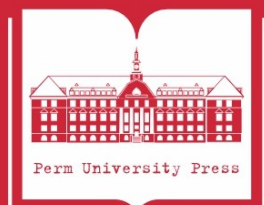


ПЕРМСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

А. В. Татаркин

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
В ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ
И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЯХ
(ФУНДАМЕНТЫ И ОСНОВАНИЯ)



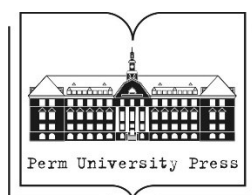
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

А. В. Татаркин

**ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
В ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ
И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ
(ФУНДАМЕНТЫ И ОСНОВАНИЯ)**

*Допущено методическим советом
Пермского государственного национального исследовательского университета
в качестве учебного пособия для студентов,
обучающихся по направлению подготовки магистров «Инженерная геология»*



Пермь 2025

УДК 550.83.01(075.8)
ББК 26.211.02я73
Т232

Татаркин А. В.

Т232 Геофизические методы в инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях (фундаменты и основания) [Электронный ресурс] : учебное пособие / А. В. Татаркин ; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Электронные данные. – Пермь, 2025. – 9,66 Мб ; 99 с. – Режим доступа: <https://psu.ru/files/docs/science/books/uchebnie-posobiya/Tatarkin-Geofizicheskie-metody-v-inzhenerno-geologicheskikh-i-gidrogeologicheskikh-issledovaniyah-fundamenty-i-osnovaniya.pdf>. – Заглавие с экрана.

ISBN 978-5-7944-4316-5

В издании приведено современное состояние вопроса по изучению фундаментов и их оснований геофизическими методами неразрушающего контроля. Материал последовательно изложен в виде трех глав, от объекта к технологии исследований, включающей последние достижения в науке и технике, с представлением примеров решения практических задач.

Учебное пособие предназначается для изучения и преподавания дисциплины «Геофизические методы в инженерной геологии в инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях» и сопряженных предметов в высших учебных заведениях. Издание будет полезно студентам, аспирантам геологических специальностей очной и заочной форм обучения, а также специалистам в области геофизики и строительства.

УДК 550.83.01(075.8)
ББК 26.211.02я73

*Издается по решению ученого совета геологического факультета
Пермского государственного национального исследовательского университета*

Рецензенты: д-р техн. наук, доцент, советник РААСН, профессор кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика» Пермского национального исследовательского политехнического университета **О. А. Маковецкий;**

АО «Нью Граунд» (председатель научно-технического совета – д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РААСН **Г. Г. Кашеварова)**

ISBN 978-5-7944-4316-5

© Татаркин А. В., 2025
© ПГНИУ, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Фундаменты и основания как объект исследований	5
1.1 Виды фундаментов	7
1.1.1 Фундаменты в открытых котлованах	8
1.1.2 Фундаменты глубокого заложения.....	10
1.1.3 Свайные фундаменты.....	11
1.2 Типы оснований.....	16
2. Нормативно-техническое и правовое обеспечение методов исследований.....	18
3. Методы и примеры решения задач.....	21
3.1 Сейсмоакустические	22
3.1.1 Наземные	23
3.1.2 Скважинные	35
3.1.3 Аппаратура.....	42
3.2 Электрические	52
3.2.1 Наземные	55
3.2.2 Скважинные	63
3.2.3 Аппаратура.....	91
Список литературы.....	97

ВВЕДЕНИЕ

Изменение техногенной нагрузки, опасные геологические процессы и негативные катастрофические явления оказывают существенное влияние на несущую способность грунтового основания и фундамента. При этом вышеперечисленные факторы повышают риск разрушения инженерных сооружений. Кроме того, нередко ввиду отсутствия проектной документации или необходимости расчетов несущей способности возникает потребность в восстановлении фактических данных о глубинах заложения фундаментов, их типе, состоянии и геологических условиях в их основании. Поэтому получение актуальной информации о свойствах горного массива и конструкции фундаментов очень важно [26, 21]. Для этой цели могут использоваться как прямые методы, так и геофизические методы, входящие в группу неразрушающего контроля (МНК).

Актуальность использования методов геофизических исследований в первую очередь обусловлена ограниченным применением прямых методов вследствие отсутствия доступа к фундаментам, особенностям гидрогеологического режима или большим глубинам для вскрытия. В то же время многообразие используемых подходов при геофизических исследованиях связано с ограничением в области их применения и неоднозначностью интерпретации при решении задач для сложных объектов. Под сложными объектами понимаются сооружения с надстроенной частью фундаментов или неблагоприятными инженерно-геологическими условиями.

Существующие геофизические методы для решения вышеуказанных задач можно разделить по двум признакам: природе используемых полей (сейсмоакустические, электромагнитные) и условиям проведения (наземные, скважинные, комбинированные). Использование геофизических методов позволяет оперативно с наименьшими экономическими затратами получать в пространстве и времени информацию об особенностях строения (изменений) системы «фундамент – грунтовое основание» [7, 16].

1. Фундаменты и основания как объект исследований

Инженерно-геологические условия (ИГУ) оснований в совокупности с фундаментами во многом определяют безопасную эксплуатацию зданий и сооружений. Особую актуальность данные вопросы имеют в сложных геологических условиях при ограниченном доступе к объектам исследований. Это обусловлено, прежде всего, особенностями строения грунтового массива и многофункциональным взаимодействием **природно-технической системы** (ПТС).

Как правило, на стадиях эксплуатации, реконструкции или строительства сооружений наиболее часто решаемые задачи сводятся к:

- контролю изменения оснований и окружающего массива грунта;
- обследованию фундаментов и грунтов основания при реконструкции объекта в случаях изменения на него нагрузок;
- обследованию фундаментов, грунтов основания, а также конструкций зданий и сооружений для определения возможных причин деформации;
- мониторингу ПТС.

Осложняющим фактором является развитие опасных геологических и техногенных процессов (карст, подтопление, оползни, подработанные территории, зоны активной тектоники). В случае возникновения опасных природно-техногенных процессов очень важно оперативное получение достоверной информации.

Основанием называется массив грунта, который находится непосредственно под сооружением и рядом с ним и деформируется от усилий, передаваемых ему с помощью фундаментов. Если строительные свойства грунтов основания мы специально не улучшаем и не изменяем, то такое основание называется естественным, в отличие от искусственного основания, в котором строительные свойства грунтов преднамеренно нами улучшены для того, чтобы уменьшить сжимаемость грунтов, увеличить их прочность, изменить водопроницаемость и др. Основания, созданные искусственно уложенными грунтами в результате отсыпки с уплотнением или намыва, также называются искусственными [11].

Принимая во внимание вышеизложенное, **основанием** можно назвать массив естественного или искусственного происхождения, взаимодействующий с нагрузками от фундамента здания или сооружения.

Для передачи и перераспределения нагрузки от возводимых сооружений на основание используется конструктивный элемент, называемый **фундаментом** [2].

В результате воздействия нагрузки от веса сооружений в основании фундамента формируется деформируемый массив [1]. Таким образом, при оценке надежности общей конструкции рассматривается единая система «**фундамент**

– **основание**» (рис. 1.1). В данной системе следует выделить различные виды деформаций и разрушений. Относительно фундаментов повреждения могут быть механическими и коррозионными, а деформации оснований проявляются в виде осадок и просадок пород инженерно-геологических элементов естественного (ИГЭ 1–ИГЭ 3) или искусственного происхождения (ИГЭ 4).

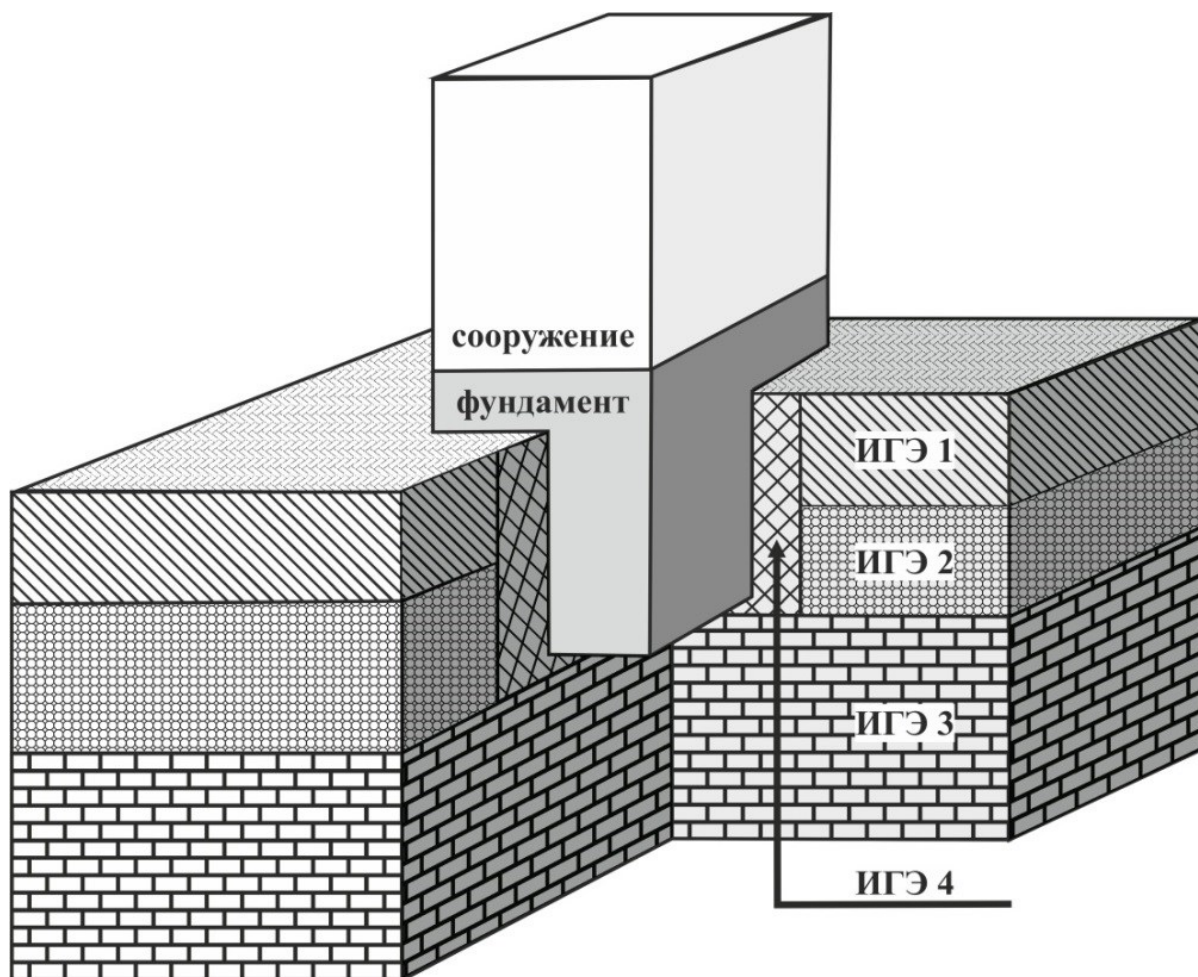


Рис. 1.1. Система «фундамент – основание»

В качестве причин возникновения деформаций и разрушений выделяют конструктивные, эксплуатационные и проектные ошибки в виде:

- наличия слабых ИГЭ;
- нарушения глубины заложения конструктивных элементов;
- суффозионных процессов;
- горнопроходческих и строительных работ;
- изменения динамического режима эксплуатации;
- вариаций гидрогеологических условий;
- несоблюдения норм проектирования;
- отсутствия достаточных исходных данных.

1.1 Виды фундаментов

В конструктивном плане следует отметить элементы фундаментов, такие как верхняя плоскость, нижняя плоскость (подошва), глубина заложения, высота. Верхняя плоскость фундамента принимает нагрузку от сооружения, нижняя распределяет давление на основание. Глубиной заложения считается расстояние от земной поверхности до подошвы, а высотой – между верхней и нижней плоскостью [2]. По глубине заложения выделяются **фундаменты мелкого** (ФМЗ), **глубокого заложения** (ФГЗ) и **свайный** (рис. 1.2).

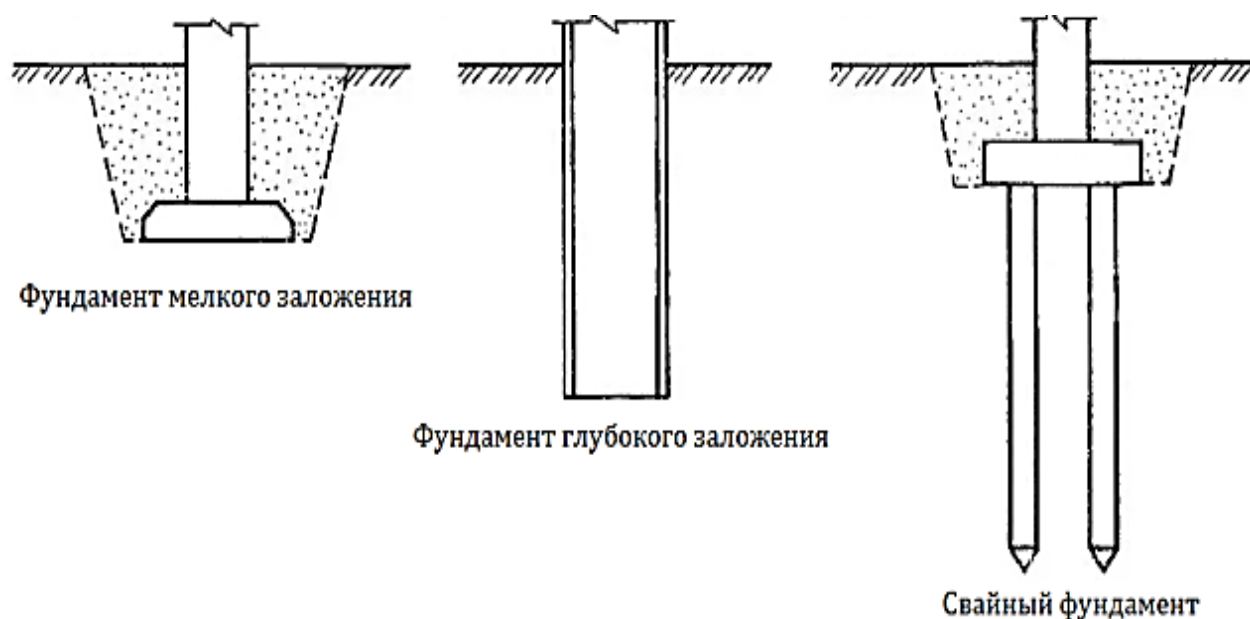


Рис. 1.2. Типы фундаментов по глубине

С точки зрения **используемых материалов** фундаменты могут быть каменными, железобетонными, бетонными, ячеистобетонными и деревянными.

По **форме** фундаментов их можно классифицировать на ленточные, отдельные, свайные, сплошные и массивные конструкции.

Ленточные фундаменты сооружают, как правило, под стены или для придания большей жесткости и обеспечения выравнивания осадок под колонны в виде одиночных или перекрестных лент.

Отдельные фундаменты обычно устраивают под колонны каркасных зданий или стены бескаркасных сооружений (столбчатые фундаменты).

Сплошные фундаменты выполняют в виде сплошных железобетонных плит. Существуют и другие конструктивные решения сплошных фундаментов – они могут быть коробчатыми.

Массивные фундаменты выполняют в виде сплошного жесткого массива под все сооружение. Фундаменты данного типа используют при строительстве сооружений, особенностью которых являются относительно небольшие разме-

ры в плане по сравнению с сооружением, при значительных вертикальных и горизонтальных нагрузках, передаваемых на основание (трубы, мачты и т.п.).

В плане фундаментов **опор мостовых сооружений** можно выделить классификацию из ГОСТ Р 59617–2021 (рис. 1.3).

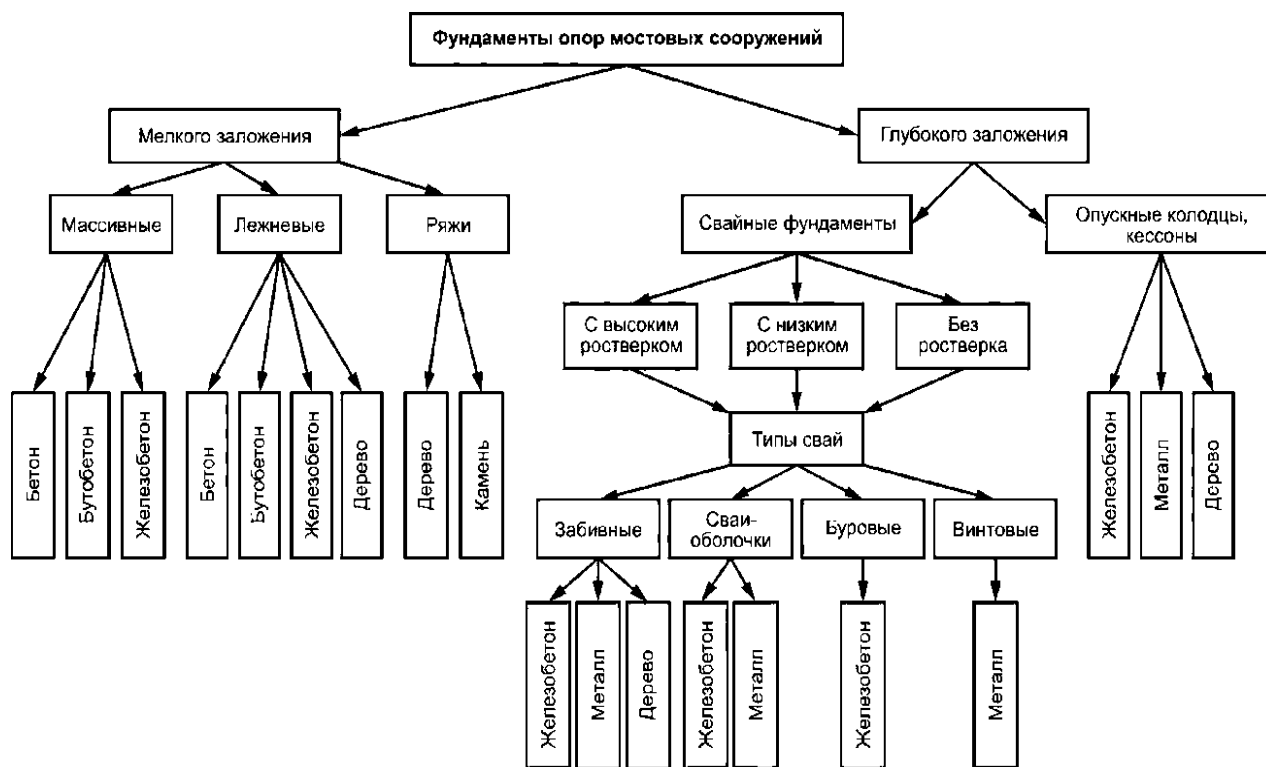


Рис. 1.3. Классификация фундаментов опор мостовых сооружений

1.1.1 Фундаменты в открытых котлованах

Фундаменты в открытых котлованах – это такие фундаменты, которые после возведения в котловане засыпаются грунтом и передают давление на основание преимущественно по подошве [1].

Распространенным материалом для устройства фундаментов является железобетон, который используют для возведения различных типов фундаментов как в монолитном, так и в сборном варианте.

Основные типы фундаментов в открытых котлованах:

1. отдельные фундаменты в виде бетонных, железобетонных кирпичных или каменных столбов с уширением в нижней части;
2. ленточные фундаменты под колонны воспринимают нагрузку от ряда колонн;
3. ленточные фундаменты под стены называют также непрерывными. Такие фундаменты почти не изменяют жесткость сооружения;
4. сплошные фундаменты устраивают под всем сооружением или под его частью в виде железобетонных плит под сетку колонн и стен;

5. массивные фундаменты устраивают в виде жесткого массива под всем небольшим в плане сооружением (дымовая труба, опора моста и т.п.).

Наиболее часто в открытых котлованах возводятся **фундаменты мелкого заложения** (ФМЗ) при отношении высоты к ширине подошвы фундамента, не превышающем четырех ее величин. Примеры ФМЗ приведены на рис. 1.4.

Фундаменты зданий и сооружений конструируют, учитывая совместную работу сооружения и грунтов основания, причем конструкция фундамента во многом определяется типом возводимого здания. Широкое распространение в условиях массовой городской застройки получили сборные фундаменты, позволяющие снижать затраты на их возведение.

Под стены бескаркасных зданий наиболее целесообразно устанавливать ленточные фундаменты, при возведении которых на дно котлована насыпают слой песчаной подготовки, который в дальнейшем выравнивают с последующей укладкой на него типовых блоков-подушек, распределяющих нагрузку от стен здания на основание. На блоки-подушки устанавливают в несколько рядов типовые стеновые фундаментные блоки.

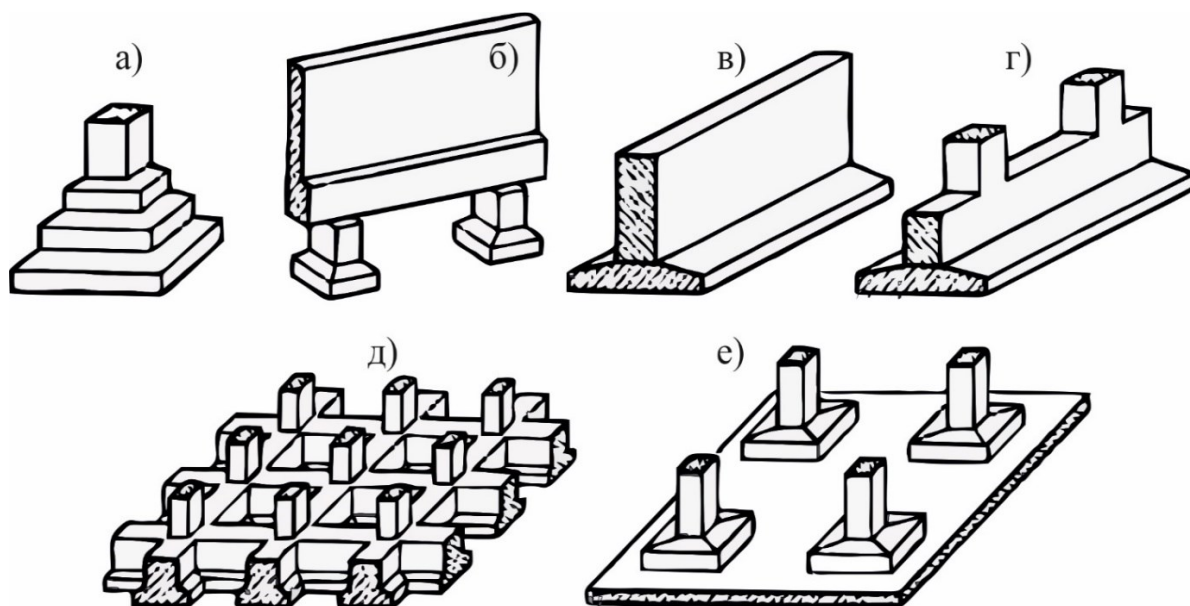


Рис. 1.4. Основные типы фундаментов мелкого заложения:

- а – отдельный фундамент под колонну; б – отдельные фундаменты под стену;
в – ленточный фундамент под стену; г – то же, под колонны;
д – то же, под сетку колонн; е – сплошной (плитный) фундамент

В некоторых случаях устраивают **прерывистые ленточные фундаменты** (рис. 1.5), позволяющие получать существенную экономию материалов. Применение прерывистых фундаментов допускается при надежных грунтах и относительно небольших нагрузках. Зазоры между плитами заполняют песком с последующим уплотнением.

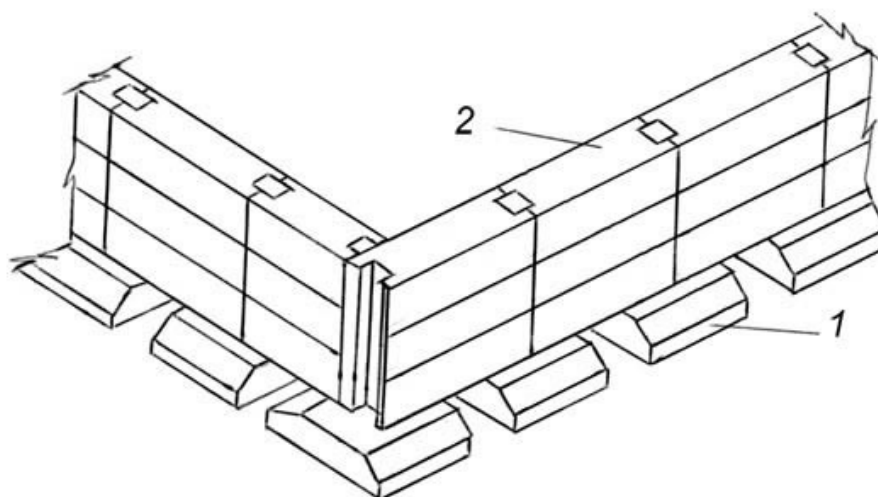


Рис. 1.5. Прерывистый ленточный фундамент:
1 – фундаментная плита (подушка); 2 – фундаментный стеновой блок

В последнее время при строительстве каркасных зданий и сооружений стали применять сплошные фундаменты из универсальных сборных блоков. Есть два типа таких блоков со скошенными ребрами и повышенной жесткости. В первом случае сплошная плита образуется в результате замоноличивания швов между блоками, во втором – в результате сварки выпусков арматуры и замоноличивания швов. Монолитные железобетонные конструкции, в зависимости от действующих усилий, грунтовых условий и размеров опирающихся на них конструкций, могут быть одно-, двух- и трехступенчатыми [1].

1.1.2 Фундаменты глубокого заложения

При строительстве зданий с большими или неравномерными расчетными нагрузками на основание часто выбирают **фундаменты глубокого заложения** (ФГЗ). Технология их обустройства позволяет оптимально распределить нагрузку от высотного дома, строения сложной конфигурации или с неравномерным распределением тяжелого оборудования, заглубленного или подземного сооружения.

Также заглубленные фундаменты выбирают, если несущие слои грунта на участке залегают на значительной глубине, если почва неравномерная (например, с глинистыми линзами, валунами в толще).

Фундаменты глубокого заложения формируют или погружают в грунт с помощью специальных механизмов. Передача нагрузки на основание осуществляется через подошву и боковую поверхность (силами трения).

В основном данный тип фундаментов применяют при возведении уникальных сооружений – с большими нагрузками на основание, а также при строительстве заглубленных помещений зданий, подземных гаражей, пеше-

ходных переходов и туннелей, отстойников, водозаборных сооружений, мостовых опор и др.

В настоящее время применяют следующие **типы фундаментов глубокого** заложения: опускные колодцы и кессоны, глубокие опоры (набивные столбы), фундаменты, возводимые методом «стена в грунте» [1] (рис. 1.6).

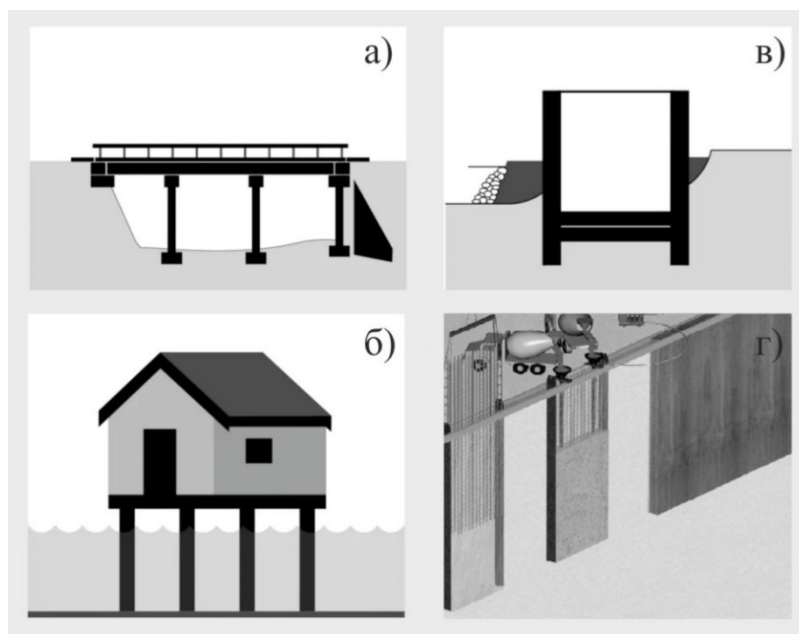


Рис. 1.6. Основные типы фундаментов глубокого заложения: а, б – глубокие опоры (набивные столбы); в – колодцы (кессоны); г – стена в грунте

1.1.3 Свайные фундаменты

Сваями называют погружаемые или сформированные в грунте в вертикальном или наклонном положении относительно длинные элементы, передающие нагрузку на нижележащие слои грунта основания.

Фундаменты из свай часто применяют при наличии в верхней зоне грунтов основания слабых грунтов, когда возникает необходимость передачи нагрузки от сооружения на более плотные грунты, залегающие в данном случае на некоторой, иногда значительной, глубине.

Свайным фундаментом считают группу свай, объединенных сверху специальной конструкцией в виде плит или балок, называемых ростверками, которые предназначены для передачи и равномерного распределения нагрузки на сваи. Ростверки, являясь несущими конструкциями, служат для опирания надземных конструкций зданий. Различают свайные фундаменты с низким ростверком, промежуточным и высоким.

Низкий ростверк (рис. 1.7а) расположен ниже спланированной поверхности земли. Являясь частью свайного фундамента и взаимодействуя с грунтом

основания, он способен передавать часть вертикального давления на основание по своей подошве и воспринимать горизонтальные усилия. При устройстве ростверка в зоне промерзания на него будут действовать нормальные и касательные силы морозного пучения, поэтому низкие ростверки в пучиноопасных грунтах рекомендуется располагать ниже зоны промерзания или использовать мероприятия, направленные на снижение вредного воздействия в результате промерзания.

В свайном фундаменте с низким ростверком в совместной работе участвуют сам ростверк, сваи и грунт, находящийся в межсвайном пространстве, причем сваи работают в основном на сжатие.

Промежуточный ростверк устраивают непосредственно на поверхности грунта без заглубления (рис. 1.7б) и используют при устройстве свайных фундаментов на непучивистоопасных грунтах. В связи с тем, что верхние слои грунта, как правило, имеют низкую несущую способность, промежуточные ростверки не могут передавать вертикальное давление по своей подошве [1].

Ростверк называется высоким, если он расположен значительно выше уровня грунта или воды (рис. 1.7в).

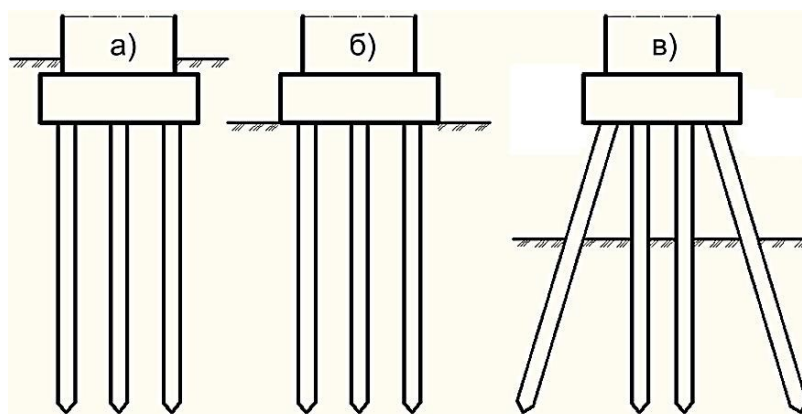


Рис. 1.7. Схемы свайных ростверков:
а – низкий; б – промежуточный; в – высокий

По способу заглубления в грунт различают следующие виды свай [16] (рис. 1.8):

а) **забивные** и вдавливаемые железобетонные, деревянные и стальные предварительно изготовленные, погружаемые в грунт за счет вытеснения и путем установки в лидерные скважины при помощи молотов, вибропогружателей, вибровдавливающих, виброударных и вдавливающих устройств, а также железобетонные круглые полые сваи диаметром до 0,8 м, заглубляемые вибропогружателями без выемки или с частичной выемкой грунта и не заполняемые бетонной смесью;

б) **сваи-оболочки** железобетонные диаметром более 0,8 м, погружаемые вибропогружателями с выемкой грунта из их полости и заполняемые частично или полностью бетонной смесью, а также сваи в виде металлических труб, погружаемые с открытым нижним концом без выемки грунта;

в) **набивные бетонные** и железобетонные, устраиваемые в грунте путем укладки бетонной смеси в скважины, образованные в результате принудительного вытеснения – отжатия грунта;

г) **буровые** железобетонные, устраиваемые в грунте путем заполнения пробуренных скважин бетонной смесью или установки в них предварительно изготовленных железобетонных элементов;

д) **винтовые** сваи, состоящие как минимум из одной металлической винтовой лопасти (спирали) и трубчатого металлического ствола со значительно меньшей по сравнению с лопастью площадью поперечного сечения, погружаемые в грунт путем ее завинчивания в сочетании с регулируемым вдавливанием с лидерными скважинами или без них.

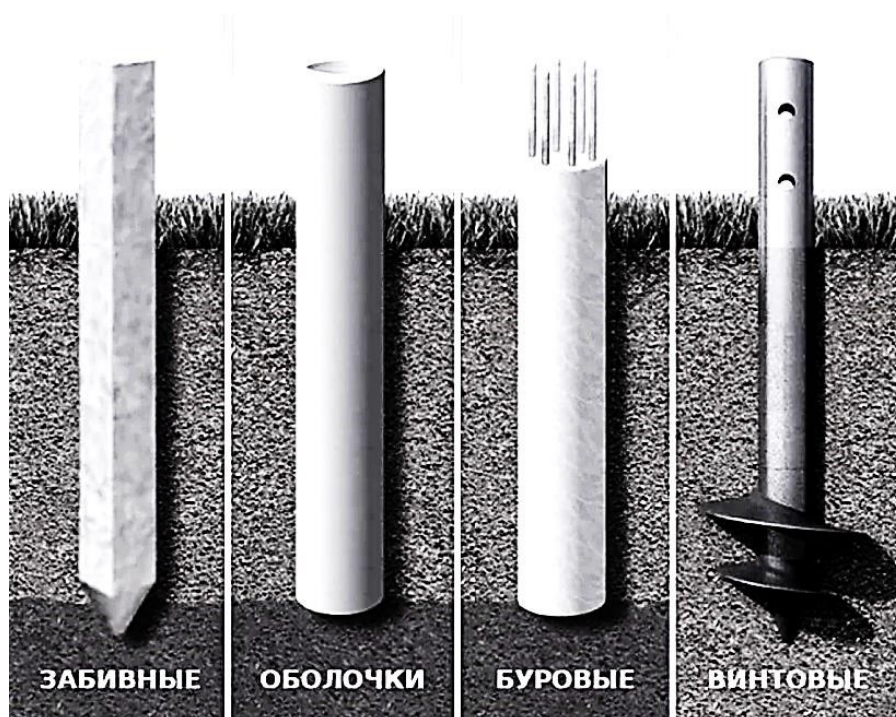


Рис. 1.8. Типы свай по способу заглубления

По условиям взаимодействия с грунтом сваи разделяют на сваи-стойки и висячие (рис. 1.9).

Сваи-стойки – это сваи всех видов, опирающиеся на скальные грунты, а забивные сваи, кроме того, на малосжимаемые грунты.

К **висячим** сваям относят сваи всех видов, опирающиеся на сжимаемые грунты и передающие нагрузку на грунты основания боковой поверхностью и нижним концом.

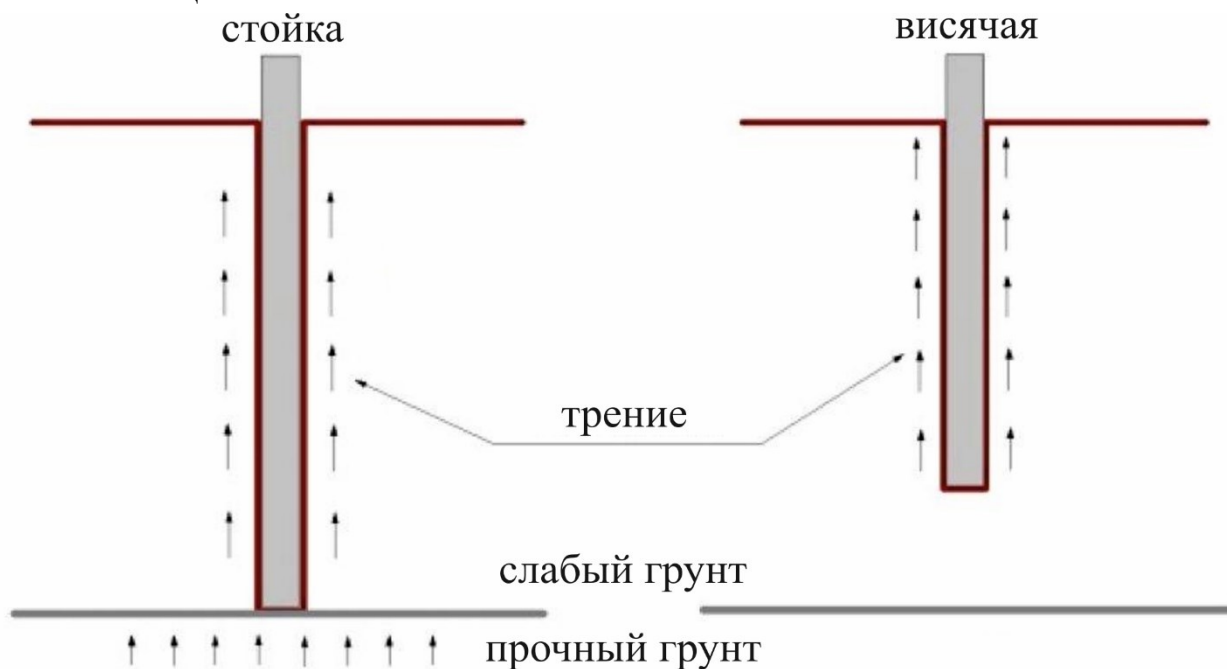


Рис. 1.9. Типы свай по взаимодействию с основанием

Забивные и вдавливаемые железобетонные сваи размером поперечного сечения 0,8 м включительно и железобетонные сваи-оболочки разделяют:

а) **по способу армирования** – на сваи и сваи-оболочки с ненапрягаемой продольной арматурой с поперечным армированием и на предварительно напряженные со стержневой или проволоочной продольной арматурой (из высокопрочной проволоки и арматурных канатов) с поперечным армированием и без него;

б) **по форме поперечного сечения** – на сваи квадратные, прямоугольные, таврового и двутаврового сечений, квадратные с круглой полостью, полые круглого сечения;

в) **по форме продольного сечения** – на призматические, цилиндрические, с наклонными боковыми гранями (пирамидальные, трапецеидальные);

г) **по конструктивным особенностям** – на сваи цельные и составные (из отдельных секций);

д) **по конструкции нижнего конца** – на сваи с заостренным, плоским нижним концом или объемным уширением (булавовидные) и на полые сваи с закрытым или открытым нижним концом или с камуфлетной пятой.

Свайные фундаменты могут быть запроектированы в зависимости от действующих нагрузок в виде:

а) **одиночных свай** – под отдельно стоящие опоры;

б) **свайных лент** – под стены зданий и сооружений при передаче на фундамент распределённых по длине нагрузок с расположением свай в один, два и более рядов (рис. 1.10а);

в) **свайных кустов** – под колонны с расположением свай в плане на участке квадратной, прямоугольной, трапецеидальной и других форм (рис. 1.10б);

г) **сплошного свайного поля** – под тяжелые сооружения со сваями, расположенными под всем сооружением и объединенными сплошным ростверком, подошва которого размещена на грунте (бетонной подготовке) (рис. 1.10в);

д) **свайно-плитного** фундамента.

В зависимости от конструкции здания применяют ленточные ростверки, ростверки стаканного типа и плитные ростверки [10].

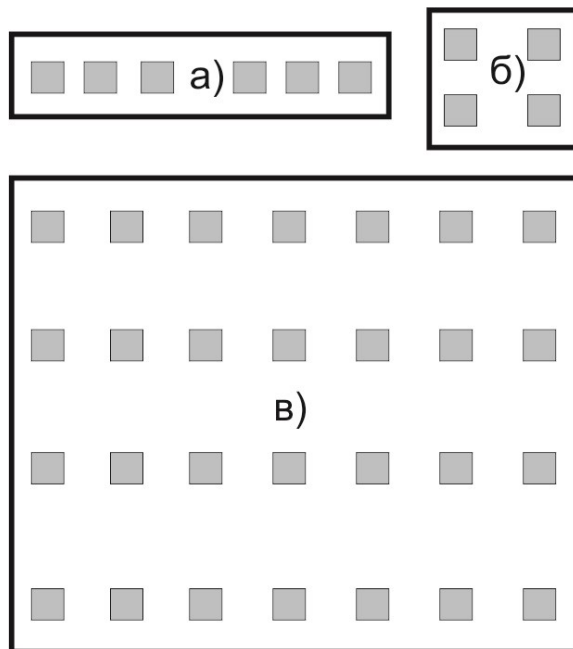


Рис. 1.10. Виды свайных фундаментов: а – ленточный; б – куст; в – поле

По материалу сваи, погружаемые в готовом виде, разделяют на деревянные, железобетонные, металлические и комбинированные. Деревянные сваи в практике строительства применяют сравнительно редко из-за возможного загнивания древесины в грунте основания при переменной влажности, необходимости экономии древесины и ограничения сортамента деревянных элементов. Такие сваи изготовляют из бревен диаметром от 18 до 36 см и длиной от 4,5 до 12 м.

Железобетонные сваи в настоящее время применяют наиболее часто с квадратным сплошным, квадратным с круглой полостью и полым круглым поперечным сечением, постоянным по всей длине сваи. Квадратные сваи изготовляют с размером поперечного сечения от 20х20 до 40х40 см и длиной от 3 до

20 м. При необходимости получения свай большей длины их стыкуют из отдельных секций, имеющих для этой цели закладные детали, позволяющие создавать болтовое или сварное соединение.

1.2 Типы оснований

Сооружения опираются на верхние слои горных пород (грунтов), образующих толщу земной коры. Часть массива горных пород, которая непосредственно воспринимает нагрузку от сооружения и деформируется под ее действием, называют **основанием** сооружения. Основание из естественных пород в их природном залегании называют естественным, если свойства пород искусственно улучшают, упрочняя, таким образом, основание, то называют **искусственным** (рис. 1.1). **Естественные** основания разделяют на однородные, слоистые с согласным и несогласным залеганием (рис. 1.11).

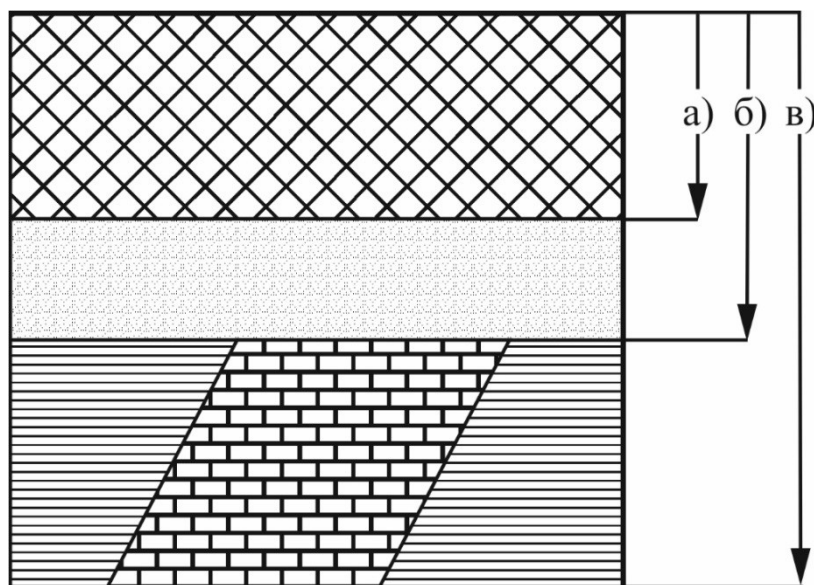


Рис. 1.11. Типы естественных оснований:

а – однородное; слоистое: б – согласное, в – несогласное залегание

Грунт – любая горная порода, почва, осадок и антропогенное породоподобное геологическое образование, рассматриваемые как многокомпонентная динамичная система, исследуемая в связи с планируемой, текущей или осуществляемой инженерно-хозяйственной, прежде всего инженерно-строительной, деятельностью человека [27].

Выделяют два существенно различающихся по своим физико-механическим свойствам основных класса пород: **скальные** и **нескальные**.

Скальными называют твердые горные породы, которые в невыветрелом состоянии и при отсутствии тектонической раздробленности и трещиноватости отличаются очень малой сжимаемостью и значительной прочностью.

Нескальные – дисперсные грунты, состоящие из легко разделяющихся в воде несцементированных или слабо сцементированных обломков горных пород и минеральных частиц различной крупности – от измеряемых десятками сантиметров валунов до тонких глинистых частиц диаметром в тысячные доли миллиметра и менее. Они образуют проницаемые пористые толщи, часто достигающие значительной мощности [2].

При использовании грунтов в качестве оснований сооружений наибольшее внимание уделяется исследованию физико-механических свойств. Грунты изучаются в лабораторных и полевых условиях как на образцах, так и в массиве.

Для исследования строения и свойств грунтов последнего, особенностей подземных вод проводят съемку, геофизические и горные работы, бурение, инженерно-геологическое опробование, статическое и динамическое зондирование, специальные опытные работы

При неудовлетворительном качестве грунтов их улучшают различными методами: уплотнением, осушением, обжигом, замораживанием, цементованием, введением специальных вяжущих веществ [1].

Основными механическими характеристиками грунтов, определяющими несущую способность оснований и их деформации, являются прочностные и деформационные характеристики [10]:

- угол внутреннего трения φ ;
- удельное сцепление c ;
- предел прочности на одноосное сжатие скальных грунтов R_c , МПа;
- модуль деформации E , МПа;
- коэффициент поперечной деформации ν .

Также необходимо знать физические характеристики, определяемые по результатам испытаний:

- природная влажность w , %;
- плотность грунта ρ , г/см³;
- плотность частиц грунта, ρ_s , г/см³;
- влажности на границе текучести w_L , %;
- влажности на границе раскатывания w_p , %;
- гранулометрический состав грунтов.

Производные физические характеристики определяются расчетным путем на основании физических характеристик грунтов, полученных по результатам испытаний [10]:

- плотность скелета грунта (сухого), ρ_d , г/см³;
- коэффициент пористости, e ;

- коэффициент водонасыщения (степень заполнения объема пор льдом и незамерзшей водой), S_r ;
- показатель текучести (для связных дисперсных грунтов), I_L ;
- число пластичности, I_p , %;
- удельный вес грунта γ , кН/м^3 .

2. Нормативно-техническое и правовое обеспечение методов исследований

Обследование фундаментов и оснований осуществляется согласно известным стандартам, нормам и правилам [20]. Так, в области изучения оснований нормативно-техническая база применения методов геофизических исследований является составной частью базы инженерно-геологических изысканий и, как правило, входит в их состав. При этом изучение фундаментов регламентируется дополнительными отраслевыми стандартами и документами.

В частности, согласно **ГОСТ-31937-2011** [4], в состав работ по обследованию грунтов оснований и фундаментов зданий (сооружений) включают:

- изучение имеющихся материалов по инженерно-геологическим исследованиям, проводившимся на данном или на соседнем участке;
- изучение планировки и благоустройства участка;
- изучение материалов, относящихся к заложению фундаментов исследуемых зданий и сооружений;
- проходку шурфов, преимущественно вблизи фундаментов;
- бурение скважин с отбором образцов грунта, проб подземных вод и определением их уровня;
- зондирование грунтов;
- испытания грунтов статическими нагрузками;
- **исследования грунтов геофизическими методами;**
- лабораторные исследования грунтов оснований и подземных вод;
- обследование состояния искусственных свайных оснований и фундаментов.

В соответствии с **ГОСТ Р 71039-2023** [6], для контроля качества бетона свай и «стен в грунте» используется метод, основанный на анализе параметров ультразвуковых волн для получения выводов об однородности железобетонных конструкций.

Следуя **ГОСТ Р 59617–2021**, инструментальный контроль отдельных параметров скрытых частей фундаментов опор при отсутствии к ним прямого доступа может быть проведен с помощью геофизических методов [5]. Для проведения контроля линейных размеров подземной части фундамента рекомендует-

ся использовать одновременно не менее двух из трех геофизических методов: георадиолокации, сейсмоакустики, сейсморазведки.

СП 45.13330.2017 указывает, что контроль качества закрепленных грунтов осуществляют следующими методами контроля (МК):

МК1 – определение физико-механических характеристик грунтоцемента и качества закрепления (однородность закрепления) по образцам, отобраным из грунтоцементного элемента при контроле из шурфов или керну, отобранному бурением;

МК2 – определение физико-механических характеристик грунтоцемента по контрольным образцам, изготовленным в лаборатории и отобраным из грунтоцементной пульпы при производстве работ;

МК3 – определение физико-механических характеристик грунтоцемента и грунтоцементного элемента штамповыми испытаниями;

МК4 – оценка качества закрепления грунтоцементного элемента/массива из грунтоцементных элементов геофизическими методами.

В зависимости от поставленных задач, наличия РД, характера и степени дефектов и повреждений в сваях может быть выполнен сплошной (полный) или выборочный контроль качества свай, изготовленных прямым методом, а именно выбуриванием керна и его испытанием, и/или одним из косвенных методов. Косвенные методы базируются на предварительно установленных градуировочных зависимостях прочности бетона, определенной одним из прямых методов и косвенными характеристиками прочности, полученных ультразвуковым, сейсмоакустическим, радиоизотопным или термометрическим методами. Сплошной (полный) контроль состоит из определения сплошности косвенными методами для всех свай на объекте и выбуривания керна из бетона не менее чем из 2 % свай на объекте [22].

В состав работ по выборочному контролю качества бетона свай включено:

- выбуривание кернов на полную длину из 2 % общего числа выполненных из монолитного бетона свай на объекте, но не менее двух свай и испытания образцов бетона, изготовленных из керна, на одноосное сжатие;
- контроль длины свай и оценка сплошности их стволов с использованием сейсмоакустических испытаний – 20 % общего числа свай на объекте;
- оценка качества (однородности) бетона свай на их полную длину методами радиоизотопных или ультразвуковых измерений – 10 % общего числа свай на объекте.

Согласно **СП 24.13330.2021**, оценку длины существующих свай в фундаментах реконструируемого сооружения рекомендуется осуществлять с помощью геофизических методов.

Обследование с помощью геофизических методов грунтов оснований фундаментов зданий и сооружений следует проводить при их расширении, реконструкции и техническом перевооружении, строительстве новых сооружений вблизи существующих (в пределах зоны влияния), а также в случае деформаций и аварий зданий и сооружений. При обследовании необходимо определять изменения геологического строения, гидрогеологических условий, состава, состояния и свойств грунтов, активности инженерно-геологических процессов с целью получения данных для решения следующих задач:

- определение возможности надстройки, реконструкции зданий и сооружений с увеличением временных и постоянных нагрузок на фундаменты;
- установление причин деформаций и разработки мер для предотвращения их дальнейшего развития, а также восстановления условий нормальной эксплуатации зданий и сооружений;
- определение состояния грунтов основания, возможности и условий достройки зданий и сооружений после длительной консервации их строительства;
- определение состояния мест примыкания зданий-пристроек к существующим зданиям и разработки мер по обеспечению их устойчивости;
- выяснение причин затапливания и подтапливания подвалов и других подземных сооружений.

В процессе обследования грунтов оснований фундаментов может выполняться обследование конструктивных элементов зданий и сооружений по отдельному техническому заданию заказчика. Геофизические обследования конструктивных элементов (фундаментов различной конструкции, опор, отдельных свай, несущих стен, перекрытий и др.) выполняются, как правило, при их реконструкции или ликвидации с целью обнаружения в них дефектов, уменьшения несущей способности, изучения развития напряженного состояния.

При обследовании оснований зданий и сооружений может выполняться определение глубины заложения фундаментов и оценки их состояния. Для определения глубины погружения свай используется метод, основанный на регистрации отражений сейсмоакустических и электромагнитных импульсов от нижних торцов свай. Для определения глубины заложения фундаментов может быть использована электроразведка методом сопротивлений. Состояние фундаментов (бетонных, кирпичных), стен и перекрытий оценивается с помощью ультразвуковых и акустических измерений способами профилирования и прозвучивания в соответствии с **ГОСТ 17624-2021** [3].

Для изучения плотности сложения, степени изменчивости сжимаемости, выявления крупных пустот, установления необходимой глубины погружения свай в **СП 50-101-2004** указывается необходимость использования зондирования (ГОСТ 19912) и геофизических методов исследований [24].

3. Методы и примеры решения задач

Существующие геофизические методы при исследованиях фундаментов можно классифицировать по двум составляющим: **физической природе** используемого источника (сейсмоакустические, электромагнитные) и **условиям проведения** (наземные, скважинные, комбинированные).

Наземные, или поверхностные, наблюдения проводятся в видимой части фундаментов с размещением источников и приемников физических полей на его открытой части. Для исследований используются как сейсмоакустические, так и электромагнитные методы.

В **скважинном** или комбинированном вариантах для измерений используют выработку, пробуренную параллельно исследуемому объекту, где с помощью сейсмических или электромагнитных зондов осуществляется изучение околоскважинного пространства (рис. 4.9). При этом возбуждение упругих колебаний или электромагнитных полей (георадиолокационное зондирование) происходит или через фундамент, его армирование, или непосредственно в скважине. Осложнения при проведении таких работ могут возникать из-за прохождения сейсмического зонда в интервале рыхлых отложений или доступа к армированию фундамента. Немаловажным фактором при выполнении такого рода измерений также является высокая стоимость используемого оборудования и большой риск его потери.

Методика **комбинированных** исследований заключается в использовании фундамента в качестве источника возбуждения сейсмических, электромагнитных колебаний и скважины или земной поверхности для регистрации отклика от погруженной части сооружения. Для упрощения методики, оптимизации наблюдений и повышения однозначности результатов исследований возможно также использование инверсии линий возбуждения и приема. В этом случае источники физических полей располагаются в скважине или на поверхности земли.

Кроме того, следует указать, что во всех модификациях исследований по определению величины погруженной части фундамента и его характеристик существуют предпосылки для уточнения инженерно-геологических условий. Таким образом, учитывая вышесказанное, основной идеей разработки способа определения состояния и вида фундамента является совершенствование существующих решений с целью комплексного извлечения информации природно-технических систем, упрощения методики наблюдений и снижения затрат на оборудование.

3.1 Сейсмоакустические

Группа сейсмоакустических методов использует упругие колебания, распространяемые как в самом изучаемом объекте, так и в среде, взаимодействующей с ним. В основе сейсмических методов лежит возбуждение упругих волн при помощи технического устройства или комплекса устройств – источника. Источник создает в среде избыточное давление, которое компенсируется средой в течение некоторого времени. В процессе компенсации связанные частицы пород совершают периодические колебания, передаваемые вглубь земли упругими волнами. Важнейшим свойством волны является ее скорость, зависящая от литологического состава, состояния горных пород (трещиноватости, выветрелости и т.д.), возраста, глубины залегания (рис. 3.1).

Распространяясь в объеме горных пород, упругие волны попадают на границы слоев с различными упругими свойствами, изменяют направление, углы лучей и амплитуду, образуются новые волны. На пути следования волн размещаются пункты приема, где при помощи сейсмоприемников принимаются колебания частиц, которые преобразуются в электрический сигнал.

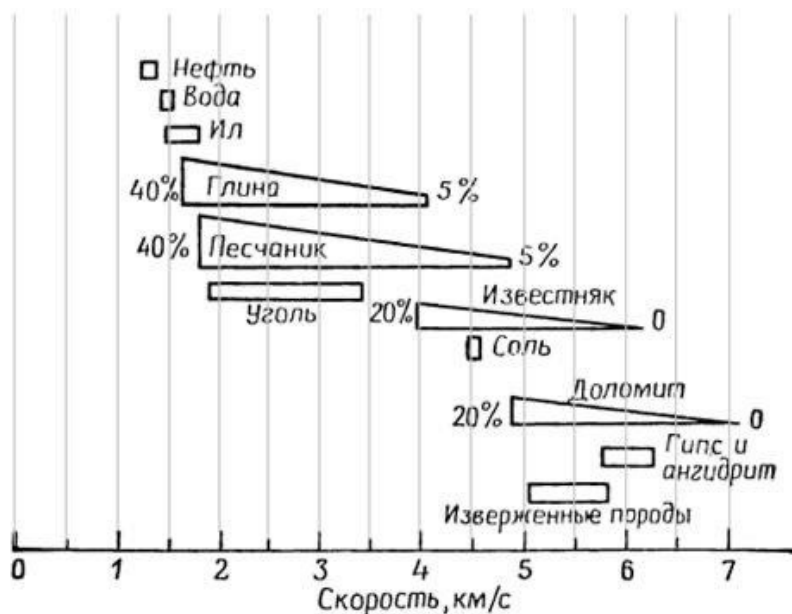


Рис. 3.1. Скорость продольных волн пород с различной пористостью (в процентах)

Для возбуждения колебаний применяются взрывы зарядов, а также длительное (вибрационное) или короткое (импульсное) ударное воздействие на объект исследований. Источник возбуждает два типа независимых сейсмических волн – продольные и поперечные. С продольными волнами связаны колебания, направленные вдоль луча волны, а с поперечными – поперек.

Прямой волной называется продольная или поперечная волна, распространяющаяся непосредственно от источника к точке наблюдения. Продольные

волны характеризуются большими скоростями, приходят в любую точку среды раньше поперечных, распространяются практически в любых веществах. Сейсмоакустический метод позволяет исследовать элементы фундамента опоры, изготовленные из бетона, железобетона, металла и дерева.

Для обследования фундаментов опор методом сейсморазведки применяют **три способа** получения геофизических данных в зависимости от расположения датчиков (сейсмоприемников) [5]:

- **поверхностный:**

- **контактный (способ А)** с расположением датчиков сверху на открытой части исследуемого фундамента и его модификация – **ультрасейсмический** (серия датчиков располагается на боковой поверхности надземной части фундамента с заданным шагом);

- **бесконтактный (способ Б)** датчики располагаются на поверхности земли в зоне обследуемого фундамента;

- **скважинный (межскважинный) контактный** (источники и приемники перемещаются по каналам внутри фундамента) и **бесконтактный** (источник или приемник перемещается внутри скважины, пробуренной снаружи и параллельно фундаменту).

При использовании сейсмоакустического метода применяют **датчики** (акселерометры, велосиметры), регистрирующие колебания конструкций от ударного воздействия и возвращения отраженных волн.

Погрешность определения глубины заложения фундамента составляет порядка 5 %.

Сейсмоакустический метод позволяет определять глубину заложения свайных элементов фундамента до 100 м в зависимости от их поперечного сечения и свойств грунтов основания.

При опирании фундамента опоры на скальные или плотные породы (гранит, базальт, диабаз, гравий и др.) сейсмоакустический метод может показывать некорректные результаты.

Результаты измерений сейсмоакустическим методом представляют в виде набора **рефлектограмм** – графиков изменения амплитуды сигнала от времени его регистрации.

3.1.1 Наземные

В контактном **способе А** датчик устанавливают строго над исследуемым свайным элементом на ростверк, ригель, насадку. При расположении сваи (столба) под углом к вертикали датчик должен быть установлен вдоль ее оси.

Отклонение оси датчика от оси сваи (столба) не должно превышать 10° (рис. 3.2).

Если в комплекте прибора используются два датчика, то второй датчик следует устанавливать на боковую поверхность элемента опоры (стойка, тело опоры) или непосредственно на сваю (столб) при наличии доступа к ней.

Поверхность элемента опоры или фундамента в местах установки датчика необходимо выровнять и зачистить. На предварительно зачищенную поверхность устанавливают датчик. Плотность контакта датчика с поверхностью элемента опоры обеспечивают с помощью мастики или густой смазки.

Для возбуждения акустической волны выполняют не менее 15–20 ударных воздействий в зоне расположения датчика специальным ручным молотком, входящим в комплект измерительного оборудования. При этом отражение акустической волны от конца сваи (столба) регистрируется датчиком и передается далее в прибор для записи сигнала (рис. 3.3).

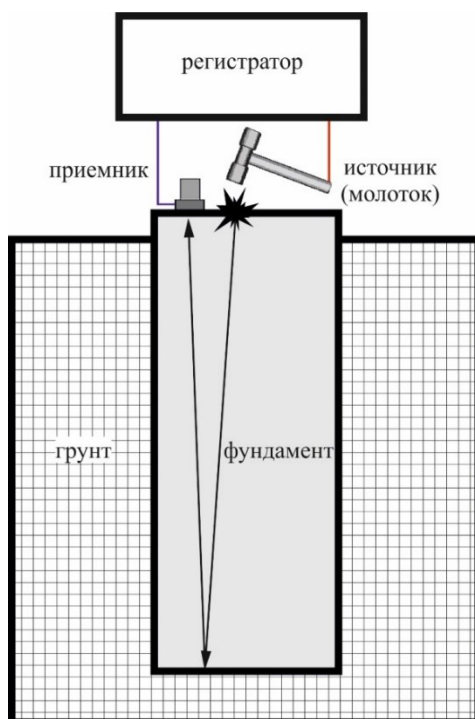


Рис. 3.2. Схема выполнения поверхностных измерений, с расположением датчиков наверху исследуемого фундамента по способу А

Выделение измеренного временного интервала между моментом удара и моментом прихода на датчик волны, отраженной от границы раздела сред, осуществляется на встроенный в регистратор компьютер. Далее длина сваи (фундамента) вычисляется по формуле:

$$H = V \cdot \frac{\Delta t}{2}, \quad (1)$$

где V – скорость распространения волны в свае (фундаменте), м/с; Δ – интервал времени между ударом и регистрацией изменения амплитуды, связанной с отражением от основания фундамента (рис. 3.4).



Рис. 3.3. Выполнение натуральных сейсмоакустических измерений поверхностным контактным способом А (Улыбин А. В. и др.)

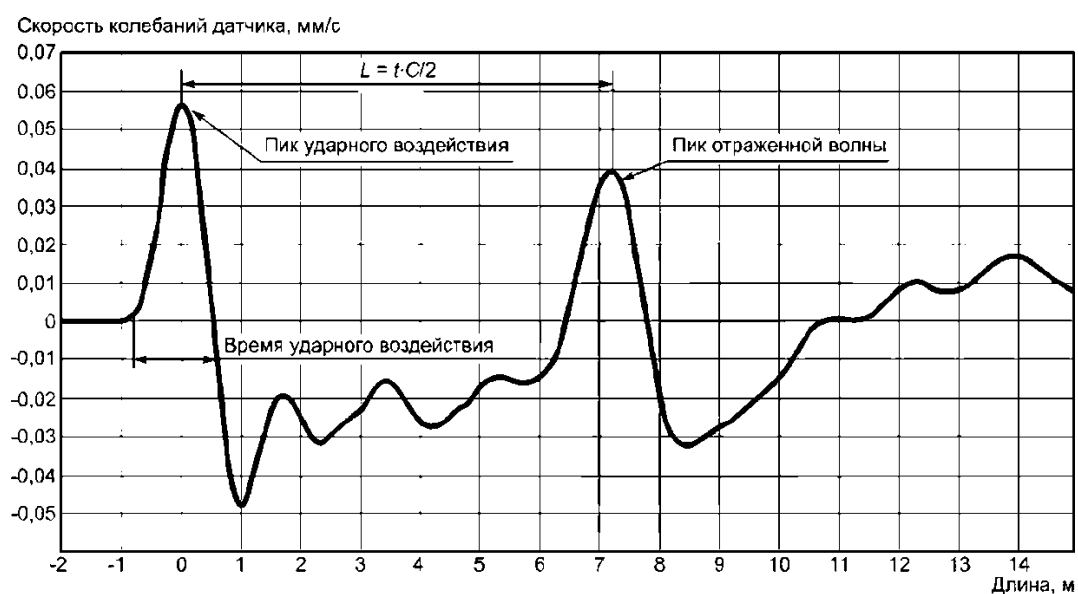


Рис. 3.4. Пример рефлектограммы пересчитанной на длину искомой части фундамента [15]

Ультрасейсмический метод представляет собой последовательность сейсмоакустических измерений с переменным по высоте уровнем (отметкой) установки датчика на боковой или верхней поверхности фундамента (рис. 3.5, 3.6). В результате ультрасейсмических измерений определяют длину измеряемого элемента (длину свай, расстояние до стыка, глубину расположения дефекта) без введения в расчет значения скорости распространения волны в фундаменте. Также по результату исследований определяют точное значение скорости в фундаменте [15].

Измерения ультрасейсмическим способом выполняют в следующей последовательности:

- на боковую поверхность элемента опоры или фундамента устанавливают датчики (не менее трех) с одинаковым шагом и располагают их в вертикальной плоскости;
- для возбуждения колебаний выполняют ударные воздействия по горизонтальной поверхности элементов опоры, расположенных над исследуемым фундаментом (ростверк, ригель, насадка и др.). Датчики регистрируют как прямые волны от ударов, так и волны, отраженные от границы раздела фундамента и грунта основания.

Рекомендуемое значение шага 0,3–0,5 при количестве сечений не менее 6 и суммарной длине участка измерений не менее 1,5 м.

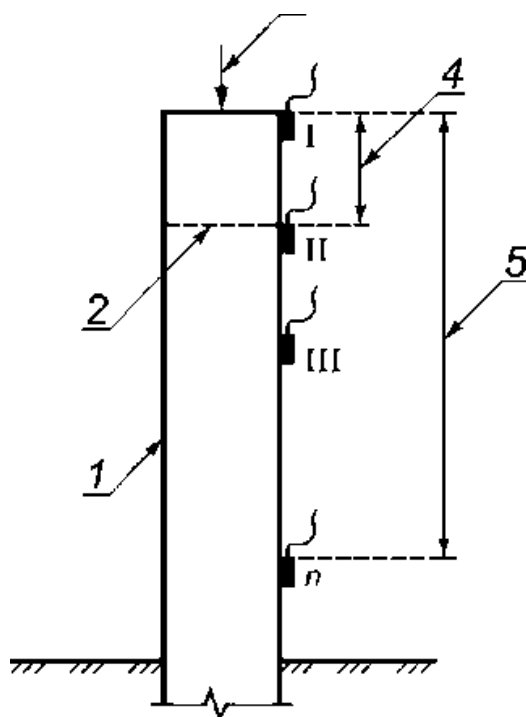


Рис. 3.5. Схема измерений ультрасейсмическим способом [15]

**1 – свая; 2 – сечение измерения; 3 – участок нанесения удара; 4 – шаг;
5 – общая длина участка измерения; I, II, III ... n – номера сечений установки датчика**

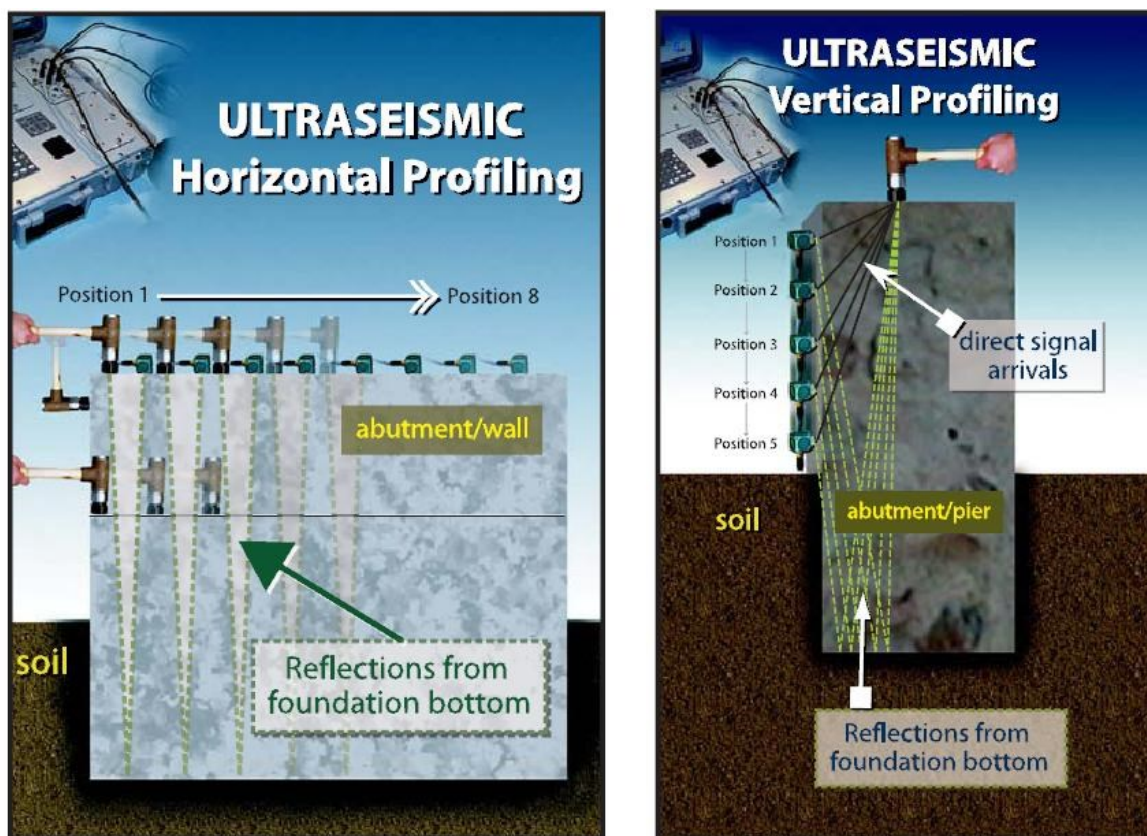


Рис. 3.6. Примеры выполнения натурных сейсмоакустических измерений ультрасейсмическим способом

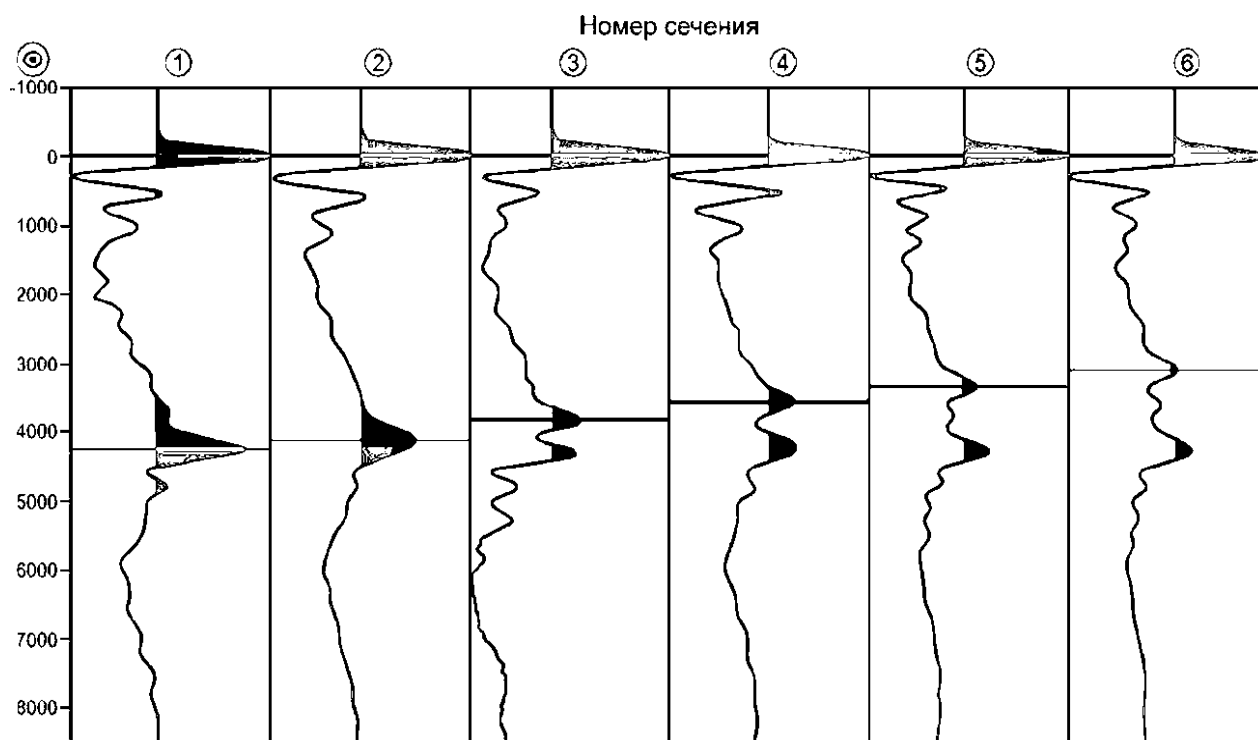
Погрешность измерения глубины заложения фундамента составляет порядка 5–10 % от измеренной длины. В зависимости от используемого оборудования данный метод позволяет определить глубину заложения фундамента от 10 до 100 м вне зависимости от типов грунтов.

Результаты измерений представляют в виде сейсмограмм – набора рефлектограмм (рис. 3.7).

Кроме того, наземные сейсмоакустические методы применяются не только для определения заглубленной части фундамента, но и для **изучения физического состояния и структурных изменений** в теле фундамента. По результатам исследований оценивается целостность фундамента и его физико-механические свойства, определяется наличие трещин (пустот), возможное изменение диаметра сваи (рис. 3.8).

Как правило, структурные и физические изменения отображаются в появлении на рефлектограмме дополнительных отражений – колебаний различного частотного состава. Один из примеров обнаружения дефекта сваи показан на рис. 3.9.

У способа имеются ограничения по соотношению длины к диаметру сваи (фундамента) и условиям вмещающей среды. По некоторым данным это соотношение не должно превышать 20:1.



**Рис. 3.7. Набор рефлектограмм, полученный по результатам измерений
ультрасейсмическим методом [15]**

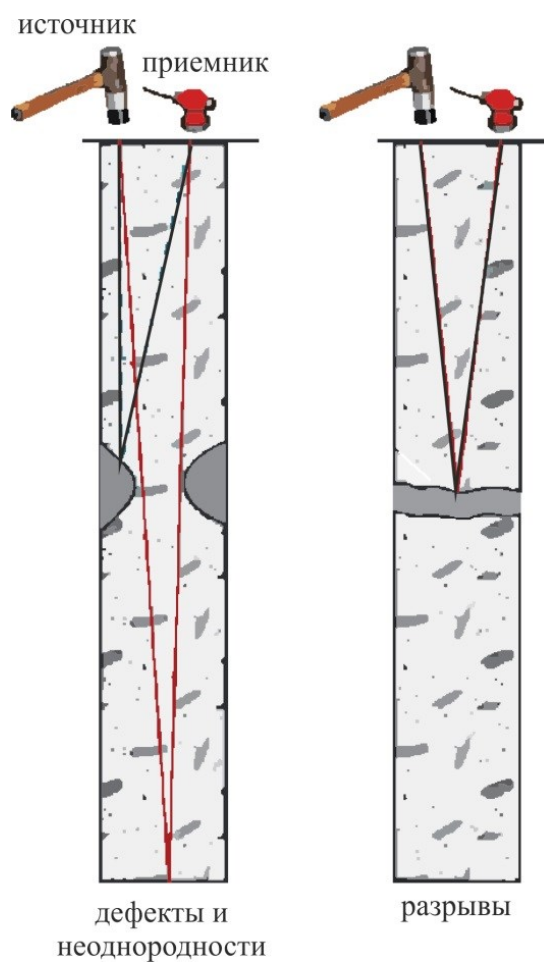


Рис. 3.8. Принцип определения дефектов в заглубленной части фундамента



Рис. 3.9. Отображение отклика сигнала при отсутствии (а) и наличии (б) нарушений в свайном фундаменте

В зависимости от количества приемников и источников сканеры представлены двумя вариантами – одноканальными (рисунок 3.10) или многоканальными (рис. 3.11) установками, которые отличаются удобством и производительностью измерений.

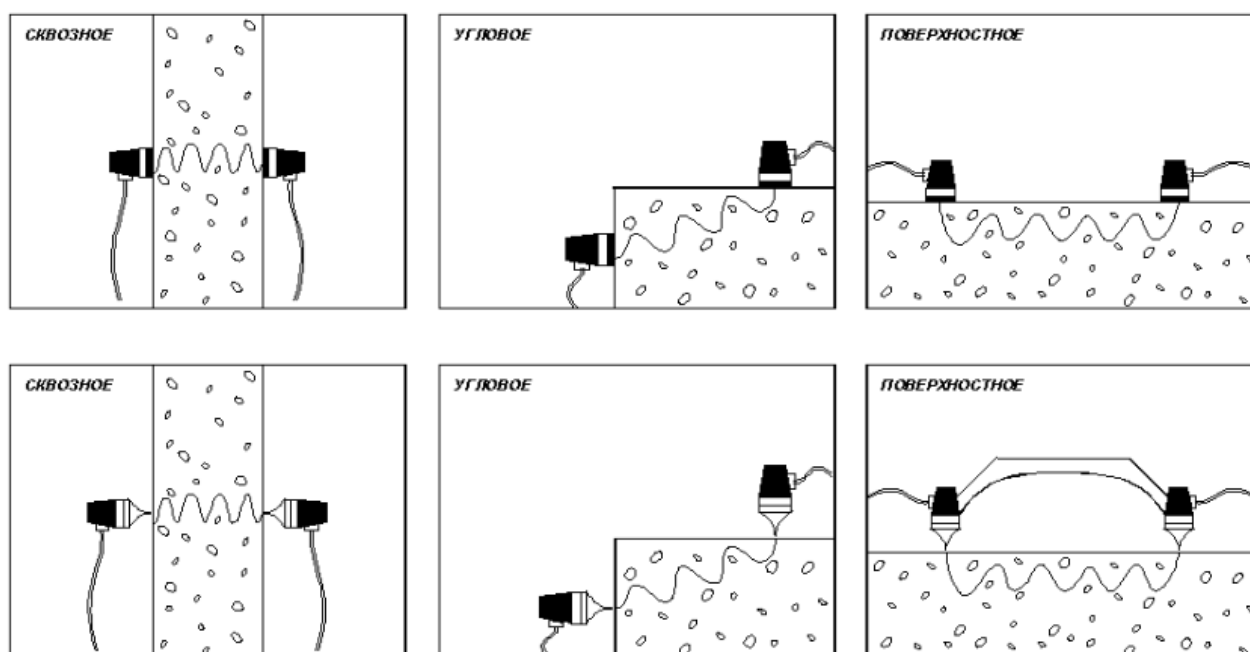


Рис. 3.10. Варианты просвечивания поверхностными одноканальными ультразвуковыми сканерами

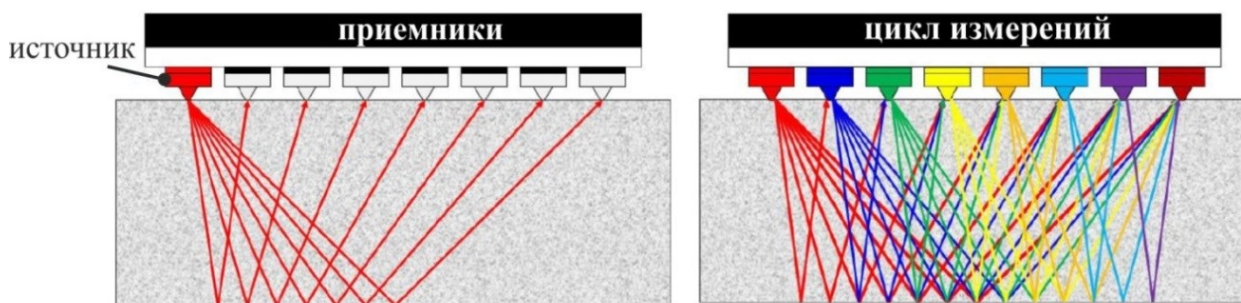


Рис. 3.11. Схема просвечивания поверхностными многоканальными ультразвуковыми сканерами

Следует отметить, что повышению точности определения геометрических характеристик и выявления особенностей, связанных с ухудшением несущих характеристик фундамента, способствует увеличение частоты используемого сигнала к ультразвуковому диапазону частот. Также существуют компактные поверхностные сканирующие модификации сейсмоакустического метода (ультразвуковые сканеры, томографы) для получения информации о внутреннем строении открытых частей фундамента или его составляющих и наличия в них дефектов.

Принцип метода в одноканальном варианте основан на измерении времени прохождения ультразвукового импульса в материале изделия от излучателя к приемнику. Скорость ультразвука вычисляется делением расстояния между излучателем и приемником (база просвечивания) на измеренное время (рис. 3.12). Для повышения достоверности в каждом измерительном цикле автоматически выполняется порядка 5–10 измерений, а результат формируется путем их статистической обработки с отбраковкой выбросов и определением среднего значения, коэффициента вариации, коэффициента неоднородности.



Рис. 3.12. Выполнение натурных ультразвуковых измерений одноканальными установками

Ультразвуковой метод в многоканальном варианте основан на оценке изменений, которые ультразвуковая волна претерпевает в компоненте вследствие рассеяния или отражения от внутренних объектов. Ультразвуковая волна генерируется на поверхности фундамента в этом приборе пьезоэлектрическим возбуждением и распространяется в виде упругой волны внутри объекта, а их регистрация осуществляется одновременно остальной группой приемников. При этом каждый элемент датчика может быть как источником, так и приемником, то есть в следующий цикл измерений излучатель меняет свой режим на прием и т.д.

Распространяясь по материалу, волна взаимодействует со структурой материала всякий раз, когда она сталкивается с границей раздела материала с другим акустическим сопротивлением, и рассеивается вдоль нее. Например, в случае бетона это происходит на границе слоев заполнителя и бетонной матрицы.

На частях внутренней конструкции, например на арматурных стержнях или облицовочных трубах, часть включенной энергии рассеивается обратно и снова достигает поверхности. Большая часть энергии отражается на задней стенке элемента (например, на границе бетона и воздуха).

Для создания и записи звуковой энергии в качестве передатчиков и приемников используются преобразовательные элементы различных типов, которые подключаются к ультразвуковым устройствам для измерения и представления результатов. Передатчики и приемники могут быть расположены по-разному, исходя из используемого метода.

В зависимости от доступности компонента, передатчик и приемник размещаются на одной стороне компонента, что называется отражающим устройством. Процедуры, которые используются с применением этого метода, называются процедурами эхо-импульса. Если доступ возможен с обеих сторон, это называется передачей звука.

Скорость звука может быть очень легко определена с помощью передачи. Это может быть экспериментально связано с такими параметрами материала, как прочность бетона на сжатие или процесс затвердевания свежего бетона.

Если амплитуды, записанные с помощью эхо-импульсного устройства, отображаются на графике с течением времени, то при известной скорости звука можно определить глубину объектов и толщину компонента.

Методически измерения производятся вдоль линий (профилей) наблюдения, размеченных на фундаментах линейкой. Прибор, имеющий матрицу датчиков, прижимается к поверхности объекта, далее производятся измерения и перемещение прибора, желательно с перекрытием относительно предыдущих измерений (рис. 3.13).

Скорость распространения ультразвуковой волны в материале зависит от его плотности и упругости, от наличия дефектов (трещин и пустот), определя-

ющих прочность и качество (рис. 3.14, 3.15). Просвечивая элементы изделий, конструкций и сооружений, можно получать информацию о:

- прочности и однородности;
- модуле упругости и плотности;
- наличии дефектов и их локализации.



Рис. 3.13. Выполнение натурных измерений многоканальными ультразвуковыми сканерами

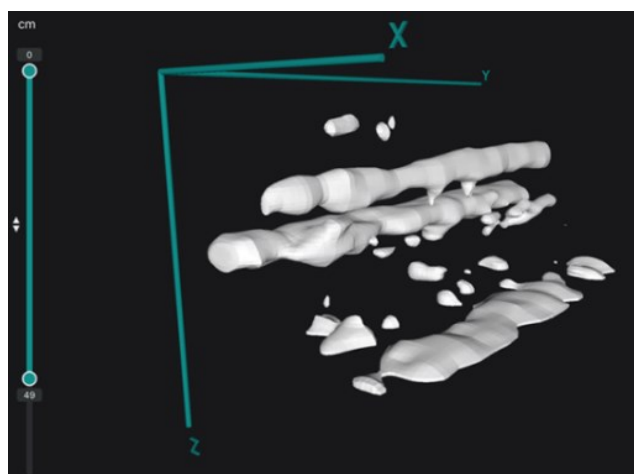


Рис. 3.14. Пример трехмерной визуализации зон разуплотнения

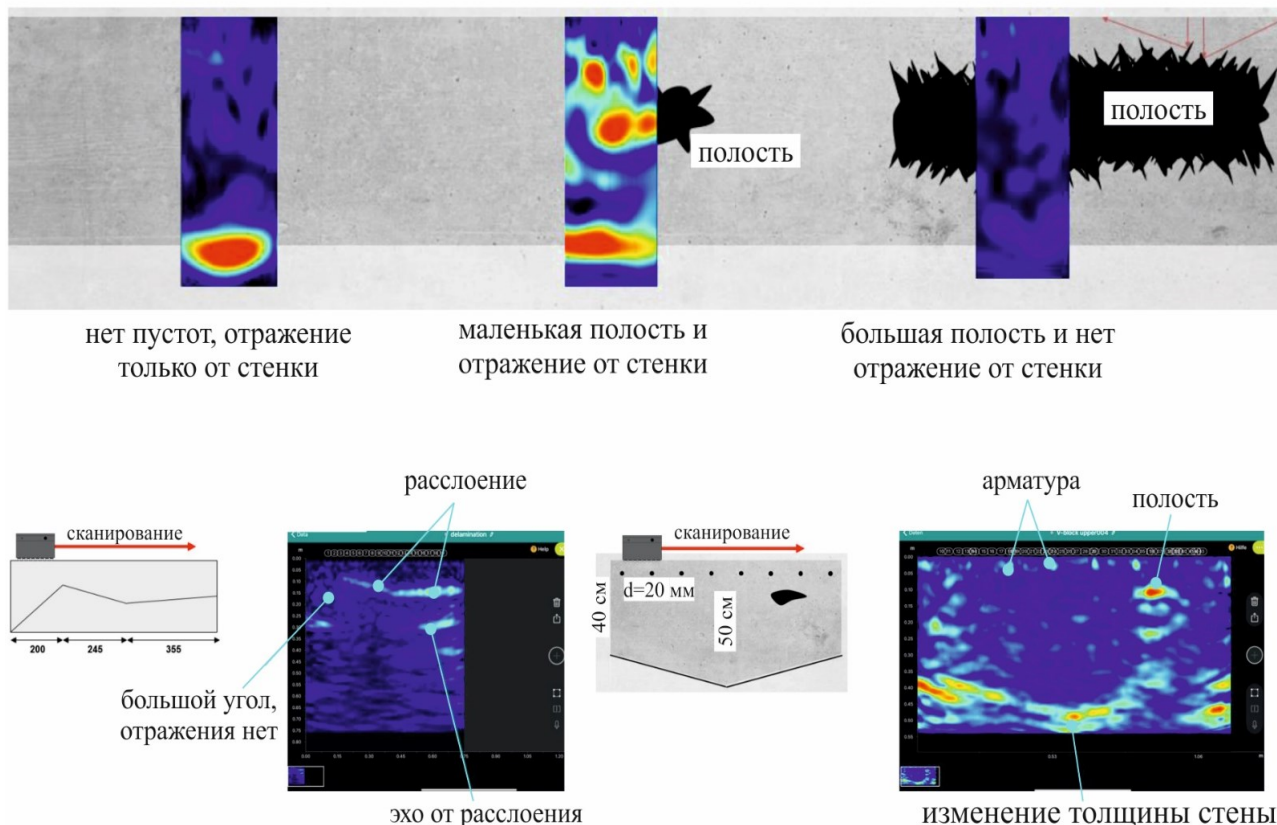


Рис. 3.15. Примеры отображения границ от стенок и полостей по результатам ультразвукового сканирования

В условиях наземных исследований известны методики проведения профильных наблюдений отраженных волн при расположении датчиков (приемников) вблизи фундамента на поверхности грунтового (техногенного) основания (рис. 3.16, 3.17).

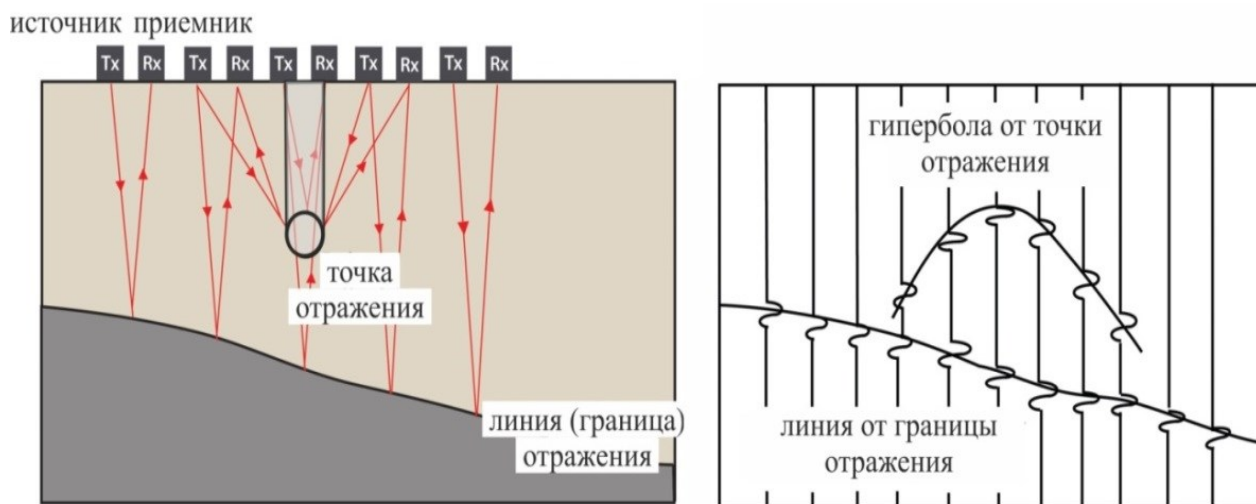


Рис. 3.16. Схема получения отражений от фундамента и границы пород

Измерения поверхностным **способом Б** выполняют в следующей последовательности [5]:

- на поверхности земли в непосредственной близости от опоры устанавливаются датчики. Количество датчиков и расстояние между ними определяются характеристиками применяемого оборудования и размерами обследуемого фундамента;
- возбуждение колебаний выполняют с помощью ударного воздействия на грунт вблизи соответствующего датчика, принимающего сигнал и передающего его на записывающее устройство.



Рис. 3.17. Выполнение натуральных сейсмических измерений поверхностным бесконтактным способом Б

Пример отображения глубины заложения фундамента с использованием отраженных сейсмических волн поверхностным способом Б приведен на рис. 3.18.

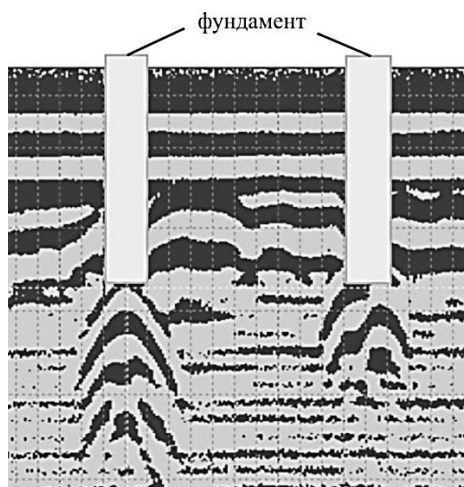


Рис. 3.18. Пример профильных сейсмических исследований способом обследования свайных фундаментов с использованием отраженных волн

3.1.2 Скважинные

Группа данных сейсмических методов использует специально подготовленные скважины в грунтовом основании вблизи или внутри изучаемых фундаментов. Расположение скважин снаружи фундаментов, как правило, обусловлено наличием эксплуатируемых зданий и сооружений.

Исследования внутри фундаментов проводятся на стадии их возведения. Для этого в тело фундамента до его основания закладываются специальные незаполненные каналы-трубы.

Наружные исследования в скважинах параллельно фундаменту называют **Parallel Seismic (PS)**. Их применяют как для изучения фактической глубины его заложения, так и для выявления дефектов. Внутренние измерения дают сведения о технологических стадиях, физическом состоянии фундамента и его однородности.

Параллельные сейсмические исследования – это неразрушающие поверхностные методы, используемые для проверки фундаментов, а именно длины и их целостности. По сравнению с другими неразрушающими поверхностными сейсмическими методами, технология параллельной сеймики более надежна и универсальна для решения геотехнических задач.

Сейсмические волны генерируются при ударе молотком по конструкции. Эти волны сжатия или сдвига, которые проходят вниз по фундаменту, регистрируются гидрофонным приемником внутри скважины. Как показано на рисунке 3.19, гидрофоны расположены на близком расстоянии друг от друга.

Генерируемые волны распространяются вниз вдоль конструкции с более высокой скоростью, пока не достигнут основания фундамента. За пределами основания фундамента, т.е. при прохождении через грунт, время прохождения увеличивается из-за меньшей скорости волн в грунте.

Испытание основано на определении прямого времени прихода этих волн сжатия или сдвига на приемные станции (гидрофон). Точка, в которой скорость быстро уменьшается (время прохождения t увеличивается), интерпретируется как глубина сооружения (точка перегиба на рис. 3.19). Полученный график зависимости глубины от времени определяет глубину испытываемого фундамента.

Аналогичным образом, если в фундаменте есть какой-либо разрыв или включение, сигналы или волны огибают его, увеличивая длину пути и время прохождения. Это покажет отклонение прямой линии на графике зависимости глубины от времени, полученном в результате параллельного сейсмического теста.

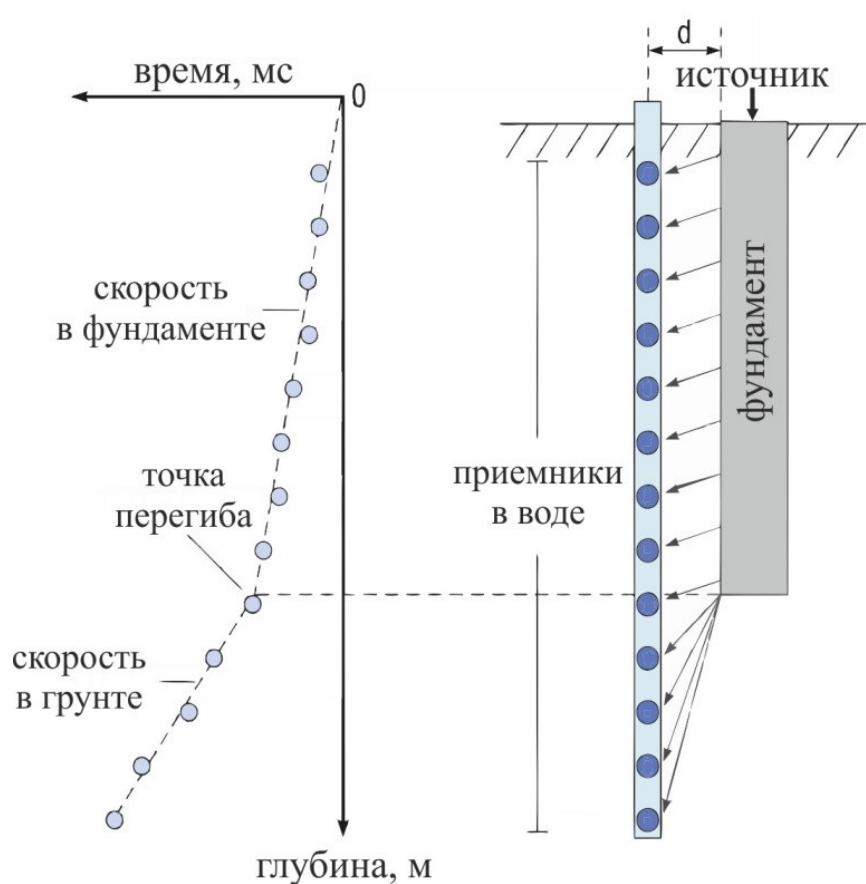


Рис. 3.19. Схема сейсмических исследований параллельным способом (PS)

Измерения способом PS (рис. 3.20) выполняют в следующей последовательности:

- осуществляют бурение вертикальной исследовательской скважины ниже предполагаемой глубины заложения фундамента в максимальной близости от тела опоры, насколько это позволяют габариты бурового оборудования и конструкция сооружения;
- в скважину устанавливают обсадную трубу с заглушенным нижним концом, изготовленную из неметаллического материала (например, пластика), которую заполняют водой. Внутренний диаметр обсадной трубы должен быть достаточным для свободного перемещения в ней сейсмических приемников;
- в скважину помещают сеймоприемники, подключенный к сеймостанции, и выполняют измерения по всей высоте скважины с шагом около 0,5 м;
- возбуждение колебаний осуществляют с помощью ударного воздействия по горизонтальной поверхности элементов опоры, расположенных над исследуемым фундаментом (ростверк, ригель, насадка и др.) [5].



Рис. 3.20. Выполнение натурных измерений способом PS

Диаметр скважины, пробуренной для испытания, составляет от 150 до 200 мм. Скважина бурится параллельно и близко к конструкции, рядом с фундаментом или непосредственно возле фундамента. Бурение производится на расстоянии до 1,5 м от фундамента. По мере удаления ствола скважины от фундамента интерпретация данных испытаний PS становится более сложной.

Параллельные сейсмические испытания относительно быстры для изучения фундамента под существующими конструкциями. Метод PS может применяться на фундаментах, расположенных на влажном грунте, на глубоких фундаментах, таких как шпунтовые сваи, опорные столбы и т.д. При исследованиях определяют длину свай, тип фундамента и размывы в фундаменте. Точность оценки глубины заложения фундамента параллельным методом оценивается в $\pm 5\%$.

На рисунке 3.21 показаны примеры результатов параллельного сейсмического испытания. Изменение наклона линии, представляющей время прихода импульса напряжения в зависимости от глубины, указывает глубину заложения фундамента.

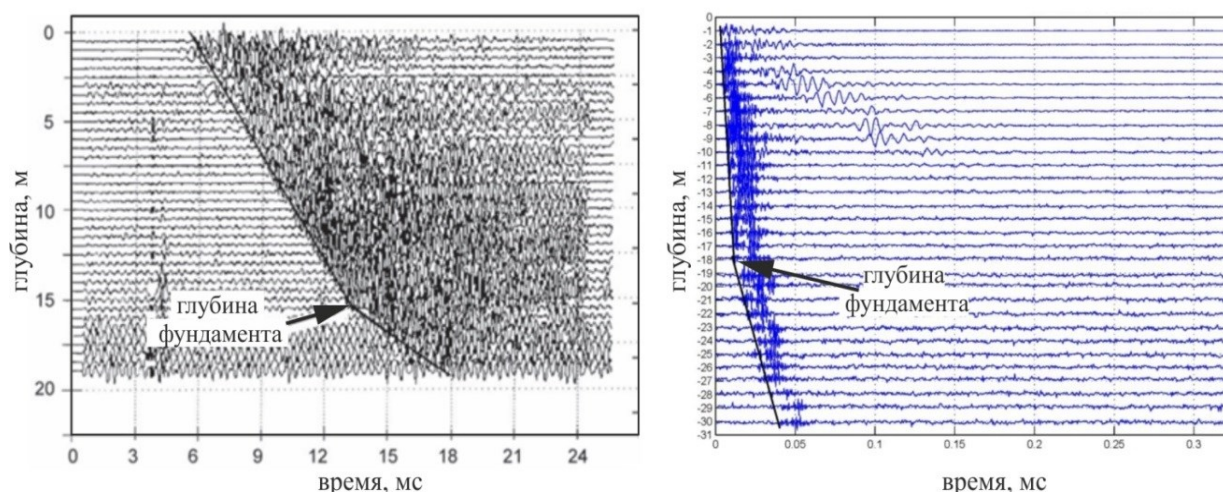


Рис. 3.21. Примеры сейсмических исследований параллельным способом (PS)

Исследования **внутри** фундамента известны под названием «межскважинный акустический каротаж», или **crosshole sonic logging (CSL)**. Данный метод является наиболее точным и надежным методом оценки целостности глубоких элементов фундамента, таких как недавно уложенные бетонные стволы и стенки из бурового раствора, особенно при бурении ниже уровня грунтовых вод. Учитывая количество проблем, которые могут угрожать целостности элементов глубокого фундамента во время строительства, важно обеспечить высокий уровень контроля качества. Исследования методом CSL позволяют обнаружить аномалии внутри бетона.

Количество проблем, которые угрожают целостности пробуренных стволов и стенок бурового раствора, велико. Сужение и обрушение пробуренных стволов, прогиб арматурного каркаса, повреждение свай, проникновение избыточной воды – все это может серьезно повлиять на целостность конструкции. Возможность проведения контроля качества сразу после заливки бетона может сэкономить значительное количество времени и денег по сравнению с поздним обнаружением дефектов.

Испытания выполняются в соответствии с ГОСТ 17624-2012 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности» и международным стандартом ASTM D6760-16 Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing (Стандартный метод испытаний целостности бетона для фундаментов глубокого заложения с применением ультразвука).

Для проведения исследований методом CLS перед началом строительства необходимо установить подводящие трубы. Обычно это трубы из ПВХ или стали диаметром от 38 до 50 мм, прикрепленные к внутренней части каркаса арматуры. Необходимое количество труб зависит от размера конструкции и требуемого разрешения.

При проведении измерений трубы (каналы) наполняют водой для лучшего прохождения ультразвуковых волн через исследуемый объем фундамента. Гидрофоны источника и приемника опускаются на дно отдельных труб. При одновременном подъеме гидрофонов измеряется горизонтальная скорость ультразвукового импульса (рис. 3.22). Шкала глубины контролирует разрешение выборочных показаний, которые обычно снимаются с интервалом в несколько сантиметров.

Самый простой формат испытания предполагает установку по крайней мере двух параллельных труб. Два датчика (передатчик и приемник) опускаются на дно шахты и поднимаются вверх. Время прохождения ультразвукового импульса через бетон между трубами измеряется регистратором данных. По мере подъема датчиков UPV измеряется и регистрируется в зависимости от высоты. Это позволяет инженерам получать вертикальный профиль времени прохождения сигнала. В современной системе CSL используется автоматический датчик глубины для точной регистрации положения зондов внутри труб доступа.

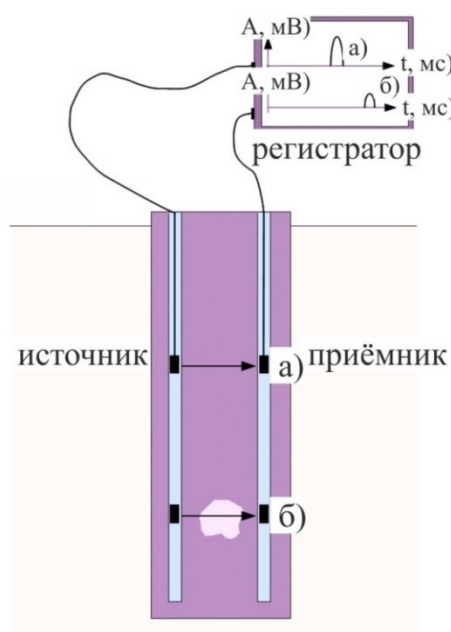


Рис. 3.22. Схема выполнения межскважинного акустического (ультразвукового) каротажа (CLS)

В зависимости от количества подготовленных в фундаменте каналов (скважин) можно выделить три модификации метода (рис. 3.23):

- CLS, межскважинный каротаж (2D просвечивание) при наличии минимум двух каналов в фундаменте;
- SSL, каротаж одиночных скважин в фундаменте;
- СТ, межскважинная томография, трехмерное просвечивание тела фундамента благодаря наличию системы скважин по всему периметру исследуемого объекта.



Рис. 3.23. Модификации внутренних исследований и пример полевого выполнения работ

Теоретически скорость импульса в бетоне зависит от модуля упругости, плотности и коэффициента Пуассона. Однородный бетон хорошего качества способствует распространению ультразвуковых волн. Более длительное время прохождения ультразвуковой волны и меньшие амплитуды соответствуют бетону низкого качества или с пустотами. Полная потеря сигнала означает, что значительная пустота препятствует передаче сигнала между гидрофонами (рис. 3.24).

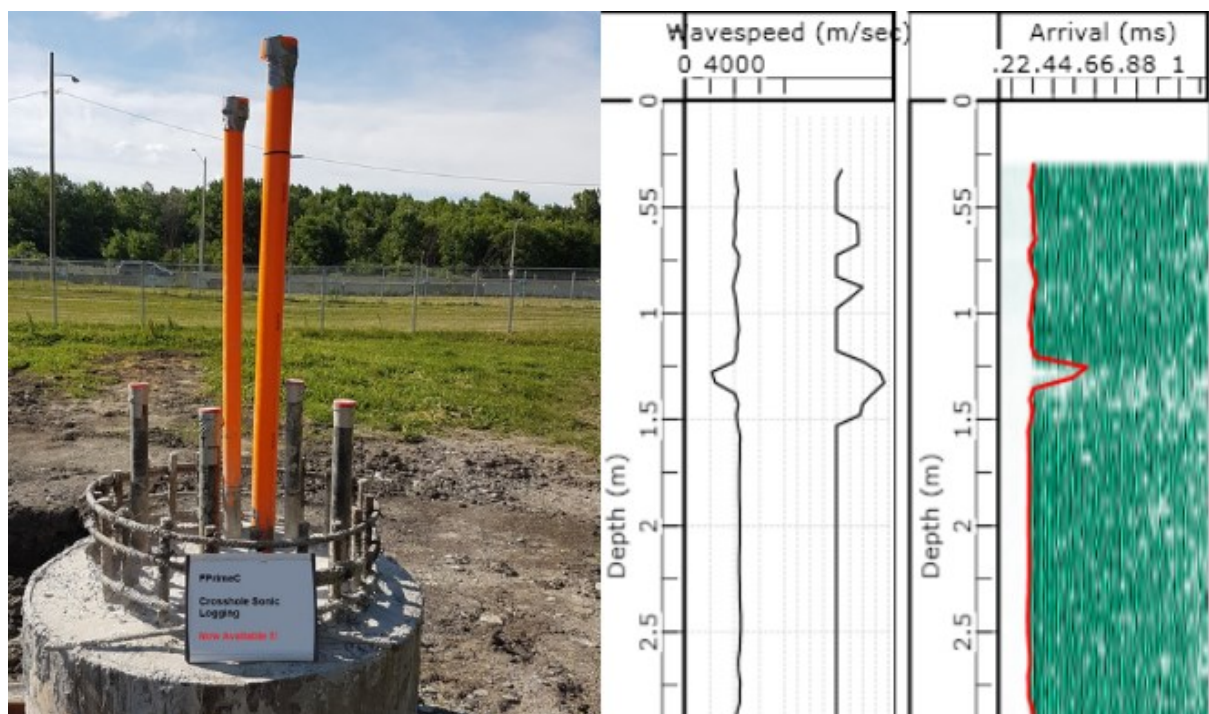


Рис. 3.24. Пример результатов выполнения исследований методом межскважинного акустического (ультразвукового) каротажа (CLS)

Разрешение сканирования по высоте можно регулировать скоростью вывода датчиков в трубе (обычно выполняется снизу вверх). Разрешение сканирования на каждом возвышении зависит от ряда параметров, таких как выбранная частота (длина волны импульса), количество и горизонтальное расстояние между трубками доступа. Современный CSL оснащен датчиками, которые могут работать в диапазоне от 25 до 50 кГц, позволяя обнаруживать дефекты размером от 2,5" до 4" (в каждом горизонте).

Межскважинная томография, или томографический анализ, это изменение межскважинного акустического каротажа, которое позволяет получить изображение аномалии внутри ствола. Такое изображение показывает форму и положение пораженной зоны. Если обычная CSL (горизонтальная установка) показывает, что в стволе есть вероятность наличия дефекта, могут быть проведены дополнительные испытания с датчиками, смещенными вертикально, чтобы обеспечить наклонные пути прохождения импульсов. Это позволяет определить площадь и размер дефекта.

Для реализации томографических наблюдений устанавливаются трубы с множественным доступом по всему периметру. Благодаря этому пары труб, включая субдиагональные, могут быть использованы для дальнейшего пространственного определения любых аномалий и получения полного 3D-внутреннего изображения дефектов конструкции (рис. 3.25).

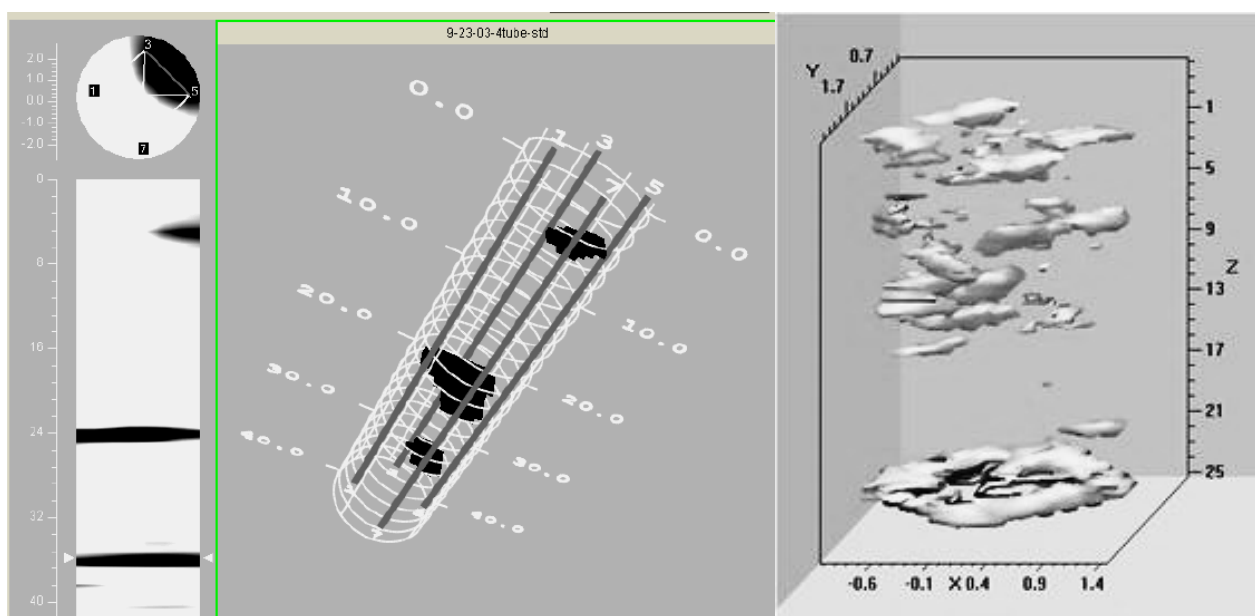


Рис. 3.25. Пример схемы измерений и трехмерного отображения пустот по результатам исследований томографическим методом СТ

Используя один и тот же набор водонаполненных подводящих труб, как CSL, так и СТ могут дать бесценную информацию о качестве бетона между этими трубами.

Акустический каротаж в односкважинных скважинах (SSL), представленный на рисунке, дает дополнительную информацию о качестве бетона вблизи отдельной трубы. Это позволяет проводить анализ качества за пределами периметра каркаса арматуры, что способствует полному и анализу поперечного сечения.

3.1.3 Аппаратура

Для реализации сейсмоакустических исследований **способами А, Б** в контактном и бесконтактном вариантах на практике используются как готовые решения в виде специализированных аппаратурно-программных комплексов типа **СПЕКТР, ПДС-МГ4, ИДС, РЕТ, SIT, NDE 360**, так и стандартное геофизическое оборудование, которое применяется для выполнения сейсморазведочных работ [17].

В плане отечественных разработок следует отметить прибор диагностики свай **СПЕКТР**. Аппаратура производится НПП Интерприбор в двух модификациях СПЕКТР-4.31 и СПЕКТР-4.32 (рис. 3.26), отличается высоким качеством изготовления.



Рис. 3.26. Общий вид прибора СПЕКТР

1 – беспроводной цифровой датчик виброускорения ДАЦ;
2 – молоток с демпфером (СПЕКТР-4.31); 3 – Молоток с демпфером и датчиком силы МДС (СПЕКТР-4.32); 4 – Планшетный ПК

Приборы предназначены для решения следующих задач:

- виброакустической диагностики железобетонных (забивных, буронабивных, буроинъекционных и др.), стальных, деревянных свай в соответствии со стандартом ASTM D5882;

- определения длины свай, обнаружения и локализации дефектов в теле свай в соответствии со стандартом ПНСТ 804;

- дефектоскопии различных объектов по их реакции на ударное воздействие (при наличии специализированных методик).

Торцевой датчик ВД-1002 предназначен для установки на поверхность, перпендикулярную оси сваи, например вырубку в боковой поверхности сваи или на металлическую призму, прикрепленную к свае. Датчик крепится на строительную липкую ленту, мастику, густую литиевую смазку или для металлических поверхностей на встроенные магниты в платформе датчика (рис. 3.27).

Боковой датчик ВД1002.02 предназначен для установки на боковую поверхность сваи в труднодоступных местах и когда отсутствует доступ к оголовку сваи. Датчик крепится на строительную липкую ленту, мастику, густую литиевую смазку или для металлических свай (при наличии металлических элементов в конструкции свай) на встроенные магниты.



Рис. 3.27. Торцевой и боковой датчики

Прибор ПДС-МГ4 ООО «СКБ Стройприбор» (рис. 3.28) так же, как и **СПЕКТР**, предназначен для измерений интервалов времени между моментом возбуждения акустической волны в свае и моментом прихода эхо-сигнала, отраженного от границы раздела сред.

Область применения аналогичная – определение длины и целостности свай в строящихся зданиях и сооружениях (СП 45.13330.2017 «Земляные сооружения, основания и фундаменты»), а также для бесконтактных сейсмических исследований – профилирования или зондирования



Рис. 3.28. Общий вид прибора ПДС-МГ4

1 – электронный блок; 2 – молоток; 3 – сейсмоприемник; 4 – разъем для подключения первого сейсмоприемника; 5 – разъем для подключения второго сейсмоприемника; 6 – разъем для подключения молотка; 7 – разъем USB; 8 – разъем для зарядного устройства; 9 – молоток с встроенным пьезодатчиком; 10 – геофон

Аналогичной многоканальной системой является комплекс **ИДС-2** (рис. 3.29), позволяющий осуществлять инструментальный контроль не только железобетонных, буронабивных и железных свай, но также и ленточных сплошных фундаментов, тоннелей метро и других сложных конструкций.



Рис. 3.29. Комплект аппаратуры ИДС-2

Ведущими зарубежными разработчиками – **Piletest, Olson Engineering, Profound** – выпускаются варианты **PET, NDE 360, SIT** (рис. 3.30–3.32).



Рис. 3.30. Комплект аппаратуры PET



Рис. 3.31. Комплект аппаратуры NDE 360



Рис. 3.32. Комплект аппаратуры SIT

Другая категория аппаратных разработок представлена в виде ультразвуковых томографов и предназначена для визуализации внутренней структуры бетонных конструкций, обнаружения объектов и дефектов внутри них, а именно:

- поиска расслоений, пустот и пористости, определения глубины залегания и размеров дефектов, оценки зернистости;
- оценки твердости бетона и стадии его затвердевания;
- измерения толщины объекта при одностороннем доступе;
- определения прочности бетона на сжатие;
- оценки однородности и прочности бетонных конструкций посредством определения скорости ультразвукового импульса.

Благодаря технологии многоканального ультразвукового эхо-импульса и программному обеспечению комплексы подробно визуализируют внутреннюю структуру бетона, позволяя на месте проводить исследование объекта до глубины порядка 1 м.

В качестве примера на рисунках 3.33–3.35 представлены зарубежные комплексы Pundit PD8050, Mira A1040, A1220 МОНОЛИТ.



Рис. 3.33. Комплект аппаратуры Pundit PD8050



Рис. 3.34. Комплект аппаратуры Mira A1040



Рис. 3.35. Комплект аппаратуры А1220 МОНОЛИТ

Простейшей вариацией вышеперечисленных томографов для изучения приповерхностного слоя фундаментов является одноканальный измеритель времени и скорости распространения ультразвука **ПУЛЬСАР** (рис. 3.36).



Рис. 3.36. Общий вид прибора Пульсар

Комплекс **ПУЛЬСАР** предназначен для оценки свойств и дефектоскопии твердых материалов по времени и скорости распространения, а также форме принимаемых ультразвуковых импульсов при поверхностном и сквозном прозвучивании. Прибор позволяет выявлять дефекты, определять прочность, плотность и модуль упругости строительных материалов, звуковой индекс абразивов по предварительно установленным градуировочным зависимостям данных параметров от скорости распространения импульсов. Также прибор имеет дополнительную функцию вычисления класса бетона по схеме Г п. 4.3 ГОСТ 18105.

Основные области применения:

- определение прочности бетона согласно ГОСТ 17624 при технологическом контроле, обследовании зданий и сооружений, в том числе в сочетании с методом отрыва со скалыванием (прибор ОНИКС-ОС) и методом скалывания ребра (прибор ОНИКС-СР);
- поиск дефектов в бетонных сооружениях по аномальному снижению скорости и по форме визуализируемых сигналов УЗ-импульсов;
- оценка глубины трещин;
- оценка пористости, трещиноватости и анизотропии композитных материалов и горных пород;
- определение модуля упругости и плотности материалов;
- диагностика буронабивных свай.

Следующая группа аппаратурных комплексов используется для скважинных измерений методами **PS** и **CSL**. Среди отечественных разработок можно выделить дефектоскоп буронабивных свай **ПУЛЬСАР-2.2 ДБС** (рис. 3.37). Комплекс предназначен для ультразвукового контроля однородности и сплошности бетона в сваях и фундаментах глубокого заложения по времени и скорости распространения ультразвукового сигнала. Основные области применения:

- диагностика буронабивных свай по специальным контрольным водонаполненным каналам (трубам) в соответствии с Европейским стандартом;
- проверка однородности и сплошности бетона в фундаментах глубокого заложения (буронабивных сваях, пробуренных скважинах, бетонных сваях или сваях, устроенных при помощи технологии непрерывного проходного шнека);
- проверка однородности и сплошности бетона в фундаментах типа «стена в грунте», баррета, плотина и т.д.;
- определение глубины залегания фундамента.



Рис. 3.37. Внешний вид дефектоскопа буронабивных свай Пульсар-2.2 ДБС

- 1 – электронный блок (прибор); 2 – разъемы для подключения УЗ датчиков;
3 – разъемы для подключения датчиков положения; 4 – УЗ датчик;
5 – смотчики кабеля; 6 – разъемы для подключения кабелей УЗ датчиков
к электронному блоку; 7, 8 – датчики положения (энкодер)**

В комплекс введены дополнительные функции, обеспечивающие контроль по заданным сечениям и по высоте свай.

При дефектоскопии буронабивных свай и фундаментов с помощью комплекса осуществляется:

- поиск дефектов (неоднородностей, пустот, трещин и т.д.);
- оценка прочности бетона на контролируемых сечениях и уровнях по градуировочным характеристикам, получаемым путем параллельного прозвучивания и разрушающего испытания образцов-кубов или кернов (см. ГОСТ 22690).

Диагностика выполняется путем дискретного прозвучивания по высоте радиальных и сегментных сечений свай, с дальнейшим получением ультразвуковой модели. При этом измеряется время распространения УЗ сигнала на известной базе прозвучивания, вычисляется скорость УЗК, а также прочность бетона (по известной градуировочной зависимости).

Ниже на рисунках 3.38–3.40 приведены зарубежные комплексы по этому направлению от производителей Olson, Piletest.



Рис. 3.38. Внешний вид дефектоскопа буронабивных свай Olson



Рис. 3.39. Внешний вид дефектоскопа буронабивных свай CHUM (Piletest)



Рис. 3.40. Внешний вид комплекса по определению глубины фундаментов параллельным методом (PS) PSI 2 (Piletest)

3.2 Электрические

Другой подход изучения фундаментов при определении погруженной части фундамента и свойств их оснований связан с использованием электромагнитных полей от **постоянного** (0 Гц) до **переменного** (2000 МГц) тока. Методы, использующие постоянный или квазипостоянный ток, называют **методами сопротивлений**. Они основаны на пропускании известного постоянного тока через исследуемые объекты с помощью пары контактов (AB) и измерении напряжения (разности потенциалов), вызванного этим током, с помощью другой пары контактов (MN). Зная ток и напряжение, можно вычислить сопротивление, а с учетом конфигурации расположения контактов ABMN можно установить, к какой части пространства это сопротивление относится. Увеличение расстояния между токовыми контактами (разнос) влечет увеличение глубинности исследования и является зондирующим фактором при выполнении измерений (рис. 3.41).

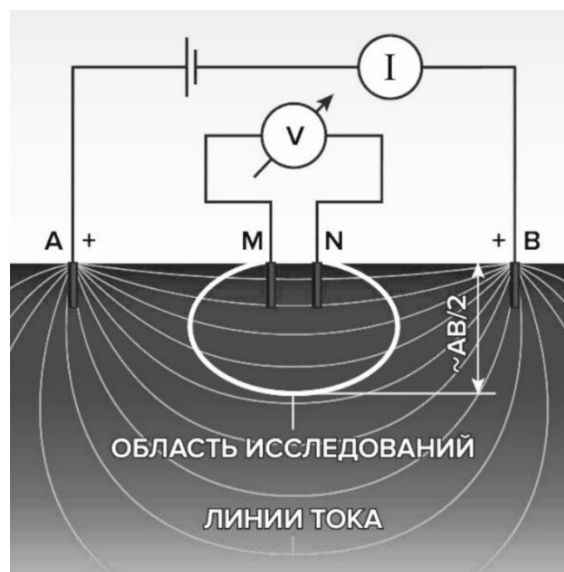


Рис. 3.41. Схема выполнения исследований методом сопротивлений на квазипостоянном токе

Методы, использующие переменное электромагнитное поле, в основе распространения которого лежит феномен магнитной индукции, называют **индукционными**. Зная параметры источника поля, можно измерять различные электрические и магнитные компоненты индуцированного поля, восстанавливая по ним параметры среды или получая отклик от изучаемого объекта (рис. 3.42). В отличие от методов сопротивлений, где зондирующим параметром является разнос, в индукционных методах, кроме размеров установки, глубинность зависит также от частоты тока в генераторе или от времени регистрации после выключения тока в генераторе.

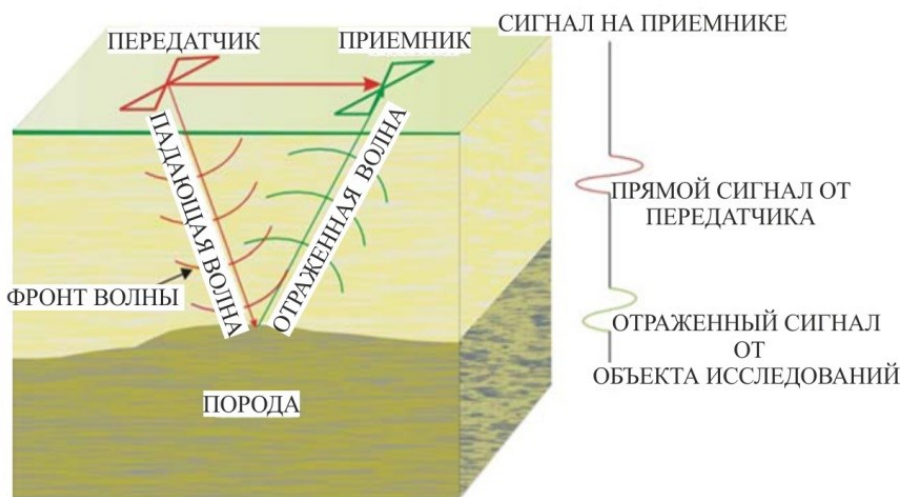
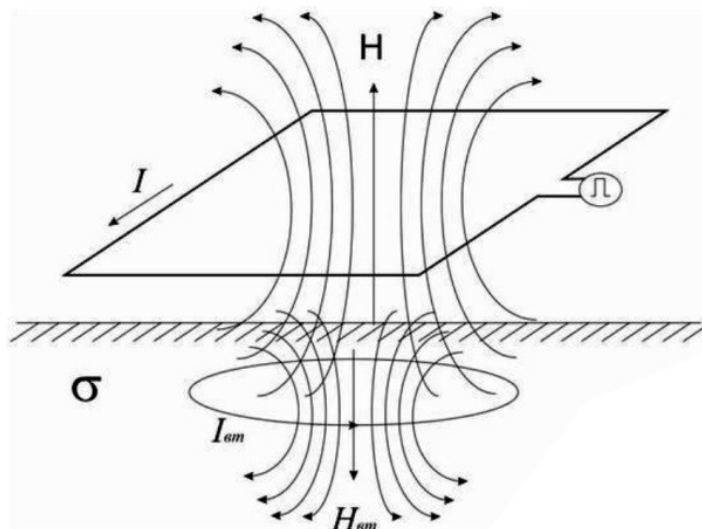


Рис. 3.42. Схема выполнения исследований индукционными методами в частотной и временной области

Электрические методы так же, как и при акустических исследованиях, можно разделить по способу изучения и типам используемых электромагнитных полей:

- контактный метод сопротивлений;
- бесконтактный метод сопротивлений;
- контактный индукционный метод;
- бесконтактный индукционный.

Применительно к расположению измерений методы могут иметь три варианта размещения: наземный (поверхностный), скважинный (подземный), комбинированный (наземно-подземный).

Основными свойствами при исследованиях являются: удельное электрическое сопротивление и диэлектрическая проницаемость. Наиболее значимым

свойством геологической среды является **удельное электрическое сопротивление** (УЭС), которое характеризует способность проводить электрический ток. УЭС изменяется в широких пределах от долей единиц до сотен тысяч Ом·м и зависит от следующих факторов (рис. 3.43): водонасыщенности породы (влажность); минерализации поровой влаги (степени засоленности); пористости, структуры порового пространства; водопроницаемости; литологического состава пород, глинистости; температуры; давления.

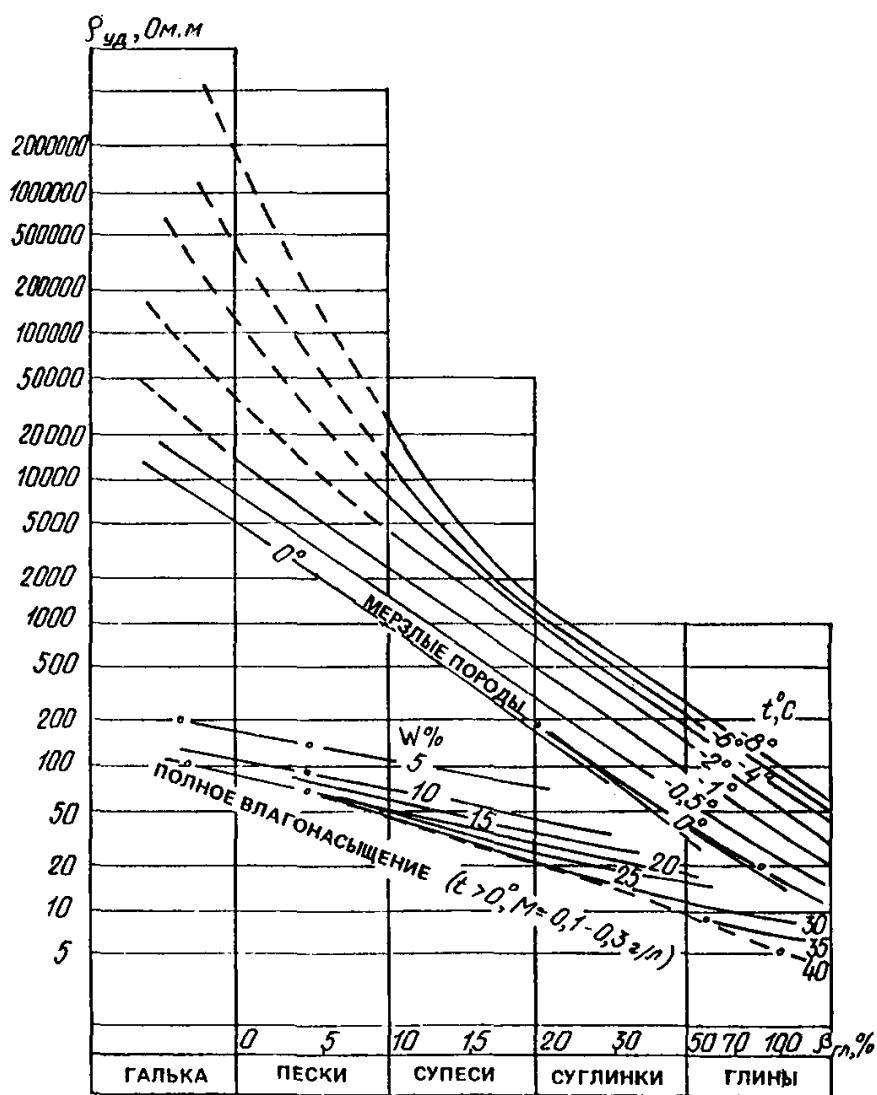


Рис. 3.43. Зависимость удельного электрического сопротивления от температуры, водонасыщения пресными водами и литологического состава дисперсных пород

Результатами измерений электрическими методами являются, как правило, графики изменения сопротивления, амплитуды сигналов от глубины или от времени регистрации. Как и в сейсмоакустических методах, наиболее достоверными результатами считаются те, которые получены при проведении параллельных исследований в скважинах.

3.2.1 Наземные

В одном из наземных контактных вариантов, который предложен Г. И. Квятковским, используется **метод сопротивления заземления**. Сущность метода заключается в установлении взаимосвязи между геоэлектрическими и геометрическими параметрами фундаментов за счет измерения сопротивления заземленной части фундамента, удельного электрического сопротивления окружающего его грунта и периметра у поверхности земли, входящего в комплексный электрометрический параметр.

Помещенные в грунт железобетонные фундаменты насыщаются грунтовой влагой, и при положительных температурах и полном влагонасыщении его удельное электрическое сопротивление находится в пределах 100–1000 Ом·м. Сопротивление растеканию тока с фундамента-заземлителя в землю пропорционально удельному электрическому сопротивлению грунта, в котором расположен фундамент.

При проведении исследований находят кажущееся сопротивление грунта и переходное электрическое сопротивление фундамента, которые связаны с глубиной его заложения. Ограничение метода зависит от наличия асфальтового или бетонного покрытия прилегающей территории или невозможности проведения работ ввиду застроенности территории. Также осложняющим фактором является гидроизоляция фундамента, которая может оказывать негативное влияние на результаты измерения переходного сопротивления и приводить к неверным результатам.

Для измерения переходного электрического сопротивления заземленной части фундамента используют установку, в которой одна пара электродов 1 (приемный и токовый) остается в грунте, а другую 2 располагают на фундаменте или цокольной части сооружения (рис. 3.44). Причем токовый электрод располагают на таком расстоянии от исследуемого фундамента-заземлителя, чтобы не могло возникнуть взаимодействия токовых полей электродов, приемный электрод располагают в зоне нулевого потенциала между токовым электродом и исследуемым фундаментом. В качестве датчиков могут быть использованы медные, латунные, цинковые или свинцовые пластины диаметром 10–25 см, которые совместно с поролоном, пропитанным электролитом, крепят к фундаменту. Затем путем обмерных работ определяют периметр фундамента у поверхности земли и электросопротивление грунта. На основании полученных данных глубину заложения фундамента рассчитывают по формуле: $h = P \cdot X$, где h – глубина заложения фундамента; P – периметр фундамента у поверхности земли; X – переводной коэффициент, учитывающий геоэлектрические и геометрические параметры изучаемого объекта.

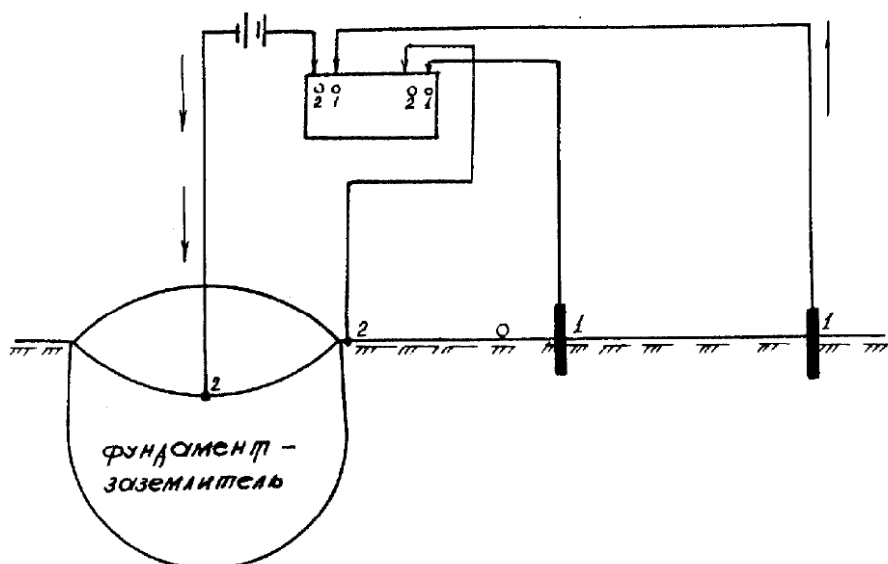


Рис. 3.44. Схема выполнения измерений методом сопротивления заземления

Несколько другой подход для определения погруженной части фундамента в наземной контактной модификации в 1983 г. был предложен Д. В. Квятковским (рис. 3.45, [9]).

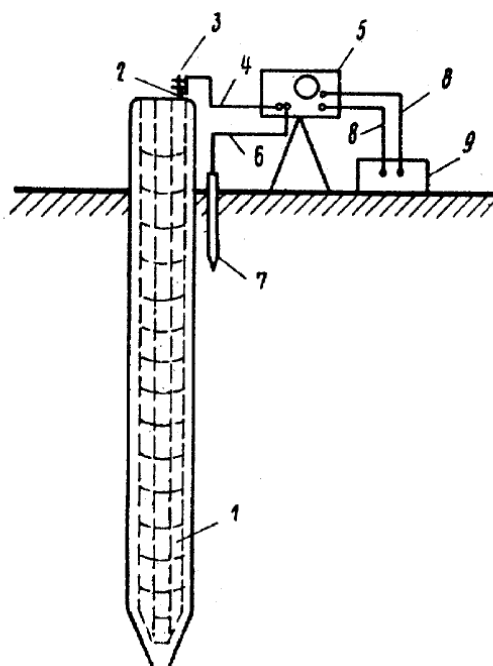


Рис. 3.45. Способ определения величины свайного фундамента контактным методом электромагнитного отклика [9]

Суть метода заключалась в регистрации отклика электрического импульса от конца арматуры. Вблизи забитой сваи 1 погружают латунный стержень 7 в грунт не менее чем на 0,5 м. К измерительной аппаратуре 5 подсоединяют металлическую арматуру 2 сваи 1 и стержень 7. С помощью регистратора измеряют время прихода импульса, отраженного от конца арматуры 2. Зная ско-

рость распространения электрического импульса в вакууме и введя поправку изменения этой скорости в металле арматуры, определяют длину сваи.

Поверхностный бесконтактный метод **георадиолокации** основан на излучении импульсов электромагнитных волн и регистрации сигналов, отраженных от различных объектов зондируемой среды. Метод позволяет определить тип фундамента (глубокого или мелкого заложения), глубину его заложения, а также геометрические размеры. Достоверность и точность получаемых результатов зависят от конкретных условий залегания фундамента. Метод георадиолокации позволяет фиксировать элементы фундамента, изготовленные из камня, бетона, железобетона, металла и дерева.

При обследовании фундаментов опор, расположенных на суше и в воде, методом георадиолокации осуществляют поверхностное профилирование. При выполнении работ на воде антенный блок георадара необходимо устанавливать на плавсредства с неметаллическим днищем. В зимний период поверхностное профилирование следует производить с поверхности льда.

В зависимости от типа грунтов и применяемого оборудования данный метод позволяет определить глубину заложения фундамента до 30 м. Результаты измерений методом георадиолокации представляют в виде радарограмм. Некоторые из примеров отображения фундаментов на радарограммах приведены на рис. 3.46–3.49.

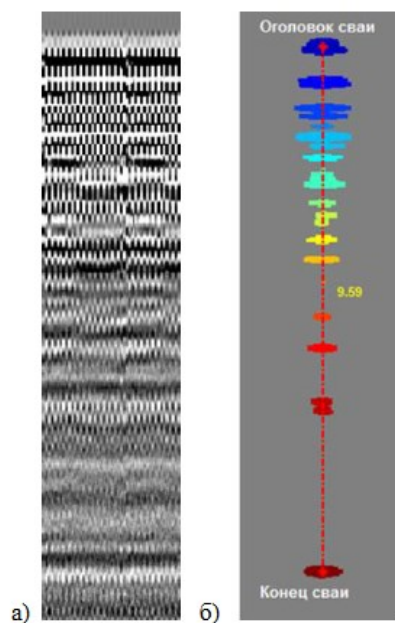


Рис. 3.46. Изображения железобетонной сваи в результатах георадиолокации.
а) исходная радарограмма; б) результат измерения длины сваи и реконструкции
металлических включений

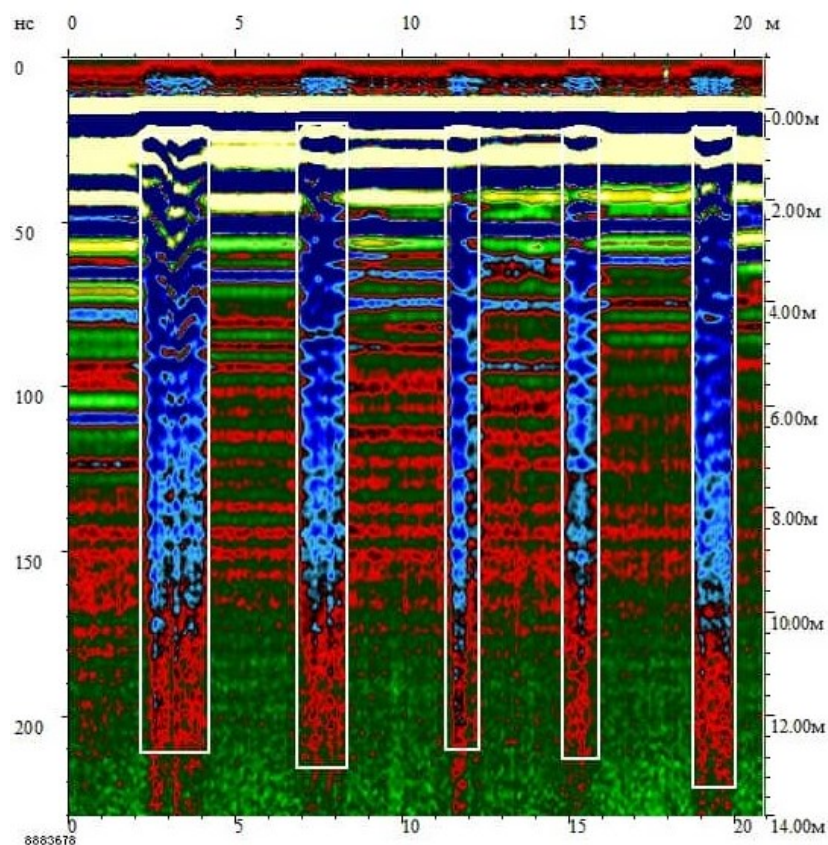


Рис. 3.47. Пример отображения железобетонных свай на радарограмме

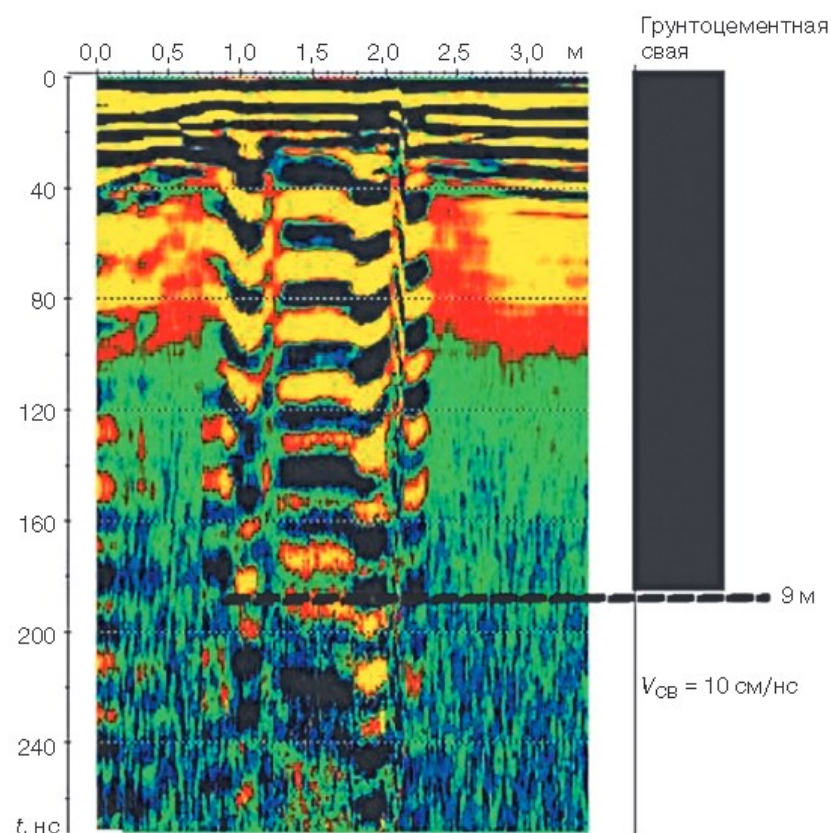


Рис. 3.48. Пример радиолокационного зондирования вблизи сваи с использованием антенного блока 300 МГц

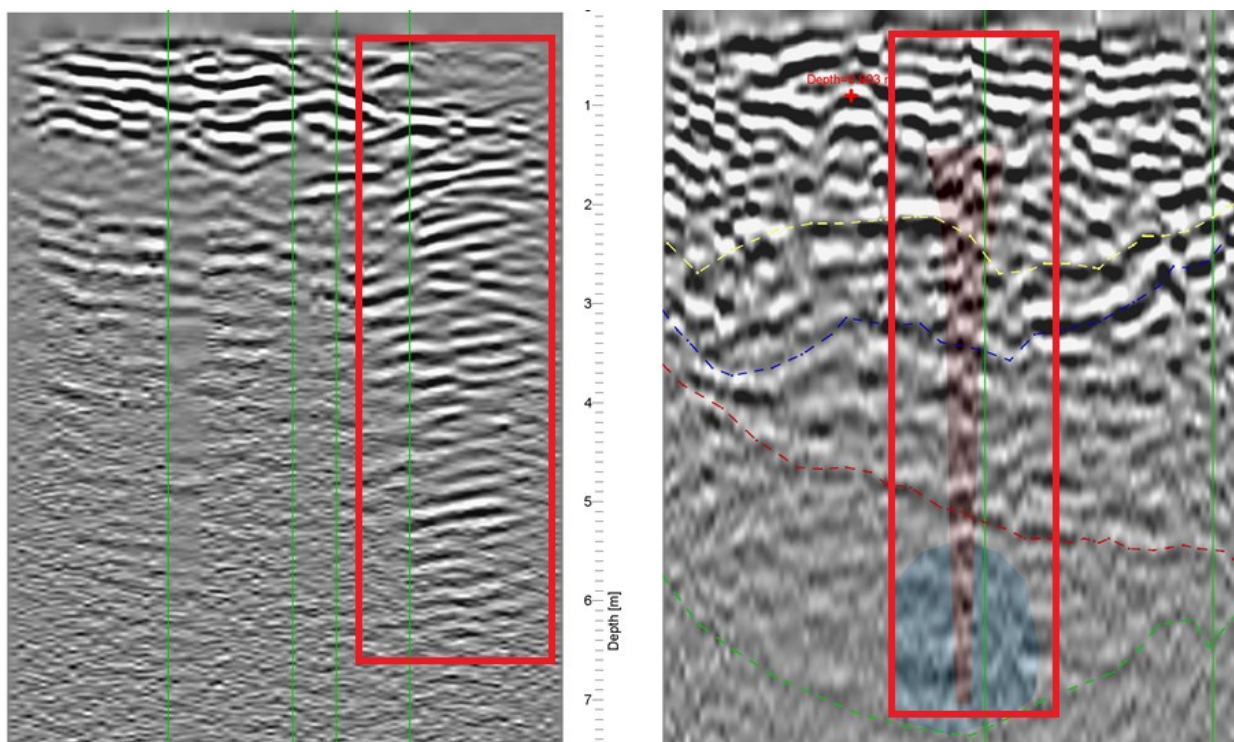


Рис. 3.49. Пример радиолокационного зондирования вблизи фундаментов и инъекций для их закрепления с использованием антенного блока 250 МГц

Другая модификация контактного электрического способа направлена на определение удельного электрического сопротивления (УЭС), косвенно связанного с прочностными свойствами фундаментов, и прямое изучение коррозионной агрессивности по отношению к бетону, входящему в состав конструкции.

Сущность метода основана на определении УЭС **четырёхточечной установкой** Веннера путем обеспечения контактов электродов, через которые пропускается электрический ток и электродов, измеряющих разность потенциалов (напряжение) на открытой поверхности фундаментов (рис. 3.50). Характеристика удельного электрического сопротивления поверхности дает полезную информацию о состоянии бетонной конструкции.

Доказано, что удельное сопротивление напрямую связано не только с вероятностью протекания процессов коррозии, но и со скоростью карбонизации. Кроме того, способ изучения УЭС используется для определения прочности на сжатие свежих бетонов, что делает его одним из наиболее универсальных методов неразрушающего контроля бетона.

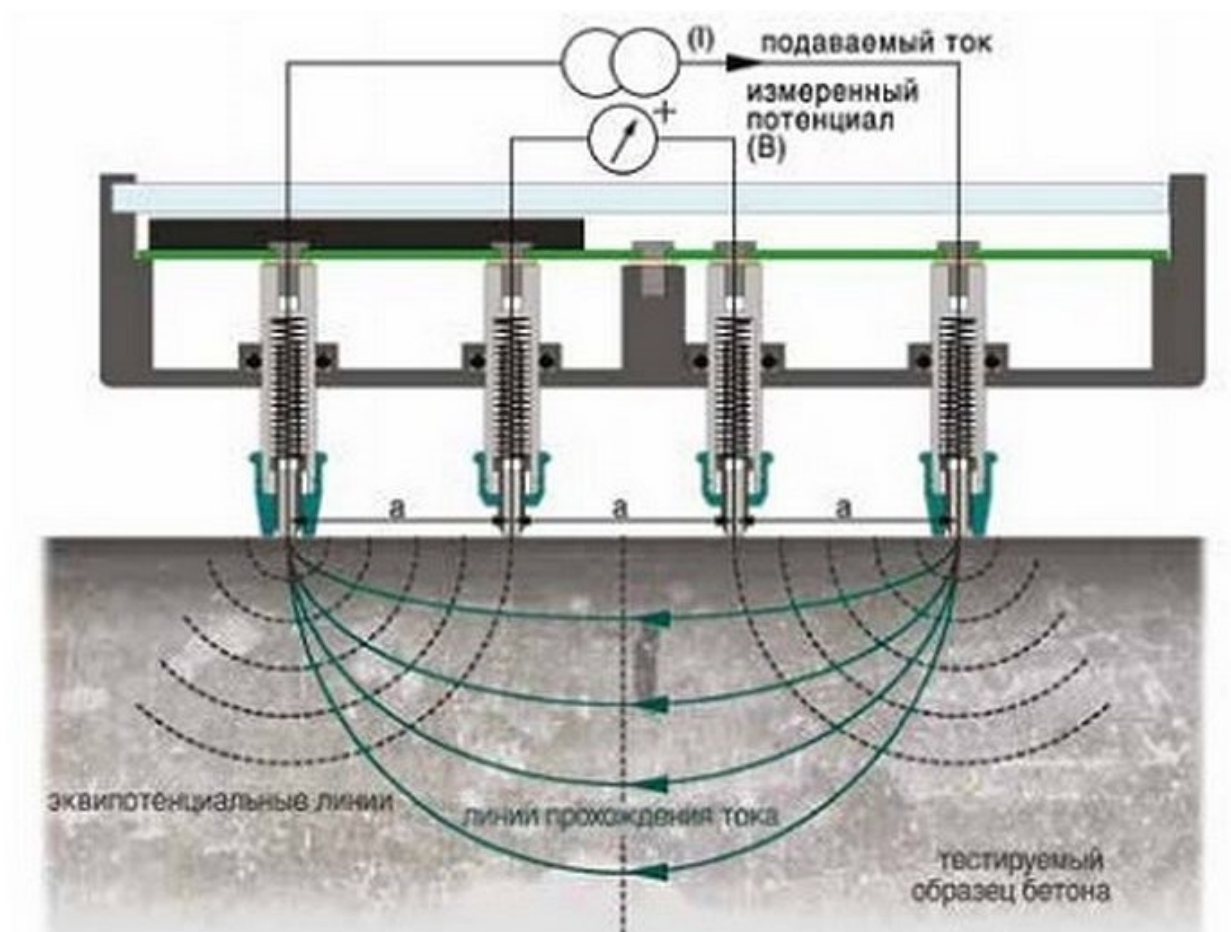


Рис. 3.50. Схема контактно-стержневого четырехточечного способа определения удельного электрического сопротивления открытой части фундаментов

Применение данного способа важно при решении следующих задач:

- определение вероятности коррозии;
- индикатор скорости коррозии;
- корреляция с проницаемостью для хлорида (карбанизация);
- оценка эффективности отверждения на месте;
- определение зональных требований к системам катодной защиты;
- выявление влажных и сухих участков в бетонной конструкции;
- выявление отклонений соотношения воды и цемента в бетонной конструкции;
- определение участков конструкции, наиболее подверженных карбонизации;
- корреляция с ранней прочностью на сжатие;
- корреляция с водопроницаемостью камня.

Для случая площадных измерений большого объема существует **контактно-роликовый способ**, позволяющий выполнять непрерывные измерения за счет скользящих элементов и раствора сульфата меди или хлорида серебра, или ртути, помещаемого внутрь роликовых электродов (рис. 3.51).

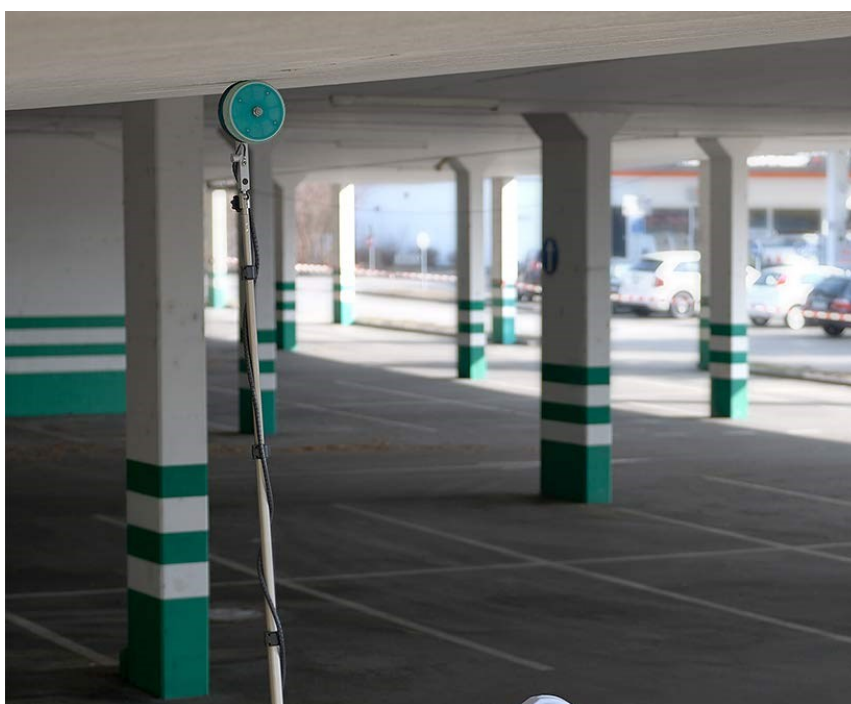


Рис. 3.51. Схема контактно-роликового черехточечного способа определения удельного электрического сопротивления открытой части фундаментов

Данный раствор позволяет обеспечить путем смачивания контакт с исследуемой поверхностью бетона и минимизировать влияние собственного потенциала при изучении естественных потенциалов в фундаменте. Естественные потенциалы являются также характеристикой, указывающей на степень коррозии материалов, и используются при идентификации местоположения арматуры (рис. 3.52).

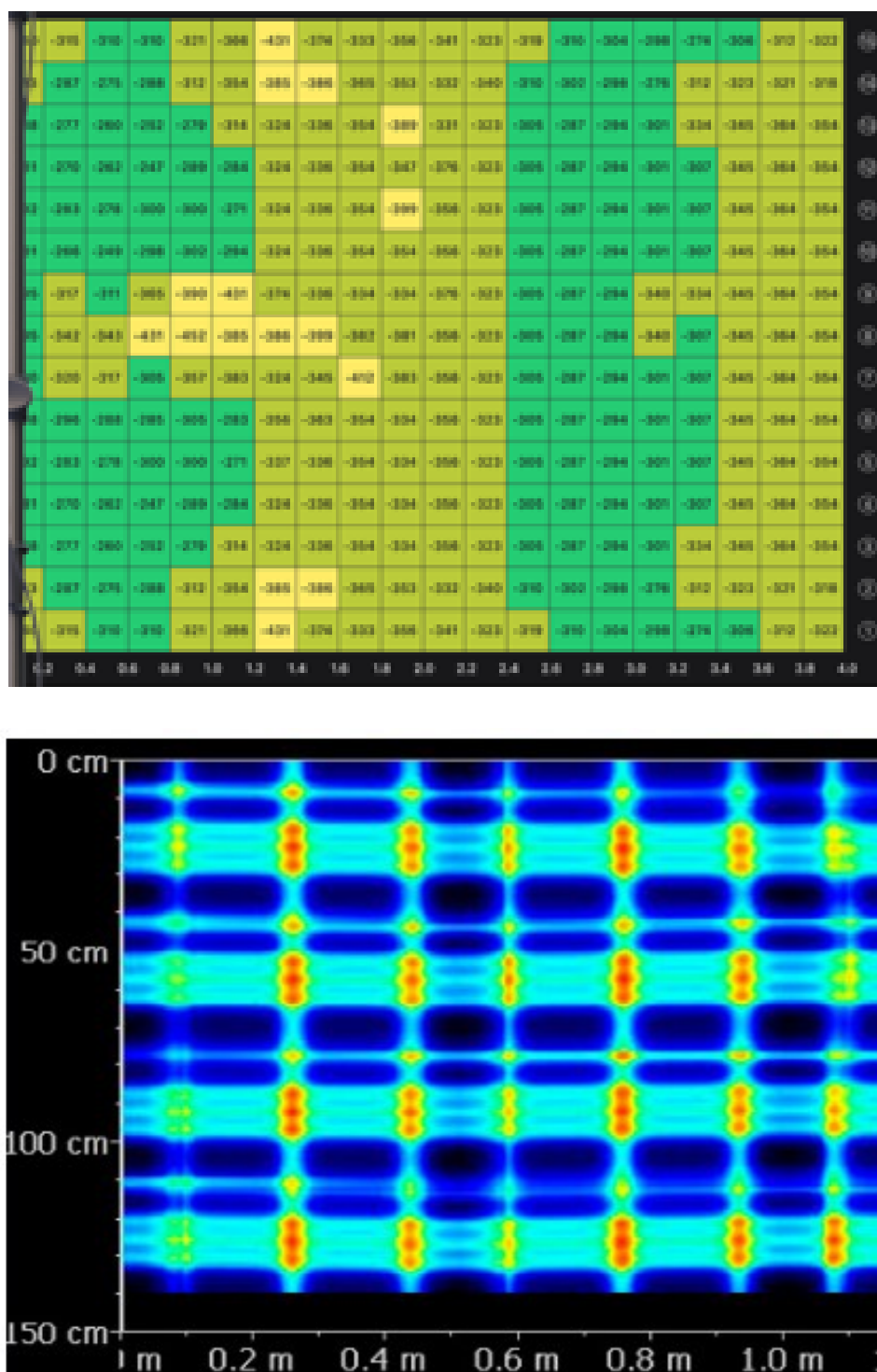


Рис. 3.52. Пример результатов по выделению участков железобетонного фундамента с различными свойствами и определению армирующих элементов

3.2.2 Скважинные

В скважинном варианте для измерений используют выработку, пробуренную параллельно исследуемому объекту, где с помощью зондов осуществляется изучение околоскважинного пространства (рис. 3.53). Осложнения при проведении таких работ могут возникать из-за прохождения зонда в интервале рыхлых (дисперсных) отложений. Также немаловажные факторы при выполнении такого рода измерений – высокая стоимость используемого оборудования и большой риск его потери.

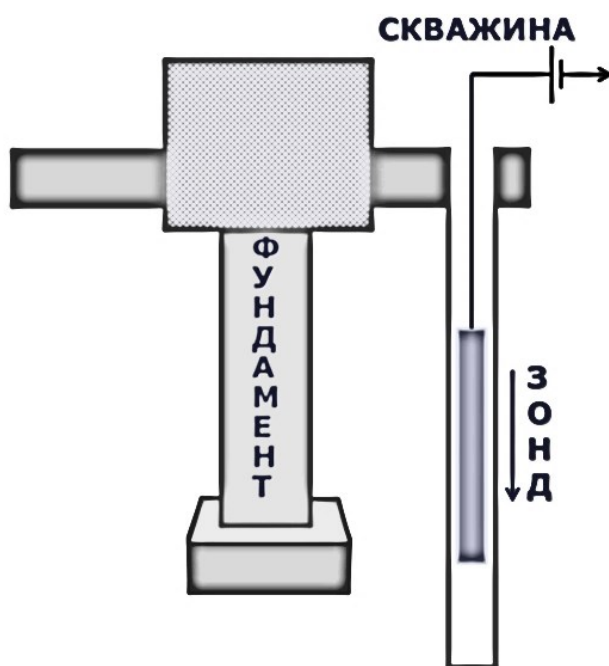


Рис. 3.53. Схема изучения околоскважинного пространства

Одним из вариантов изучения фундаментов является использование метода электрического каротажа и дифференциации горных пород, находящихся в околоскважинном пространстве по кажущемуся сопротивлению, которое зависит от многих факторов: 1) удельного сопротивления и мощностей пластов, напротив которых находится каротажный зонд; 2) диаметра скважины и удельного сопротивления заполняющей ее промывочной жидкости; 3) характера проникновения фильтрата промывочной жидкости в пласт; 4) типа и размера зонда, которым проводят измерения.

Суть метода заключается в измерениях, которые производят с помощью зонда, содержащего три электрода, а четвертый заземляют на поверхности. Два электрода (А и В) соединяют с генератором тока, два других (М и N) включают на вход измерителя разности потенциалов.

Поскольку диапазон частот, применяемых в методе, не превышает нескольких сотен герц, теория метода базируется на законах постоянного тока. Измерения проводят градиент-зондами, для которых $AM \gg MN$, и потенциал-зондами, для которых $AM \ll MN$ (рис. 3.54).

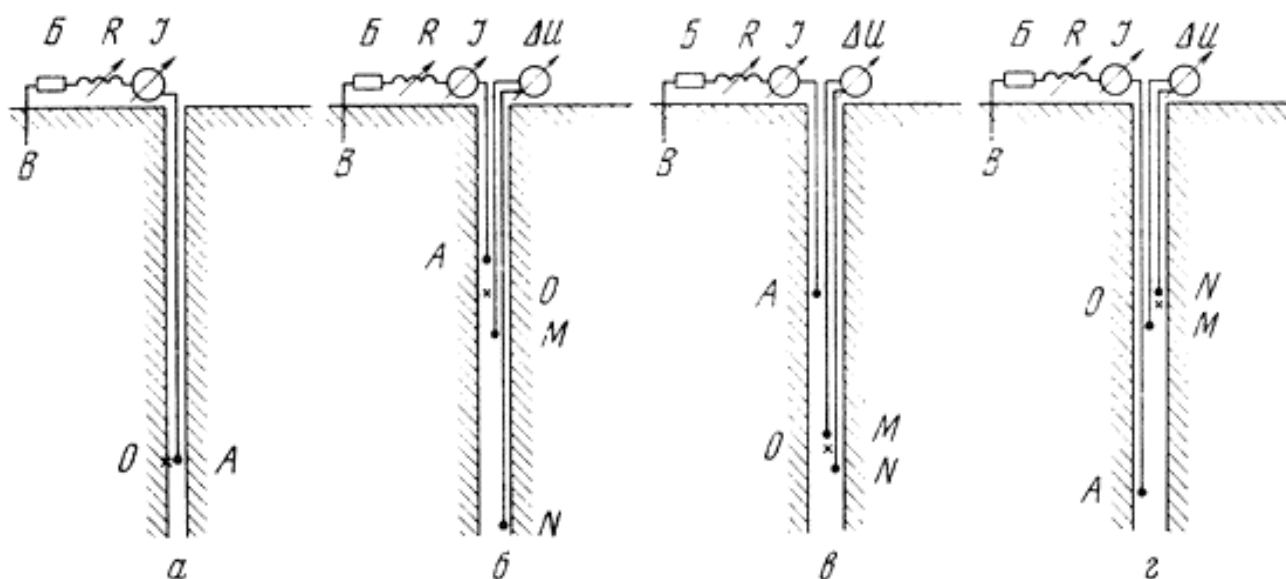


Рис. 3.54. Типы зондов для электрического каротажа скважин:
а – одноэлектродный зонд, **б** – трехэлектродный потенциал-зонд,
в – трехэлектродный подошвенный (последовательный) градиент-зонд,
г – трехэлектродный кровельный (обращенный) градиент-зонд;
А, В – питающие электроды, **Б** – источник питания,
R – вариатор сопротивления для задания силы тока, **I** – амперметр,
MN – измерительные электроды, **dU** – вольтметр, **О** – точка записи

В результате перемещения зонда по скважине регистрируется кривая разности потенциалов. По измеренным разности потенциала (ΔU) и силе тока, пропускаемого в землю (I), рассчитывается кажущееся сопротивление (ρ_k) отложений, слагающих геологический разрез: $\rho_k = K \cdot \Delta U / I$, где k – коэффициент, зависящий от взаимного расположения заземлений.

Интерпретация данных электрического каротажа заключается в визуальном выделении аномалий кажущегося сопротивления, которые связаны со сменой литологического состава. В соответствии с основными интерпретационными принципами в дальнейшем проводится литологическое расчленение с указанием границ раздела и физических характеристик выделенных элементов.

При этом по максимальным показаниям подошвенного градиент-зонда на каротажной кривой уверенно выделяются нижняя граница слоя повышенного электрического сопротивления и верхняя граница низкоомного слоя. Использование же обращенного градиент-зонда, наоборот, целесообразно при выявлении кровли высокоомного горизонта и подошвы слоя низких сопротивлений.

Один из подходов – **параллельное электрическое зондирование (ПЭЗ)** – связан с оценкой системы «фундамент – грунтовое основание» путем скважинных измерений методом сопротивлений в выработке, параллельной фундаменту. Скважинные измерения выполняются методом электрического каротажа на постоянном токе с использованием двух зондов разной величины (рис. 3.55). Результаты исследований позволяют получить достоверные сведения о характеристиках фундамента (глубина погруженной части, вид фундамента, наличие разрушений фундамента и его гидроизоляции) и грунтов в его основании. Преимуществом данного подхода является небольшая стоимость и простота оборудования.

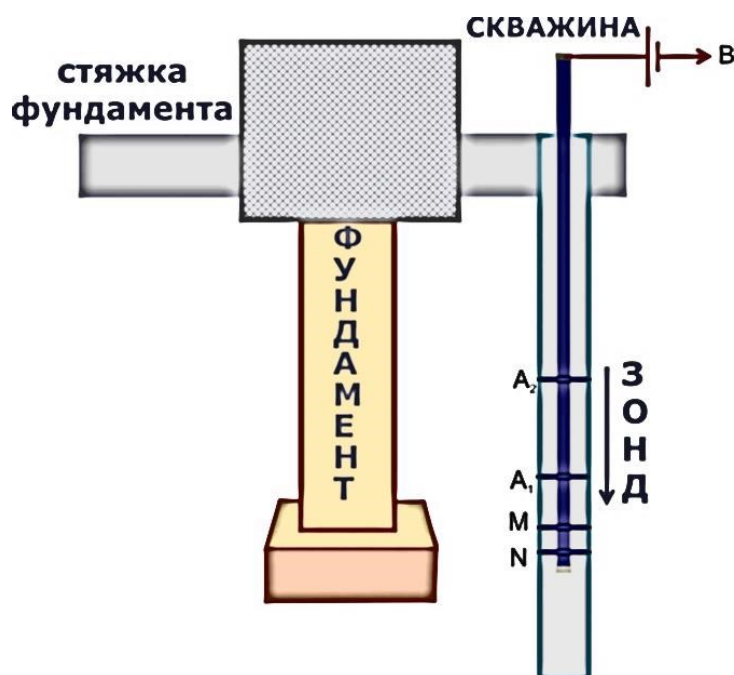


Рис. 3.55. Схема метода ПЭЗ с использованием большого и малого зондов

Суть метода ПЭЗ заключается в совокупности действий, включающих в себя следующие операции:

- выбор места заложения горной выработки (скважины);
- проведение электрического каротажа:
 - а) малым зондом для оценки инженерно-геологических условий;
 - б) большим зондом для определения глубины залегания и состояния фундамента;
- оценка глубины залегания и состояния фундамента.

Поскольку при определении глубины фундамента, как правило, мы имеем дело с выделением эффектов от подошвы высокоомного включения на границе с пониженными сопротивлениями, а также учитывая возможные ограни-

чения в пространстве скважины по глубине, рациональнее использовать подошвенный зонд.

Эффект от одиночной сваи в однородной среде показан на результатах физического моделирования. Для этой цели в баке, наполненном водой, с помощью микрозонда выполнены измерения вдоль вертикально погруженного высокоомного включения (сваи) на различных удалениях от него (рис. 3.56). Пример полученных графиков кажущегося сопротивления приведен на рис. 3.57.

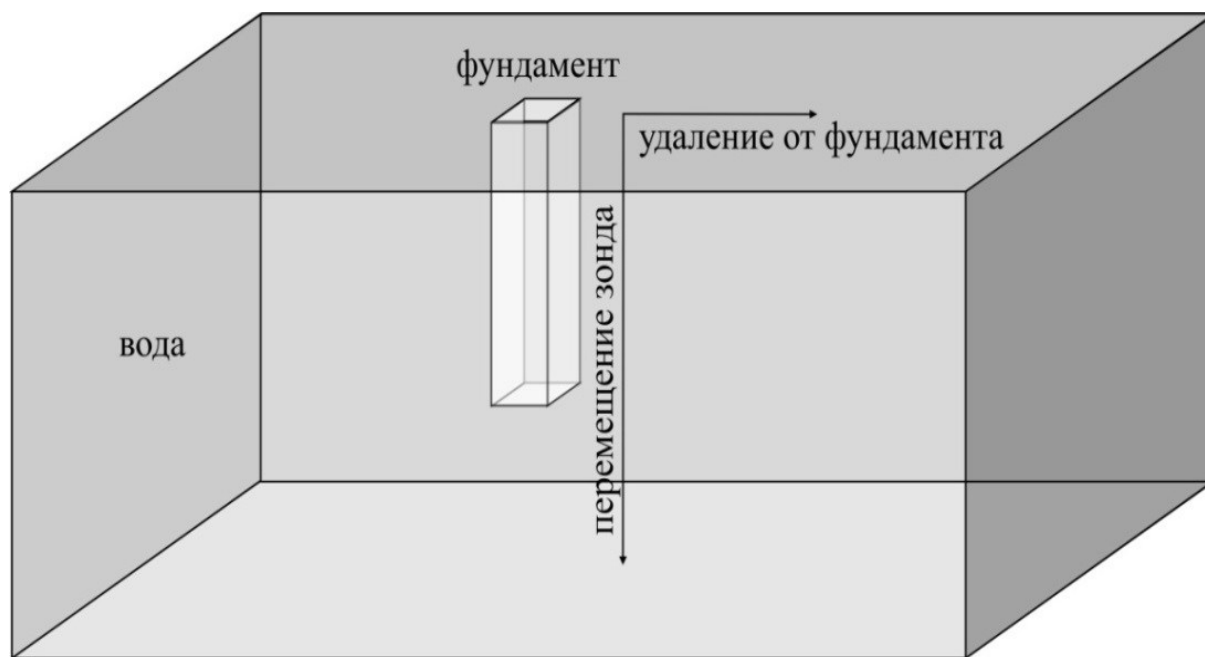


Рис. 3.56. Схема выполнения физического моделирования

Полученный эффект на расстоянии $1/5$ длины зонда от основания сваи отображается на графике максимумом значений, превышающим более чем в два раза сопротивление вмещающей среды (рис. 3.57). Увеличение сопротивления в левой части графика обусловлено влиянием границы раздела «воздух – вода». При достижении расстояния, соответствующего длине зонда, эффект от сваи стремится к нулю.

Таким образом, оптимальное удаление от изучаемого фундамента для заложения горной выработки должно не превышать половины длины зонда. Однако на физических моделях, имитирующих ленточный фундамент, где ширина превышает длину зонда, по результатам трехмерного численного моделирования получен аномальный эффект на расстоянии, равном длине установки.

На рисунке 3.58 приведены результаты численного трехмерного моделирования, которые показывают наличие аномальных эффектов от различных по конструкции фундаментов.

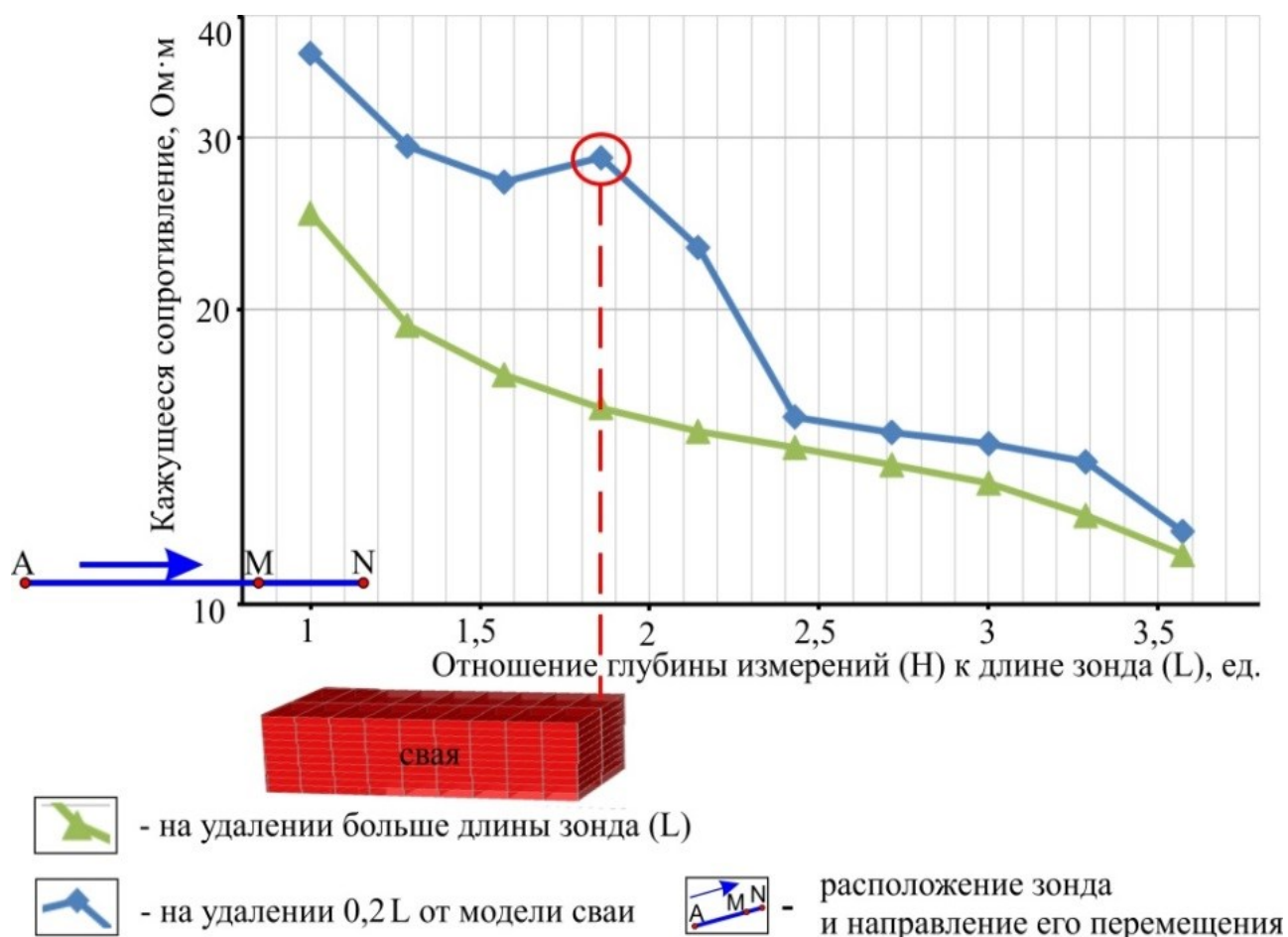


Рис. 3.57. Влияние расстояния на результаты измерений

Численные расчеты на представленных трехмерных моделях показывают возможность идентификации фундаментов с различной геометрией и обнаружения в них дефектов. В частности, наличие максимумов значений кажущихся сопротивлений свидетельствует о геометрии фундамента, а относительное отклонение от фоновых значений показаний малого зонда характеризует физическое состояние фундамента.

Надстроенная часть фундаментов, представленная обычно асфальтобетонным покрытием, на графиках отображается резким повышением кажущегося сопротивления. Изменение поперечных размеров в основании фундаментов выделяется фоновым понижением значений. При удалении от фундаментов значения кажущихся сопротивлений уменьшаются, а аномальные эффекты приобретают интегральный характер. В этом случае эффективен расчет дифференциальных параметров.

Снижение значений сопротивления обусловлено меньшим влиянием сооружения вследствие его удаления от линии наблюдения в скважине. В случае переноса линии наблюдения на 180° для вышеописанной ситуации общий фон в интервале минимальных поперечных размеров уменьшается незначительно,

но при этом на графике сохраняется экстремум в месте изменения геометрии объекта. Сохранение эффекта связано с локальным характером фундамента и отображается благодаря трехмерному моделированию. Фундаменты с усиленным основанием, обусловленные его расширением с глубиной, по результатам моделирования, отмечаются двумя экстремумами и медленным спадом в зоне перехода к вмещающей среде. Графики, полученные для протяженных фундаментов, как и было сказано, указывают на сохранение значительного эффекта при удалении от линии наблюдения равном длине зонда.

Ситуации, связанные с наличием дефектов фундамента вследствие возможного выноса материала, разрушения или некачественного изготовления (установки), отображаются локальным понижением электрического сопротивления (рис. 3.58)

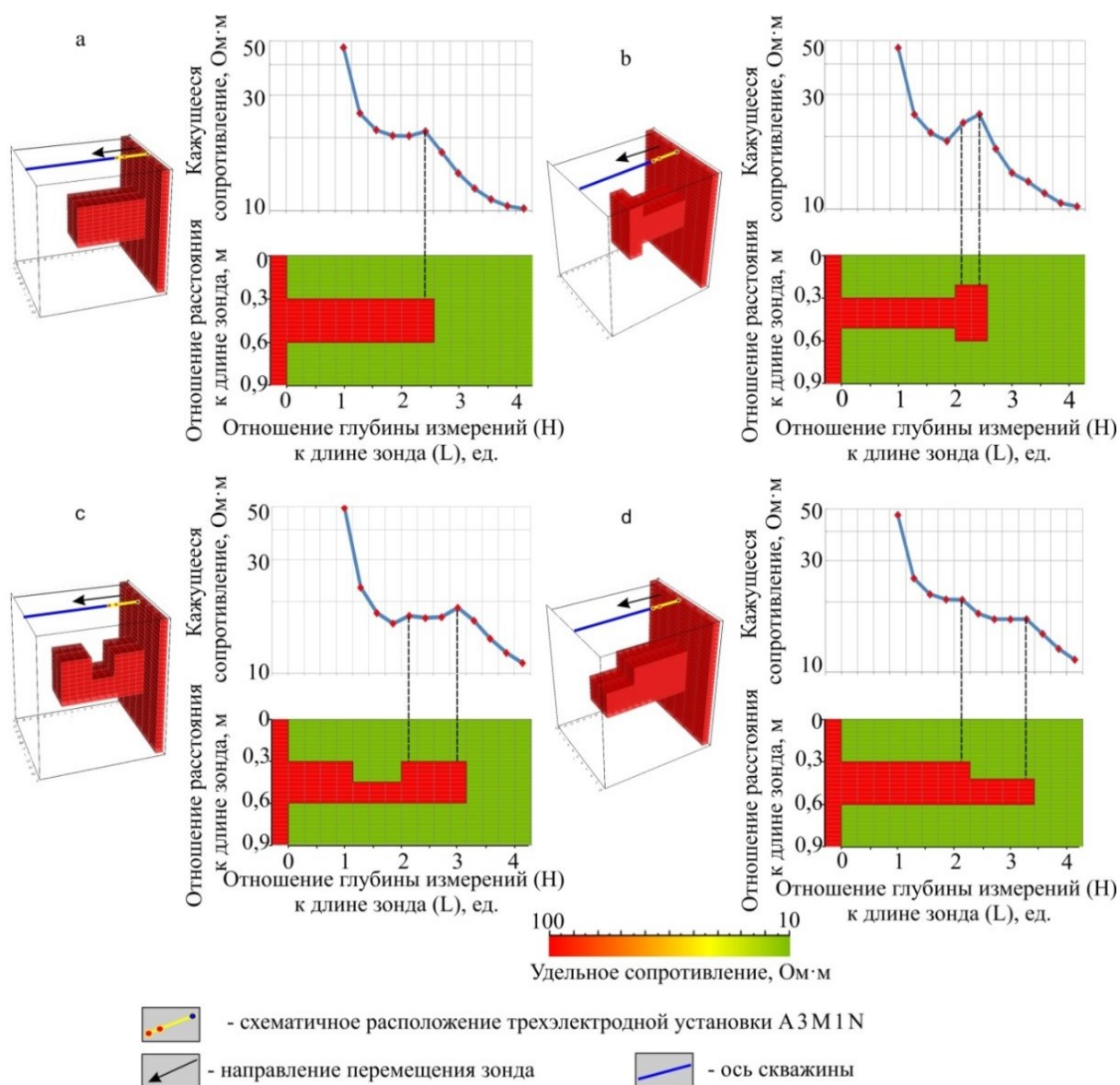


Рис. 3.58. Смещение аномальных эффектов относительно положения фундамента по результатам трехмерного численного моделирования

В ходе выполнения обследования фундаментов немаловажным фактором является уточнение геологического строения и гидрогеологических условий в основании фундамента. Для этого используется малый зонд, радиус исследований которого позволяет выполнить литологическое расчленение, определить уровень подземных вод и оценить изменения свойств грунтов. При этом применение установки с меньшим разномсом позволяет исключить влияние фундамента, что необходимо для выделения аномалий, связанных с фундаментом в сложных (неоднородных) средах.

Разделение эффектов показано на рис. 3.59. Приведенные на рисунке графики кажущегося сопротивления, с учетом влияния верхнего полупространства, построены по результатам физического моделирования при одновременном измерении зондами различной длины на удалении $0,3L$ от объекта исследования.

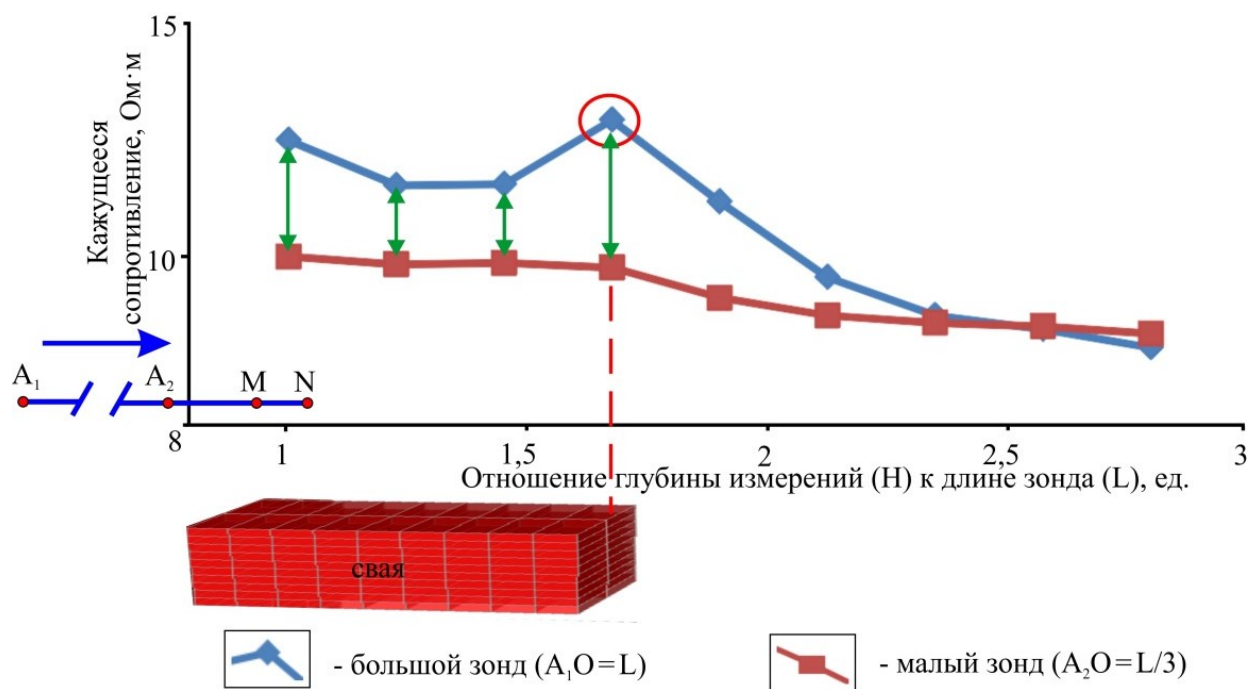


Рис. 3.59. Оценка инженерно-геологических условий малым зондом

Расхождение графиков указывает на идентификацию получаемых эффектов от геологической среды и фундамента, что значительно облегчает интерпретацию результатов и доопределяет инженерно-геологические условия. Кроме того, величина расхождения графиков зависит от сопротивления фундамента и однородности его свойств, что может быть использовано для оценки состояния фундамента.

Одним из важных моментов при определении инженерно-геологических условий с помощью малого зонда является интерпретация результатов измерений. Так, наличие экстремумов электрического сопротивления свидетельствует

о смене литологического (гранулометрического) состава, влажности, минерализации или физического состояния породы. При этом фоновый уровень кажущегося сопротивления, как правило, отображает истинное удельное электрическое сопротивление породы, по которому может быть определен литологический состав.

Для восстановления литологического состава в рамках петрофизического подхода при наличии керна или рядовых проб применяется экспресс-методика измерения сопротивления (ЭМИС) дисперсных грунтов. В отличие от гостированных методик, данный способ позволяет с наименьшими трудозатратами оценить УЭС грунтов на образцах произвольных размеров без нарушения их герметичности в лабораторных условиях или оперативно при их полевом извлечении.

Для измерений применяется серийная электроразведочная аппаратура, используемая при выполнении исследований на квазипостоянном токе, и четырехэлектродная микроустановка, созданная на базе модульной системы многопиновой шины (рис. 3.60). Использование сменных электродов позволяет оперативно выполнять смену электродов и регулировку площади контакта. Конструкция дает возможность беспрепятственно осуществлять контакт путем прокола образца через парафин или защитное пленочное покрытие. При этом не требуется вскрытие образца, что сохраняет его первоначальные свойства и характеристики.

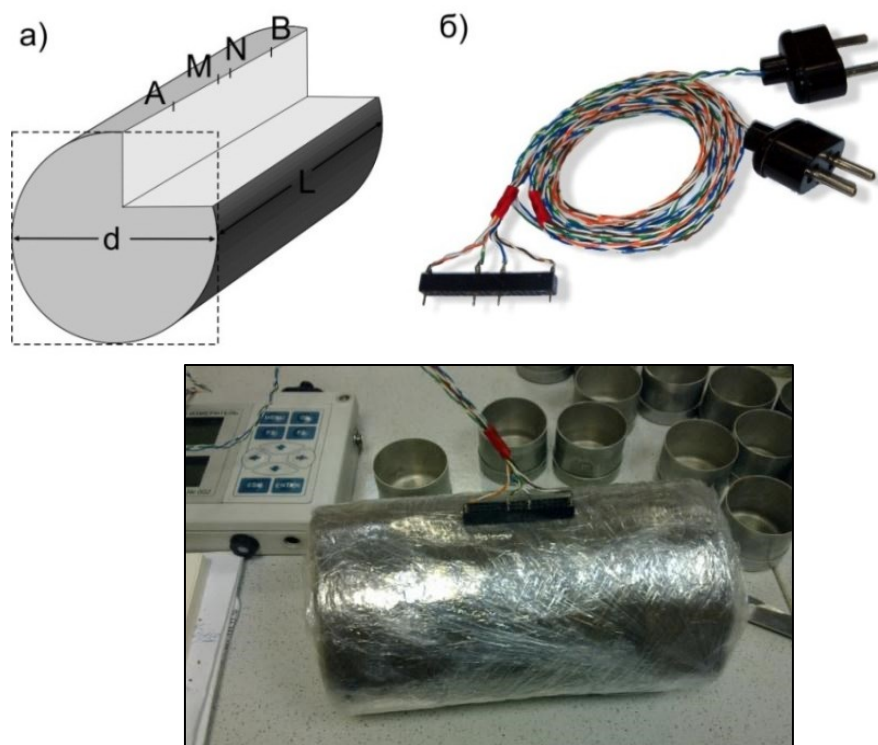


Рис. 3.60. Схема измерений (а), вид четырехэлектродной микроустановки АМNB (б) и пример определение УЭС на образце

Определение поправок за влияние геометрических размеров образца производится при помощи номограммы (рис. 3.61), полученной на основании физического и численного трехмерного моделирования электрического поля.

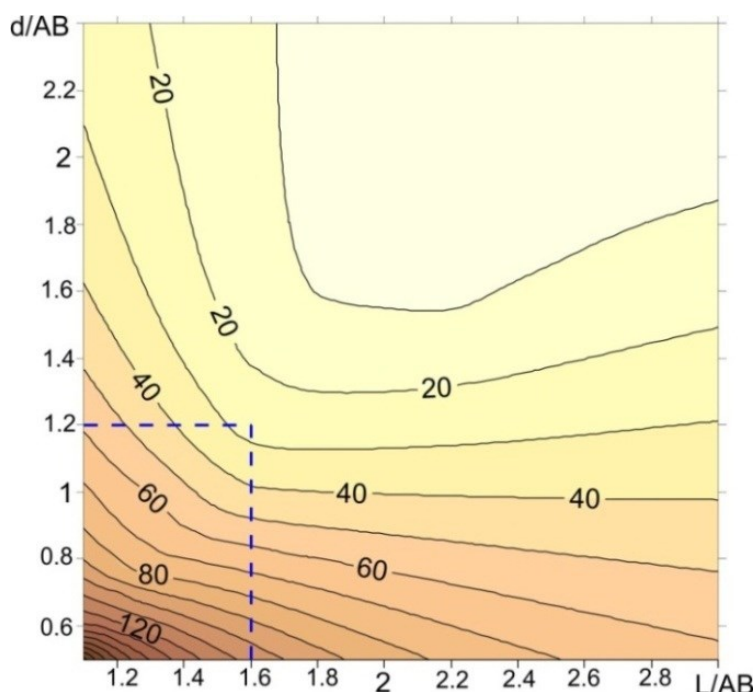


Рис. 3.61. Номограмма процентного завышения истинного значения удельного электрического сопротивления образца в зависимости от его геометрических размеров (d , L – диаметр и длина образца соответственно)

По результатам измерений удельного электрического сопротивления, выполненных при районировании различных территорий, могут быть составлены диаграммы распределения электрических свойств в зависимости от литологического состава отложений. Один из примеров свойств групп дисперсных грунтов Приволжского и Северо-Западного федеральных округов представлен на рис. 3.62, 3.63.

Как мы видим из представленных данных, 90 % глин имеют сопротивление до 20 Ом·м. Для суглинков большее число сопротивлений находится в пределах 20–50 Ом·м. Для аргиллитов большее количество встреченных значений сопротивления находится в пределах 50–70 Ом·м, для супесей – 80 Ом·м, для песков – более 200 Ом·м.

Определение глубины и состояния фундаментов осуществляется с использованием большого зонда с глубиной исследования, превышающей несколько диаметров скважин.

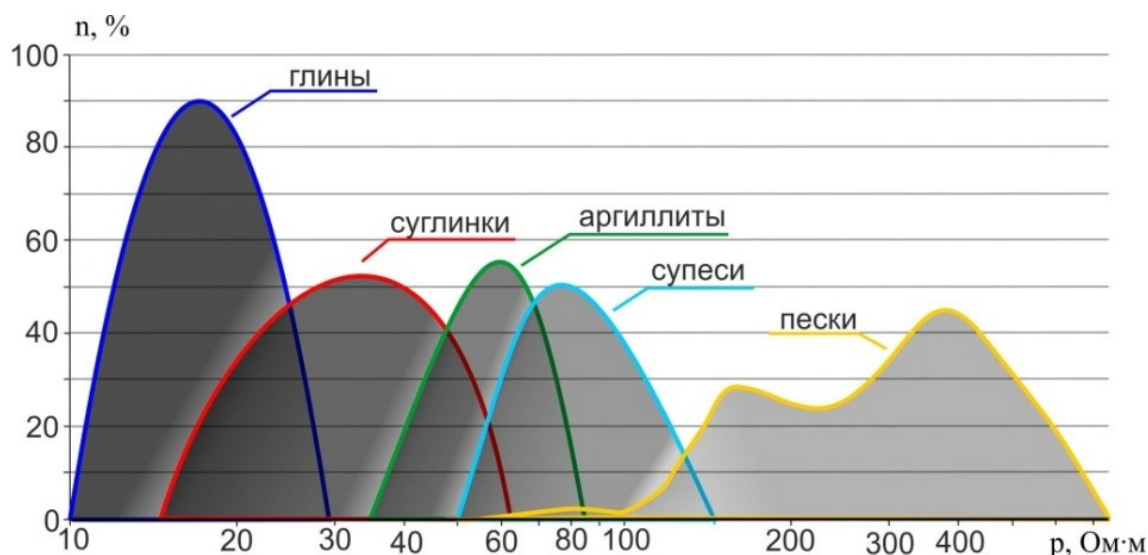


Рис. 3.62. Распределения удельных электрических сопротивлений дисперсных грунтов для Приволжского и Северо-Западного федерального округов

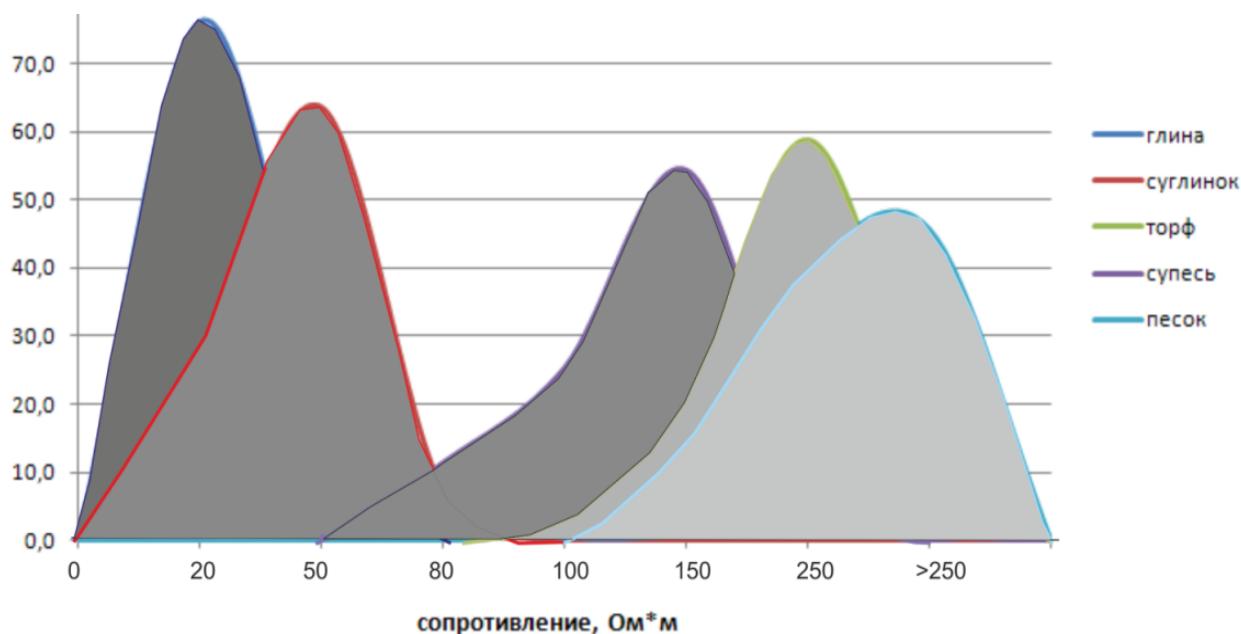


Рис. 3.63. Гистограмма распределения удельных электрических сопротивлений дисперсных грунтов Дальневосточного федерального округа

Нередко возникает необходимость обследования фундаментов и определения их характеристик в условиях повышенного ограничения доступа к ним. В частности, когда возможно произвести бурение скважины лишь на расстоянии, превышающем эффективный радиус исследований. При данных обстоятельствах целесообразно выполнение исследований в модификации **просвечивания** по упрощенной схеме (ПЭП).

Наиболее эффективной является методика с использованием одной скважины и питающего электрода с противоположной стороны (рис. 3.64).

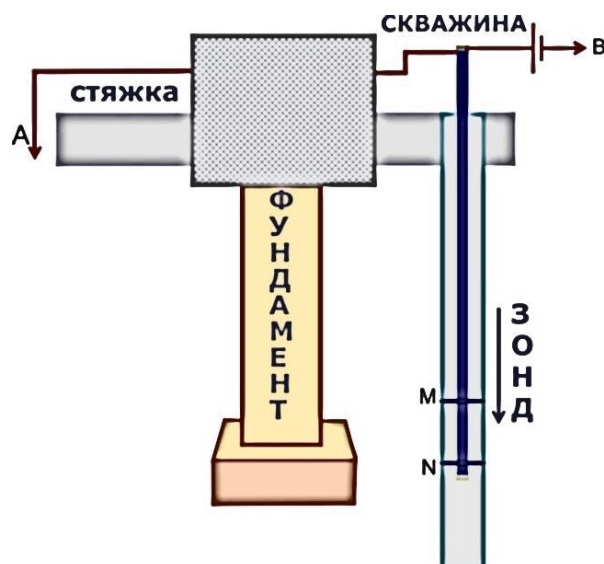


Рис. 3.64. Схема скважинных исследований фундамента по упрощенной методике просвечивания

Основным критерием обнаружения основания заглубленной части фундамента является минимальное значение градиента потенциала, когда один из электродов находится в зоне «экранирования» сооружения (рис. 3.65). Дальнейшее прохождение измерительного зонда сопровождается четким максимумом и выходом на фоновые значения в случае однородной среды. При этом большое значение имеет размер приемной линии.

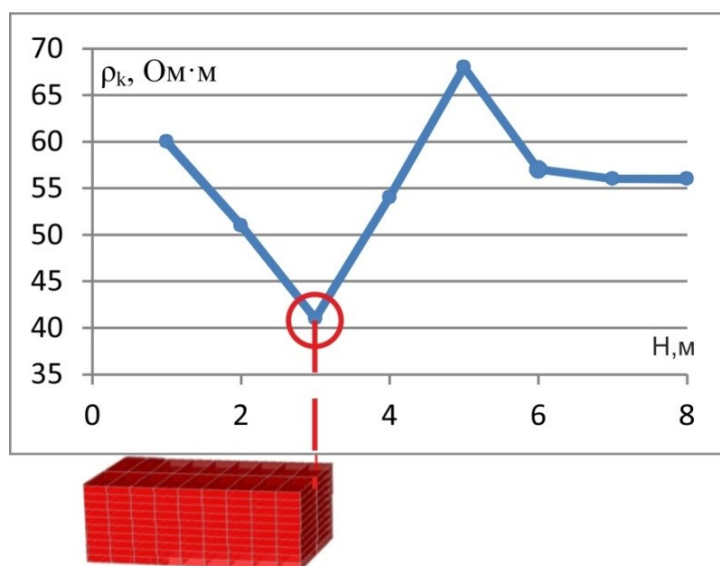


Рис. 3.65. Результаты физического моделирования просвечивания фундамента стаканного типа в однородной среде с электрическим сопротивлением 50 Ом·м

Таким образом, для оценки системы «фундамент – грунтовое основание» используется модель, которая представлена двумя элементами (табл. 3.1). Пер-

вый элемент характеризует литологический состав, изменение свойств грунтов и подземные воды, второй – глубину залегания и физическое состояние погруженной части фундамента.

Таблица 3.1

Модель оценки системы «фундамент – грунтовое основание»

Элементы модели	Определяемые параметры	Критерии оценки	Результат
Грунтовое основание	Литологический состав и физические свойства грунтов	Изменение сопротивления по результатам измерений малым зондом	Выделение особенностей в грунтовом основании фундамента и коррозионной агрессивности грунтов в естественном залегании
	Подземные воды (глубина залегания, водонасыщение, минерализация)	Понижение сопротивления в пределах одного ИГЭ	Уточнение уровня подземных вод и определение их минерализации
Фундамент	Глубина залегания фундамента	Наличие основных максимумов сопротивления на фоне максимальных отклонений от показаний малого зонда	Соответствие проектной документации
	Состояние фундамента	Наличие дополнительных максимумов сопротивления. Величина отклонения сопротивления относительно показаний малого зонда	Наличие изменений или разрушений фундамента

В качестве интерпретационных критериев оценки параметров используются данные измерений большим и малым зондом. В частности, изменение сопротивления по результатам малого зонда и понижение его в пределах инженерно-геологических элементов, выделенных при проходке горной выработки, определяют литологический состав, физические свойства, водонасыщенность грунтов и минерализацию подземных вод. А наличие максимумов сопротивления большого зонда и величина отклонения от показаний малого является глав-

ным для изучения геометрии и физического состояния второго элемента модели – фундамента. Результатом использования модели является уточнение геологических условий в основании фундамента, определение коррозионной агрессивности грунтов в естественном залегании, фактической глубины залегания фундамента и выявление в нем нарушений.

Ниже рассматривается применение метода ПЭЗ на ряде промышленных объектов с известными по проектной документации характеристиками фундаментов в различных инженерно-геологических условиях. Для измерений используется разборный трехсекционный зонд с резьбовым соединением из пластиковых труб (рис. 3.66).



Рис. 3.66. Конструкция большого зонда и пример выполнение скважинных измерений методом ПЭЗ

Применение пластиковых труб позволяет осуществлять погружение зонда в условиях осыпания или оплывания пробуренной скважины путем проталкивания. При этом конструкция обладает требуемой гибкостью, необходимой при работе в стесненных условиях или возникновении внештатных ситуаций при застревании зонда.

Общая длина конструкции выбирается исходя из предполагаемых глубин залегания фундаментов и составляет около 6 м. В качестве электродов используются пружины, обеспечивающие хороший контакт с выработкой независимо от вариаций ее диаметра (50–80 мм) в пределах допустимого диапазона.

Выбор места заложения выработок осуществлялся при максимальном приближении к фундаментам и, как правило, не превышал половины длины установки. Измерения проводились дискретно с шагом 0,1–0,2 м.

Рассмотрим примеры изучения фундаментов в сравнительно однородных условиях. В геологическом строении грунты представлены четвертичными элювиальными суглинками от тугопластичной до твердой консистенции с древесой и щебнем аргиллита мощностью до 3,8 м и аллювиальными отложениями. С поверхности распространен насыпной грунт. Ниже залегают верхнепермские отложения, которые имеют пологое падение.

Район работ характеризуется развитием трещинно-пластовых грунтовых вод верхнепермских отложений с разгрузкой в аллювиальные отложения текущей и мягкопластичной консистенции. Воды в рамках территории исследуемых объектов имеют единый уровень.

По химическому составу подземные воды гидрокарбонатно-хлоридно-кальциево-магниевого состава с минерализацией 0,74–0,99 г/л. Подземные воды имеют слабую агрессивность к арматуре железобетонных конструкций при периодическом смачивании и не агрессивны к бетону нормальной проницаемости марки W4.

Примеры графиков изменения кажущегося сопротивления с глубиной для большого зонда приведены на рис. 3.67–3.68.

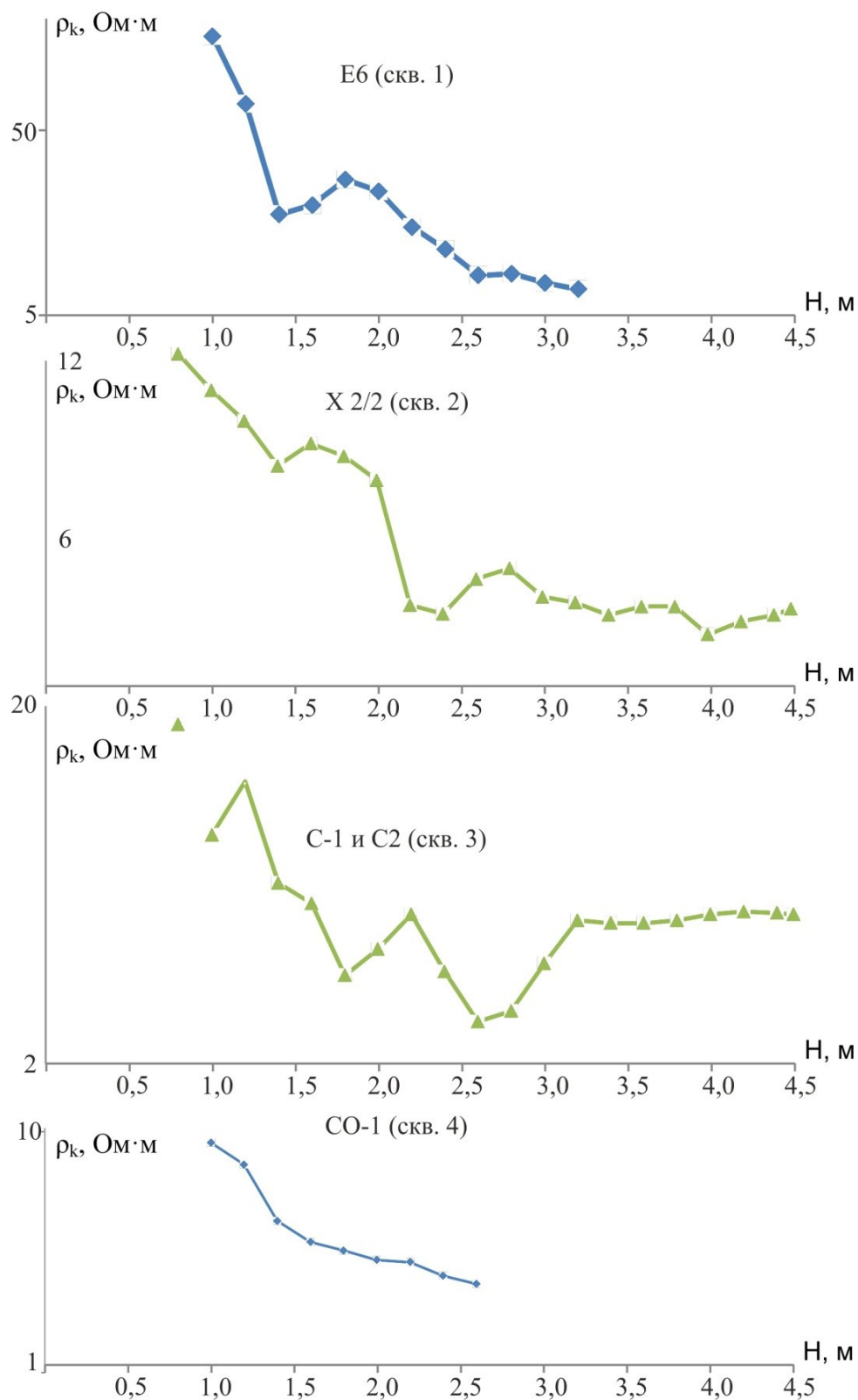


Рис. 3.67. Графики кажущегося сопротивления, построенные по результатам ПЭЗ большим зондом вблизи фундаментов сооружений Е6 (скв. 1), X 2/2 (скв. 2), между фундаментами сооружений С-1 и С2 (скв. 3) и сооружения СО-1 (скв. 4)

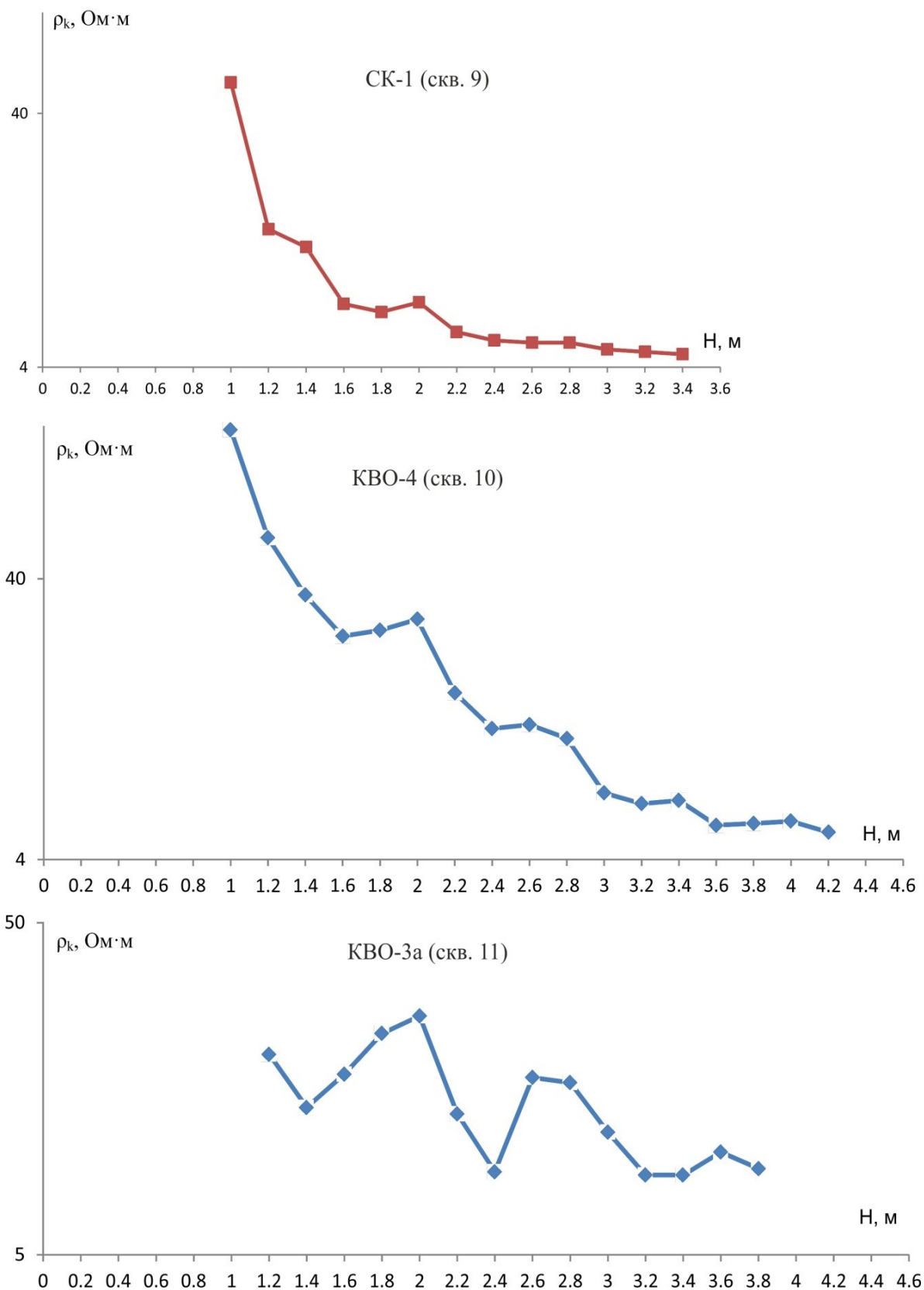


Рис. 3.68. Графики кажущегося сопротивления, построенные по результатам ПЭЗ большим зондом вблизи фундамента сооружений СК-1 (сква. 9), КВО-4 (сква. 10), КВО-3а (сква. 11)

На основании модели системы «фундамент – грунтовое основание» с учетом измерений фоновых значений электрического сопротивления грунтов околоскважинного пространства приведены характеристики ее элементов (табл. 3.2).

Так, при исследованиях в скважинах 1, 2, 3, 6, 10 ниже глубины заложения фундамента в его основании отмечается наличие трансформации свойств грунта, которое может быть связано с изменением литологического состава или наличием насыпных грунтов (щебень, пгс).

Таблица 3.2

Элементы моделей опытных работ

Номер скважины (сооружения)	Фундамент		Инженерно-геологические условия
	Глубина погружения фундамента и его частей, м	Наличие изменений	
1 (Е6)	2,0±0,1 м	+	нарушены
2 (Х 2/2)	2,0±0,1 м	-	нарушены
3 (С-1, С-2)	2,2±0,1 м	+	нарушены
4 (СО-1)	2,2±0,1 м	-	-
5 (Э-2)	2,2±0,1 м	+	-
6 (Д-1)	2,0±0,1 м	+	нарушены
7 (Е6Б)	2,0±0,1 м	+	-
8 (эстакада ВУ 9а)	1,8±0,1 м	-	-
9 (СК-1)	2,0±0,1 м	-	-
10 (КВО-4)	2,0/2,6/3,6±0,1 м	-	нарушены
11 (КВО-3а)	2,8±0,1 м	+	-

Ввиду наличия локальных областей пониженных сопротивлений в интервале залегания фундамента было сделано предположение об изменениях фундаментов, предположительно связанных с нарушением их гидроизоляции, частичным разрушением или изменением прочностных свойств. Впоследствии

вскрытие указанных фундаментов позволило обнаружить вышеперечисленные дефекты.

Другой пример связан с определением заглубленной части простого фундамента для случая его залегания в однородных по составу глинистых грунтах. Измерения выполнены в двух скважинах и в условиях влияния второго фундамента, находящегося неподалеку. На графиках отчетливо отображается максимум, связанный с основанием фундамента, при этом ширина максимума увеличивается при удалении от сооружения (рис. 3.69). Относительное расхождение графиков в интервале глубин 1,4–1,8 м объясняется нарушением гидроизоляции одного из фундаментов.

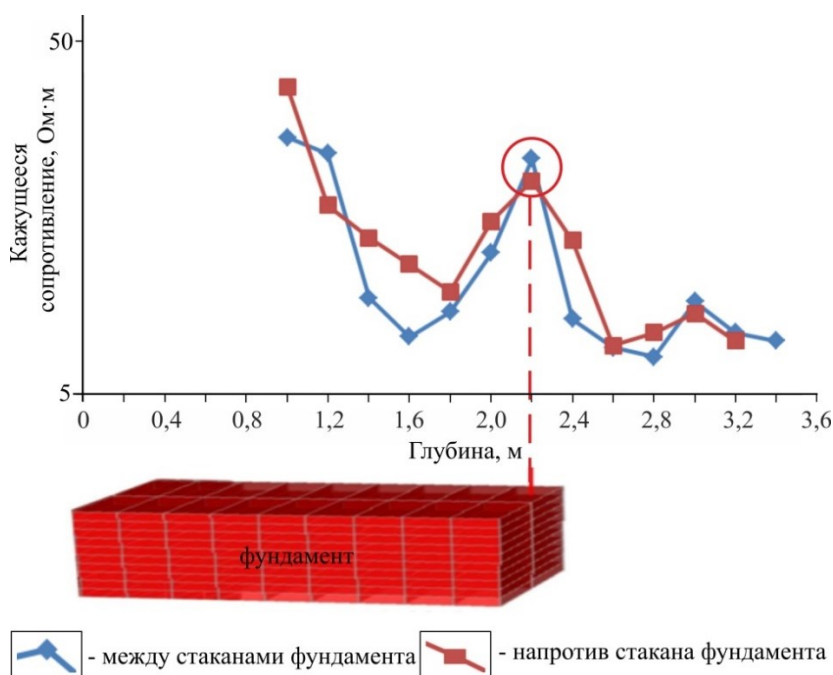


Рис. 3.69. Результаты измерений методом ПЭЗ на простом фундаменте в однородных грунтах

Следующий пример связан со сложным фундаментом в однородной среде. На рисунке 3.70 представлены результаты определения заглубленной части сложного фундамента для случая его залегания в однородных по составу глинистых грунтах. Исходя из полученных материалов, можно утверждать, что фундамент по вертикали состоит из двух частей: первая (стакан) залегает до глубины 1,8 м (а), вторая, меньших поперечных размеров (свая), до глубины 2,6 м (б). Кроме того, в интервале глубин 2,6–3,4 м выделяется неоднородность техногенного или естественного происхождения. Это связано с изменением литологического состава или свойств грунтов в основании сваи (в). Относительное уменьшение расхождения графиков в интервале 1,4–1,8 м свидетельствует об изменениях свойств фундамента стаканного типа.

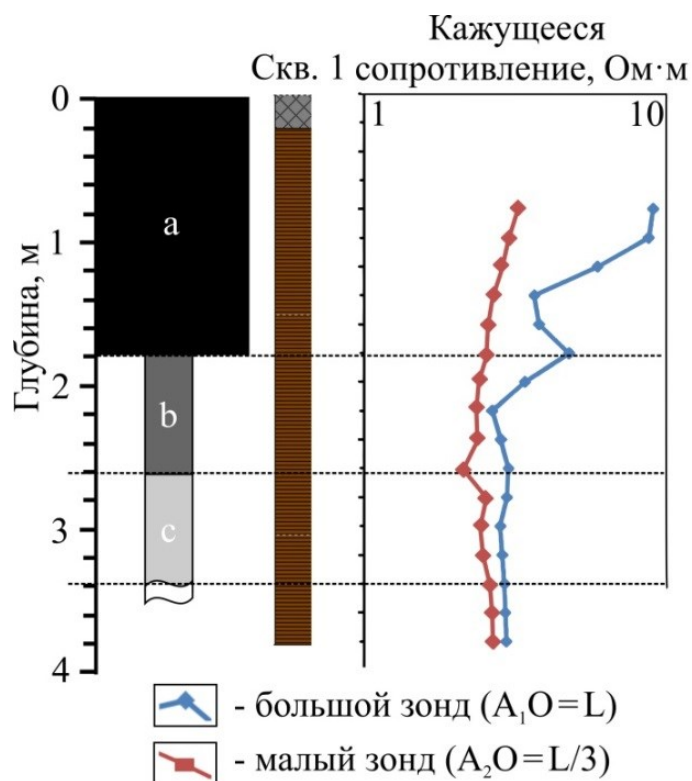


Рис. 3.70. Апробация способа на сложном фундаменте в однородных грунтах

Ниже приведен пример определения характеристик фундамента в неоднородной среде на одном из объектов культурного наследия. Разрез представлен переслаиванием песчано-глинистых отложений (рис. 3.71).

В геологическом строении до глубины 7,0 м принимают участие аллювиальные отложения, представленные суглинком от текучей до мягкопластичной консистенции, песком мелким малой и средней степени водонасыщения. С поверхности залегает насыпной грунт.

Насыпной грунт с поверхности благоустроен тротуарной плиткой с песчанистой подготовкой, ниже представлен песком коричневым мелким рыхлым малой степени водонасыщения, с тонкими линзами суглинка коричневого тугопластичной консистенции, с включением обломков кирпича, гравия, гальки содержанием 5–10 %. Его мощность составляет 1,8–2,0 м.

Аллювиальные отложения включают песок коричневый, светло- и темно-коричневый мелкий рыхлый малой и средней степени водонасыщения, с линзами супеси коричневой пластичной консистенции мощностью 1,0–1,1 м.

Суглинок коричневый легкий пылеватый реже песчанистый текучепластичной консистенции, с глубины 4,4 м текучей консистенции, с глубины 5,8–6,0 м от мягкопластичной до текучепластичной консистенции. Мощность отложений – 4,0–4,1 м.

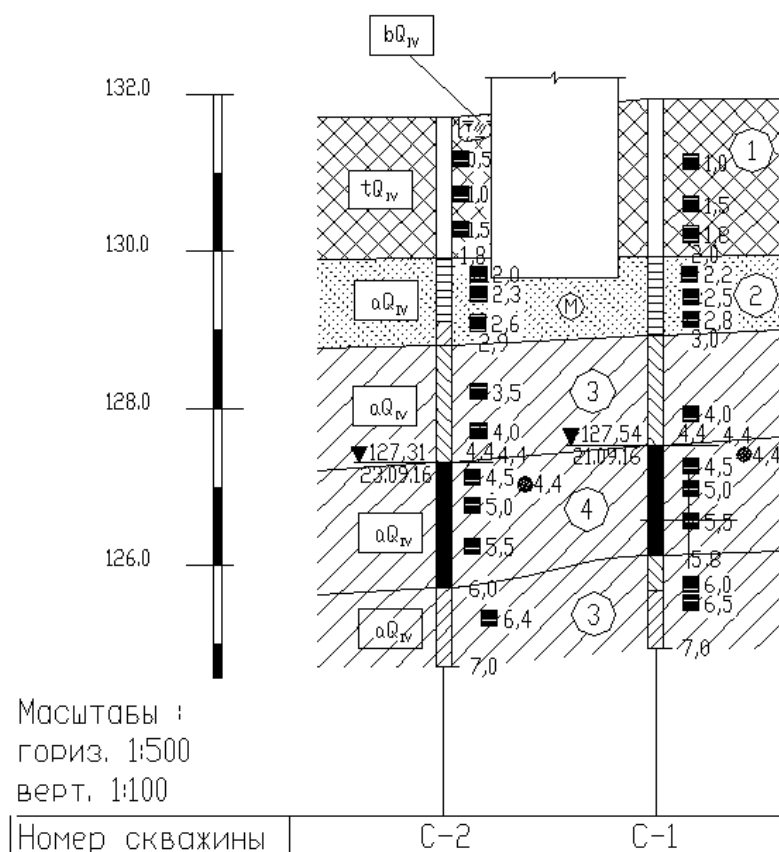


Рис. 3.71. Геологический разрез вмещающих грунтов и условное отображение фундамента сооружения

На период проведения буровых работ подземные воды встречены на глубине 4,4 м, установившийся уровень зафиксирован на этой же глубине. Подземные воды были приурочены к суглинкам текучей консистенции. Режим грунтовых вод носит сезонный характер и зависит от количества атмосферных осадков, инфильтрации грунтов, поверхностного и подземного стока. В момент проведения скважинных наблюдений уровень подземных вод поднялся до глубины 2,5 м. Согласно химическим анализам, грунтовые воды гидрокарбонатно-сульфатно-кальциево-натриевого состава. Согласно СП 28.13330.2012, грунтовые воды не агрессивны к бетону нормальной проницаемости марки W4 и не агрессивны к арматуре железобетонных конструкций при периодическом смачивании.

Согласно полевому описанию, лабораторным данным, с учетом классификации грунтов по ГОСТ 25100-2011 на площадке изысканий выделены следующие инженерно-геологические элементы: ИГЭ – 1 (насыпной грунт), ИГЭ – 2 (песок мелкий), ИГЭ – 3 (суглинок текучепластичной и мягкопластичной консистенции), ИГЭ – 4 (суглинок текучей консистенции).

По результатам измерений построены графики сопротивлений для двух зондов (рис. 3.72). График, полученный с использованием малого зонда, позво-

лил выполнить детальное расчленение литологического разреза. По результатам интерпретации выделяются особенности строения и физического состояния.

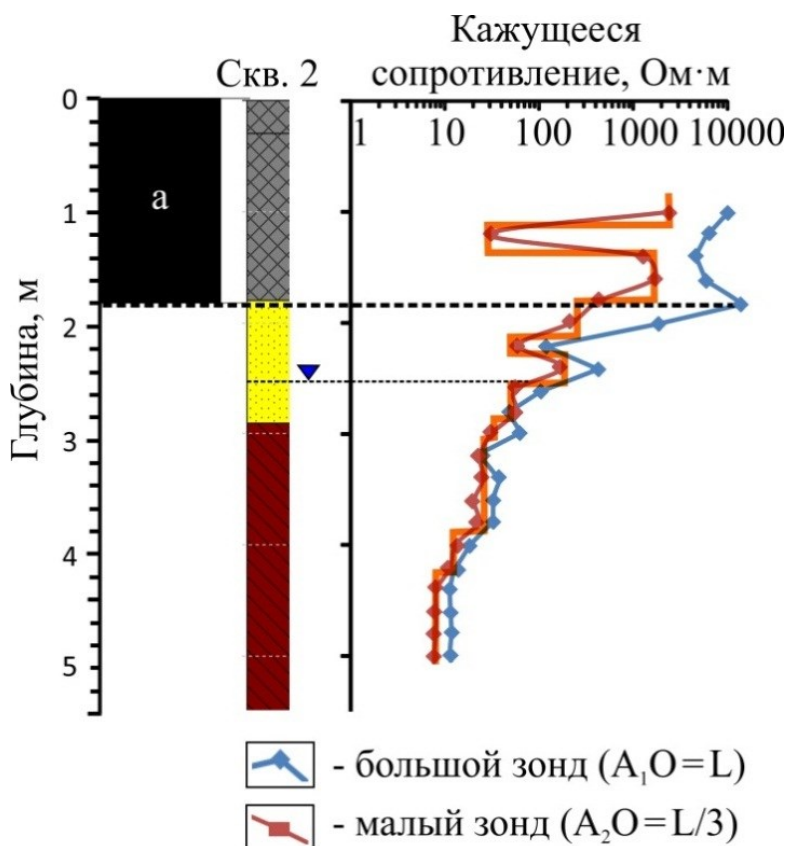


Рис. 3.72. Апробация способа на фундаменте стаканного типа в неоднородных грунтах

В частности, интервал глубин до 2 м представлен сильно дифференцированными по составу грунтами от супесей (песков) до обломочного материала. В интервале 2,0–2,5 м в песках отмечается изменение свойств, а до глубины 3 м наоборот – выдержанность ввиду водонасыщения отложений.

Далее с глубины 3 м грунты однородны по свойствам и близки к текучепластичным суглинкам. С глубины 4 м сопротивление пород продолжает уменьшаться, что предполагает их большее влагонасыщение или увеличение глинистости.

Результаты измерений на большом зонде, направленные на определение характеристик фундамента, показали наличие нескольких максимумов. Для идентификации максимума, связанного с заглубленной частью фундамента, был выполнен совместный анализ данных двух зондов.

Исходя из критериев, рассмотренных выше, основание фундамента определено при наибольшем расхождении кривых для двух зондов, то есть для максимума, расположенного на глубине 1,8 м. Величина отклонения двух графиков

в интервале погруженной части фундамента не указывает на наличие изменений в нем.

Учитывая большие размеры фундамента, на данном объекте опробовано определение глубины по методике просвечивания (ПЭП). На расстоянии, превышающем величину большого зонда, выполнено дополнительное бурение двух скважин с других двух сторон фундамента. Просвечивание осуществлялось сначала в одной скважине, потом в другой с расположением источника на поверхности (рис. 3.73). По результатам наблюдений строятся графики просвечивания и определяется величина заглубленной части фундамента относительно земной поверхности (рис. 3.74). Величина погруженной части фундамента составила 2,0–2,2 м.



Рис. 3.73. Натурные измерения характеристик фундамента методами параллельного электрического зондирования (ПЭЗ) и просвечивания ПЭП

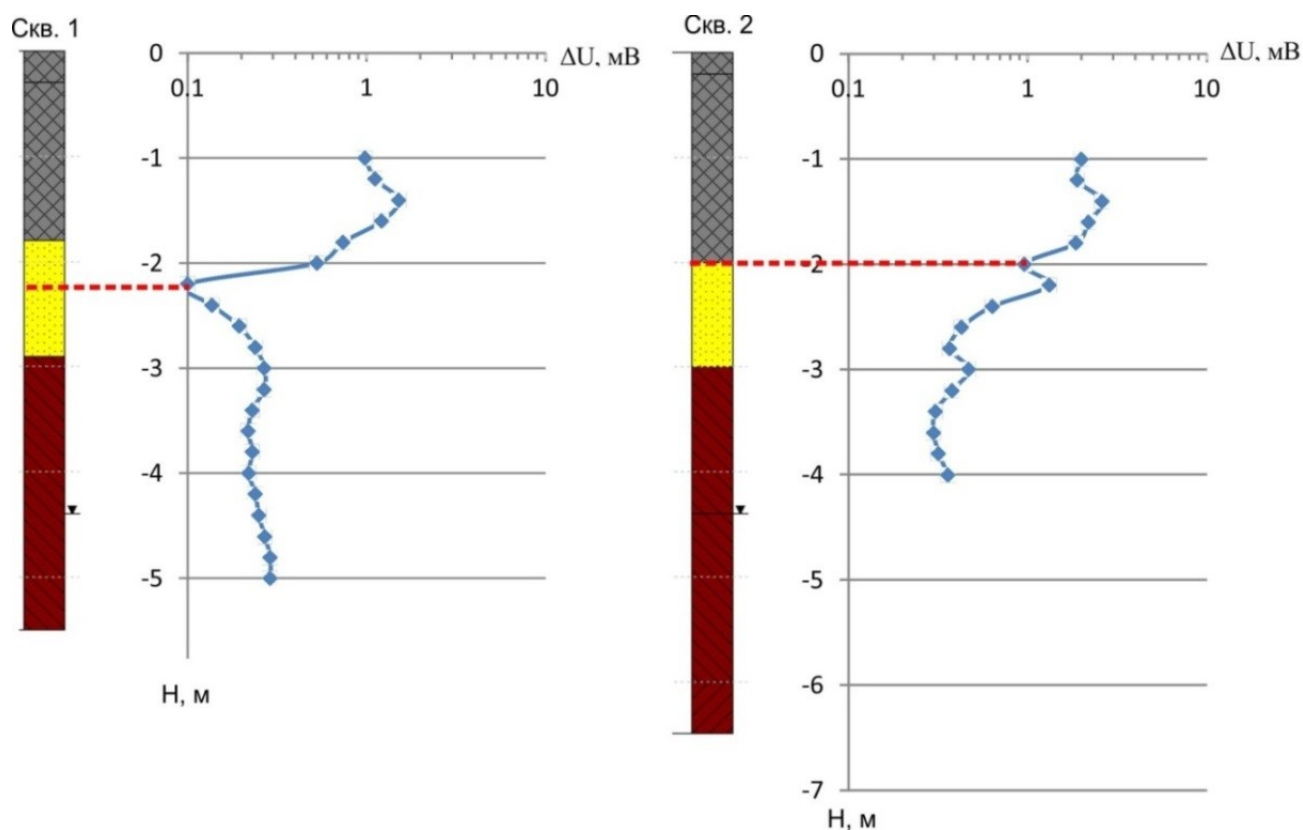


Рис. 3.74. Геологический разрез вмещающих грунтов и условное отображение фундамента сооружения

В качестве примера представлена погрешность определения глубины для 11 объектов, которая не превышает 10 %, что удовлетворяет практике исследований (табл. 3.3). Как показали исследования, точность определения в большей степени зависит от удаления фундамента и шага измерений.

Таблица 3.3

Оценка точности метода ПЭЗ

Номер сооружения	Глубина по скважинным измерениям, м	Фактическая глубина, м	Погрешность, %
1	2,2	2,1	4,8
2	1,8/2,6	1,8/2,4	0,0/8,3
3	1,8	1,9	5,3
4	2,4	2,2	9,1
5	2,4	2,4	0,0
6	2,0	1,9	5,3
7	2,2	2,1	4,8
8	2,0	2	0,0
9	2,2	2,1	4,8
10	3,6	3,5	2,9
11	2,8	2,7	3,7

Следует отметить ряд факторов, осложняющих реализацию способа. Наличие специфических инженерно-геологических условий и необходимость совместного анализа данных двух зондов требует специализированных знаний, как и при использовании любых других косвенных методов. Определение характеристик фундамента и грунтового основания возможно в ограниченном радиусе исследования. Кроме того, при реализации методики в редких ситуациях может происходить увеличение погрешности интерпретации ввиду большого удаления от фундамента или появления значительных углов между линией наблюдения и фундаментом. Данное обстоятельство требует внимательного обозначения доверительного интервала геометрических характеристик фундамента и уменьшения расстояния от скважины до фундамента.

Учитывая вышесказанное, метод сопротивлений в скважинном варианте ПЭЗ может успешно применяться для уточнения инженерно-геологических условий при реконструкции зданий и сооружений действующих предприятий в тех ситуациях, когда невозможно или затруднено выполнение измерений другими методами или в рамках комплексирования исследований для повышения достоверности заключений.

Разновидностью **индукционного способа** является метод **георадиолокационного зондирования в скважинном варианте – ГРЗС** (рис. 3.75). ГРЗС проводят в следующей последовательности:

- осуществляют бурение вертикальной исследовательской скважины ниже предполагаемой глубины заложения фундамента в максимальной близости от тела опоры, насколько это позволяют габариты бурового оборудования и конструкция мостового сооружения;
- в скважину устанавливают обсадную трубу с заглушенным нижним концом, изготовленную из неметаллического материала (например, пластика), из которой удаляют воду. Внутренний диаметр обсадной трубы должен быть достаточным для свободного перемещения в ней антенного блока георадара;
- в скважину помещают антенный блок, подключенный к георадару, и выполняют съемку путем подъема (или опускания) антенного блока по всей высоте скважины.

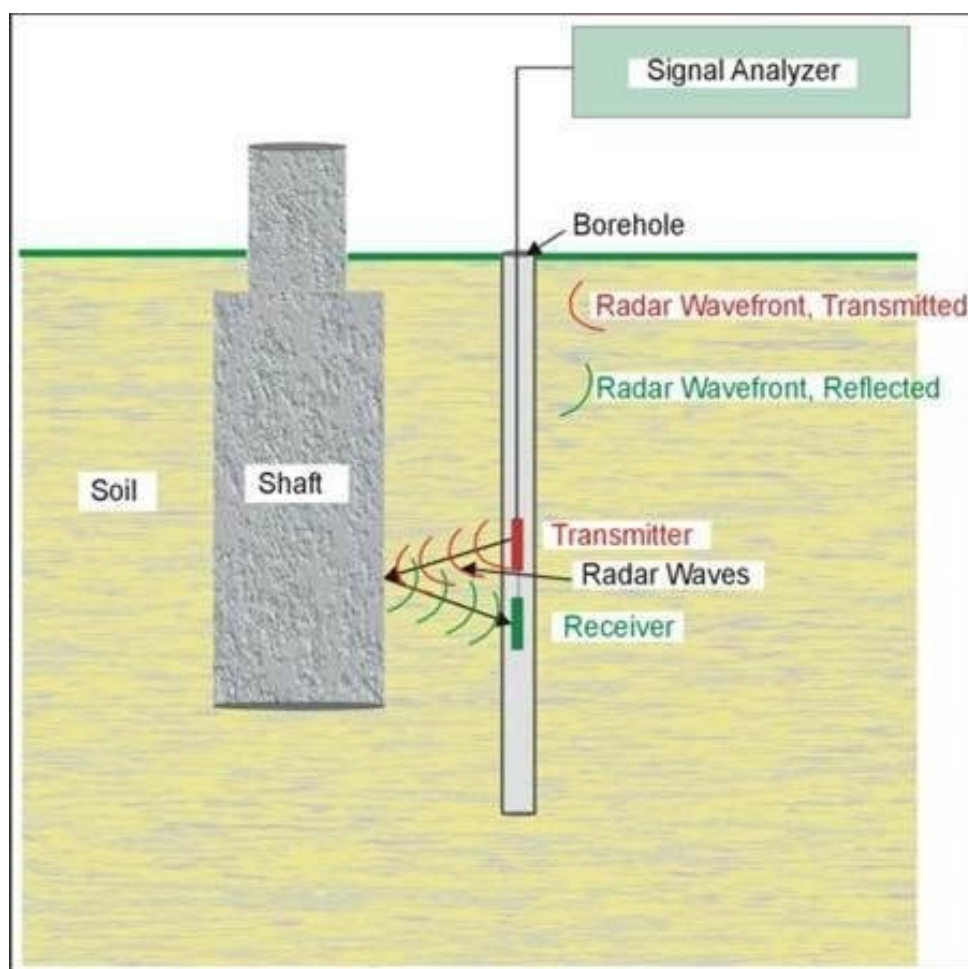


Рис. 3.75. Схема скважинных измерений при определении характеристик фундамента с использованием георадиолокационного зондирования

Антенный блок подбирают в зависимости от предполагаемой глубины заложения фундамента и его геометрических размеров. Для получения достоверных параметров фундаментов опор следует, как правило, одновременно применять эти два способа получения геофизических данных.

При сопоставлении результатов поверхностного и скважинного профилирования погрешность измерения геометрических параметров конструкций фундаментов составляет 5 %.

Пример отображения фундаментов в результатах георадиолокационного зондирования в скважинном варианте приведен на рис. 3.76.

При наличии нескольких скважин возможно выполнение межскважинного просвечивания методом ГРСП. В самом простейшем исполнении скважинные антенны перемещаются параллельно друг другу с одинаковым шагом и регистрацией сигнала между скважинами (рис. 3.77). Более сложная методика связана с томографическими измерениями, то есть многократными измерениями при одном положении источника.

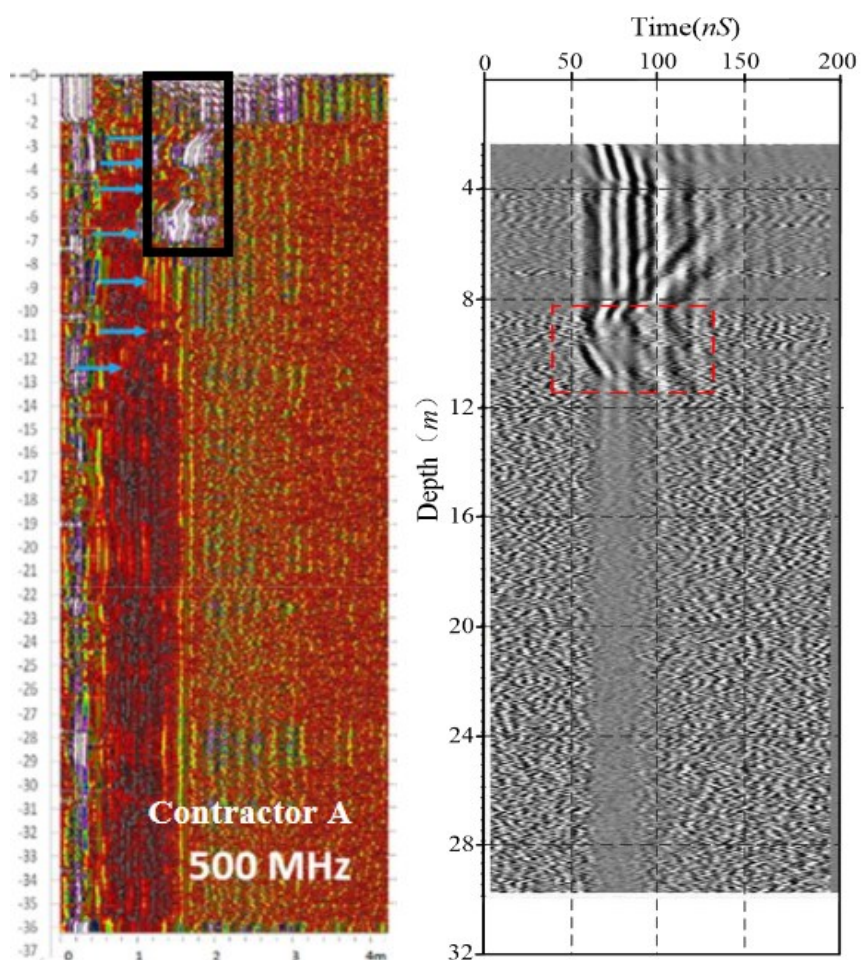


Рис. 3.76. Примеры отображения фундаментов по глубине в результатах георадиолокационного зондирования (ГРЗС) (J. J. Fu & C. Veeresh, 2021, Jianli Wang 2023)

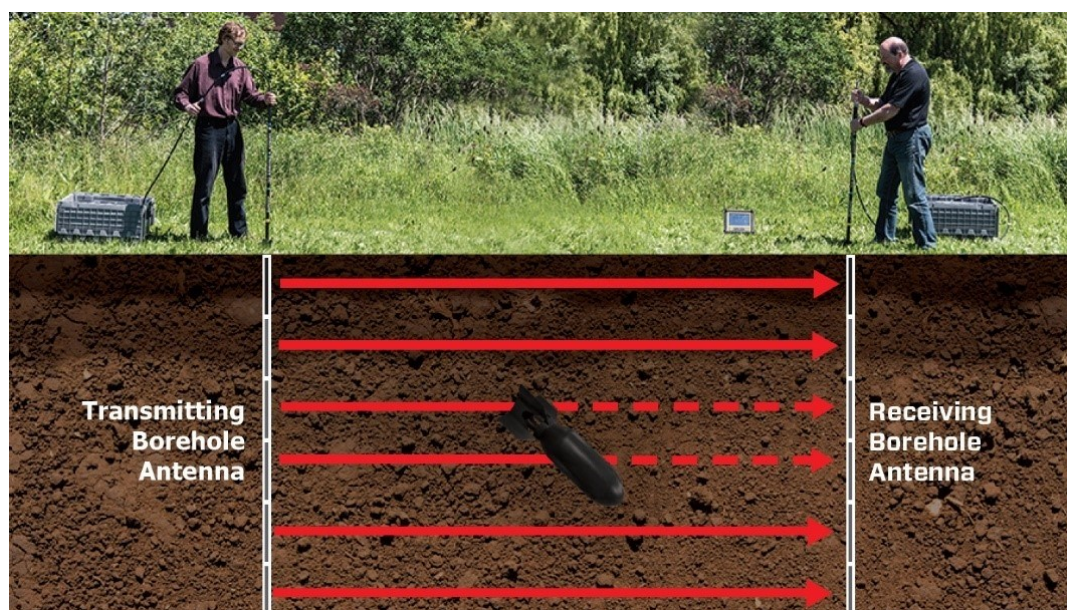


Рис. 3.77. Схема выполнения межскважинного просвечивания георадиолокационным методом (ГРСП)

Изменения во времени прохождения сигнала и его амплитуде показывают изменения свойств материала между скважинами, включая наличие объектов или изменений геологической среды (зоны разуплотнения), связанных с карстово-суффозионными процессами.

Методика комбинированных исследований заключается в использовании фундамента в качестве источника возбуждения электромагнитных колебаний и скважины или земную поверхность для регистрации отклика от погруженной части сооружения. Для упрощения методики, оптимизации наблюдений и повышения однозначности результатов исследований возможно также использование инверсии линий возбуждения и приема. В этом случае источники физических полей располагаются в скважине или на поверхности земли.

В качестве примера на рис. 3.78 приведены результаты исследований для изучения эффекта от свайного фундамента. Электрическое поле возбуждалось непосредственно через оголовок фундамента, а в скважинах при различных удалениях от фундамента проводились измерения потенциала электрического поля.

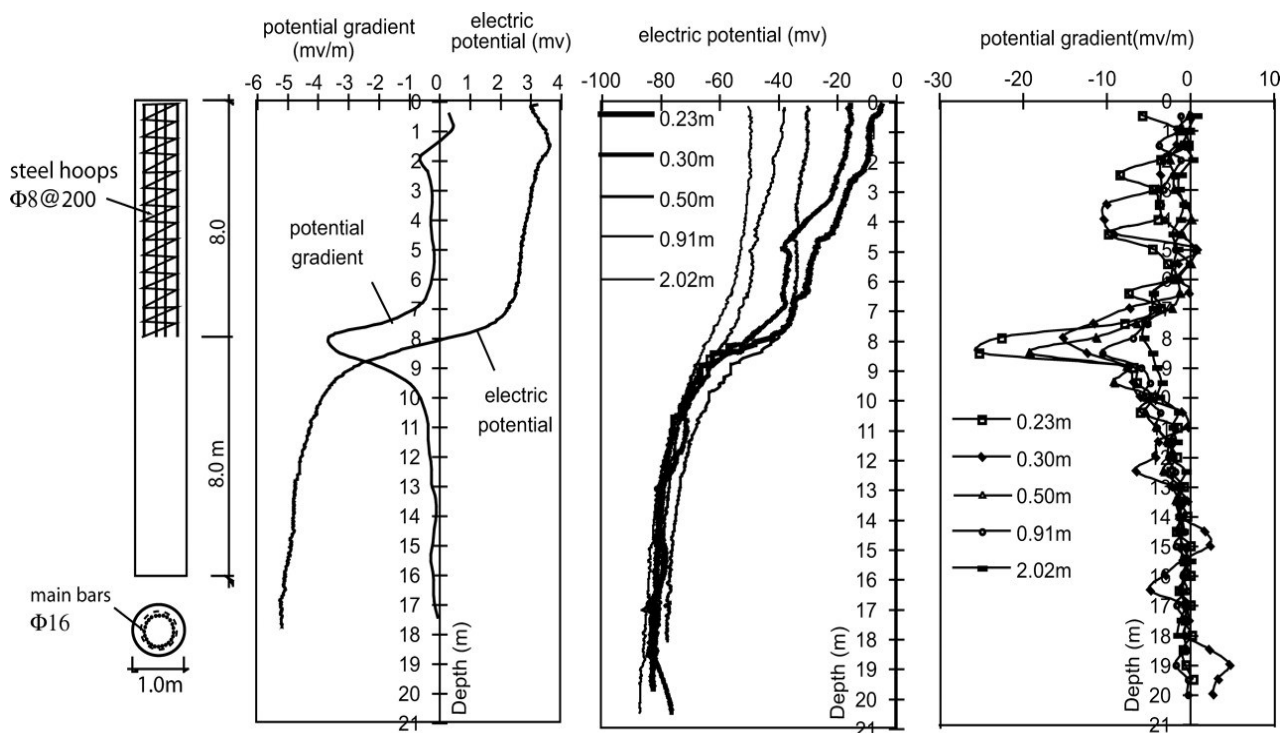


Рис. 3.78. Результаты скважинных измерений при определении характеристик фундамента с использованием квазипостоянного электрического тока

Критерием для определения погруженной части сооружения является появление экстремумов значений градиента потенциала. Методикам комбинированных исследований также присущи описанные недостатки при скважинных и наземных наблюдениях.

Кроме того, следует указать, что во всех модификациях исследований по определению величины погруженной части фундамента и его характеристик существуют предпосылки для уточнения инженерно-геологических условий.

Возможность использования метода каротажа сопротивлений при комбинированных измерениях рассмотрена С. М. Простовым. Схема подключения электродов приведена на рис. 3.79. Результаты, полученные по приведенной схеме измерений А 1,3 М 0,6 N, позволяют определить месторасположение края трубы с достаточно высокой точностью при удалении не более 1,5 м от оси исследуемого объекта (рис. 3.80).

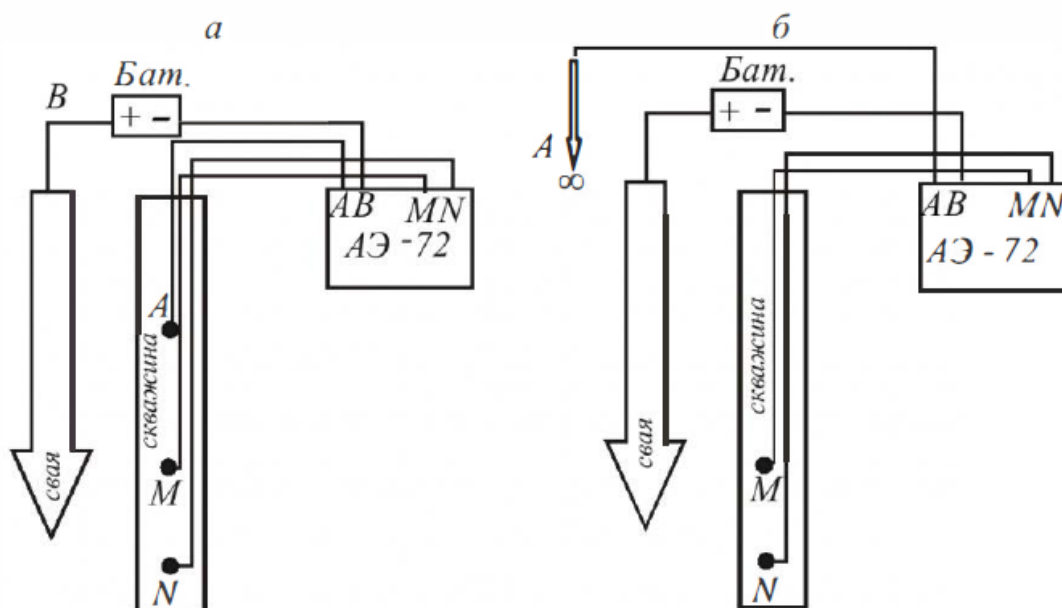


Рис. 3.79. Схемы подключения электродов при определении глубины залегания свай (Простов С. М., 2006)

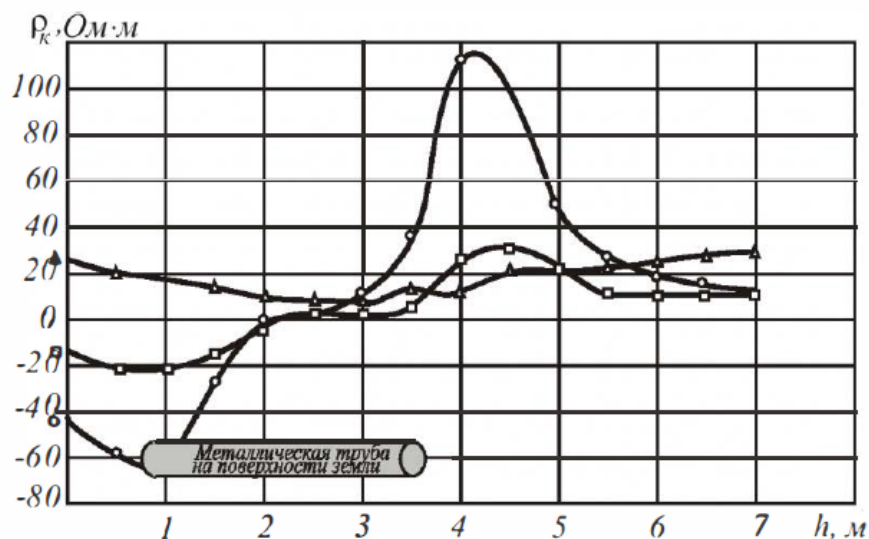


Рис. 3.80. Пример результатов измерений на расстоянии от фундамента-трубы, равном 1 м (Простов С. М., 2006)

3.2.3 Аппаратура

Для выполнения электрометрических измерений методом сопротивлений в различных модификациях и вариантах (наземном, скважинном), как правило, используют аппаратуру на постоянном токе низких частот.

В состав аппаратурных комплексов входят генерирующие и измерительные блоки.

Генераторы необходимы для создания электрического поля с заданными характеристиками (частотой, силой тока) в исследуемых объектах. Частота может варьироваться от нуля до нескольких сотен герц, а сила тока – от 0,1 мА до 1 А.

Измерительные, или регистрирующие приборы, предназначены для определения амплитудных и фазовых значений (абсолютных или относительных) напряженности поля. Часто измеряют разности потенциалов ΔU в приемных линиях с помощью стрелочных или цифровых милливольтметров с записью измерений в память приборов.

Измерительные и регистрирующие приборы характеризуются следующими техническими характеристиками: различными частотами и динамическими диапазонами; пороговой чувствительностью (около 10 мкВ) и погрешностью (в пределах ± 3 –10 %); высоким входным сопротивлением (свыше 1 МОм); помехозащищенностью, особенно от помех промышленной частоты 50 Гц; возможностью ручной или автоматической установки нуля прибора, обычно предназначенной для компенсации электродных разностей потенциалов; отсутствием или наличием микропроцессоров, обеспечивающих измерение и обработку информации.

Электроды-заземлители необходимы для гальванического создания поля в объекте исследований и измерения электрических составляющих напряженности поля. В качестве электродов для питающих линий АВ используют стальные, а для приемных линий MN медные или латунные электроды длиной 0,3–1 м и диаметром 1–3 см. Для исключения влияния потенциала приемных электродов применяют неполяризующиеся элементы, которые состоят из заземляемого пористого (керамического или брезентового) сосуда с раствором медного купороса и медного стержня в нем.

Одним из современных аппаратурно-программных комплексов, обладающих высокой надежностью для выполнения работ методом сопротивлений, является система SGD-EEM MEDUSA B2+SGD-EGC SKAT III и SGD-COMM (рис. 3.81).

Электроразведочный комплект измерителя MEDUSA-B2 с генератором SKAT III позволяет работать методами сопротивлений (ВЭЗ, СГ, ЭП) и вызван-

ной поляризации (ВП) в частотной и временной области, а также методами ЕП и блуждающих токов.

Единый широкий диапазон длительностей импульсов в частотной и временной области (от 0 до 625 Гц и от 0,5 до 32 сек.) дает возможность гибко адаптировать методику работ в соответствии с задачами. Сочетание электро-разведочного комплекта с коммутатором SGD-COMM кардинально повышает скорость выполнения детальных исследования, особенно в варианте томографии.



Рис. 3.81. Общий внешний вид генератора SGD-EEM измерителя MEDUSA B2+SGD-EGC SKAT III и коммутатора SGD-COMM

При использовании метода георадиолокационного зондирования широкое распространение получили аппаратные разработки производителей Mala GeoScience (Швеция), Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI) (США), Sensor and Software, Inc (Канада), US Radar Sub-Surface Imaging Systems (США), Ingegneria Dei Sistemi (IDS) (Италия).

Российскими компаниями, занимающимися производством георадаров, являются ООО «Лаборатория дистанционного зондирования», ООО «Логические системы», ЗАО «Таймер», ОАО «ВНИИСМИ», ЗАО «НТЦСМ», АО «НПП «Радар ммс», ФГУП СКБ ИРЭ РАН и др.

На рисунке 3.82 приведена система сбора данных георадиолокации с использованием оборудования Mala GeoScience.



Рис. 3.82. Система сбора данных методом георадиолокации от производителя Mala GeoScience

Для изучения физического состояния, изменений и коррозионных свойств бетона используется прибор Proceq Resipod компании Screening Eagle Technologies AG. Прибор Resipod – это полностью интегрированный 4-точечный датчик Веннера, предназначенный для измерения удельного электрического сопротивления бетона методом неразрушающего контроля. Прибор имеет высокую точность, скорость определения УЭС и реализован в прочном водонепроницаемом корпусе для работы в сложных условиях (рис. 3.83).



Рис. 3.83. Внешний вид и использование прибора Proceq Resipod

На больших площадях используется **Profometer Corrosion** (рис. 3.84). Его конструкция из четырех роликовых электродов позволяет технологично обнаруживать и производить разносторонний анализ очагов коррозии в железобетонных конструкциях.



Рис. 3.84. Внешний вид комплекта Profometer Corrosion для площадного изучения железобетонных конструкций

Для идентификации активной коррозии арматурных стержней на основе электрохимических свойств железобетона используется метод измерения потенциала. Все электроды (стержневые или роликовые) на полуэлементах меди/медного купороса (Cu/CuSO_4), соединении серебра/хлориде серебра (Ag/AgCl) или на насыщенном хлориде ртути ($\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2$). В приборе используется улучшенная цифровая фильтрация, удаляющая эффект внешнего шума (гражданские и промышленные источники энергоснабжения).

Преимущества комплекса:

- интуитивно понятный интерфейс для сбора и обработки полученных данных;
- оптимизированный рабочий процесс для измерения стержневыми и роликовыми электродами;
- удобные функции, позволяющие представлять объекты любой геометрически неправильной формы;
- улучшенная цифровая фильтрация, удаляющая эффект внешнего шума (гражданские и промышленные источники энергоснабжения);

- программное обеспечение Profometer Link для анализа данных сочетает оценку получаемых данных и отчетность, ПО совместимо с любым сторонним программным обеспечением;
- создание пользовательских отчетов путем экспорта графиков и диаграмм;
- корпус специально спроектирован для использования в полевых условиях.

Скважинные контактные измерения и **экспресс-методика измерения сопротивления (ЭМИС)** дисперсных грунтов выполняются аппаратурой метода сопротивлений, описанной выше (рис. 3.81). Специфика исследований различными методиками заключается в разнообразии конструкций зондов и способов заземлений контактов. На рисунке 3.85 приведен общий вид зонда для оценки системы «фундамент – грунтовое основание» методом **параллельного электрического зондирования (ПЭЗ)**. Конструкция зонда создана из армированного полипропилена, а контакты из гибких пружин, позволяющих проводить измерения в скважинах с переменным диаметром.



Рис. 3.85. Внешний вид зонда для выполнения измерений методом параллельного электрического зондирования (ПЭЗ)

Обследование бесконтактным (индукционным) способом – методом **гео-радиолокационного зондирования в скважинном варианте (ГРЗС)** – может быть осуществлено с помощью таких аппаратно-программных комплексов, как pulseEKKO®, Mala Borehole GPR и др. Виды скважинного оборудования данного метода приведены на рис. 3.86, 3.87.



Рис. 3.86. Внешний вид скважинных зондов pulseEKKO®

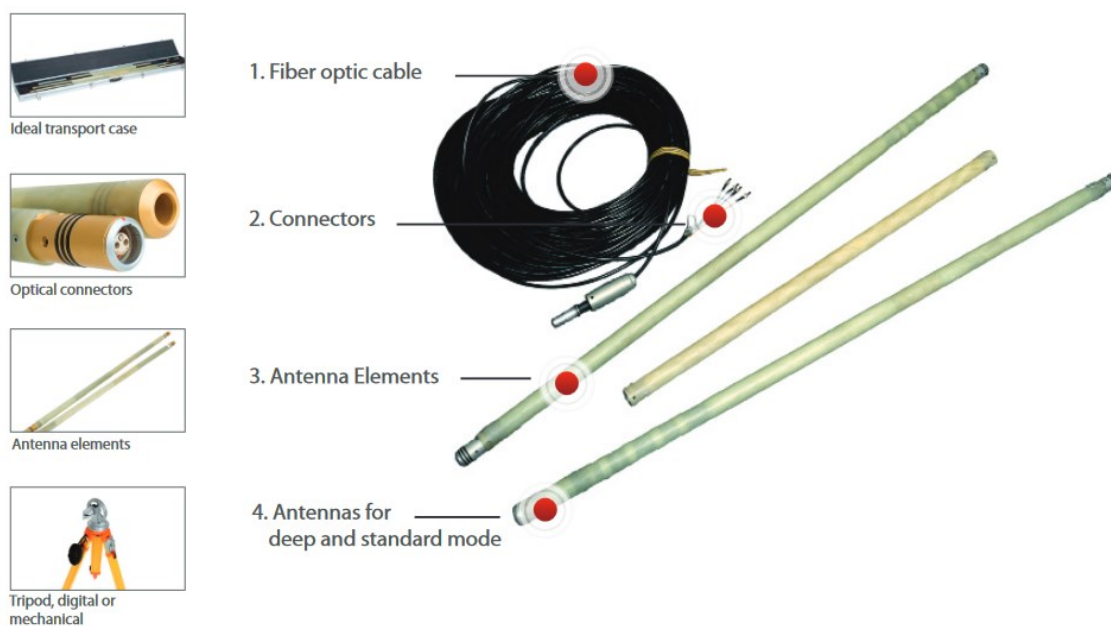


Рис. 3.87. Внешний вид скважинных зондов Mala Borehole

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Берлинов М. В. Основания и фундаменты: учебник. 4-е изд., испр. СПб: Издательство «Лань», 2011. 320 с
2. Гольдштейн М. Н., Царьков А. А., Черкасов И. И. Механика грунтов, основания и фундаменты: учебник для вузов ж.-д. трансп. М.: Транспорт, 1981. 320 с.
3. ГОСТ 17624-2021. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. Издание официальное. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 18 с.
4. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния / Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и оценке соответствия в строительстве. М.: Стандартинформ, 2012. 95 с.
5. ГОСТ Р 59617-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Мостовые сооружения. Правила обследования фундаментов опор. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 28 с.
6. ГОСТ Р 71039-2023. Сваи буронабивные и «стены в грунте» траншейного и свайного типов. Межскважинный ультразвуковой метод контроля качества бетона. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 16 с.
7. Инструкция по электроразведке. Л.: Недра, 1984.
8. Квятковский Г. И. Метод сопротивления заземления в инженерной геофизике. М.: Недра, 1993. 90 с.
9. Квятковский Д. В., Нед В. С., Русанов Г. А. Способ определения глубины погружения свай в грунт. Патент 958585. 1982.
10. Кокунько И. Н., Прокопова М. В., Масленников С. А., Дмитриенко В. А., Пашкова О. В. Основания и фундаменты: учебное пособие. Шахты: ИСОиП (филиал) ДГТУ в г. Шахты, 2018. 106 с.
11. Малышев М. В., Болдырев Г. Г. Механика грунтов. Основания и фундаменты (в вопросах и ответах): учебное пособие для студентов вузов. М.: Ассоциация строительных вузов, 2000. 320 с.
12. Огильви А. А. Основы инженерной геофизики: учебник для вузов / под ред. В. А. Богословского. М.: Недра, 1990. 501 с.
13. Ордобаев Б. Р., Апсеметов М. У. Механика грунтов, основания и фундаменты: учебник для вузов. Бишкек: Айат, 2014.
14. Ордобаев Б. С., Сардарбекова Э. К., Апсеметов М. Ч. и др. Краткий курс лекций по дисциплине «Основания и фундаменты»: учеб.-метод. пособие. Бишкек: Кыргызско-Российский Славянский Университет, 2010. 137 с.
15. ПНСТ 804-2022. Сваи. Сейсмоакустический метод контроля длины и сплошности. СПб: ОЗИС-Венчур, 2022. 24 с.

16. Пособие к МГСН 2.07-01. Основания, фундаменты и подземные сооружения. Обследование и мониторинг при строительстве и реконструкции зданий и подземных сооружений / В. А. Ильичев, П. А. Коновалов, В. П. Петрухин [и др.]. М.: ГУП «НИАЦ» Москомархитектуры, 2004. 59 с. EDN: WEYABN
17. Продукция/Приборы диагностики свай : сайт. URL: <https://www.interpribor.ru> (дата обращения: 17.07.2025)
18. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. I–VI. М., 1997–2003. 47 с.
19. СП 115.13330.2016. Геофизика опасных природных воздействий. Актуализированная редакция СНиП 22-01-95. М., 2016.
20. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. М.: Минстрой России, 2016. 181 с.
21. СП 24.13330.2021. «СНиП 2.02.03-85 Свайные фундаменты». М.: Минстрой России, 2021. 88 с.
22. СП 45.13330.2017. «Земляные сооружения, основания и фундаменты». М.: Минстрой России, 2017. 156 с.
23. СП 47.13330.2016. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. М., 2016.
24. СП 50-101-2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений. М.: ФГУП ЦПП, 2005. 248 с.
25. СП 14.13330.2014. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81. М., 2016.
26. СП 28.13330.2012. Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85. М., 2012.
27. Трофимов В. Т., Королев В. А., Харьковина М. А. и др. Базовые понятия инженерной геологии и экологической геологии: 280 основных терминов / под ред. В. Т. Трофимова. М.: Геомаркетинг, 2012. 320 с. ISBN: 978-5-905138-06-5 EDN: QKKXHN
28. ASTM D5882-16. Стандартный метод испытаний фундамента глубокого заложения на целостность путем приложения ударной нагрузки малой интенсивности. West Conshohocken.: ASTM international, 2016. 6 с.
29. Methods/foundation depth integrity methods : сайт. URL: <https://olsonengineering.com> (дата обращения: 22.04.2025)
30. Product/NDE 360 : сайт. URL: <https://www.pcte.com.au> (дата обращения: 04.03.2025)
31. Products : сайт. URL: <https://www.piletest.com> (дата обращения: 25.03.2025)

Учебное издание

Татаркин Алексей Викторович

**Геофизические методы в инженерно-геологических
и гидрогеологических исследованиях
(фундаменты и основания)**

Учебное пособие

Редактор *А. С. Серебrenиков*

Корректор *С. А. Вороненко*

Компьютерная верстка: *А. В. Татаркин*

Объем данных 9,66 Мб

Подписано к использованию 30.12.2025

Размещено в открытом доступе

на сайте psu.ru

в разделе НАУКА / Электронные публикации
и в электронной мультимедийной библиотеке ELiS

Управление издательской деятельности
Пермского государственного
национального исследовательского университета
614068, г. Пермь, ул. Букирева, 15
Тел.: (342) 239-65-47