыпи. Для оперативного неразрушающего контроля ГТС используют альтернативные геологическим геофизические методы. Наибольшее предпочтение отдается геоэлектрическим методикам, позволяющим по электрофизическим характеристикам грунта обнаружить участки повышенной обводненности и места инфильтрации воды. Электроразведочные работы позволяют выявлять основной негативный фактор, влияющий на состояние плотины, – влагонасыщенность грунта. В местах фильтрации воды сквозь тело и основание насыпи возможно развитие процессов суффозии, приводящих к разуплотнению породы, образованию полостей. В этом случае целесообразно в комплекс с электрическими исследованиями включать сейсмические методы для изучения упругих свойств среды (Федорова, Давыдов, 2014).

При изучении технического состояния земляных плотин оценивают положение и форму депрессионной поверхности, выделяют неоднородности в теле плотины и оценивают суффозионную устойчивость. Депрессионные поверхности (контрастные геофизические границы) изучают по данным ВЭЗ и ВЭЗ-ВП. Карты изолиний потенциала естественного электрического поля отображают карту гидроизогипс. Сейсморазведка и электроразведка позволяют изучить фильтрацию воды через плотину. Например, проводят измерения потенциала или градиента потенциала естественного электрического поля через 1–3 месяца и по изменению площадей и амплитуд отрицательных аномалий судят о динамике суффозионного процесса.

При изучении технического состояния водохранилищ и каналов оценивают фильтрацию в ложе и бортах сооружений, качество противофильтрационных работ и изучают процессы заиливания акваторий. Для этого используется комплекс из метода естественного электрического поля, термометрии и резистивиметрии (Шувалов, 2011).

На рисунке 12 показана типичная форма аномалий естественного электрического поля и температуры, наблюдаемые на участке повышенной водопроницаемости в теле плотины.

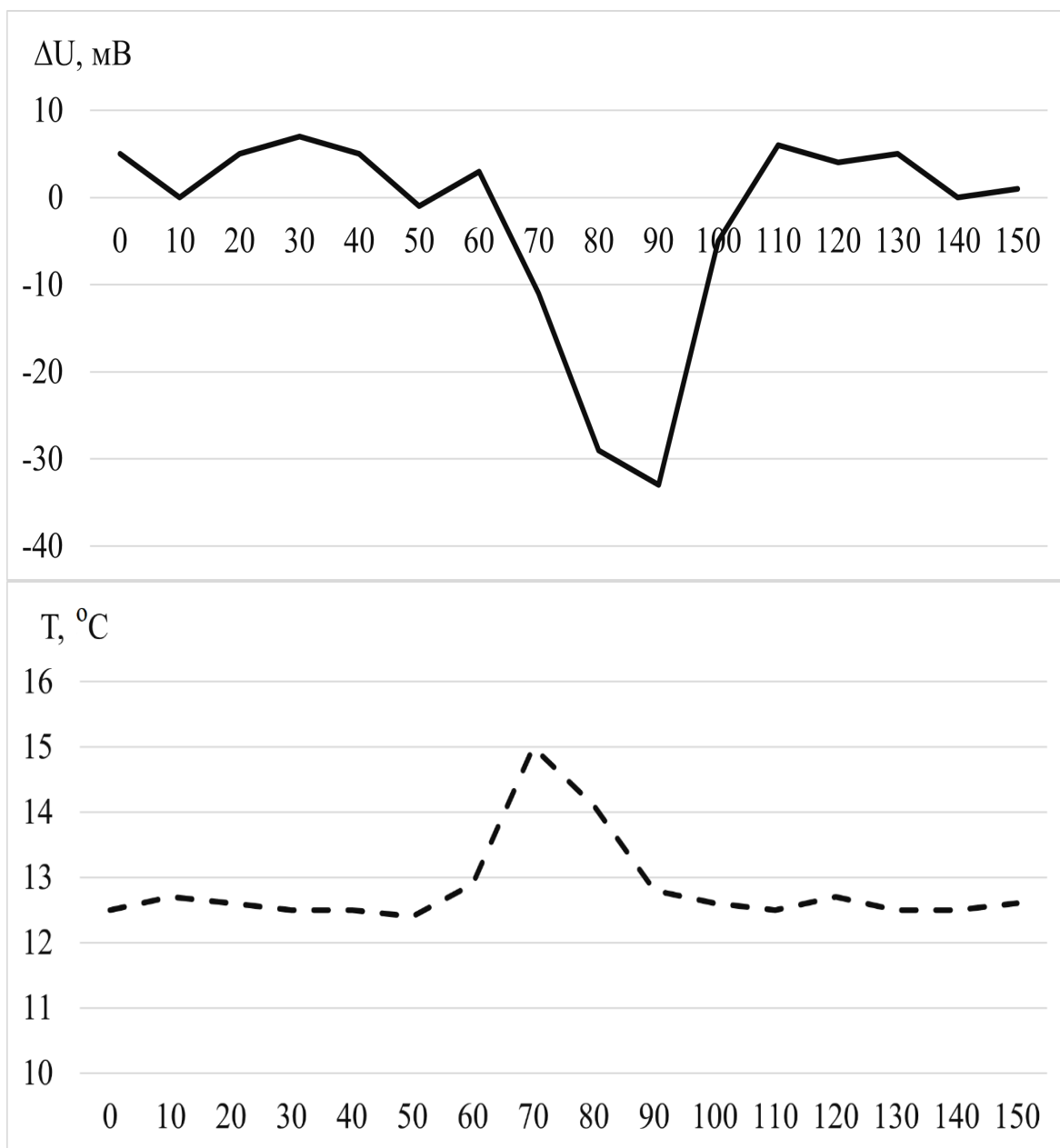


Рисунок 12 – Аномалии естественного электрического поля (вверху) и температуры (внизу) в зоне повышенной проницаемости в теле грунтовой плотины

Изменения фильтрации воды через нарушения в теле грунтовой плотины могут фиксироваться с помощью повторных съемок методом естественного электрического поля. На рисунке 13 показаны изменения потенциала естественного электрического поля во времени.

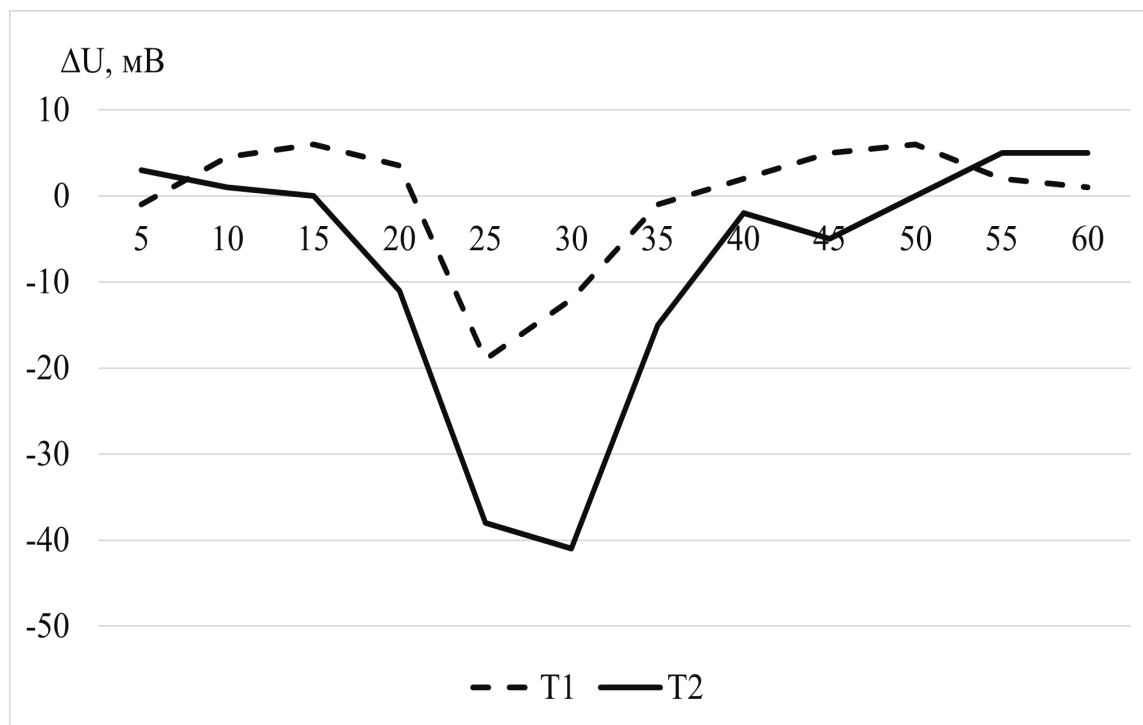


Рисунок 13 – Динамика потенциала естественного электрического поля в зоне разуплотнения тела плотины (T1 и T2 – моменты времени)

Обводнение участков разуплотнения (трещиноватости) в теле плотины может обнаруживаться с помощью профилирования методом вызванной поляризации (рисунок 14). Для терригенных пород, в случае незначительного количества электропроводящих вкраплений, характер и интенсивность эффекта вызванной поляризации зависит от размера зерен, пористости и влагонасыщенности породы, а также от минерализации порового флюида. Соответственно участки с высокой влагонасыщенностью будут отмечаться положительными аномалиями кажущейся поляризации ( $\eta_k$ ).

Геоэлектрический мониторинг показывает очень высокую эффективность, в особенности, в случае плотин различного типа. Электроразведка позволяет выявлять неоднородности сопротивления в теле плотины, которые могут быть связаны с возникновением ослабленных зон, зон повышенной фильтрации воды. Локализация и наблюдение за этими областями во времени помогает своевременно предупреждать развитие опасных процессов.

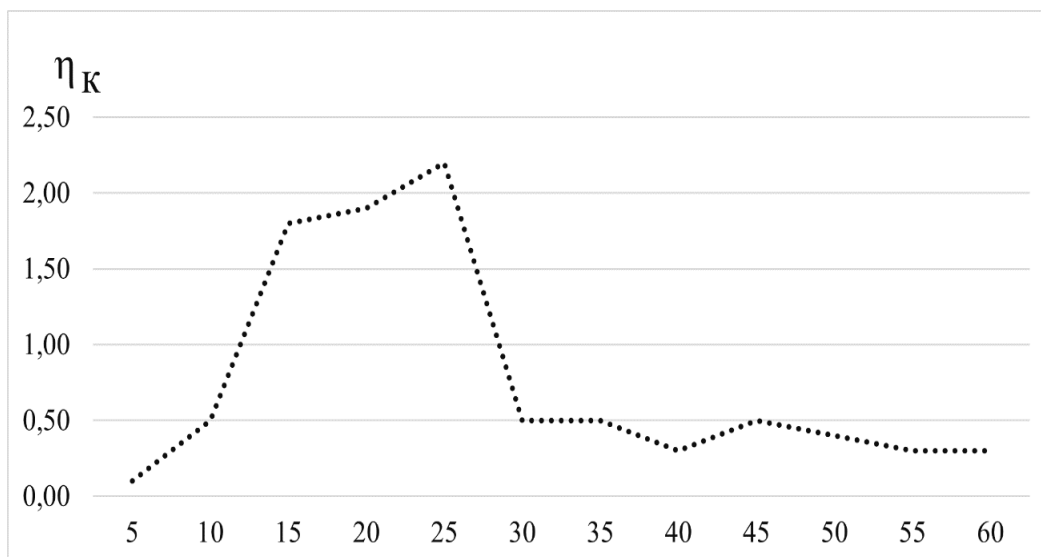


Рисунок 14 – Аномалия кажущейся поляризации на участке разуплотнения грунтовой плотины

Опыт геофизического мониторинга на крупных гидротехнических объектах указывает на необходимость заблаговременного формирования специализированного комплекса наблюдений во время первого наполнения водохранилища. Схемы наблюдений для этого, наиболее ответственного, периода требуют существенно большей детальности (как временной, так и пространственной), чем системы наблюдений эксплуатационного периода, поскольку в этот начальный период выбираются и отрабатываются оптимальные методики и режимы наблюдений (Павлова, 2014).

Так, например, для мониторинга состояния плотины Камбаринской ГЭС-2 (КГЭС-2) использовался следующий комплекс методов: вертикальное электрическое зондирование в варианте резистивной томографии (ЭРТ) по восьми профилям с глубиной зондирования до 100 м; микросейсмические измерения (СМР), горизонтальной ( $H$ ) и вертикальной ( $V$ ) компонент микросейсмического шума для выявления локальных эффектов усиления сейсмических колебаний и оценки мощности различных слоёв в теле плотины. Для мониторинга фильтрационных процессов в теле плотины использовались пьезометрические наблюдательные скважины. Результаты режимной электротомографии и пьезометрического мониторинга свидетельствовали о наличии в теле плотины двух основных фильтрационных потоков: выявлена фильтрация через аллювиальные отложения в основании плотины, на участке засыпанного русла р. Нарын; обнаружено просачивание воды из водохранилища через два фильтрационных окна в насып-

ной левой верхней части плотины. На основании результатов комплексных геофизических исследований и мониторинга состояния плотины КГЭС-2 создана трёхмерная геолого-геофизическая модель плотины (Торгоев, Хавенит, 2018).

Для мониторинга грунтовой плотины водохранилища К-25 в Республике Казахстан был предложен и использован рациональный комплекс геофизических методов: электроразведочные методы дипольно-электрического зондирования (ДЭЗ), вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), естественного электрического поля (ЕП), георадарное и сейсмическое зондирование (Ахметов и др., 2022).

По данным совместной интерпретации результатов дипольно-электрического зондирования в модификации вызванной поляризацией, вертикального электрического и георадарного зондирований, составлены инженерно-геологические разрезы, которые можно рассматривать как исходные модели для мониторинга водопроницаемости плотины. Площадная электроразведка методом естественного электрического поля показала высокую результативность в варианте режимных наблюдений при выявлении зон фильтрации воды. С целью достоверности диагностики аномальных эффектов, связанных с фильтрационными процессами, использован параметр дисперсии электрического потенциала. Сейсморазведка корреляционным методом преломленных и рефрагированных волн на продольных и поперечных волнах была достаточно продуктивной при изучении строения плотины и выявлении в ней ослабленных зон, в которых могут проходить фильтрационные процессы. Корреляция выделенных сейсморазведкой ослабленных участков с зонами аномально повышенной дисперсии электрического потенциала существенно повысила достоверность геофизических данных при оценке фильтрационной обстановки в плотине (Ахметов и др., 2022).

## **Вопросы для самоконтроля**

1 Какие задачи решаются геофизическими методами при мониторинге технических систем?

2 Какие геофизические методы используются при оценке состояния зданий и сооружений?

3 Какие задачи решает тепловая съемка зданий и сооружений?

4 Какие геофизические методы используются для диагностики состояния железобетонных конструкций?

5 Какие задачи решаются геофизическими методами при мониторинге плотин?



## 6 ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКЕ

### 6.1 Микромагнитная съемка археологических объектов

**Цель:** выяснение места потенциального нахождения захороненных археологических объектов.

**Материалы:** данные микромагнитной съемки (таблица 4).

Таблица 4 – Результаты микромагнитной съемки (шаг между пикетами 2 м, между профилями – 5 м)

Профиль 1		Профиль 2		Профиль 3		Профиль 4		Профиль 5	
№	T, нТл	№	T, нТл	№	T, нТл	№	T, нТл	№	T, нТл
1	50 100	1	50 132	1	50 120	1	50 110	1	50 122
2	50 120	2	50 130	2	50 344	2	50 140	2	50 200
3	50 109	3	50 181	3	50 301	3	50 377	3	50 108
4	50 095	4	50 345	4	50 244	4	50 450	4	50 110
5	50 105	5	50 401	5	50 120	5	50 178	5	50 120
6	50 130	6	50 333	6	50 111	6	50 150	6	50 130
7	50 132	7	50 173	7	50 120	7	50 012	7	50 122
8	50 120	8	50 120	8	50 100	8	50 030	8	50 140
9	50 091	9	50 100	9	50 122	9	50 040	9	50 120
10	50 082	10	50 150	10	50 130	10	50 100	10	50 130

#### Ход работы:

1 Построить графики изменения напряженности геомагнитного поля по профилям, обосновать фоновые значения напряженности геомагнитного поля для данного участка.

2 С помощью геоинформационной системы Surfer построить карту изолиний напряженности геомагнитного поля (для интерполяции рекомендуется использовать кригинг).

3 Проанализировать карту изолиний напряженности геомагнитного поля, выявить положительные и отрицательные аномалии.

4 Интерпретировать положительные и отрицательные аномалии напряженности геомагнитного поля, обосновать предположения об археологических объектах на данном участке, используя таблицу 5.

5 Сделать выводы.

Таблица 5 – Магнитная восприимчивость горных пород и археологических объектов (объемный % магнетита)

Магнитная восприимчивость, ед. СИ								
0,000001	0,00001	0,0001	0,001	0,01	0,1	1	10	100
								Железо
		Гематит Шлак Магнетит						
		Базальт						
		Керамика						
		Гранит						
		Горелая почва						
		Кварцит						
		Песчаник						
		Почва						
Мел								
Известняк								
Песок								

## 6.2 Изучение движения грунтовых вод методом естественного электрического поля

**Цель:** выяснить участки инфильтрации и разгрузки грунтовых вод на основе материалов съемки методом естественного электрического поля.

**Материалы:** данные съемки методом естественного электрического поля (таблица 6).

### Ход работы:

1 Построить графики изменения потенциала естественного электрического поля по профилям.

2 По графикам изменения потенциала естественного электрического поля выделить участки инфильтрации грунтовых вод на каждом профиле.

3 По графикам изменения потенциала естественного электрического поля выделить участки разгрузки грунтовых вод на каждом профиле.

4 С помощью геоинформационной системы Surfer построить карту изолиний потенциала естественного электрического поля (для интерполяции рекомендуется использовать кригинг).

5 Проанализировать карту изолиний потенциала естественного электрического поля, указать зоны инфильтрации и разгрузки грунтовых вод.

6 На основе анализа карты изолиний, зон инфильтрации и разгрузки выяснить и показать направление движения движения грунтовых вод.

7 Сделать выводы.

Таблица 6 – Результаты съемки методом естественного электрического поля (способ потенциала, шаг между пикетами 10 м, шаг между профилями 20 м)

Профиль 1		Профиль 2		Профиль 3		Профиль 4	
№ пикета	U, мВ	№ пикета	U, мВ	№ пикета	U, мВ	№ пикета	U, мВ
1	+0,5	1	-23,0	1	-49,6	1	-2,2
2	+1,0	2	-33,0	2	-33,9	2	-4,3
3	+2,5	3	-45,0	3	-23,1	3	-1,7
4	-1,0	4	-14,0	4	-31,2	4	-0,6
5	-10,0	5	-11,1	5	-9,5	5	+0,9
6	-15,0	6	-9,4	6	-4,5	6	+0,5
7	-22,0	7	-3,3	7	-1,2	7	+1,1
8	-32,0	8	-1,2	8	+0,5	8	+3,1
9	-15,0	9	+4,5	9	+6,5	9	+2,5
10	-3,0	10	+3,1	10	+1,7	10	+1,8
11	-2,0	11	+4,1	11	+4,5	11	+1,2
12	+3,0	12	+0,5	12	+4,2	12	+3,1
13	+1,7	13	+4,1	13	+5,1	13	+1,5
14	+1,9	14	+0,5	14	+1,2	14	+4,5
15	-0,5	15	+3,2	15	+3,6	15	+12,9
16	+3,5	16	+1,2	16	+10,6	16	+25,0
17	+4,5	17	+1,5	17	+15,5	17	+35,0
18	+2,4	18	+1,2	18	+17,5	18	+29,0
19	+1,7	19	0	19	+21,6	19	+28,6
20	+3,5	20	+3,5	20	+22,5	20	+33,8

### 6.3 Изучение поля техногенных блуждающих токов

**Цель:** диагностика поля техногенных блуждающих токов в геологической среде города.

**Оборудование:**

- цифровой мультиметр (точность измерения напряжение – 1 мВ);
- неполяризующиеся электроды системы ВИРГ;
- катушка с геофизическим проводом (100 м).

### **Ход работы:**

1 Изучить принцип, порядок работы и устройство системы наблюдения за блуждающими токами (мультиметр, неполяризующиеся электроды, катушка с проводом).

2 Изучить устройство неполяризующихся электродов, подготовить неполяризующиеся электроды к проведению полевых измерений.

3 Установить измерительные линии на тестовом участке (2 линии длиной 100 м, расположенные перпендикулярно друг другу).

4 Измерение электрического потенциала  $U$  в течение 10 мин (4–6 измерений в минуту) с помощью мультиметра.

5 Построение графиков изменений электрического потенциала  $U$  во времени.

6 Провести оценку амплитуды и характера колебаний электрического потенциала  $U$ ;

7 Установить предположительные источники блуждающих токов;

8 Сделать выводы.

## **6.4 Определение места коррозии трубопровода методами электроразведки**

**Цель:** диагностировать участки коррозии трубопровода на основе электрического профилирования и метода естественного электрического поля.

**Материалы:** данные электрического профилирования и метода естественного электрического поля (таблица 7).

### **Ход работы:**

1 Построить графики изменения кажущегося сопротивления и потенциала естественного электрического поля по профилю.

2 По графику кажущегося сопротивления выделить низкоомные участки.

3 По графику потенциала ЕЭП выделить положительные и отрицательные аномалии, дать их интерпретацию.

4 Проанализировать сопряженные изменения кажущегося сопротивления и потенциала ЕЭП, указать участки наибольшей коррозионной активности.

5 Сделать выводы.

Таблица 7 – Результаты электрического профилирования (установка Шлюмберже, АВ = 15, MN = 3) и метода естественного электрического поля (способ потенциала, MN = 10 м)

№ пикета	$\rho_k$ , Ом·м	$U$ , мВ	№ пикета	$\rho_k$ , Ом·м	$U$ , мВ
1	88	0	16	200	+3
2	67	+1	17	193	0
3	160	+54	18	174	+5
4	101	+11	19	102	+46
5	22	+88	20	66	+77
6	25	+45	21	25	+102
7	19	+25	22	18	+18
8	88	+5	23	33	+88
9	140	-1	24	12	+57
10	170	-5	25	25	+110
11	177	-29	26	33	+33
12	190	-22	27	120	+5
13	191	-17	28	99	-4
14	179	-15	29	139	-11
15	190	-10	30	125	-15

## 6.5 Определение трассы трубопровода и его глубины методом электрического профилирования

**Цель:** выяснить области подтопления на основе электрического профилирования.

**Материалы:** данные электрического профилирования (таблица 8).

### Ход работы:

1 Построить графики изменения кажущегося сопротивления по профилям.

2 По графикам кажущегося сопротивления выделить трассу трубопровода на каждом профиле.

3 С помощью геоинформационной системы Surfer построить карту изолиний кажущегося сопротивления (для интерполяции рекомендуется использовать кригинг).

4 Проанализировать карту изолиний потенциала естественного электрического поля, указать трассу трубопровода.

5 На основе анализа карты аномалий кажущегося сопротивления определить глубину залегания трубопровода.

6 Сделать выводы.

Таблица 8 – Результаты электрического профилирования (установка и Шлюмберже, АВ = 15, MN = 5, шаг между пикетами 10 м, шаг между профилями 500 м)

Профиль 1		Профиль 2		Профиль 3		Профиль 4	
№ пикета	$\rho_k$ , Ом·м	№ пикета	$\rho_k$ , Ом·м	№ пикета	$\rho_k$ , Ом·м	№ пикета	$\rho_k$ , Ом·м
1	122	1	450	1	180	1	180
2	142	2	490	2	190	2	170
3	123	3	300	3	198	3	149
4	186	4	143	4	290	4	44
5	201	5	129	5	280	5	30
6	232	6	122	6	155	6	48
7	199	7	132	7	60	7	59
8	242	8	102	8	30	8	55
9	222	9	79	9	88	9	127
10	201	10	32	10	46	10	229
11	38	11	15	11	39	11	233
12	88	12	32	12	29	12	241
13	90	13	44	13	66	13	244
14	180	14	220	14	55	14	253
15	288	15	201	15	99	15	155

## ЛИТЕРАТУРА

1 Александров, В. В. Электрофизика пресных вод / В. В. Александров. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. – 183 с.

2 Богословский, В. А. Экологическая геофизика : учеб. пособие / В. А. Богословский, А. Д. Жигалин, В. К. Хмелевской. – М. : Изд-во МГУ, 2000. – 256 с.

3 Вахромеев, Г. С. Экологическая геофизика / Г. С. Вахромеев. – Иркутск : ИрГТУ, 1995. – 216 с.

4 Владов, М. Л. Методическое руководство по проведению георадиолокационных исследований / М. Л. Владов, В. П. Золотарев, А. В. Старовойтов. – М. : ГСД Продакшн, 1997. – 67 с.

5 Геоэлектрическая диагностика загрязнения геологической среды в зоне влияния полигона токсичных отходов / А. П. Гусев [и др.] // Вестник Пермского университета. Геология. – 2019. – Т. 18. – № 1. – С. 79–85.

6 Малоглубинная геофизика при оценке состояния геологической среды промышленных зон (на примере полигона твердых отходов Гомельского химического завода) / А. П. Гусев [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2021. – № 4. – С. 63–70.

7 Гусев, А. П. Комплексование фитоиндикации и геоэлектрического метода для оценки загрязнения геологической среды / А. П. Гусев // Вектор ГеоНаук. – 2022. – Т 5. – № 1. – С. 74–82.

8 Гусев, А. П. Комплексование космической съемки и геоэлектрических методов при диагностике химического загрязнения геологической среды / А. П. Гусев // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2023. – № 3. – С. 133–140.

9 Джахуташвили, М. Н. Эффективность геофизических методов при выявлении археологических памятников в Грузии : автореферат диссертации, представленной на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук : 04.00.12 / М. Н. Джахуташвили. – Тбилиси, 2006. – 40 с.

10 Естественно-научные методы в полевой археологии. Выпуск 1 / отв. ред. В. В. Седов [и др.]. – М. : Институт археологии РАН, 1997. – 58 с.

11 Журбин, И. В. Археология и геофизика: принципы комплексных исследования / И. В. Журбин // Российская археология. – 2004. – № 3. – С. 79–88.

12 Журбин, И. В. Комплексные исследования археологических памятников и геоинформационный анализ междисциплинарных данных / И. В. Журбин // Историческая информатика. – 2018. – № 3. – С. 89–105.

13 Журбин, И. В. Геофизические исследования поселений че-пецкой культуры: комплексный анализ и интерпретации / И. В. Журбин. – М. : ТАУС, 2020. – 168 с.

14 Капустин, В. В. Техническая геофизика. Методы и задачи / В. В. Капустин, М. Л. Владов // Геотехника. – 2020. – Т. XII. – № 4. – С. 72–85.

15 Кошелев, И. Н. Магнитная разведка археологических памятников / И. Н. Кошелев. – Киев : Изд-во Библ. им. В. И. Вернадского, 2005. – 313 с.

16 Крапивский, Е. М. Геофизические методы диагностики технического состояния подземных трубопроводов : учеб. пособие : Ч. 1. Методы постоянного и низкочастотного переменного тока / Е. М. Крапивский, Н. П. Демченко. – Ухта, 2001. – 159 с.

17 Манштейн, А. К. Малоглубинная геофизика. Пособие по спецкурсу / А. К. Манштейн. – Новосибирск, 2002. – 135 с.

18 Методические рекомендации по применению комплекса геофизических методов при гидрогеологических и геоэкологических исследованиях на акваториях / сост. С. З. Козак ; ред. М. В. Кочеткова. – М. : ГИДЭК, 2002. – 55 с.

19 Модин, И. Н. Электроразведка в технической и археологической геофизике : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук : 25.00.10 / И. Н. Модин. – М. : МГУ, 2010. – 48 с.

20 Никитин, А. А. Комплексование геофизических методов : учебник для вузов / А. А. Никитин, В. К. Хмелевской. – М. : ВНИИ-геосистем, 2012. – 346 с.

21 Огильви, А. А. Основы инженерной геофизики / А. А. Огильви. – М. : Недра, 1990. – 501 с.

22 Позднякова, А. И. Оценка засоления почв и грунтовых вод методами электрического сопротивления : учеб. пособие / А. И. Позднякова. – Астрахань : Астраханский университет, 2013. – 71 с.

23 Павлова, А. М. Применение малоглубинной электроразведки для изучения трехмерно неоднородных сред : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 25.00.10 / А. М. Павлова. – М., 2014. – 128 с.

24 Поздняков, А. И. Электрогеофизика почв / А. И. Поздняков, А. Д. Позднякова. – М. : МГУ, 2004. – 54 с.

25 Прохоров, Н. Н. Оценка состояния земляных дамб шламоохранилищ по результатам геофизических исследований / Н. Н. Прохоров // Горный журнал. – 2003. – № 7. – С. 86–88.



26 Сергеев, К. С. Комплексирование сейсморазведки и электро-томографии в малоглубинной геофизике : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 25.00.10 / К. С. Сергеев. – М. : РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2018. – 135 с.

27 Смекалова, Т. Н. Магнитная разведка в археологии. 12 лет применения Оверхаузеровского градиентометра GSM-19WG / Т. Н. Смекалова, О. Восс, А. В. Мельников. – СПб. : СПбГУ, 2007. – 74 с.

28 Смерников, С. А. Оценка подтопления почв городов электрофизическими методами / С. А. Смерников, А. И. Поздняков, Е. В. Шейн // Почвоведение. – 2008. – № 10. – С. 1–8.

29 Торгоев, И. А. Геофизический мониторинг и оценка устойчивости взрывонабросной плотины Камбаратинской ГЭС-2 / И. А. Торгоев, Х. Б. Хавенит // Irrigatsiya va melioratsiya. – 2018. – № 3(13). – С. 56–61.

30 Трофимов, В. Т. Современное состояние, задачи и сложности дальнейшего развития экологической геологии / В. Т. Трофимов // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2013. – № 3. – С. 19–28.

31 Трофимов, В. Т. Экологическая геология / В. Т. Трофимов, Д. Г. Зилинг. – М. : Геоинформмарк, 2002. – 415 с.

32 Хмелевской, В. К. Геофизические методы исследования земной коры : в 2 кн. Книга 2. Региональная, разведочная, инженерная и экологическая геофизика / В. К. Хмелевской. – Дубна : Международный университет природы, общества и человека, 1999. – 184 с.

33 Шувалов, В. М. Комплексное применение методов геофизики на стадиях проектирования, строительства и эксплуатации инженерных сооружений и коммуникаций / В. М. Шувалов // Вестник Пермского университета. Геология. – 2011. – Вып. 4 (13). – С. 46–60.

34 Электроразведка : пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей : в 2 т. Т. 2. Малоглубинная электроразведка / под ред. В. А. Шевнина, А. А. Бобачева. – М. : МГУ, 2013. – 123 с.

35 Электроразведка. Справочник геофизика : в 2 кн. Кн. 2 / под ред. В. К. Хмелевского, В. М. Бондаренко. – М. : Недра, 1989. – 378 с.

36 Эппельбаум, Л. В. Особенности геофизических исследований на археологических объектах Израэля / Л. В. Эппельбаум, Б. Э. Хесин, С. Е. Иткис // Российская археология. – 2006. – № 1. – С. 59–70.

37 Loke, M. H. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion / M. H. Loke, R. D. Barker // Geophysical Prospecting. – 1996. – V. 44. – P. 499–523.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

## (справочное)

### Физические свойства горных пород и грунтов

Таблица А.1 – Удельное электрическое сопротивление различных типов горных пород и грунтов в гумидных ландшафтах (при минерализации подземных вод 0,5–0,8 г/л и температуре 0–25 °С, в условиях естественной влажности)

Порода	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м			
	10	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>
Почва				
Пески чистые				
Пески глинистые				
Супеси				
Суглинки				
Глины				
Насыпные грунты				
Скальные породы				

Таблица А.2 – Удельное электрическое сопротивление различных типов горных пород и грунтов в аридных ландшафтах (при минерализации подземных вод 1–3 г/л и температуре 0–25 °С, в условиях естественной влажности)

Порода	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м			
	10	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>4</sup>
Почва				
Пески чистые				
Пески глинистые				
Супеси				
Суглинки				
Глины				
Насыпные грунты				
Скальные пород				

Таблица А.3 – Скорости продольных упругих волн в различных типах горных пород и грунтов (в условиях естественной влажности)

Порода	Скорость упругих волн ( $V_p$ ), м/с						
	100	200	500	1 000	2 000	5 000	8 000
Почва							
Пески чистые							
Пески глинистые							
Супеси							
Суглинки							
Глины							
Насыпные грунты							
Скальные породы							

Таблица А.4 – Скорости поперечных упругих волн в различных типах горных пород и грунтов (в условиях естественной влажности)

Порода	Скорость упругих волн ( $V_s$ ), м/с						
	100	200	500	1 000	2 000	5 000	8 000
Почва							
Пески чистые							
Пески глинистые							
Супеси							
Суглинки							
Глины							
Насыпные грунты							
Скальные породы							

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

### Геоэлектрические параметры почв

Таблица Б.1 – Геоэлектрические параметры почв подзолистого и болотного типов почвообразования (Поздняков, Позднякова, 2004)

Почвенный горизонт	Кажущееся электрическое сопротивление, Ом·м	Электрический потенциал, мВ
1	2	3
<b>Автоморфные дерново-подзолистые почвы</b>		
На однородных суглинках		
Слабоподзолистые		
A1	< 150	10–15
A1A2	150–200	28–25
A2B	100–150	10–20
B, C	30–50	< 10
Среднеподзолистые		
A1	400–600	15–20
(A2A1) A1A2	600–800	30–50
(A2) A2B	400–600	20–30
B (C)	30–60	< 10
Сильноподзолистые и подзолы		
A1	800–1000	20–30
(A2A1) A2	> 1000	> 50
A2B	600–800	10–20
B (C)	30–50	< 10
Окультуренные		
Апах	< 50	10–20
A2ост	50–80	20–30
B (C)	< 50	< 10
На супесчаных и песчаных породах		
Среднеподзолистые		
A1	800–1500	–
A2A1	1000–3000	–
A2B (A2)	400–1500	–
B (C)	200–1000	–
Окультуренные		
Апах	100–200	–
A2ост	400–500	–
B (C)	200–400	–

Окончание таблицы Б.1

1	2	3
Гидроморфные почвы на однородных суглинках		
Глееватые		
A1	200–300	10–20
(A2A1, A1A2)	300–400	10–20
(A2, A2B)	80–150	10
(B,C)	30–50	< 10
Глеевые		
A1	100–150	6–10
(A2A1, A1A2)	150–200	10–15
(A2, A2B)	50–70	< 10
(B, C)	30–50	< 10

Таблица Б.2 – Геоэлектрические параметры почв черноземного, солонцового и солончакового почвообразования (Поздняков, Позднякова, 2004)

Почвенный горизонт	Кажущееся электрическое сопротивление, Ом·м	Электрический потенциал, мВ
Черноземы типичные		
A	40–60	10–20
B	20	0–10
Светлокаштановые почвы		
A	60–80	40–60
B	10–20	10–20
Солонцы		
A	60–80	40–60
B	10	10
Солончаки		
Асол	10	10
A	10–20	10–20
A	10–20	10–20
Асол	10	10

Таблица Б.3 – Оценка степени засоления почв по удельному электрическому сопротивлению паст (Оценка засоления..., 2013)

Почва	Удельное электрическое сопротивление пасты, Ом·м
Незасоленные бурые пустынные	30–50
Слабозасоленные бурые пустынные	10–30
Среднезасоленные бурые пустынные	5–10
Сильнозасоленные бурые пустынные	Менее 5

Таблица Б.4 – Оценка степени содово-сульфатного засоления почв по удельному электрическому сопротивлению водной вытяжки (Оценка засоления..., 2013)

Степень засоления	Плотный остаток, %	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м
Незасоленные	Менее 0,25	Более 10
Слабозасоленные	0,25–0,50	10–6
Среднезасоленные	0,50–1,00	6–4
Сильнозасоленные	1,00–2,00	4–2,5
Солончаки	Более 2,00	Менее 2,5

Учебное издание

Гусев Андрей Петрович

**ТЕХНИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОФИЗИКА  
ЧАСТЬ 1. ТЕХНИЧЕСКАЯ ГЕОФИЗИКА**

Пособие

В 2 частях

Редактор Е. С. Балашова  
Корректор В. В. Калугина

Подписано в печать 01.03.2024. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 5,12. Уч.-изд. л. 5,59.  
Тираж 20 экз. Заказ 117.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования  
«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».  
Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013 г.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий в качестве:  
издателя печатных изданий № 1/87 от 18.11.2013 г.;  
распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017 г.  
Ул. Советская, 104, 246028, Гомель.

