

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Национальный
исследовательский технологический университет «МИСИС»

Набатов Владимир Вячеславович

ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МЕТОДА
ОБНАРУЖЕНИЯ ПОЛОСТЕЙ В ЗАОБДЕЛОЧНОМ ПРОСТРАНСТВЕ
ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

2.8.3 – «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика,
маркшейдерское дело и геометрия недр»

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:

Доктор технических наук
Вознесенский Александр Сергеевич

Москва - 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ВЫЯВЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД ВБЛИЗИ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ В МЕГАПОЛИСАХ	12
1.1. Проблемы, возникающие при строительстве и эксплуатации тоннелей и сооружений метрополитенов	12
1.1.1. Объекты подземного строительства, их особенности.....	12
1.1.2. Геологические особенности грунтового массива, способные вызывать проблемы при подземном строительстве	14
1.1.3. Причины и последствия возникновения полостей в заобделочном пространстве при строительстве и эксплуатации тоннелей метрополитенов	21
1.2. Обзор геофизических методов выявления полостей в заобделочном пространстве	27
1.2.1. Сейсморазведочные изыскания	28
1.2.2. Сейсмоакустические изыскания.....	31
1.2.3. Георадиолокационные изыскания.....	34
1.2.4. Электроразведочные изыскания.....	38
1.2.5. Другие методы	41
1.3. Основные проблемы и направления их решения при выявлении полостей в заобделочном пространстве.....	43
Выводы по результатам обзора научной литературы. Постановка задач исследования.....	46
ГЛАВА 2. РАЗВИТИЕ МЕТОДА СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ЗАОБДЕЛОЧНОГО ПРОСТРАНСТВА.....	49
2.1. Результаты натурных измерений в тоннелях московского метрополитена	49
2.2. Распознавание вида заполнителя в полостях заобделочного пространства при обследовании тоннелей метрополитенов сейсмоакустическим методом.....	54
2.2.1. Особенности компьютерного моделирования	54
2.2.2. Результаты моделирования, проверка полученной модели.....	61
2.2.3. Влияние заполнителя полости на спектр отклика	66

2.3. Структурные особенности поведения заобделочного пространства, выявленные по результатам сейсмоакустических исследований	72
2.3.1. Особенности методики компьютерного моделирования	73
2.3.2. Результаты исследования для моделей с одним тоннелем	77
2.3.3. Результаты исследований для ситуаций сложных горнотехнических условий	80
Выводы по второй главе	95

ГЛАВА 3. РАЗВИТИЕ МЕТОДА ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ ЗАОБДЕЛОЧНОГО ПРОСТРАНСТВА..... 97

3.1. Специфика георадиолокационного выявления полостей в заобделочном пространстве	97
3.2. Подбор графа обработки георадиолокационных данных при выявлении полостей в заобделочном пространстве	103
3.3. Локация течей с помощью георадаров при строительстве и эксплуатации подземных сооружений.....	113
3.4. Подавление прямой волны с помощью помеховых радарограмм	119
3.5. Оценка параметров армирования с целью улучшения качества выявления полостей в заобделочном пространстве	139
3.6. Развитие метода георадиолокационного поиска зон разуплотнения в массиве пород вблизи тоннелей при обследованиях с поверхности с использованием информативных параметров.....	148
3.6.1. Выявление разуплотнений при съёмках с поверхности.....	148
3.6.2. Использование информационной энтропии в качестве идентификатора при выявлении строения массива горных пород с помощью низкочастотных георадаров	163
Выводы по третьей главе.....	178

ГЛАВА 4. ОТБОР И ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ОБЪЕДИНЕНИИ ИХ В КОМПЛЕКСЫ..... 180

4.1. Общие принципы отбора информативных параметров	181
4.2. Отбор основных информативных параметров при георадиолокационном контроле заобделочного пространства	186
4.2.1. Основные особенности идентифицирующих сигналов	186
4.2.2. Основные информативные параметры	188
4.2.3. Особенности использования спектральных информативных параметров.....	196
4.2.4. Особенности поведения признаков, вычисляемых по результатам обработки георадиолокационных трасс	203

4.2.5. Комплексирование информативных параметров при георадиолокационных измерениях.....	208
4.3. Отбор основных информативных параметров при сейсмоакустическом контроле заобделочного пространства.....	214
4.4. Подготовка образцовой и тестовой выборки	219
Выводы по четвёртой главе.....	221
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА И ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ ПОЛОСТЕЙ В ЗАОБДЕЛОЧНОМ ПРОСТРАНСТВЕ	222
5.1. Особенности воздействия помеховых факторов на комплексы признаков	222
5.2. Использование коэффициента информационной эффективности при составлении комплексов.....	226
5.3. Эмпирическая оценка величины априорной вероятности наличия полости от времени эксплуатации тоннеля.....	232
5.4. Оценка плотностей вероятности по результатам геофизических измерений.....	235
5.5. Эмпирическая оценка информационной эффективности комплексов признаков	241
5.6. Оценки допустимой вероятности пропуска полости в заобделочном пространстве	245
5.7. Комплексирование информационных признаков вычисленных по результатам натурных измерений методами различной физической природы	249
5.7.1. Общие принципы Байесовской классификации	251
5.7.2. Результаты распознавания. Оценка влияния матрицы потерь	254
Выводы по пятой главе.....	259
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	262
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	265
ПРИЛОЖЕНИЕ. Информация о внедрении результатов работы	

Введение

Актуальность темы диссертационного исследования связана с необходимостью обеспечения безопасности эксплуатации метрополитена в условиях активного развития подземной инфраструктуры. Одной из значимых проблем в этой сфере остаётся выявление полостей в заобделочном пространстве, которые могут оказывать существенное влияние на напряжённо-деформированное состояние (НДС) грунтового массива, вызывать деформации и растрескивание обделки, а также влиять на состояние рельсового пути и окружающей застройки.

Современная практика показывает, что при строительстве и эксплуатации тоннелей возможны образования пустот в заобделочном пространстве, которые не только нарушают геомеханическое равновесие, но и представляют потенциальную угрозу для устойчивости сооружений. В ряде случаев такие деформации выявляются лишь после появления внешних признаков – трещин, перекосов путей или просадок поверхности, что значительно усложняет оперативное реагирование. Это подтверждает необходимость в развитии эффективных диагностических подходов, способных не только фиксировать наличие пустот, но и оценивать их геометрию и положение в массиве. Особенно остро проблема встаёт в условиях плотной городской застройки, где любые деформации могут привести к аварийным ситуациям.

Основным техническим решением является тампонаж полостей, однако его реализация возможна только после их надёжного обнаружения. Из-за ограниченного доступа к заобделочному пространству и невозможности вскрытия обделки в действующих тоннелях особую значимость приобретают геофизические методы обследования. Наиболее перспективными среди них считаются геофизические методы – сейсмоакустика и георадарное обследование.

Однако при применении этих методов по отдельности возникают определённые сложности. Сейсмоакустические методы, такие как метод импульсного отклика (Impulse Response, далее по тексту IR), обладают ограниченной разре-

шающей способностью и зависимостью от помеховых факторов (характер удара, характер поверхности), что может снижать достоверность локализации полостей. Георадиолокация, несмотря на высокую разрешающую способность, сталкивается с трудностями интерпретации из-за влияния ряда помеховых факторов. Это может приводить к ситуациям «ложное срабатывание» и «пропуск цели». Низкая достоверность результатов как IR, так и георадиолокации требует разработки комплексных алгоритмов обработки сигналов, адаптированных под условия подземного строительства.

Таким образом, исследование возможностей и ограничений этих методов для обнаружения полостей в заобделочном пространстве, а также разработка подходов к интерпретации и комплексированию получаемых данных представляют собой актуальную научную и инженерную задачу.

Цель работы состоит в обосновании и разработке помехоустойчивого комплексного геофизического метода, способного достоверно выявлять и оценивать наличие и тип заполнителя полостей в заобделочном пространстве подземных сооружений.

Идея работы состоит в выборе и комплексировании информативных параметров геофизических методов, имеющих различную физическую природу, которые необходимы для достоверного выявления полостей в заобделочном пространстве подземных сооружений.

Основные научные положения, выносимые на защиту.

1. Установлено, что признаком заполнения полости в заобделочном пространстве водой либо смесью грунта и воды является наличие спектрального максимума сейсмоакустического сигнала, регистрируемого при ударном возбуждении обделки тоннеля, в области 100-1000 Гц, подтверждаемого величиной коэффициента корреляции между спектральными составляющими модельного (с различным соотношением грунта и воды в полости) и натурного сигналов.

2. Объяснена природа возникновения геофизических аномалий, связанных с неоднородностями массива, обусловленная особенностями напряжённо-

деформированного состояния, приводящего к развитию зон пластической деформации вблизи тоннеля в нижних боковых частях тоннеля и гораздо реже в его верхней части.

3. Установлено, что при проведении георадиолокационной съемки с поверхности и наличии областей разуплотнения, находящихся рядом с тоннелем, регистрируемый георадиолокационный сигнал содержит низкочастотную составляющую, приводящую к изменению закона распределения значений амплитуд георадиолокационной трассы, выявляемого с помощью описывающего форму этого распределения энтропийного критерия.

4. Установлено, что при увеличении времени эксплуатации выработки вероятность возникновения полости в заобделочном пространстве возрастает, при этом для возраста 30–90 лет средняя вероятность возникновения полости составляет 0.057, а для возраста 0–20 лет средняя вероятность составляет 0.018.

5. Определен метод выбора комплекса и оптимального количества информативных параметров, учитывающий априорную вероятность наличия полости, а также плотности вероятностей информативных параметров при наличии и отсутствии полости, позволяющий уменьшить ошибку ее выявления более чем в 80 раз.

6. Установлены взаимосвязи вероятности пропуска и ложного определения полостей с количеством информативных параметров предложенного комплексного геофизического метода, что позволяет расширить область минимальных значений вероятности пропуска полостей и существенно минимизировать вероятность их ложного определения путем изменения соотношения коэффициентов матрицы потерь.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается:

- непротиворечивостью результатов исследования законам акустики и теории электромагнитного поля;
- достаточным объемом экспериментальных исследований;

- удовлетворительной сходимостью результатов теоретических исследований, компьютерного моделирования и натурных экспериментов;
- использованием средств измерения с высокими метрологическими характеристиками; использованием современных, общепринятых, хорошо себя зарекомендовавших методов и программ обработки экспериментальных данных и компьютерного моделирования.

Методы исследований, использованные в диссертационной работе:

- анализ и обобщение научно-технической информации с целью выявления спектра существующих методов выявления полостей в заобделочном пространстве, основных проблем их применения, путей развития этих методов;
- экспериментальные натурные исследования в тоннелях московского метрополитена, а также исследования с поверхности областей, попадающих в зону влияния тоннелей метрополитена и подземных коллекторов;
- статистическая обработка и анализ результатов измерений;
- конечно-элементное моделирование и его валидация по результатам натурального эксперимента.

Научная новизна работы заключается в:

- установлении закономерностей изменения спектра, зарегистрированного с помощью сейсмодатчика отклика обделки на ударное воздействие в зависимости от типа заполнителя полости в заобделочном пространстве;
- обосновании возможности определения типа заполнителя полостей в заобделочном пространстве по максимуму коэффициента корреляции между спектральными составляющими модельного и натурального сигналов;
- установлении факта возрастания энтропии амплитуд низкочастотного георадиолокационного сигнала вблизи водонасыщенной зоны разуплотнения грунтового массива;
- установлении закономерностей развития зон пластической деформации в заобделочном пространстве, связанных с особенностями изменения напряжённо-деформированного состояния массива пород, способных быть причиной образования полостей;

- разработке нового метода комплексирования информативных параметров геофизических сигналов, основанного на оценке их информационной эффективности.

Практическая значимость и реализация результатов.

Результаты работы были использованы при подготовке нормативных документов: «Руководство по проектированию и технологии выполнения работ по компенсационному нагнетанию в грунты основания для обеспечения сохранности зданий и сооружений при освоении подземного пространства в городе Москве» (ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации» и НИУ МГСУ по заказу Департамента градостроительной политики города Москвы), «Руководство по строительству подземных сооружений транспортного назначения в условиях карсто-суффозионной и оползневой опасности в городе Москве» (ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации» и НИУ МГСУ по заказу Департамента градостроительной политики города Москвы), «Руководство по контролю качества скрытых работ геофизическими методами при строительстве подземных объектов, включая объекты метрополитена, на территории Москвы» (Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы). Также результаты работы были использованы при подготовке СТО-75-25 «Контроль качества скрытых работ геофизическими методами при строительстве объектов метрополитена» (АО «Мосинжпроект»); ГОСТ Р 71733–2024 «Строительные работы и типовые технологические процессы. Контроль качества скрытых работ геофизическими методами при строительстве подземных объектов» (АО «Мосинжпроект»); СП 120.13330.2022 «СНиП 32–02–2003. Метрополитены», а также внедрены в практику контроля качества тампонажа заобделочного пространства при проходке перегонных тоннелей метрополитена города Москвы (АО «Мосинжпроект»).

Апробация работы. Основные научные и практические результаты диссертационной работы были доложены на следующих Всероссийских и Международных конференциях: Международная научно-технической конференция «Основные направления развития инновационных технологий при строитель-

стве тоннелей и освоении подземного пространства крупных мегаполисов» – 2011, 2012, 2013 годы; Международный научный симпозиум «Неделя горняка» – 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 годы (Москва, «НИТУ МИСИС»); Международная научно-практическая конференция «ГЕОРАДАР-2017» (Москва, 27-29 сентября 2017 года, Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова совместно с Радарными и сейсмическими системами); Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, 8–10 апреля, 2015 г., «РГГУ имени Серго Орджоникидзе»); Круглый стол «Возможности современных геофизических методов и оборудования в рамках проведения инженерно-геологических изысканий» (Москва, 6-7 июня 2019, в рамках выставки «ГеоИнфо ЭКСПО – 2019»); XV Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, 25-28 октября 2021 г., «ИПКОН РАН»); V Международная научно-практическая конференция «Российский форум изыскателей» (18-22 сентября 2023, «НИУ МГСУ»); XVI Международная научная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, 23-27 октября 2023 г., «ИПКОН РАН»); «XXVI Уральская молодежная научная школа по геофизике» (Пермь, 17-21 марта 2025 г., «ГИ УрО РАН»); X Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Акустика среды обитания» (Москва, 29–30 мая 2025 г., «МГТУ им. Н.Э. Баумана»); XVII Международная школа молодых ученых и специалистов «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, 27-31 октября 2025 г., «ИПКОН РАН»).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 32 научные работы, в том числе 19 – в журналах, рекомендуемых ВАК по специальности защищаемой диссертации либо входящих в Scopus, и 3 нормативных документа.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованных источников из 329 источников и 1 приложения, содержит 103 рисунков и 17 таблиц.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному консультанту д.т.н. Вознесенскому Александру Сергеевичу за ценные советы и поддержку при подготовке диссертации. Автор также благодарит весь коллектив кафедры Физических процессов горного производства и геоконтроля НИТУ МИСИС за поддержку, профессиональный интерес и активное участие в обсуждении работы.

Глава 1. Современное состояние и проблемы выявления структурных особенностей массивов горных пород вблизи подземных сооружений в мегаполисах

1.1. Проблемы, возникающие при строительстве и эксплуатации тоннелей и сооружений метрополитенов

1.1.1. Объекты подземного строительства, их особенности

Под подземными сооружениями понимают сооружение или его часть, расположенное ниже уровня земной поверхности. Согласно [1] объекты подземного строительства можно разделить на несколько групп по распространённости. Наиболее распространены транспортные тоннели (метрополитен, авто-транспортные тоннели), коммунальные тоннели, подземные автомобильные парковки и подземные технические помещения (сети инженерного оборудования, объекты промышленного назначения и энергетики). Следующую группу по массовости составляют помещения предприятий торговли, общественного питания и бытового обслуживания (подземные магазины, офисы, выставочные залы), а также склады. Отдельную группу образуют подземные пешеходные связи.

Можно отметить, что в течение нескольких последних десятилетий идёт процесс активного развития подземного строительства. Причины увеличения объёмов и разнообразия этого типа объектов связано с достоинствами, которыми они обладают. В первую очередь объекты подземного строительства снимают такие проблемы как дефицит городских территорий, перегруженность транспортных линий и городской инфраструктуры [2]. При интенсивном подземном строительстве сокращаются площади отчуждённых участков, что важно для сохранения зеленых насаждений и способствует улучшению экологической ситуации города.

Также для объектов подземного строительства характерно сохранение более-менее постоянного температурно-влажностного режима, что уменьшает энергетические затраты на отопление и охлаждение [3, 4]. Эксплуатация подобных сооружений не зависит от погодных условий – для Москвы, для которой характерен сезонный перепад средних температур это означает увеличение время эксплуатации сооружения [5]. Для подземных объектов характерны естественная акустическая изоляция и виброустойчивость. Это используется для организации специальных производственных процессов.

Если сравнивать наземные и подземные транспортные сети, в первую очередь метрополитен, то можно помимо уже означенных указать на ряд особых достоинств подземных транспортных сетей. Наиболее заметное достоинство – это возможность реализовывать протяжённые транспортные сети, которые позволяют не разделять город на отдельные, слабо связанные территории, что важно, как с технической, так и с экономической точки зрения. Так же это высокая скорость перемещения по городу и высокая провозная способность, связанные с тем, что подземная транспортная сеть не пересекается с другими транспортными сетями.

Важной особенностью подземных транспортных сетей является минимизация акустического воздействия (шумового загрязнения) на пространство города, а также ограниченное воздействие на экологию города. Ещё одно достоинство – это возможность проектировать и строить сложные, комплексные объекты, увязывающие в одном месте станции и тоннели метрополитенов, железнодорожные станции, другие транспортные системы и узлы пересадки [5, 6].

Стоит отметить, что центр города использует подземное пространство наиболее эффективно, что достигается не только за счёт нового строительства, но и при реконструкции [7]. Причиной этого являются дороговизна земли и жесткие ограничения, налагаемые на проекты (высота, габариты участка и пр.) [5, 1]. Однако ближе к периферии города описанный выше показатель падает до малых значений.

Это обобщение достоинств, а также неоднородность распределения объектов позволяет сделать вывод, что сфера подземного строительства будет самым активным образом развивается и далее.

Вместе с тем развитие этой области будет сдерживаться рядом причин. В первую очередь будут влиять сложные инженерно-геологические условия подземного строительства. Также важным аспектом является то, что подземное пространство города всё больше усложняется. На возводимые тоннели метрополитенов будут воздействовать фундаменты существующих зданий, инженерная инфраструктура, уже построенные объекты транспортной инфраструктуры, в частности уже действующие линии метро. Существует и обратное воздействие – строящиеся, а также эксплуатируемые тоннели метрополитенов влияют как на подземную инфраструктуру (коммуникации, подземные торговые площади и паркинги), так и наземные сооружения – здания, наземные транспортные системы и пр. Эти особенности необходимо учитывать, как при строительстве, так и при эксплуатации тоннелей метрополитена.

Таким образом, увеличение объёмов подземного строительства, а также большой спектр сопутствующих проблем делает тему этого диссертационного исследования важной и актуальной не только в настоящий момент, но и в перспективе.

1.1.2. Геологические особенности грунтового массива, способные вызывать проблемы при подземном строительстве

При подземном строительстве и эксплуатации подземных сооружений возникает широкий ряд проблем. Некоторые из них можно снять с помощью изысканий, проводимых методами неразрушающего контроля. Этот список проблем в одних случаях привязан к конкретным объектам и технологиям, а в других – те или иные проблемы можно найти в широком диапазоне вопросов. Наиболее острыми называются техногенная суффозия, карстово-суффозионные

процессы, ряд гидрогеологических особенностей массива, влияние техногенных объектов [8, 9].

Суффозия. Под суффозией понимают разрушение и вынос потоком подземных вод отдельных компонентов и крупных масс пород [10]. Существуют различные причины суффозии. Перемещение пород может возникать за счёт движения фильтрующегося потока [11]; за счёт развития карстовых процессов; на границе слоёв с разной дисперсностью (мелкодисперсные породы аккумулируются в грубодисперсном пласте); за счёт деятельности человека. Особенно распространены суффозионные процессы в местах, где грунтовые воды выходят на поверхность (берега рек, борта оврагов) [8]. При этом зона разуплотнения может тянуться на расстояние до 200 м от места выхода вод на поверхность или вдоль объекта [12]. Вместе с тем в последние десятилетия эти процессы в ряде городов стали менее выраженными. Например, берега реки Москвы и частично Яузы облицованы, рельеф выравнен, овраги и долины мелких рек засыпаны. Суффозия чисто природного происхождения встречается в районах со слабой застройки, где она не может нанести крупного ущерба. Однако суффозионные процессы, инициированные техногенным воздействием могут играть существенную роль [13].

Ряд техногенно вызванных проявлений суффозии связан с вымыванием грунтом из-за возникновения протечек из водонесущих подземных коммуникаций [14, 15, 16], а также при постоянном стоке в системы водоотведения [17]. Типичными последствиями техногенной суффозии является оседания поверхности, заболачивание котлованов, осадка зданий, повреждения других подземных коммуникаций (транспортных, инфраструктурных) [18, 14].

Для решаемой в диссертации задачи техногенная суффозия может быть одним из факторов который обостряет развитие полостей в заобделочном пространстве. Она также могут являться их причиной. Процесс также может быть сложно устроенным – полости влияют на окружающий массив, что обостряет техногенную суффозию и это в конечном счёте снова влияет на развитие полостей.

Поиски полостей, вызванных течами из канализационных сетей, обычно выполняются с помощью георадиолокации. Причиной выбора метода является высокая разрешающая способность, возможность провести съёмку с плотным расположением профилей [19, 20]. Интересным развитием подхода является предложенная в [21] методика, когда массив пород снимается на нулевом цикле, а контроль утечек ведётся через сравнительный анализ данных снимающихся в последующих циклах. Также существуют подходы, когда местонахождение утечек определяют с использованием наземных микрофонов, с помощью которых выявляют изменения энергии сигнала в частотном диапазоне 300 – 3500 Гц [19, 22].

Карстово-суффозионная опасность. Под карстом понимают процессы и созданные ими явления в земной коре, вызванные химическим растворением горных пород [23]. Карстово-суффозионный процесс это "взаимосвязанное развитие карстового процесса и суффозии" [10]. Опасность этого процесса определяется режимом подземных вод, строением геологического разреза, техногенным воздействием. Часто карсты оказываются залеченными или неактивными. Таковы, например, случаи, когда закарстованная область перекрыта песками, а в основании этой толщи находится глинистый слой мощностью не менее 10 м. Однако техногенное воздействие вследствие наземного и подземного строительства, бурения скважин может активизировать опасный процесс. Особенно остро стоит вопрос активизации карстовых и суффозионных явлений из-за неликвидированных скважин, по которым происходит переток грунтовых вод [13].

Еще одной проблемой оценки карстово-суффозионной опасности является существенная вариация карстовой опасности по территории города. К сожалению, невозможно определить некую среднюю карстоопасность территории и строить объекты исходя из неё – в рамках достаточно небольшой территории будут присутствовать и безопасные для строительства участки и участки на которых строить нельзя [24].

Помимо провалов карстовые процессы опасны из-за образования так называемой ослабленной зоны, представляющей собой зону деформаций покровных отложений над карстовой полостью [24]. В мегаполисах эта проблема часто возникает в связи с развитием высотного строительства [25]. Ослабленная зона также может существенно влиять как на процесс строительства, так и на эксплуатацию тоннелей метрополитенов [26].

В контексте образования полостей в заобделочном пространстве участки развития карста рассматриваются как области в которых вероятность присутствия полостей увеличивается. Непосредственными причинами здесь являются неравномерные деформации, изменение гидростатического давления, изменение свойств пород (проницаемость, водонасыщенность), наличие пустот в породном массиве над карстом [27, 28, 29]. Помимо проблемы аварийного риска при строительстве и эксплуатации существует проблема развития этих зон во времени. Карстовые процессы могут развиваться циклически, активизируясь и затухая [24]. Активизация карстового процесса может привести к резкому изменению свойств ослабленной зоны.

Для выявления карстоопасных зон используют бурение геологических скважин, однако проблема этого подхода состоит в слишком большом расстоянии между скважинами. Часто используются снесённые скважины, результаты обследования по которым могут быть нерепрезентативны в месте проходки тоннеля метро. Поэтому задача оценки карстово-суффозионной опасности часто решается с помощью геофизических изысканий.

Достаточно часто геофизическое обследование карстоопасных участков ведут с помощью сейсморазведки [30], поскольку для применяемого метода нужна достаточно высокая глубинность. Одной из причин выбора именно этой группы методов является возможность оценки физико-механических свойств грунтов по скоростям упругих волн (по регрессионным моделям). Абсолютные значения получаемых так называемых динамических параметров могут иметь достаточно большую ошибку, однако их относительные значения вполне могут иметь практическую ценность. Низкочастотная георадиолокация и электрораз-

ведка также применимы для решения задач выявления и оконтуривания карстоопасных участков [31, 32].

При обнаружении карста применяют ряд мероприятий противокарстовой защиты: тампонаж, архитектурно-планировочные мероприятия, конструктивные мероприятия [23]. Архитектурно-планировочные мероприятия подразумевают рациональное размещение сооружений, назначение их формы и этажности. Конструктивные – фокусируются на специфике конструкций возводимых сооружений.

Гидрогеологические особенности массива. Наличие на участке строительства плавунных грунтов одна из наиболее острых проблем. При механическом воздействии плавунные грунты теряют несущую способность и переходят в текучее состояние. Проблемы, которые возникают при проходке: всплытие либо опускание головы щита, потеря призабойного давления, необходимость экстренных остановок, деформации и разрушение обделки (за счёт неравномерного бокового давления), прорывы в тоннель [33, 34]. Плывуны принято выявлять на стадии инженерных изысканий. Для этого используются буровые скважины, лабораторные исследования свойств грунтов, долгосрочные измерения с помощью пьезометров, геофизические исследования в частности сейсморазведка и низкочастотная георадиолокация [35, 36].

В случае наличия плавуна на трассе ТПМК специальным образом подбирают режимы проходки [37, 38], ведут контроль параметров проходки (давление в камере пригруза, объём вынимаемого грунта и т.п.). Дополнительно ведут геодезическое и геофизическое обследование как из выработанного пространства, так и на поверхности. Контролируют осадку геодезическими методами. В ряде случаев используют предварительное водопонижение или заморозку участка массива, тампонаж.

При эксплуатации выработок также возникают проблемы, связанные с наличием рядом с тоннелем плавуна. Неравномерное боковое давление приводит к деформациям колец, развитию трещин. Плывуны способствуют развитию осадки тоннеля. Сезонные колебания УГВ делают нагрузки переменными.

Медленная фильтрационная деформация приводит к выносу мелких фракций с образованием пустот за обделкой. Методы борьбы с этими эффектами – инъецирование полостей в заобделочном пространстве, мониторинг заобделочного пространства (с поверхности, из тоннеля), усиление опасных участков тоннеля.

На проходку также существенное влияние оказывает уровень грунтовых вод (УГВ) [39, 40]. В частности, высокий его уровень и высокая его изменчивость при сезонных колебаниях. Эту проблему решают водопонижением и мониторингом с помощью пьезометров. Проблемой также может стать высокая проницаемость пород.

Геофизический контроль в первую очередь позволяет выделять УГВ, который чаще всего оценивается с помощью георадиолокации. Однако, здесь приходится сталкиваться с той проблемой, что отражённая волна не формируется при падении на границу с плавно изменяющейся на ней диэлектрической проницаемостью пород. Это показано с помощью численного моделирования в [41]. За счёт капиллярного эффекта вода поднимается над УГВ – обладая высокой диэлектрической проницаемостью она обеспечивает плавное изменение диэлектрической проницаемости пород [42]. Успешность таких работ может определяться спецификой геологического строения толщи: крупнозернистый песчаный грунт обеспечивает малый капиллярный подъём, у пылеватого высота капиллярного подъёма будет больше, а распределение воды – более плавное [43]. В [44] можно найти пример интерпретации результатов георадиолокационного обследования с выделением как УГВ, так и границы зоны капиллярного поднятия. Также в ряде случаев для выделения уровня грунтовых вод используют сейсморазведку. В частности, работы производятся методом МОВ ОГТ с использованием принципов многоволновой сейсморазведки [45].

Для подземного строительства существенен так называемый барражный эффект – подземное сооружение играет роль плотины, по одну сторону которой вода скапливается (что приводит к разжижению грунтов с понижением их несущей способности, к деформациям зданий), по другую же сторону грунты

осушаются и уплотняются. Этот процесс может быть длительным и проявиться не сразу [46].

Помимо контроля непосредственно УГВ геофизические исследования позволяют выделить ослабленные зоны в грунтовых массивах, которые становятся каналами для фильтрационных потоков [47]. В [47] также можно найти пример барражного эффекта, проявившегося в связи со строительством автозаправочной станции. Геофизические изыскания позволили предположить, что он является причиной подтопления и последующего наледообразования.

Техногенные объекты (погребённые свалки, старые фундаменты зданий, коммуникации и пр.). В целом играют роль источников проблем как при строительстве, так и при эксплуатации тоннелей.

Основные проблемы с влиянием погребённых свалок связано с возникновением деформаций грунтового массива, а также с изменением гидрорежимов [48], что может приводить к образованию полостей. Помимо нестабильности самого объекта, деформации могут возникать и на фоне биологических процессов, происходящих в свалках (разложение органики, выделение метана, изменение химической агрессивности грунтовых вод).

Техногенные насыпи и антропогенные грунты (засыпанные овраги) характеризуются неоднородностью физико-механических свойств, осадками, сложной гидрогеологической ситуацией. Их влияние приводит к долгосрочным осадкам и деформациям тоннелей, образованию полостей [49]. Проходка в подобных грунтах вызывает ряд сложностей (износ режущих органов и т.п.) [50].

Старые фундаменты зданий, заброшенные подземные коммуникации, сваи опасны в процессе ведения строительства. Они могут встречаться на трассе ТПМК, вызывать заклинивание ротора, быть причинами длительных простоев. Могут встречаться и на существенной глубине при проходке участков выровненной местности. Сваи легко могут достигать глубины проходки [51, 52].

Контроль подобных техногенных объектов в основном сводится к их выявлению и картированию. В зависимости от типа объекта хорошо подходят сейсморазведка, низкочастотная георадиолокация, электроразведка. В процессе

строительства тоннелей метро используются системы геоакустического зондирования, целью которых является предупреждение о наличии на трассе ТПМК препятствий [53, 51]. Чаще в этом случае предполагается выявление крупных валунов на трассе ТПМК, либо полей, содержащих много камней, но также выявляются и техногенные объекты.

Биологическое загрязнение геологической среды. Подобное загрязнение приводит к росту численности микроорганизмов, что вызывает увеличение объёмов производимых ими продуктов метаболизма. Всё это приводит к увеличению газонасыщенности грунтовой толщи, снижению её прочности, развитию областей разуплотнения, к деградации строительных конструкций (деревянных, бетонных, металлических) [54]. Часть этих особенностей можно контролировать с помощью георадиолокации. Например, можно оценивать загрязненность территорий городов нефтепродуктами [55], а также картировать незадокументированные подземные хранилища (цистерны), давать оценки наличия течей в них.

1.1.3. Причины и последствия возникновения полостей в заобделочном пространстве при строительстве и эксплуатации тоннелей метрополитенов

Одной из основных проблем при эксплуатации тоннелей метрополитенов является возникновение полостей на границе «грунт-обделка». Полости представляют собой нарушения сплошности массива, которые могут быть заполнены воздухом, водой, рыхлым грунтом, смесью воды и грунта. В публикациях описан довольно широкий спектр причин их образования.

На стадии строительства возникновение полостей в заобделочном пространстве связано с рядом причин. Диаметр ТПМК немного больше чем диаметр возводимого тоннеля, что приводит к образованию зазора, который частично заполняется деформирующимся окружающим породным массивом, частично заполняется инъекционным раствором [56].

Здесь может возникать ситуация, когда физико-механические свойства грунта не позволяют ему прилегать к обделке. Непосредственно при нагнетании раствора проблемы могут возникать: за счёт недостаточного давления, геометрических особенностей зазора (слишком узкий зазор не позволяет раствору заполнить часть пространства). Возможно также вымывание раствора грунтовыми водами, его перемещение в полости, находящиеся рядом с тоннелем (например, в карстовые полости); важное значение имеет проницаемость прилегающего массива [57, 58].

Особенностью процесса строительства является высокая протяжённость инженерных сооружений (тоннелей, коллекторов), что приводит к тому что геологические особенности массива постоянно меняются при проходке. Вблизи трассы тоннеля на образование полостей могут влиять валуны, карстовые пустоты, речные врезы. В этих областях реализуется изменяющаяся специфика гидрогеологических режимов, специфика проницаемости массива, особенности деформирования вмещающих пород, их гидрогеологические особенности [59, 60].

Стоит отметить что наиболее значение для процесса образования полостей имеет процесс нагнетания. Существенное воздействие может оказывать материал тампонажа [58, 61], его механические свойства после затвердевания [62], избыточное или недостаточное давление [63]. Также стоит отметить, что давление при котором происходит нагнетание может быть асимметричным, вызывает различные деформации вмещающего массива и таким образом приводит к образованию полостей [64]. Причины подобного асимметричного давления могут быть связаны с выходом из строя (засорением) одного из отверстий для нагнетания.

Здесь стоит также упомянуть воздействие проходки на массив, вмещающий тоннель. Проходка всегда идёт с деформациями массива, вызывая на поверхности так называемую мульду оседания [65]. Этот процесс затрагивает весь массив, начиная от глубин несколько ниже лотка и до поверхности и может ин-

тенсифицировать процесс образования полостей. Особенно важен здесь факт перебора грунта при проходке [66].

Наконец причины образования полостей является непосредственно сам процесс строительства: движение рабочего органа, нарушающего вмещающий массив, нагрузки при монтаже сегментов обделки, особенности тампонажа [67, 62]. Материал публикаций в основном фокусируется на особенностях нагнетания.

Публикаций по теме как конкретно изменяющееся НДС и процедуры строительства влияют в процесс проходки на массив достаточно много [68, 69], но по большей части они не решают вопросы образования полостей и не связаны с валидацией и верификацией, например, по результатам геофизических изысканий.

На стадии эксплуатации тоннелей реализуются другие процессы. Наиболее часто называемая причина – локальное размывание грунтов вблизи тоннеля [70, 71]. Чаще всего это происходит из-за проникновения грунтовых вод в тоннель через негерметичные соединения и трещины в обделке, которое сопровождается выносом грунта в тоннель [72, 73, 74]. В ряде случаев причиной этих процессов являются процессы карстообразования вблизи от тоннелей [75, 76, 70], а также изменение гидрорежимов [77]. В [78] даётся интересный анализ того как могут развиваться полости в заобделочном пространстве при поступлении воды в тоннель. Обсуждаются временной и пространственный контекст развития полости в процессе проникновения воды в тоннель с выносом песка. Выявлено, что зона эрозии склонна к форме вращающегося эллипсоида. Размер полости зависит скорее от напора воды, чем от глубины залегания.

Большую роль в образовании полостей играют особенности осадки конструкций тоннеля во время длительной эксплуатации [79, 80], а также особенности деформирования колец обделки и стыков между ними [81].

Эти процессы могут по-разному реализовываться в зависимости от состояния конструкций тоннеля – от качества материала (например, недостаток цемента в бетоне), от заполнения швов [82]. При этом состояние обделки может

существенно меняться при длительной эксплуатации – на конструктивные элементы тоннеля влияет агрессивное воздействие грунтовых вод, солей, циклов заморозки и разморозки. Существенное влияние на локальное размывание грунтов вблизи тоннеля оказывает не только нарушенность конструкций самого тоннеля, но и особенности окружающих тоннель пород. В частности влияние может оказывать форма частиц, распределение размеров частиц, НДС грунтов [83, 71].

Ряд причин образования полостей связан с особенностями строительства тоннелей, в частности с некачественным тампонажом, реализуемым в процессе строительства. Конкретными причинами в этом случае могут быть – некорректная оценка объёмов и давления при инъецировании, потеря раствора через трещины или поры в грунтовом массиве, высокая усадка тампонажного раствора [84]. Возникшие на этой стадии полости могут впоследствии обострять ситуацию, вызывая деформацию обделки, появление трещин и плохих стыков через которые вода начинает поступать в выработку.

Довольно часто реализуются причины, связанные с внешним воздействием на тоннель (техногенные причины). Тоннели метрополитенов существуют в ситуации воздействия плотной городской застройки на поверхности и сложной подземной инфраструктуры города. Над тоннелями метро возводятся новые сооружения, изменяющие напряжённо-деформированное состояние породного массива. Существенное воздействие на тоннель оказывают процессы подземного строительства: котлованы станций, проколы производимые над и под тоннелями, строительство тоннелей транспортных систем пересекающих уже существующие тоннели метро [70]. Одной из причин развития полостей вблизи тоннелей является развитие аварийных ситуаций вблизи существующих подземных коммуникаций – например из-за протечек из подземных коммуникаций [85].

Отдельную группу причин возникновения полостей составляют динамические воздействия, под которыми в первую очередь подразумевается воздей-

ствие вибрации от движущихся по тоннелям поездов [86, 87]. В некоторых случаях причиной могут быть оползни и землетрясения [88].

Большой объём исследовательских работ связан с оценкой последствий, которые может вызвать наличие областей в заобделочном пространстве.

Наличие полостей может вызвать асимметричное распределение напряжений, появление мест концентрации напряжений вблизи краёв полости [89; 90], а в ряде случаев и к разрушению тоннельных конструкций [91, 92], что может приводить к недопустимым деформациям. Усталостные периодические нагрузки приводят к деградации конструкций тоннеля, снижению прочности.

Процессы развития полостей могут приводить к нарушению гидроизоляции [93], что интенсифицирует водопиток в тоннель и сопровождается всё увеличивающимся выносом грунта [94]. В конечно счёте это приводит к тому, что образование и увеличение размеров полостей становится всё более интенсивным. В работе [95] проведено интересное модельное исследование типов повреждений обделки, вызванных пустотами, в частности трещины в бетоне, сколы, несоосность сегментов обделки, её смятие, оценка воздействия полости на несколько секций обделки. Исследовано влияние расположение и размера полости на проявление этих особенностей.

При небольшой глубине возможны ситуации с возникновением просадок поверхности и влиянием на окружающую застройку [96]. Также полости на границе "обделка-грунт" могут приводить к деформациям рельсового пути и усилению вибраций, вызываемых проходящим поездом [97]. При этом вибрации могут влиять как на тоннель, так и передаваться на фундаменты зданий находящихся вблизи от транспортного сооружения [98]. В ряде публикаций приводятся примеры, когда полости могут быть причинами образования просадок на поверхности [99, 100, 101].

Важная проблема довольно слабо раскрыта в публикациях – это вопрос того чем заполнены полость – водой, воздухом, рыхлым грунтом. Заполнение водой имеет те риски, что при вскрытии такой обделки, с целью тампонажа, возможно поступление воды в тоннель, что технологически опасно, учитывая,

что время для ремонтных работ – это короткое время ночного окна (несколько часов). Также проблему создаёт тот факт, что в случае возникновения протечки в тоннель через стыки между тубингами размер водонаполненной полости будет довольно быстро увеличиваться [78], обостряя все проблемы вызываемые полостями в заобделочном пространстве. Положительным аспектом заполнения полости водой является то, что в этом случае обеспечивается более-менее равномерное давление на обделку, что приводит к более стабильному поведению тоннеля по сравнению с ситуацией, когда полость заполнена воздухом.

Публикаций по этой теме достаточно мало. Например, публикация [102] содержит исследования, описывающие чувствительность неразрушающих методов к тому, чем заполнена полость, но исследования касаются только вопросов полостей внутри бетонных конструкций.

Решение проблемы плохого качества контакта обычно разбивается на две стадии: первоначально выявляются участки тоннеля, где за обделкой находятся полости; далее через технологические отверстия производится нагнетание тампонажного раствора в полости. Первая стадия традиционно решается с помощью геофизического обследования, чему будет посвящена отдельная глава обзора.

Стоит отметить, что причинам возникновения полостей, особенностям их влияния на несущую способность конструкций, прогнозированию поведения грунтов под воздействием пустот, анализу случившихся аварийных ситуаций, оценке последствий, опыту реконструкции, разработке подходов проектирования посвящен довольно большой объём публикаций. Это говорит о высокой важности этой области исследования. В контексте методических подходов стоит отметить, что в общем объеме публикаций, публикации, связанные с конечно-элементным и физическим моделированием, занимают довольно большую долю. При этом существенное количество работ не верифицируются по натурным результатам, что следует расценить как недостаток, в частности связанный с недостаточным развитием методов выявления и контроля разуплотнений в за-

обделочном пространстве, а также со сложностями проведения прямых обследований на эксплуатируемых объектах.

1.2. Обзор геофизических методов выявления полостей в заобделочном пространстве

Одной из наиболее важных задач контроля заобделочного пространства является выявление областей разуплотнения, а также оценка их структуры. Практическая ценность информации о состоянии заобделочного пространства состоит в том, что она позволяет планировать тампонажные процедуры [103], оценивать напряжения в обделке с помощью моделирования [104], оценивать воздействие на тоннель сейсмических волн [105]. При этом важно проблемой является вопрос, чем заполнена полость: воздухом или водой.

Прямое опробование можно было бы назвать самым достоверным методом оценки наличия либо отсутствия полости. Однако оно связано с необходимостью создавать отверстия в обделке, тем самым нарушая её целостность. Даже если отверстие невелико по размеру через него может начать поступать вода. Также проблемой будет массовое прямое обследование – невозможно производить множественное нарушение обделки с относительно небольшим шагом между сечениями тоннеля.

Это приводит к тому что подобные процедуры возможны на локальных участках и обычно не реализуются как массовые измерения. Поэтому неразрушающий контроль и, в частности, геофизические обследования – это наиболее оптимальный вариант. Они обладают достаточно высокой оперативностью, позволяют снимать большие объёмы и при этом не оказывать разрушающее воздействие на объект контроля.

Очевидная проблема геофизических методов в том, что они не могут давать результат с той же достоверностью, как и прямое обследование. При этом прямое опробование может быть средством проверки и настройки геофизического метода выявления областей в заобделочном пространстве.

Стоит отметить что геофизическое обследование может вестись как из выработанного пространства, так и с поверхности. Во втором случае чётко определить расположение, структурные особенности, тип заполнителя полостей невозможно, поскольку не хватает разрешающей способности метода.

Однако обследование с поверхности может быть важным дополнительным источником информации, который позволяет выяснить причины образования полостей. Например, сейсморазведочные и георадиолокационные измерения с поверхности позволяют выявить такие особенности строения массива как карсты, речные полеоврезы, пливуны, водонасыщенные линзы. Оценить их форму, расположение относительно тоннеля. Поэтому этот аспект также поднят в обзоре в последующих главах.

1.2.1. Сейсморазведочные изыскания

Группа методов, опирающаяся на регистрацию и последующую обработку упругих волн сейсмического диапазона частот. Параметром среды для сейсморазведочных исследований является так называемая акустическая жёсткость. Контрастное изменение акустической жёсткости является причиной отражения упругой волны, которое описывается коэффициентом отражения. Для выявления полостей при обследовании из выработанного пространства не используется, однако позволяет производить обследование рядом с коллектором, тоннелем метро с целью оценки структуры и состояния заобделочного пространства.

Наиболее отработаны и распространены методики: корреляционный метод преломлённых волн (КМПВ, иногда просто – МПВ) и метод отражённых волн в модификации общей глубинной точки (МОВ ОГТ, иногда МОГТ). Несмотря на длительную историю сейсморазведка испытывает активное развитие в последние десятилетия, как за счёт разработки новых технологий, так и за счёт усовершенствования старых. Активно развиваются такие методы как

MASW (многоканальный анализ поверхностных волн), сейсмическая томография, активно внедряется многоволновая сейсморазведка.

Особым достоинством сейсморазведочных методов является возможность оценки упругих модулей для различных слоёв пород [106]. При этом абсолютные значения значений могут иметь достаточно большую ошибку, однако, относительные оценки позволяют выявлять изменения этих параметров в рамках площадки обследования [107]. В этом контексте особенно выигрывает такой метод как MASW.

Рассмотрим несколько сейсморазведочных методов, используемых при выявлении неоднородностей в массивах, в том числе рядом с тоннелями и подземными коммуникациями.

МОВ ОГТ и КМПВ – традиционные сейсморазведочные методы, обладающие глубиной от первых метров до нескольких десятков метров, что является их главным достоинством наряду с возможностью определять механические свойства грунта. Их недостатком по сравнению, например, с георадиолокацией является относительно низкая разрешающая способность. Тем не менее эти методы позволяют выявлять, картировать, исследовать внутреннюю структуру множества геологических объектов (карсты, речные врезы, малая тектоника). Также с их помощью можно прослеживать и контролировать УГВ (в ряде случаев они могут решать эту задачу лучше, чем георадиолокация) [45]. По применению этих методов легко можно найти большой объём публикаций [30, 108, 109, 110].

MASW. MASW опирается на регистрацию поверхностных волн (Рэлея), для дисперсионной кривой которых производится инверсия с получением разреза скорости сдвиговых волн. Достоинство метода – лучшая устойчивость к шумам и затуханию в рыхлых отложениях, более детальная картина по сравнению с картиной которую дают методы с использованием отражённых волн на определённых глубинах. Недостаток – малая глубинность, трудности с интерпретациями границ структурных особенностей массива (например, трудно картировать границы карста). В контексте методики MASW достаточно хорошо

развито использование не только активных источников возбуждения, но и пассивной регистрации сейсмического шума. MASW активно используется для выявления протечек, выявления карстовых пустот, разломов, оценки результатов укрепления грунтовых массивов [111, 112, 106].

Можно выделить два основных типа сейсмической томографии: поверхностная и с использованием скважин (межскважинная томография). Достоинства сейсмической томографии с использованием скважин в меньшей зависимости от помеховых факторов (в частности от влияния поверхностных волн), в возможности производить обследование рядом с объектом контроля, с меньшей зависимостью от эффекта падения разрешающей способности от глубины исследования. Её недостаток – сложность обустройства скважин.

В целом томография даёт более устойчивый к шумам результат, по сравнению с МОВ ОГТ более проста в интерпретации и лучше интегрируется с данными других методов. Так же активно развиваются системы пассивной регистрации сейсмического шума, по результатам анализа которого строится томографический разрез [113]. По теме сейсмической томографии достаточно много публикаций [114, 115; 116], при этом стоит отметить, что сейсмическая томография всё чаще оказывается частью комплекса и всё чаще делается как пассивный метод.

Одно из активно развивающихся направлений в сейсморазведке является внедрение подходов многоволновой сейсморазведки, которая подразумевает работу с широким спектром типов волн, в первую очередь получения разрезов отдельно по поперечным и продольным волнам [30, 117]. При использовании многокомпонентных сейсмоприёмников, либо нескольких сейсмических кос с различными сейсмоприёмниками к данным можно применять так называемый поляризационный метод, позволяющий выделять волновые пакеты различных типов волн. Работы методами многоволновой сейсмики дают определённые преимущества. В [45] можно найти достаточно интересные, полученные в мегаполисе, примеры когда раздельная интерпретация сейсмических разрезов ОГТ построенных по *P*- и по *S*-волнам позволяет получать дополнительную

информацию о структуре массива пород. В частности, контролировать положение УГВ.

В контексте развития аппаратного обеспечения сейсморазведки просматривается тенденция к переходу от сейсмостанций к телеметрическим системам. В традиционных сейсмостанциях сигнал от сейсмоприёмников на сейсмостанцию передаётся в аналоговой форме. При этом на него накладываются переходные и внешние помехи, фазовые и амплитудные искажения, связанные с передаточной характеристикой кабелей. Телеметрические системы подразумевают, что функции предварительной обработки (предусиление, оцифровка) зарегистрированных сигналов переключаются с собственно сейсмостанции на блоки обработки, вынесенные к датчикам. В [118] приведены примеры, сейсмограмм иллюстрирующие повышение качества собираемых с помощью телеметрических систем данных в условиях мегаполиса.

В финале раздела стоит отметить, что методы МОВ ОГТ, MASW и сейсмической томографии обладают достаточно высокой трудоёмкостью и стоимостью, упоминания о которых можно найти в ряде статей [119, 120, 121], что ограничивает объём съёмки на площадке обследования. Для съёмок с поверхности сейсморазведочные методы довольно трудоёмки по сравнению, например, с георадиолокацией, позволяющей снимать большой объём профилей и таким образом детально анализировать ситуацию. Однако они могут давать дополнительную информацию и существенно дополнять общую картину.

1.2.2. Сейсмоакустические изыскания

Довольно большое место в выявлении полостей за обделкой занимают акустические методы неразрушающего контроля. В практике обследования бетонных конструкций наиболее распространены два направления: ультразвуковые и сейсмоакустические исследования [102].

Ультразвуковые исследования подразумевают измерение скоростей поверхностных волн, которые позволяют определять прочность бетона, выявлять

трещины, оценивать модули упругости [122], находить полости внутри конструкций [102]. Спектр задач ультразвуковых исследований довольно близок к задачам, с которыми приходится сталкиваться при обследовании обделок тоннелей, однако они в основном используются для анализа состояния самой обделки и редко для выявления полостей за обделкой.

В ряде публикаций можно встретить описание оборудования и результаты измерений методом ультразвуковой томографической съёмки с односторонним доступом [123, 124]. Основной проблемой этого подхода является высокая трудоёмкость измерений, требующая относительно большого времени работ на каждом небольшом участке обделки. В случае если необходимо обследовать верхнюю часть тоннеля, работа с помощью такого оборудования требует организации доступа (лестницы, полати, передвижной состав). В результате подобные подходы вполне состоятельны в случае если нужно детально исследовать небольшой участок тоннеля, имеющий особую важность. Для массового обследования обделок этот подход реализовать технически сложно.

Сейсмоакустические исследования представлены в основном двумя основными методами: *impact-echo* (IE) и *impulse response* (IR). Принципы обследования заобделочного пространства этими методами близки к принципам обследования фундаментных плит [125]. Стоит отметить что в отечественных публикациях терминология этих методов до сих пор не устоялась – один и тот же метод довольно часто называют разными терминами. IE также называют «толщинным резонансом», а IR «методом анализа отклика на ударное воздействие». Встречаются и другие обозначения этих методов (виброакустический, собственно сейсмоакустический). Чтобы избежать этой путаницы далее по тексту эти методы будут называться IE и IR.

Физической основой IE является возникновение стоячих волн, на которые влияют особенности отражения сигнала на границе обделка-грунт. В качестве информативного параметра при выявлении полостей используются смещения спектральных максимумов и их выраженность [126, 127, 128, 129, 130, 131], анализ формы сигнала и время существования выраженных спектральных мак-

симумов [132, 133, 127], параметры корреляционных функций [134]. Источником упругих колебаний может быть, как удар, так и оборудование способное излучать линейно-частотно модулированный сигнал.

При использовании IR анализируется отклик конструкции на ударное воздействие [135, 136, 137; 103]. По сравнению с IE IR использует более низкие частоты и большую силу удара [103]. Наличие полости за обделкой приводит к увеличению амплитуды изгибных колебаний [138]. Информативными параметрами являются как спектральные, так и волновые особенности откликов. К недостаткам IR относят проблематичность выделения малых полостей [135, 139]. К достоинствам может быть отнесена простота и скорость выполнения измерений [139], устойчивость к помехам. Относительная простота выполнения полевых работ позволяет использовать смонтированные на досылочных штангах датчик и ударник, что облегчает доступ к участкам тоннеля находящимся на высоте.

Помимо этих основных методов поиск полостей за обделкой может вестись с помощью других технологий. Например, с помощью регистрации микрофоном акустических волн, вызванных ударом [140], такой метод иногда называют Impact sound diagnosis [141]. Другой подход подразумевает регистрацию и изучение спектров микросейсмических колебаний, накапливаемых в течение некоторого времени с помощью датчиков устанавливаемых на обделке [142]. Третий опирается на излучение и регистрацию S-волн ультразвукового диапазона частот с получением томографических изображений, описывающих строение бетонных конструкций [143, 144]. Список методов можно расшить, однако эти подходы связаны с рядом сложностей, таких как дороговизна оборудования, неустойчивость к акустическому шуму, трудоёмкость и пр.

В целом можно отметить, что такие достоинства IR как оперативность контроля, возможность обследования труднодоступных участков, высокая скорость обследования даёт ему преимущество. В [139] предполагается что массовые измерения можно производить с помощью IR, а более детальные и важные участки обследовать с помощью IE.

1.2.3. Георадиолокационные изыскания

В основе георадиолокационного обследования лежит излучение и приём электромагнитных волн радиочастотного диапазона. Подобные волны при излучении с помощью испускающей антенны распространяются в объекте контроля и могут быть зарегистрированы с помощью приёмной антенны.

В контексте контроля полостей в заобделочном пространстве можно выделить два основных подхода. Первый это георадиолокационная съёмка из выработанного пространства (из тоннеля) с помощью высокочастотных георадаров. Этот тип обследования подходит только для железобетонных обделок и решает задачу непосредственного выявления полостей на границе «обделка-грунт» [145, 146, 147, 148, 103]. Второй подход – это съёмка с поверхности с помощью низкочастотных георадаров. При использовании частот 50 - 25 МГц глубины проходки тоннеля метрополитенов в первые десятки метров вполне достижимы, что позволяет анализировать структуру прилегающего к тоннелю массива. В этом случае нельзя конкретно указывать на места наличия либо отсутствия полости, но возникает возможность оценить присутствие в разрезе областей разуплотнённых грунтов (карсты, речные врезы, пливуны) [149, 31], конкретным образом спроектировать ремонт тоннеля (например, оценить эффективность тампонажа), предположить наличие воды в полостях и т.п.

При обследовании тоннелей реализуют два основных подхода. Первый (air-coupled) подразумевает относительно быстрое продвижение по тоннелю на транспортном средстве с непрерывной съёмкой. Такой подход подразумевает достаточно малую глубину обследования, и высокий уровень ошибок типа пропуска цели. Однако он позволяет снимать большие объёмы выработок выявляя наиболее опасные участки. Второй вариант съёмки (ground-coupled) подразумевает работу на локальных участках с непосредственным контактом георадара с обделкой. Это позволяет получать гораздо более детальную картину, но скорость такой съёмки существенно ниже [150, 151].

Достоинствам георадиолокационного обследования при выявлении полостей из выработанного пространства является относительно низкая трудоёмкость измерений, непрерывность получаемых профилей, высокая разрешающая способность, возможность детального изучения участка за счёт съёмки множества профилей. К недостаткам относится невозможность обследовать чугунные обделки, сложность обследования многослойных конструкций (стены на станциях покрытые отделкой), подверженность помеховому воздействию [152, 153, 43]. А также сложность и трудоёмкость интерпретации получаемых данных [154]. При этом результаты работ слишком подвержены субъективному фактору при интерпретации [155].

Касательно помех можно сказать, что массив пород приходится обследовать через преграду, которой является армированная обделка. На низких частотах с длиной излучаемой волны больше размера ячейки сетки арматуры она проявляет свойства сплошного экрана [152], не пропускающего излучение, что исключает возможность локации полостей. Эту проблему можно решить если использовать высокочастотные георадары (от 500 МГц и выше [156]). Однако полностью эта проблема не решает, поскольку армирование создаёт существенное помеховое воздействие, которое мешает анализировать отражения от границы «грунт-обделка». Отдельной сложностью являются также отражения от окружающих профиль объектов, называемые также "воздушными" помехами [156].

Признаками полостей в заобделочном пространстве называют: повышенную амплитуду регистрируемого сигнала [145], множественные переотражения и «звон» [157, 158], изменение фазы сигнала [148], специфика наблюдаемых осей синфазности [158], изменения спектров регистрируемых сигналов [159]. Причиной возникновения "звонов" обычно называют либо границу с увеличивающейся проводимостью [160], когда полость заполнена водой, либо многократные переотражения в объектах геосреды [43]. Подобный случай может наблюдаться при заполнении полости как водой, так и воздухом.

По публикациям стоит отметить что при большом объёме физического и компьютерного моделирования просматривает достаточно ограниченный объём натурального материала, получаемого в реальных тоннелях на длительный эксплуатируемых обделках.

Стоит обратить внимание на одну из проблем связанную с формой полостей [161] – они могут быть тонкими (вызванными ситуациями при первичном нагнетании) и более широкими (связанными с геологическими особенностями окружающего тоннель массива пород). Первый вариант полостей хуже выявляется с помощью георадаров, формируя ситуацию пропуск цели и в этом отношении георадиолокация будет проигрывать сейсмоакустическим методам.

Поскольку проблема сложности и субъективности интерпретации результатов георадиолокационной съёмки является довольно заметной, большой объём публикации направлен на то чтобы автоматизировать интерпретацию. Распространённый подход это найти эффективные информативные параметры (такие как амплитудный максимум, энергия сигнала, частота спектрального максимума и другие), которые будут указывать на наличие полости при обработке радарограммы [162]. Довольно часто непосредственно в качестве системы принятия решения предлагается использовать искусственные нейронные сети [163, 164], при том что статистические методы ещё недостаточно хорошо разработаны. Это кажется упущением, поскольку подход искусственных нейронных сетей обладает своими недостатками – в частности он требует больших выборок для обучения и создаёт проблему недостаточной обоснованности полученного решения. Этими проблемами не страдают статистические методы.

Помимо задач выявления полостей георадары активно используются при выявлении течей [165, 166, 167, 168]. При обследовании пространства тоннеля это позволяет проследивать нарушение в толще обделки, выявлять места поступления воды в выработку. При обследованиях с поверхности это позволяет выявлять опасные участки, где наземные коммуникации могут быть нарушены и способны влиять на массив пород и конкретно тоннели.

Также георадары в контексте проблем эксплуатации выработок активно используются для контроля параметров армирования [169, 170]. Это нужно для того чтобы корректно вести сейсмоакустические измерения (уплотнение сетки армирования будет приводить к изменению пороговых значений по которым принимается решение о наличии либо отсутствии полости). Что бы корректно анализировать результаты георадиолокационной съёмки [157]. Для того чтобы верно оценивать воздействие тоннелей, коллекторов и объектов строительства вблизи друг на друга.

Помимо традиционно решаемых задач существуют попытки расширения сферы применения георадиолокации для контроля армирования. Георадары используются для оценки диаметра прутков армирования по энергии отражённых сигналов [171], для мониторинга процессов корродирования стержней армирования по изменению информативных параметров, вычисляемых при обработке георадиолокационного сигнала [172]. В некоторых случаях отражённые от ряда армирования сигналы используются как индикатор состояния бетона между стержнями и поверхностью конструкции (защитный слой) [173, 174].

Активно развивается обработка данных, собираемых при георадиолокационных обследованиях. Распространены спектральные преобразования (обычное и оконное преобразование Фурье; кепстральный анализ, wave-let-анализ); миграция; получение огибающей сигнала и её обработка; различные формы декомпозиции и фильтрации регистрируемого волнового поля [175, 176, 177, 178]. Специфическим вариантом является анализ радарограмм, как изображения (двумерного дискретного поля), которое можно подвергать специальным преобразованиям [179, 180, 181].

Так же активно развивается анализ информативных параметров [172, 182, 183], когда по результатам обработки волновых форм вычисляются те или иные признаки, способные указывать на аномалию, либо подвергающиеся дальнейшей обработке. Информативные параметры можно использовать не только как автоматизированную систему принятия решения, но и как рекомендательную. В случае аномальных значений информативного параметра участок в дальней-

шем может быть проанализирован оператором с принятием окончательного решения.

В качестве подобных параметров могут выступать информационная энтропия, скорость, регрессионные коэффициенты [184]. Это позволяет извлекать дополнительную информацию из данных и частично автоматизировать их обработку и интерпретацию. Если в сейсморазведке подобны подход давно занял существенное место, то в георадиолокации наблюдается недостаток работ в этой области. При анализе литературы можно найти относительно небольшое количество публикаций по этой теме [154, 185]. В иностранных публикациях тема представлена шире [186, 187, 188], однако её разработанность не сравнима с разработанностью в области сейсморазведки.

1.2.4. Электроразведочные изыскания

Электроразведка один из самых активно используемых методов для исследования структуры массива пород вблизи от подземных сооружений. В основном метод используется для работы с поверхностью.

В практике в основном такие методы как вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) и электротомография (ERT – Electrical Resistivity Tomography). Поскольку присутствие в массиве воды существенно влияет на удельное электрическое сопротивление, её повышенное содержание в тех или иных участках хорошо выявляемо с помощью электроразведочных методов. Это может быть, как вода, являющаяся результатом протечек из подземных коммуникаций, так и вода, собирающаяся в разуплотнённых участках породного массива (карсты, речные врезы). Также с помощью электроразведки есть возможность выявлять подземные коммуникации, полости, контролировать загрязнение грунтовых вод, изменения УГВ.

Публикаций по этой теме достаточно много [189, 190, 191, 192, 193, 194, 195] поскольку электроразведка является оперативным, недорогим и чувствительным к особенностям породного массива методом. Недостатков у этой

группы методов тоже достаточно много. Относительно небольшая глубинность (10-50 м). Часто для ERT нужно прокладывать длинные профили, мешающие движению транспорта – не всегда можно найти место при обследовании в городе. Не всегда есть возможность монтировать электроды, поскольку поверхность занята асфальтом. Частичным решением может быть использование бесконтактной электроразведки, которую допустимо реализовать на коротких профилях с возможностью быстро производить съёмку. Ограничением этого подхода является небольшая глубинность и разрешённость результатов.

Недостатком электроразведки является сложность интерпретации и зависимость от условий площадки – техногенные грунты, располагающиеся в верхней части разреза; высокоомные либо низкоомные среды; влияние погоды; электромагнитный шум от линий электропередач. Есть сложности в определении структуры массива в случае если разуплотнённая область представляет собой множество небольших пустот, которые в целом будут немного влиять на удельное сопротивление, но их структуру будет трудно анализировать [114].

Стоит отметить что очень часто ERT оказывается в комплексе с какими-нибудь другими методами, часто сейсморазведочными (MASW, МОВ ОГТ), что как раз связано со сложностями в интерпретации материала.

Высокая продуктивность электроразведки позволяет использовать её для мониторинга процессора щитовой проходки, контролируя движение воды вблизи тоннеля [196]. По большей части электроразведка – это метод обследования с поверхности, однако можно встретить и результаты съёмки из тоннеля (часть электродов расположено в тоннеле, часть на поверхности) [197]. ERT можно реализовать с расположением электродов в скважинах [196].

Отдельно стоит сказать о переходных электромагнитных методах (ТЕМ – Transient Electromagnetic Methods). Методика этих измерений предполагает генерацию первичного поля и измерение вторичного, индуцированного вихревыми токами. Зарегистрированные при этом начальные участки сигнала соответствует приповерхностным областям породного массива, более поздние участки сигнала более глубоким. Зарегистрированный сигнал подвергается инверсии

что позволяет получить разрез удельного сопротивления. Достоинства – высокая глубинность (сотни метров), оперативность метода, портативность оборудования. Недостатки – ограничение применения в зависимости от свойств массива (высокоомные разрезы являются проблемой), недостаточная разрешающая способность для ряда задач, наличие мёртвой приповерхностной зоны (10-20 м). Относительно активно используется для выявления карстовых полостей, обводненные трещины, водонасыщенных областей [198, 199, 200].

ТЕМ может использоваться для прогнозирования условий щитовой проходки на глубину 50-100 м от забоя. Само оборудование ТЕМ (петли, передатчики, приемники) устанавливается на заборе и работает в момент остановки щита – например, при монтаже обделки [201]. ТЕМ может использоваться для определения расположения полостей в заобделочном пространстве [202]. Проблемой могут быть помехи от металлических конструкций (рельсы, армирование, оборудование ТПМК).

Дополнить общую картину необходимо методом самопроизвольной поляризации (он же метод естественного электрического поля), который основывается на измерении естественных электрических потенциалов, аномалии которых вызываются гидрогеологическими особенностями (потоки грунтовых вод, зоны окисления-восстановления). Важен для контроля карстовых полостей, выявления утечек. Обычно входит в комплекс методов (часто вместе с ERT). Достоинства – чувствителен к гидрогеологическим особенностям. Недостатки – чувствительность к помехам, связанные с ними сложности с интерпретацией результатов [203, 204].

Также используется метод вызванной поляризации. Принцип метода состоит в изучении вторичных электрических полей (вызванных процессами поляризации), возникающих в земле под действием первичного электрического тока. Метод позволяет выявлять закарстованные участки и другие нарушения (например, трещины, заполненные водой). Может использоваться с поверхности и в забое [205, 206].

1.2.5. Другие методы

Гравиразведка. Гравиразведка достаточно редко проводится в условиях города, однако существует ряд публикаций, указывающих на возможность ограниченного использования этого метода в условиях города [207, 208; 209]. С помощью гравиразведки возможен поиск подземных объектов (фундаменты зданий, тоннели метро), анализ гидрогеологической ситуации, обнаружение карстовых полостей, оценка плотности грунта, выявление разломов, нестабильных зон для планирования строительства [210, 211].

Аномалии от искомых объектов составляют первые десятки микрогал [207]. При этом на процесс измерения влияет достаточно большое количество помеховых факторов (подземные объекты, здания, особенности рельефа), а погрешности поправок могут превосходить аномалии, создаваемые искомыми объектами. Поэтому в большинстве случаев подразумевается, что гравиразведка возможна только в благоприятной ситуации.

Одним из решений здесь может быть проведение гравиразведки в форме многоцикловых исследований – измерения производятся в одних и тех же точках через некоторые промежутки времени. В этом случае окружающая обстановка (здания и рельеф) не меняются, однако может изменяться гидрогеологическая ситуация: существует возможность контролировать движение подземных вод, выявлять места их скопления (скопление вод увеличивает плотность пород) [207]. С помощью микрогравиметрии возможно определение пустот под улицами [212] – эта работа также потребовала разработки системы коррекции гравитационного влияния помеховых объектов. Разработка методологии расчёта подобных поправок развивается как отдельное направления современной микрогравиметрии [213].

Магниторазведка. Применяется в городской инженерной геофизики для решения задач обнаружения подземных объектов (металлические трубы, цистерны с отходами, полости), а также загрязнений среды поскольку магнитные свойства веществ (минералов, загрязнителей) различаются и могут быть выяв-

лены с помощью магнитометров [214, 215]. Метод пассивный, не требует воздействия на площадку обследования (например, бурения), достаточно оперативен. Недостатки – большое количество помех в городе, ограничен по задачам (неэффективен для немагнитных материалов). Метод часто используется в комплексе с другими методами, что говорит об ограничениях по решаемым задачам.

Радиометрические методы. Основаны на измерении естественной радиоактивности горных пород, возникающей за счёт гамма-излучения калия, урана и тория, помогает в выявлении глинистых зон. Методы – гамма-каротаж (в скважинах), поверхностная гамма-спектрометрия. Работают через уточнение геологического строения. Практически всегда работают в комплексе с другими методами (электроразведка, сейсморазведка) [216, 217, 218].

Инфракрасная термометрия. Метод основан на регистрации температурных различий на поверхности тоннеля, вызванных полостями, которые нарушают теплоперенос [219]. Может быть реализован в пассивном и активном (подразумевается нагрев локального участка) вариантах. В пассивном варианте подразумевает дистанционное ведение измерения, что даёт ему высокую оперативность и возможность снимать большие объёмы. Недостатки – низкая эффективность при малых разницах температур, сезонные ограничения.

Анализируя ситуацию в целом можно отметить широкое разнообразие методов, используемых при анализе структуры и свойств заобделочного пространства при обследовании с поверхности. Обследование же из выработанного пространства (из тоннеля) существенно ограничено в основном сейсмоакустическими методами и георадиолокацией. Существует ряд методов таких как ультразвуковое обследование или ТЕМ (переходные электромагнитные методы), однако их недостатки и единичные публикации по применению этих методов говорят о том, что требуется существенная доработка и дополнительные исследования в этих сферах.

Сейсмоакустические методы в основном представлены двумя основными методами: Impulse Response и Impact Echo. При этом Impulse Response обладает такими существенными при съёмке протяжённых участков тоннелей, достоинствами как высокая оперативность и возможность работы в труднодоступных местах. Георадиолокационная съёмка тоже может вестись достаточно быстро, однако её проблемой является сложности интерпретации.

1.3. Основные проблемы и направления их решения при выявлении полостей в заобделочном пространстве

Опираясь на результаты обзора, можно отметить, что проблема недостаточной достоверности геофизического прогноза наличия полостей в заобделочном пространстве поднимается во множестве публикаций [161, 220, 157]. Основная причина возникающих ошибок – это помеховые факторы.

Одним из недостатков сейсмоакустического метода является низкая пространственная разрешающая способность. Метод не позволяет снимать с малым шагом по поверхности тоннеля. Так в [221] подразумевается шаг вдоль по тоннелю 3-5 м. Другой проблемой является сложность обследования обделок большой толщины (например, 0,75 м). При IR сложно возбудить обделку такой толщины. Стоит также отметить, что с IR сложно работать при обследованиях многослойных конструкций [222]. В этих ситуациях выигрывает IE.

В случае анализа спектров особенности возбуждения и внешние шумы могут осложнять выявление полостей. По статьям можно найти такие недостатки метода, как принятие решения на относительной основе (нет обоснованных критериев принятия решения) [223]. Указывается также на проблемы, связанные с внесением помех за счёт работы разных операторов (различные сила удара, его характер) [224]. Также указывается на влияние поверхности к которой прикладывается датчик регистрирующий отклик [224].

При георадиолокационном выявлении полостей можно констатировать большое количество источников помех: металлические элементы обследуемой

конструкции – арматура, крепёжные элементы тубингов [161, 157]; стыки между ними, которые могут приняты за идентификаторы полости [148]. «Воздушные» помехи, создаваемые трубопроводами, рельсами, проводами [225]; особенности самого оборудования, в частности прямая волна [225]. В [226] указан один из наиболее существенных помеховых факторов, который возникает при обследованиях длительно эксплуатируемых обделок – неоднородность материала обделки.

Одну из проблем георадиолокационного выявления полостей стоит отметить отдельно. По георадиолокационным исследованиям трудно принимать решения о геометрии полости. В материале [161] предлагается разделять два типа полости. Первые, образующиеся из-за проблем с заполнением зазоров тампонажным раствором. Обычно это тонкие полости, вытянутые по вертикали и горизонтали. Второй тип полостей связан с неоднородностями в окружающем породном массиве – они могут иметь округлую форму и большой размер в глубину и в высоту. Это два различных типа дефекта можно различать с помощью георадиолокации в основном на уровне субъективной интерпретации оператора, со всеми недостатками этого подхода.

Можно отметить, что при георадиолокационном выявлении полостей довольно часто нужна интерпретация исходного зарегистрированного волнового поля, что обычно предполагает субъективность, которую вносит специалист, принимающий решение. Сложности, которые тут называются, связаны не только с субъективностью, но и с нагрузкой на человека, с ухудшением его внимания в процессе принятия решения [161, 227, 228, 229]. Необходимость давать большой объём времени на камеральную обработку снижает оперативность метода и ограничивает его применение в условиях необходимости снимать протяжённые участки тоннелей.

Анализируя научную литературу в целом можно сделать вывод, что основными направлениями развития методов выявления полостей в заобделочном пространстве можно назвать следующие:

– улучшение методов обработки данных и подавления помех;

- сбор данных с помощью натуральных измерений с последующим принятием решения с использованием статистических методов или искусственного интеллекта;

- использование методов компьютерного моделирования (для создания определённых помех с целью разработки методов их фильтрации, для создания синтетических наборов данных с целью разработки методов распознавания полостей, для оптимизации оборудования и режимов его использования);

- комплексирование с новыми методами, в том числе с появляющимися и активно развивающимися (например, с ТЕМ или ультразвуковыми обследованиями обделок);

- развитие роботизированных систем съёмки, которые позволят реализовывать регулярный мониторинг состояния заобделочного пространства.

При этом перспективы развития искусственного интеллекта имеют свои сложности. Поскольку подтверждение наличия полости подразумевает в большинстве случаев вскрытие отделки с нарушением её целостности собирать большие объёмы данных сложно. Эта проблема особенно остро стоит для использования сетей глубокого обучения, требующих повышенного объёма выборок.

Проблема с недоступностью большого объёма данных для которых известна ситуация наличия и отсутствия полости связана отчасти и со сложностью, неопределённостью исходного объекта. Вариации в размерах и геометрии полостей в заобделочном пространстве [230, 231], возможные смещения (в статистическом смысле) данных от участка обследования к участку [232] подразумевают, что объёмы данных на которых будут обучаться искусственные нейронные сети должны быть достаточно большими, содержащими репрезентативным объём образов. В этом контексте статистические подходы, в том числе непараметрические методы, обладающие устойчивостью к ситуациям малого объёма выборки, являются выигрышным решением.

Также существует проблема низкой интерпретируемости (необоснованности результата), который создают подходы с использованием искусственного

интеллекта, и связанная с ней проблема невозможности предъявлять претензии в случае ошибки, если непонятно как была совершена эта ошибка. Что является проблемой для сфер связанных с риском [233].

Стоит отметить, что в будущем возможны ситуации, связанные с развитием автоматизированного сбора данных, развитием методов "обучения без учителя", снижением зависимости нейронных сетей от объема выборки, которые могут привести к частичному изменению ситуации.

Возвращаясь к статистическим подходам можно заметить, что при том что в статьях присутствуют попытки подобрать те или иные информативные параметры для задач определения факта наличия либо отсутствия полости практически не решаются вопросы какие именно информативные параметры на основании каких критериев, для каких площадок, с использованием какой предварительной обработки сигналов будут включены в комплекс, по которому будет приниматься решение. Очевидно, что это существенный и важный набор вопросов который требует своего решения.

Выводы по результатам обзора научной литературы. Постановка задач исследования

В результате проведенного анализа научной литературы можно прийти к следующим выводам. Для выбранной области исследования характерен определенный ряд проблем, среди которых ключевыми являются следующие.

1. Направленность существующих методов в основном на картирование областей ослабленного контакта без оценки свойств и состояния массива в заобделочном пространстве;
2. Присутствие проблем с подтверждением получаемого прогноза и существование проблем с его достоверностью, что требует дальнейшего развития методов геофизического прогноза полостей в заобделочном пространстве;
3. Воздействие на результаты геофизического прогноза большого количества помеховых факторов, среди которых присутствуют как общие для различ-

ных методов факторы (конструктивные особенности обделки, трудоёмкость съёмки, либо интерпретации), так и источники помех специфичные для каждого метода («воздушные» помехи для георадиолокации, характер удара и особенности поверхности для сейсмоакустического исследования). Стоит отметить, что влияние специфических (воздействующих только на конкретный метод) помеховых факторов более существенно. Это позволяет предположить, что комплексирование основных методов существенно повысит эффективность прогноза.

4. Слабая разработанность вопросов того какие именно информативные параметры на основании каких критериев, с использованием какой предварительной обработки сигналов можно включить в комплекс, по которому будет приниматься решение о наличии либо отсутствии полости за обделкой.

Обобщая выявленный спектр проблем, можно определить можно поставить ряд задач исследования:

1. Провести анализ современного состояния основных проблем и методов выявления полостей в заобделочном пространстве подземных сооружений.

2. Провести геофизические исследования (натурные эксперименты) в тоннелях метрополитенов на участках, где расположение полостей известно. Сформировать эмпирическую базу исследования.

3. Выявить закономерности поведения параметров сигналов, регистрируемых в процессе проведения геофизических обследований, в зависимости от наличия либо отсутствия полости, а также для случаев различного типа заполнителя полости (вода, воздух, смесь воды с грунтом).

4. Разработать метод выявления структуры заобделочного пространства, позволяющий определять тип заполнителя полости.

5. Разработать принципы обработки сигналов, направленные на повышение помехоустойчивости сейсмоакустического и георадиолокационного контроля при контроле заобделочного пространства подземных сооружений.

6. Разработать принципы отбора информативных параметров при объединении их в комплексы, используемые при принятии решения о наличии либо отсутствии полостей в заобделочном пространстве.

7. Разработать комплексный геофизический метод обнаружения полостей в заобделочном пространстве при строительстве и эксплуатации подземных сооружений.

Глава 2. Развитие метода сейсмоакустического контроля заобделочного пространства

Основой для исследований, описанных в этой главе, стали плановые съёмки, а также натурные эксперименты, производившиеся в тоннелях Московского метрополитена. В качестве основного сейсмоакустического метода обследования был выбран метод Impulse Response (IR), по причине его высокой оперативности и низкой трудоёмкости при обследовании тоннелей в верхних точках свода.

Исследование было направлено на решение двух конкретных задач, возникающих при контроле заобделочного пространства: выявление участков тоннеля на которых присутствуют полости при обследовании из тоннеля и выявление типа заполнителя полости (вода, воздух, смесь грунта и воды). В процессе исследования также были произведены работы по контролю заобделочного пространства вблизи эксплуатируемых тоннелей в ситуации, когда под ними ведётся проходка новых тоннелей. Это позволило выявить ряд особенностей изменения напряжённо деформированного состояния в процессе проходки новых тоннелей.

2.1. Результаты натурных измерений в тоннелях московского метрополитена

Натурные измерения производились в реальных условиях тоннелей действующего метрополитена. Обследование велось в течение времени, когда пути свободны от проходящих поездов (так называемое "ночное окно"). Использовалась двухканальная сейсмостанция ИДС-1 [234] как с электродинамическими, так и пьезокерамическими преобразователями. Параметры регистрации: полоса пропускания регистрирующей системы от 7 Гц до 8 кГц, частота дискретизации 96 кГц, длительность реализации 21.3 мс. В процессе обследования преобразователь прижимался к обделке. На расстоянии 10-30 см от преобразователя про-

изводилась серия из 5-10 ударов по обделке. На рис. 2.1 представлена схема расположения точек обследования на внутренней поверхности тоннеля. Запуск процесса регистрации происходил по превышению порога, с сохранением предыстории сигнала. Полученные сигналы усреднялись. На рис. 2.2 представлен пример волновых форм для различных вариантов заполнителя полости за обделкой.

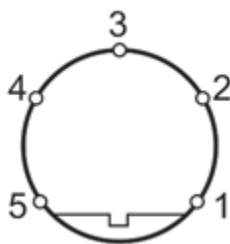


Рис. 2.1. Схема расположения точек обследования на внутренней поверхности тоннеля

При отсутствии полости (рис. 2.2 а) характерной особенностью волновых форм является малая амплитуда и быстрое затухание колебаний. Грунт за обделкой выполняет роль демпфера. При наличии полости волновые формы характеризуются большей амплитудой и слабым затуханием (рис. 2.2 б). В этом случае обделка играет роль мембраны, а демпфирующее воздействие среды за обделкой гораздо меньше, чем при наличии грунта. В некоторых случаях наличие полости вызывает также проявления низкочастотных спектральных компоненты (рис. 2.2 в).

Описанные особенности сигналов удобно оценивать по энергетическому параметру

$$E_p = \int_0^{t_{\max}} A^2(t) dt, \quad (2.1)$$

где $t_{\max}$ — длительность записи сигнала; E_p — значение энергетического параметра за отрезок времени от $t = 0$ до $t = t_{\max}$; $A(t)$ — значения сигнала. Для условий цифровой обработки сигналов выражение (2.1) принимает вид

$$E_D = \sum_{i=0}^{n_{\max}} A_i^2 \cdot \Delta t, \quad (2.2)$$

где $n_{\max}$ – номер отсчёта, соответствующего $t_{\max}$; A_i – i -ое значение сигнала; E_D – энергетический параметр на отрезке наблюдения с номерами отсчётов $n = 1 \dots n_{\max}$; Δt – интервал дискретизации. Превышение определённого порогового значения этим параметром будет указывать на наличие полостей за обделкой. Для большего удобства оперирования числами значение E_D иногда нормировалось на количество точек в сигнале и коэффициент 10^{14} .

Сигналы с большей длительностью и амплитудой имеют большую энергию, что указывает на присутствие за обделкой полости. Это иллюстрируют примеры, представленные на рис. 2.3, где показаны графики функций $A^2(t)$ для сигналов, представленных на рис. 2.2. Видно, что площадь под графиками функций $A^2(t)$, пропорциональная E_D , больше в тех случаях, когда за обделкой находится полость (рис. 2.3 *а* и 2.3 *в*). Это видно и по вычисленным значениями E_D , которые для случая наличия полости больше на порядок, чем при её отсутствии. Уровень порогового значения E_D , превышение которого указывало бы на выявленную полость, устанавливался на основании обследования опорных участков с заведомо известным расположением пустот.

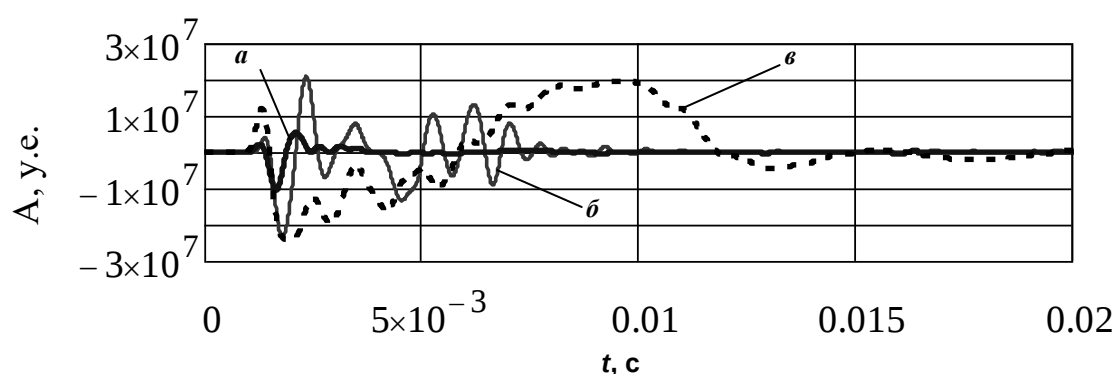


Рис. 2. Пример волновых форм для различных вариантов заполнителя: *а* – нет полости за обделкой, *б* – есть полость за обделкой, *в* – есть полость за обделкой (случай с выраженными низкочастотными компонентами в сигнале)

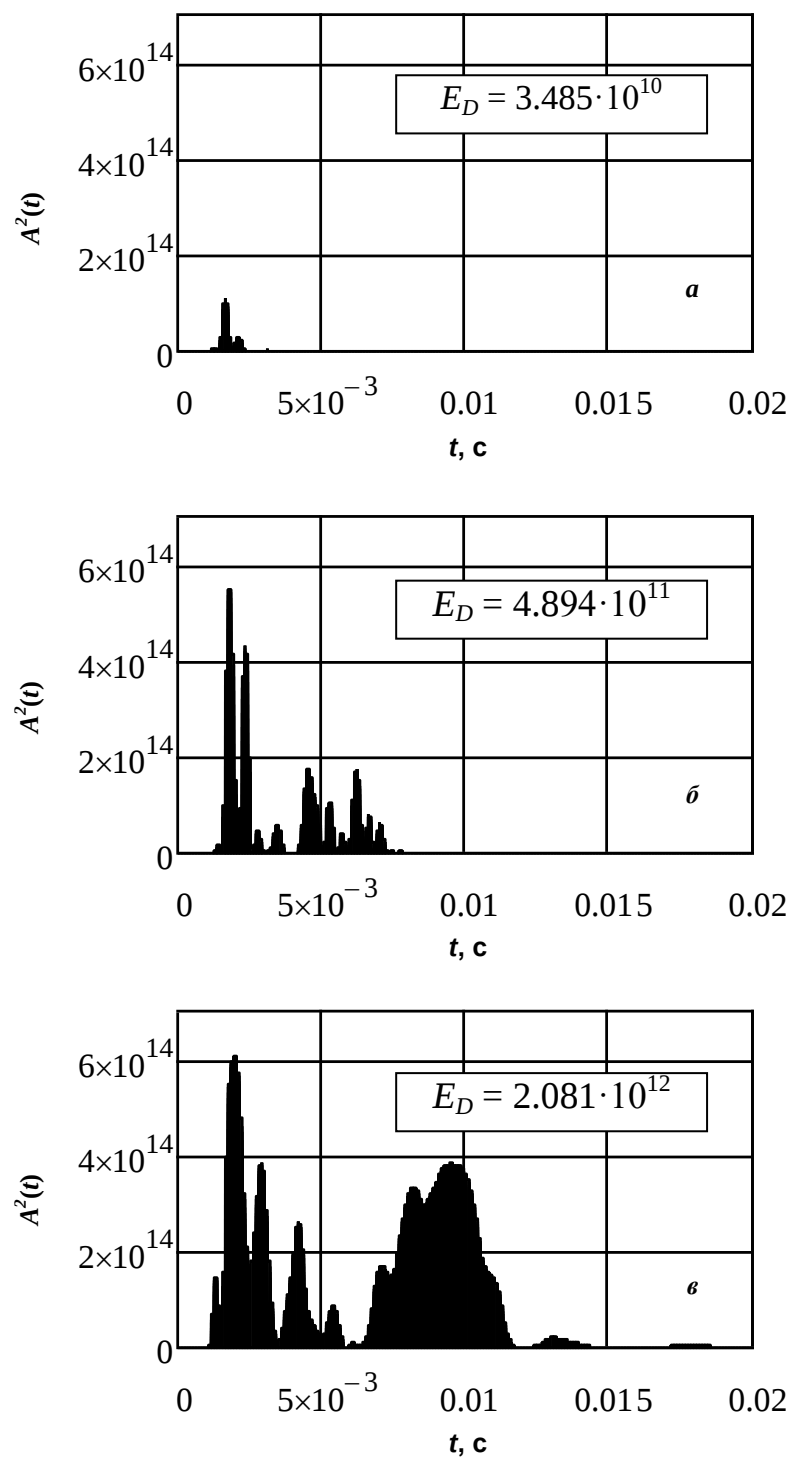


Рис. 2.3. Примеры функций $A^2(t)$ и оценок энергетического параметра E_D , соответствующих вариантам без полости за обделкой и с полостью. Графики *а*, *б*, *в* соответствуют волновым формам *а*, *б*, *в* рисунка 2.2 (*а* – полость отсутствует; *б*, *в* – полость присутствует)

В качестве еще одного информативного параметра использовалась частота максимума спектра $F(A_{max})$ регистрируемого сигнала. Низкие значения $F(A_{max})$ свидетельствуют о наличии полости, поскольку возникают из-за наличия изгибных колебаний не прижатой грунтом обделки, а также могут быть связаны со стоячими волнами, образующимися в полостях, заполненных водой. На рис. 2.2 в представлен пример волновой формы, содержащей низкочастотную компоненту. Подобная компонента существенно изменяет спектр сигнала, а также повышает E_D (рис. 2.2 в).

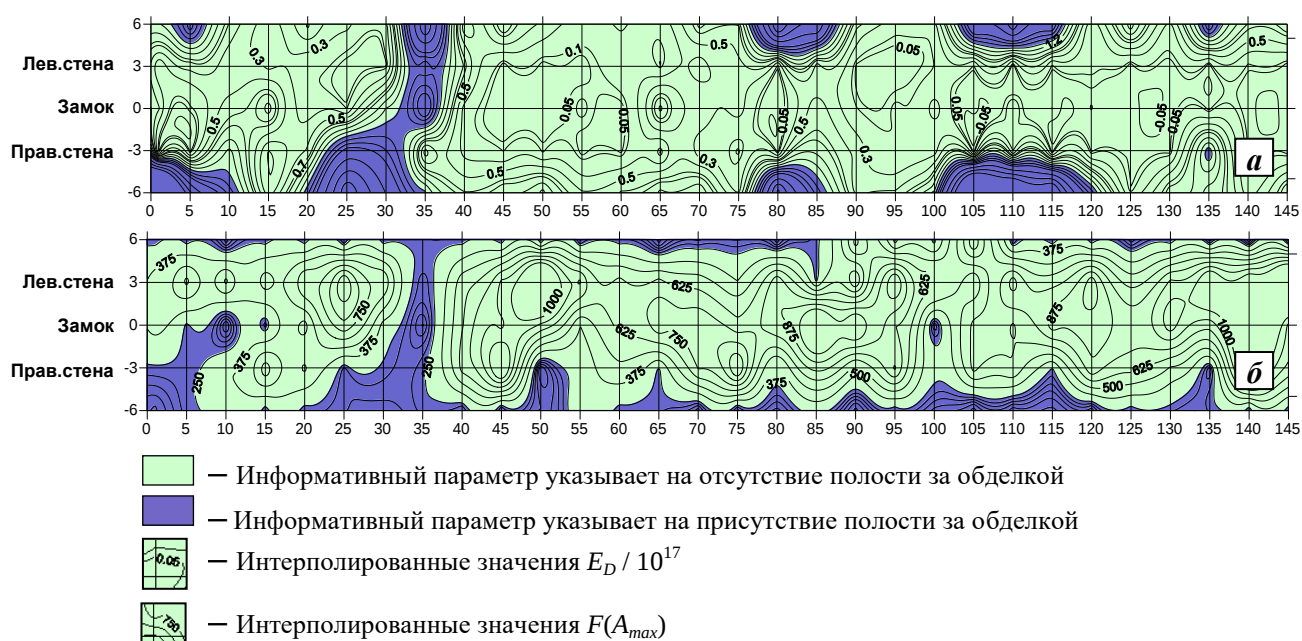


Рис. 2.4. Пример карт информативных параметров: а – карта энергетического параметра $E_D / 10^{17}$; б – карта частота максимума спектра $F(A_{max})$

При обработке результатов обследования значения E_D и $F(A_{max})$ между точками интерполировались с помощью метода Криге (Kriging) и отстраивались в виде карт. Пример подобных карт для случая чугунной обделки представлен на рис. 2.4. Анализируя рис. 2.4, можно заметить, что критерий $F(A_{max})$ менее чувствителен к выявлению полостей. На этих картах представлен один и тот же участок, при этом заметно, что на карте $F(A_{max})$, рис. 2.4 б, остались только самые большие полости, остальные просматриваются неявно. Тем не

менее, спектральный параметр может играть роль дополнительного информативного критерия.

Для случая железобетонной обделки описанный тип обследования не позволял однозначно разделять случаи "полость за обделкой" или "расслоение обделки". Поэтому в местах, где были обнаружены аномально высокие значения E_D , производились дополнительные обследования с помощью георадаров.

2.2. Распознавание вида заполнителя в полостях заобделочного пространства при обследовании тоннелей метрополитенов сейсмоакустическим методом

2.2.1. Особенности компьютерного моделирования

Для интерпретации экспериментальных результатов и оценки возможности определения вида материала в заобделочном пространстве, т.е. для определения типа заполнителя полости, было проведено компьютерное моделирование методом конечных элементов в двумерной постановке в среде Comsol Multiphysics. Чертёж части модели показан на рис. 2.5. Модель грунтового массива, ограниченного сверху дневной поверхностью и включающего выработку с обделкой, имеет размеры 500x250 м. Высота и ширина моделируемого тоннеля $H = 4.9$ м, толщина плиты обделки $B = 0.2$ м. На рис. 2.5 представлена только та часть модели, в которой расположена выработка. Помимо массива горных пород и выработки модель содержала полость за обделкой, заполненную водой либо воздухом, и стальной ударник, находившийся на стороне обделки, обращённой в тоннель (см. рис. 2.5). Модели различались размером полости. Модель №1 не имела полости за обделкой, модель №2 имела полость размером $L = H/3$, где H – высота тоннеля, модель №3 – полость размером $L = H/2$, модель №4 – полость размером $L = 3/4 H$, модель №5 – полость на всю высоту выработки. Глубина полости по горизонтали во всех случаях $M = 0.5$ м.

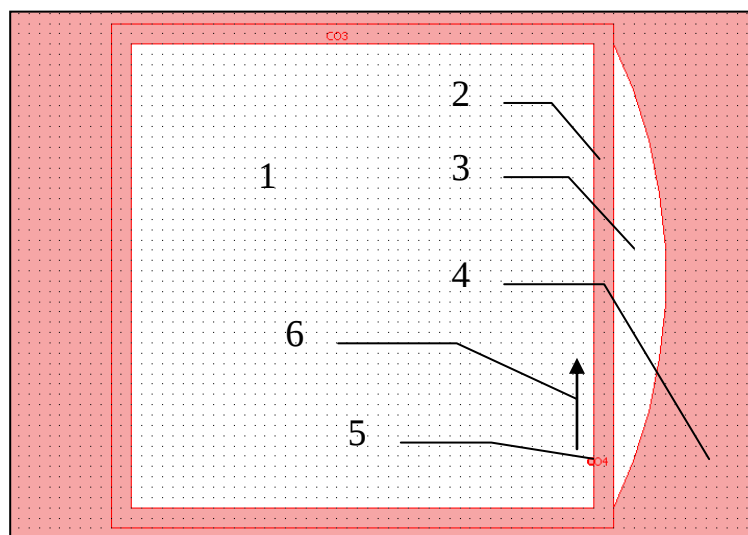


Рис. 2.5. Основные элементы модели: 1 – пространство тоннеля, 2 – обделка тоннеля, 3 – полость (вариант с размером полости, равным высоте обделки), 4 – массив пород, 5 – ударник, 6 – направление передвижения ударника при измерениях

Подобная структура модели подразумевает работу с двумя разными типами тел. Грунтовой массив, обделка и ударник моделировались как твёрдые тела, а заполнитель полости (воздух либо вода) как флюиды.

Распространение упругих волн в твёрдых телах описывалось уравнением вида

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + d \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \nabla \cdot g \nabla \mathbf{u} = \mathbf{F}, \quad (2.3)$$

где ρ – плотность среды; $\mathbf{u}$ – вектор смещений; d – параметр, характеризующий затухание; g – коэффициент, характеризующий упругие свойства среды (в данном случае – модуль упругости); $\mathbf{F}$ – действующая сила или напряжение; ∇ – оператор Гамильтона (набла). Воздействие ударника на обделку задавалось при формулировке начальных условий в виде его начальной скорости, поэтому внешнее воздействие в виде силы отсутствовало, и в правой части уравнения $\mathbf{F} = 0$. Для описания затухания использовалась Рэлеевская модель [235], для которой

$$\xi = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_{dM}}{2\pi f} + \beta_{dK} 2\pi f \right), \quad (2.4)$$

где ξ – коэффициент демпфирования; α_{dM} и β_{dK} – коэффициенты, характеризующие прямо и обратно пропорциональные зависимости затухания от частоты соответственно. Коэффициент α_{dM} играет роль при очень низких частотах и обычно учитывается в сейсмологии [236, 237, 238]. В диапазоне частот, в котором ведётся обследование тоннелей, α_{dM} можно пренебречь. Другими словами, можно принять $\alpha_{dM} = 0$ и работать только с коэффициентом β_{dK} , который вычисляется следующим образом

$$\beta_{dK} = \frac{1}{2\pi f_0 Q}, \quad (2.5)$$

где Q – добротность; f_0 – частота, на которой измеряются коэффициент потерь или добротность. Значения β_{dK} были рассчитаны для $f_0 = 900$ Гц на основании величин Q , найденных в справочной литературе [239]. Кроме того, они выбирались по результатам экспериментов на образцах горных пород и бетонов, а также по предварительным расчетам моделей при условии близости форм натурального и модельного сигналов. Значения параметров, выбранных для твёрдых тел модели, сведены в таблице 2.1, где E – модуль Юнга, μ – коэффициент Пуассона.

Таблица 2.1. Свойства твёрдых тел модели (по материалам [239, 240, 241, 11])

Область модели	E , МПа	μ	ρ , кг/м ³	β_{dK} , 1/Гц
Обделка (бетон)	$25 \cdot 10^3$	0.2	2500	$4 \cdot 10^{-5}$
Массив пород (глины)	28	0.29	2400	$4 \cdot 10^{-6}$
Ударник (сталь)	$200 \cdot 10^3$	0.31	7850	$3.8 \cdot 10^{-8}$

Исходя из соображений экономии вычислительных мощностей, в модели не были учтены такие особенности, как наличие подушки путевого бетона. Кроме того, обделка смоделирована не как сборная конструкция, а как единое

целое. Учитывая, что при моделировании изучалась, в основном, вертикально стоящая стена, эти специфики можно было принять как второстепенные.

Отражения от боковых и донной поверхностей всей модели подавлялись пространственной нелинейной функцией затухания, значения которой вблизи выработки были близки к естественным и резко возрастали к краям модели. Это было реализовано с помощью пространственно зависимой функцией $\beta(x, y)$ вида

$$\beta(x, y) = k \cdot \sqrt{\left(\frac{x}{x_{\max}}\right)^n + \left(\frac{y}{y_{\max}}\right)^n}, \quad (2.6)$$

где k – масштабирующий коэффициент (типичное значение $k = 4 \cdot 10^{-5}$, 1/Гц); x и y – координаты точки, для которой рассчитывается значение $\beta(x, y)$; $x_{\max}$ и $y_{\max}$ – предельные значения координат, в пределах которых затухание не имеет резкого возрастания; n – коэффициент, определяющий скорость роста нелинейной функции (типичное значение $n = 20$), n – чётное. С учётом возрастания к краям модели параметр затухания задавался в виде $\beta'_{dk} = \beta_{dk} + \beta(x, y)$, где β'_{dk} – пространственно зависимое скорректированное значение затухания.

Т. к. тоннель находился вблизи начала координат, отношения $x/x_{\max}$ и $y/y_{\max}$ в этих точках имели величину значительно меньше единицы. В приближении к краям модели $\beta(x, y)$ резко возрастало, увеличивая общее затухание.

Поскольку заполнитель полости представляет собой жидкое либо газообразное тело, то распространение упругих волн в заполнителе полости описывается следующим волновым уравнением

$$\frac{1}{\rho c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + d \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho} \nabla p \right) = Q, \quad (2.7)$$

где ρ – плотность; c – скорость упругих волн; p – давление флюида; d – коэффициент, характеризующий потери; Q – источник-монополь. Источник упругих волн находится вне полости (это ударник за обделкой), поэтому $Q = 0$. Параметры, выбранные для заполнителей полости, сведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Параметры заполнителей полостей (по материалам [239, 242])

Заполнитель	ρ , кг/м ³	c , м/с	d , 1/Гц
Вода	1000	1500	$2 \cdot 10^{-7}$
Воздух	1.293	337	$4 \cdot 10^{-7}$

Граничные условия. На границе «жидкость – твёрдое тело» граничные условия моделируются следующим образом. Воздействие флюида на твердое тело происходит в виде давления, направленного по нормали к поверхности в сторону твердого тела, и описывается соотношением

$$\sigma_{pS} = \mathbf{n}_S p, \quad (2.8)$$

где σ_{pS} – нормальное давление на твердое тело; $\mathbf{n}_S$ – единичный вектор, направленный по нормали к поверхности в сторону твердого тела; p – давление флюида. В компонентной записи это выглядит следующим образом

$$\sigma_{pSx} = p \cdot n_x, \quad \sigma_{pSy} = p \cdot n_y, \quad (2.9)$$

$\sigma_{pSy} = p \cdot n_y$. Где σ_{pSx} , σ_{pSy} – компоненты вектора давлений; n_x , n_y – компоненты нормального вектора.

Воздействие на флюид ускорения со стороны твёрдого тела, направленного по нормали к поверхности взаимодействия в сторону жидкости, описывается соотношением

$$-\mathbf{n}_a \cdot \left(-\frac{1}{\rho} \right) \nabla p = \mathbf{a}_n, \quad -\mathbf{n}_a \cdot \left(-\frac{1}{\rho} \right) \nabla p = \mathbf{a}_n \quad (2.10)$$

где $\mathbf{n}_a$ – единичный вектор, направленный по нормали к поверхности в сторону жидкости; ρ – плотность флюида; p – давление флюида; $\mathbf{a}_n$ – ускорение на границе флюида, оказываемое на него со стороны твердого тела. Величина ускорения описывается уравнением, в компонентной записи имеющим вид:

$$\mathbf{a}_n = \mathbf{n}_x \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + \mathbf{n}_y \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial t^2}, \quad \mathbf{a}_n = n_x \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + n_y \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \quad (2.11)$$

где $\mathbf{a}_n$ – ускорение, направленное со стороны твердого тела в направление жидкости по нормали к поверхности; n_x, n_y – компоненты единичного вектора, направленного по нормали к поверхности; u, v – смещения на границах твёрдого тела по осям x и y соответственно.

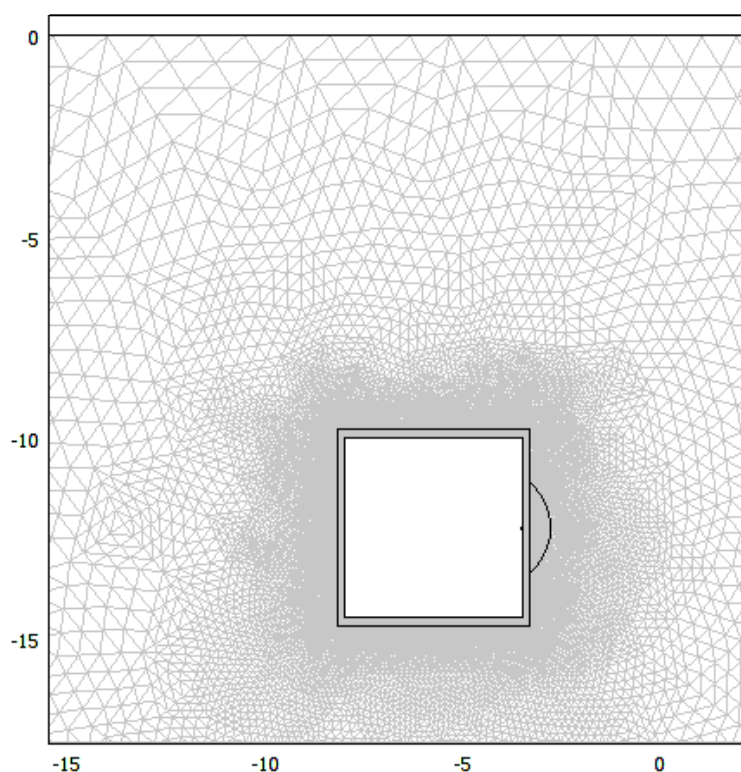


Рис. 2.6. Разбивка модели по сетке

Начальные условия. Все начальные значения смещений, их скоростей и ускорений приняты равными нулю, кроме начальной скорости ударника, которая принята равной 0.1 м/с. Этим моделируется ударное возбуждение обделки.

Разбивка модели по сетке. При расчёте модели на точность результатов влияет размер сетки [243]. В частности, существует рекомендация, чтобы допустимый максимальный размер элементов сетки модели рассчитывать из условия, что на длине волны в направлении её распространения должно укладываться не менее 4-6 элементов [244]. Как показывает практика, на реальных объектах при использовании метода IR максимальная частота отклика обделки не превышает $f_{max} = 4$ кГц. При минимальной скорости распространения волны,

использовавшейся в модели, $c = 124$ м/с длина волны $\lambda = 0.031$ м. Тогда размер элемента не должен превышать $h < \lambda/4 \approx 0.0078$ м. На результаты контроля влияет область, непосредственно примыкающая к обделке, поэтому размеры элементов на удалении от неё могут быть больше.

При моделировании в некоторых случаях использовались более крупные размеры элементов сетки конечных элементов (см. рис. 2.6). Это сделано для того, чтобы не перегружать ограниченную память компьютера при большом числе элементов и степеней свободы, когда вычисление становится невозможным.

Выбор интервала дискретизации по времени. Шаг расчёта по времени Δt_{sim} выбирался, опираясь на значение частоты дискретизации оборудования, использовавшегося в натурных измерениях Δt_{sr} . Он составил $\Delta t_{sr} = \Delta t_{sim} = 1.04 \cdot 10^{-5}$ с, что соответствует частоте дискретизации $f_{sr} = 96$ кГц. Желательно, чтобы величина Δt_{sim} удовлетворяла условию

$$\frac{c\Delta t_{sim}}{h} < 0.2, \quad (2.12)$$

где c – скорость упругой волны в среде; Δt_{sim} – шаг расчёта по времени при моделировании; h – размер элемента модели. Отсюда $\Delta t_{sim} < 0.2 \cdot h/c$. Считается, что в этом случае значения ошибок временной дискретизации примерно сопоставимы с ошибками пространственной дискретизации [244]. Требование (2.12) не зависит от скорости упругих волн, она входит как в числитель, так и в знаменатель (в неявном виде она присутствует в h). Поэтому и для воздуха и для воды требование (2.12) выглядит как $\Delta t_{sim} < 1.25 \cdot 10^{-5}$ с или $f_{sr} > 80$ кГц, что в данном случае выполняется при $\Delta t_{sr} = \Delta t_{sim}$.

В качестве результата моделирования рассматривалась скорость смещений в заданных точках обделки. Параметр скорости соответствует сигналу на выходе электродинамического преобразователя, использовавшегося в натурных наблюдениях.

2.2.2. Результаты моделирования, проверка полученной модели

На рис. 2.7 представлены формы сигналов откликов, полученных для трёх различных сред за обделкой (грунт за обделкой $A_1(t)$, вода в полости $A_2(t)$, воздух в полости $A_3(t)$).

Показаны результаты для модели с полостью высотой $L = H/2$ или 2.25 м. Точка удара находится на обделке напротив середины полости. В случае отсутствия полости, когда за обделкой находится грунт, отклик представляет собой быстро затухающий аperiodический процесс. При заполнении полости воздухом отклик имеет большую амплитуду. При заполнении полости водой наблюдаются выраженные высокочастотные осцилляции.

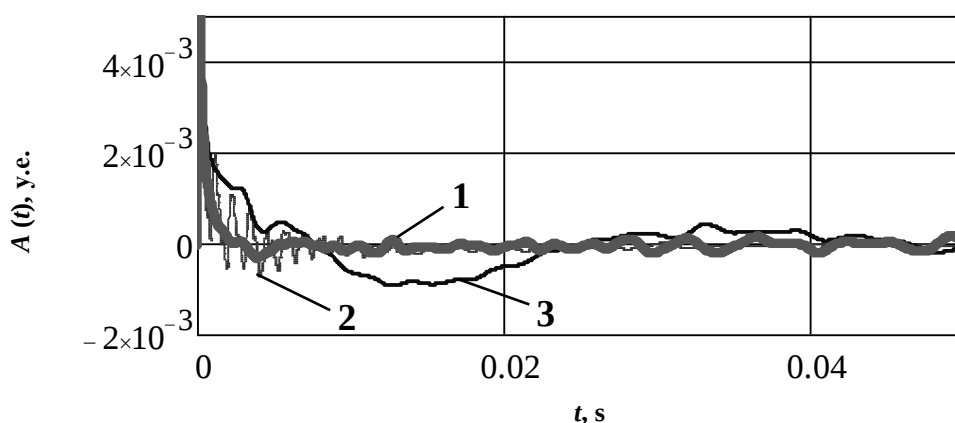


Рис. 2.7. Волновые формы отклика обделки на ударное воздействие для случаев, полученных из моделей: грунт за обделкой (1); полость заполнена водой (2); полость заполнена воздухом (3)

Полученные модельные отклики обделки позволяют произвести спектральный анализ, результаты которого представлены на рис. 2.8. На нем изображены частотные зависимости нормированных по максимуму спектров $\eta(f) = S(f)/S(f)_{\max}$, где $S(f), S(f)_{\max}$ – амплитудный спектр и его максимальное значение соответственно. У спектра 1 для случая без полости спектральный пик выражен слабо. Спектр 2 для случая с полостью, заполненной водой, обладает характерными множественными максимумами. Спектр 3 для случая поло-

сти, заполненной воздухом, имеет отчетливо выраженный максимум на первой спектральной составляющей.

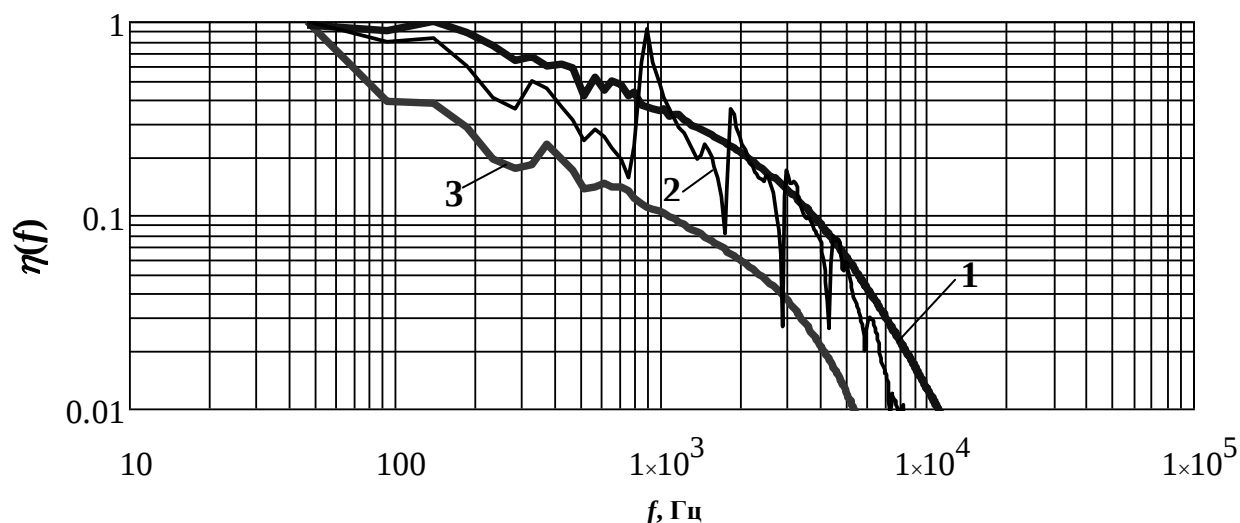


Рис. 2.8. Спектры откликов обделки для случаев моделей: грунт за обделкой (1); полость заполнена водой (2); полость заполнена воздухом (3)

Был произведён ряд исследований модели, с целью выяснить достаточно ли хорошо модель соответствует поведению реальных объектов. Первичная проверка проводилась в форме опробования процедур контроля. Для этого было смоделировано проведение сейсмоакустического профилирования при перемещении источника и приёмника с определённым шагом снизу вверх по обделке. При этом анализировались отклики сигналов над областями с различными значениями модуля упругости заполнителя. Естественнo ожидать большую амплитуду и энергию сигналов там, где модуль упругости заполнителя меньше, т. е. над пустотами.

Компьютерное моделирование сейсмоакустического профилирования производилось следующим образом. Создавался ряд из 23-х моделей с различным расстоянием l между лотком тоннеля и ударником при высоте тоннеля 4,5 м. Расстояния между положениями ударника составляло от 0.1 до 0.2 м. Расстояние ударник-приёмник составляло 0.1 м. С такими параметрами было отработано три профиля, соответствующих трём типам моделей от первой до третьей: без полости; с полостью расположенной посередине плиты обделки

размером $H \cdot 1/3$ от высоты тоннеля H ; с полостью размером $H \cdot 1/2$. Во всех случаях заполнителем полости был воздух. В качестве характеристики, индицирующей полость, использовался энергетический параметр E_D , описанный выше в выражении (2). Результат в виде функции $E(l)$, описывающей изменение E_D вдоль профиля измерений, представлен на рис. 2.9.

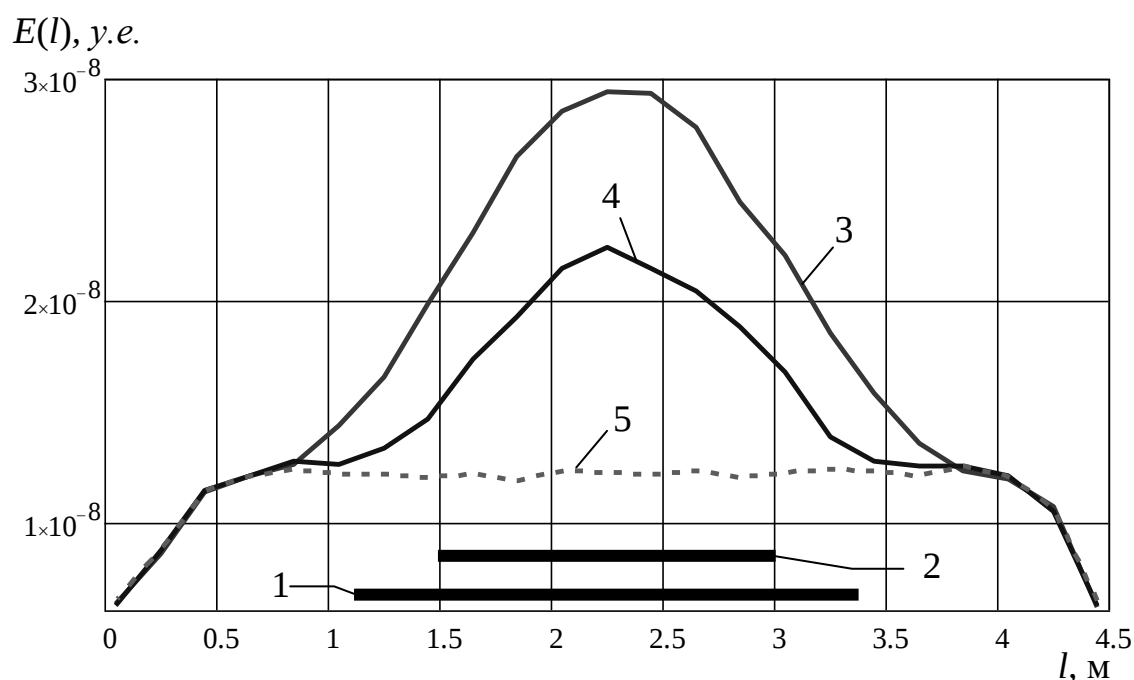


Рис. 2.9. Функции $E(l)$ для различных размеров полостей: 1 – размер и положение полости модели №2 ($1/3$ высоты тоннеля), 2 – размер и положение полости модели №3 ($1/2$ высоты тоннеля), 3 – график $E(l)$ для полости размера $1/2$; 4 – график $E(l)$ для полости размера $1/3$; 5 – график $E(l)$ для случая без полости

Горизонтальными жирными линиями показаны размеры и положение полостей. Из графиков видно, что $E(l)$ достаточно хорошо индицирует наличие полости, а при отсутствии полости график становится горизонтальным без выраженных особенностей. Также заметно что задание различных размеров полостей в модели приводит к ожидаемым изменениям выходного результата. В целом это говорит о том, что модель работоспособна и адекватно отражает особенности исходного объекта. Кроме того, можно отметить еще несколько особенностей. На краях, вблизи перекрытия и лотка тоннеля значения функции $E(l)$

оказываются заниженными, так сказывается влияние геометрии сооружения. Также можно заметить, что область подъёма функции $E(l)$ шире, чем размер полости.

Другая проверка состояла в исследовании того, насколько поведение модели соответствует поведению реального объекта. Для проведения подобной проверки в условиях тоннелей метрополитена были получены реальные сигналы. Проверка производилась на основании сравнения спектров модели и реальных сигналов для условий, когда полость заполнена водой. Эти спектры представлены на рис. 2.10, при этом размер модельной полости $L = H/2$.

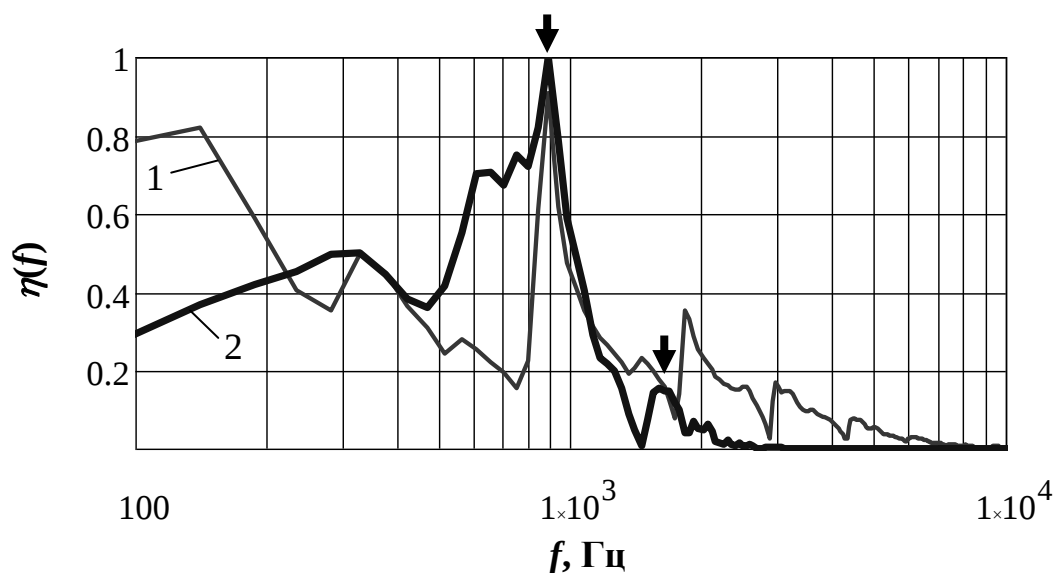


Рис. 2.10. Сравнение спектра сигнала, полученного на модели с водой в качестве заполнителя полости (1), и в реальных условиях (2)

Выше уже говорилось, что спектры модельных сигналов для случая, когда полость заполнена водой, содержат несколько выраженных пиков. При наложении спектров (см. рис. 2.10) можно заметить, что подобные же пики содержат и реальные данные (пики выделены жирными стрелками). В частности, хорошо видно соответствие амплитуд пиков вблизи от 900 Гц, вблизи частоты 1500 Гц различие в амплитудах спектральных пиков составляет меньше 10%.

Функции спектров реального и модельного сигналов рассчитывались таким образом, чтобы частоты их спектральных составляющих совпадали. К единому значению приведены шаги дискретизации и длительности временного ряда, что даёт одинаковые дискретные частотные значения в спектре. Это позволяет оценить коэффициент корреляции R двух функций $\eta(f)$, приведённых на рис. 2.10. Так, в диапазоне частот 840 ÷ 4200 Гц R достигает значения 0.91.

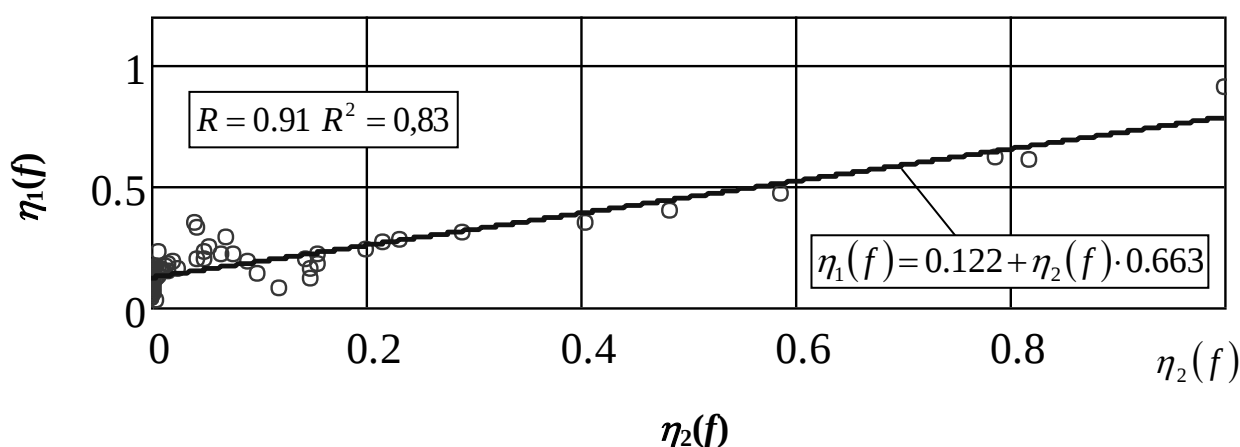


Рис. 2.11. Диаграмма рассеяния спектральных составляющих сигнала полученного на модели с заполненной водой полостью ($\eta_1(f)$) и спектральных составляющих сигнала полученного в реальных условиях ($\eta_2(f)$)

Диаграмма рассеяния и линия регрессии для этого случая представлены на рис. 2.11. Можно отметить высокую линейность зависимости, хорошую соизменчивость данных, относительно небольшую остаточную дисперсию, на что указывает большое значение коэффициента детерминации $R^2 = 0.83$. Другими словами, разработанная модель хорошо соответствует натурным данным в информативном диапазоне частот от 840 до 4200 Гц.

2.2.3. Влияние заполнителя полости на спектр отклика

После разработки и проверки модели возникает возможность её исследования и практического использования. При анализе кривых на рис. 2.8 можно заметить, что варианты "в полости воздух" и "без полости" представлены относительно гладкими графиками спектров. В то же время вариант "в полости вода" характеризуется выраженными спектральными максимумами. Если производить моделирование варианта "без полости" как полость, заполненная породой, график спектра также начинает приобретать резонансные пики. Однако они выражены значительно слабее, чем на графике "в полости вода". Это позволяет использовать результаты моделирования для выявления типа заполнителя полости.

В частности, это можно сделать с помощью коэффициента корреляции R между спектрами, полученными в тоннелях, и модельными спектрами. Рассмотренный выше случай с водой в качестве заполнителя дает $R = 0.91$. Те же данные коррелируют с моделью "в полости воздух" как $R = 0.79$, а с моделью "без полости" как $R = 0.77$. Это даёт возможность идентифицировать в качестве заполнителя именно воду, для которой коэффициент корреляции модельных и натурных спектров имеет максимальное значение по сравнению другими случаями.

Была также проведена дополнительная серия исследований, направленных на изучение механизма возникновения тех или иных резонансов в спектральных кривых. Они были связаны с некоторым рядом предположений. Например, возможно, что резонансные явления, наблюдаемые в случае, если заполнителем является вода, могут быть связаны с собственными колебаниями обделки и конструкции в целом, а не только с поведением обделки как мембраны. Другой вопрос был связан с возможностью того, что собственные частоты обделки будут подавлять резонансы в информативной области $840 \div 4200$ Гц (в которой R достигает значения 0.91). Вышеприведённые модели не содержат диапазон ниже 50 Гц из-за малой длительности используемых реализаций (дли-

на которых определялась длительностью сигналов, полученных в тоннелях). Другими словами, значения спектральных составляющих в области собственных частот конструкции могут быть настолько велики, что высокочастотная часть спектра будет не читаема.

Для того, чтобы оценить эти особенности, исследовался ряд дополнительных моделей. В первую очередь необходимо было использовать реализации большей длины. Это увеличило время расчёта, но позволило получить амплитудный спектр с большей разрешающей способностью по частоте и с более низкой частотой первой гармоники. Благодаря этому можно было увидеть диапазон частот, где влияют собственные колебания конструкции. В приводимых ниже результатах длина реализации увеличена по сравнению с первоначальной в 4 раза.

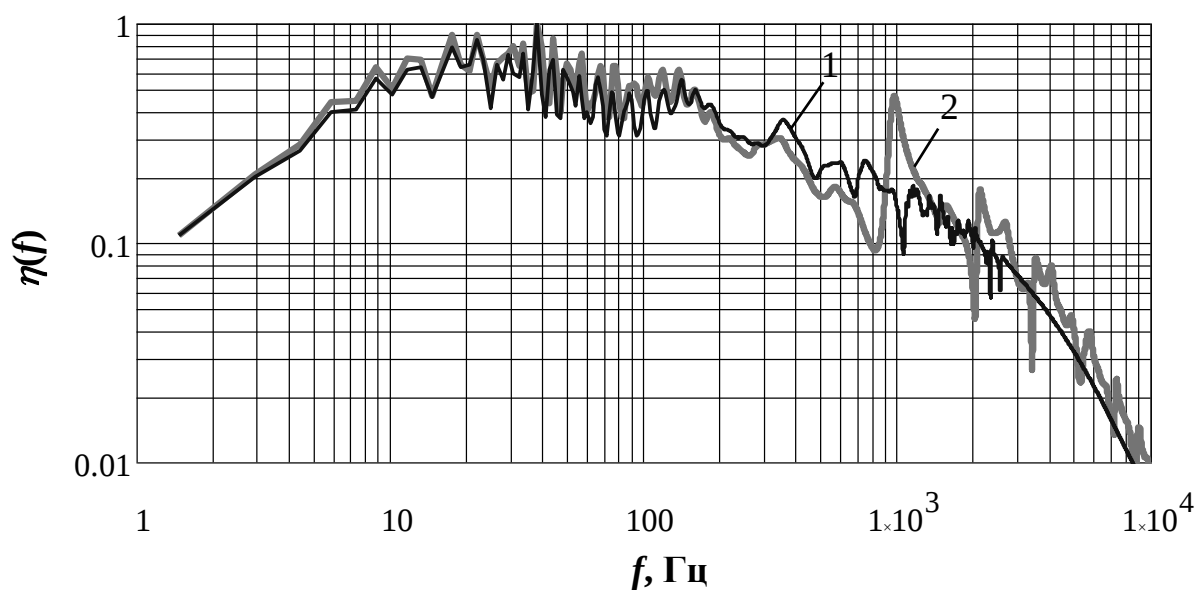


Рис. 2.12. Спектры откликов обделки, полученные по удлинённым реализациям: 1 – вариант "без полости", 2 – вариант "в полости вода"

На рис. 2.12 представлены примеры полученных спектров. В низкочастотной области появился ряд спектральных максимумов, связанных с собственными колебаниями обделки. В частности, оба представленных спектра имеют максимум на частоте 38 Гц. Ход графиков несколько отличается от представленных на рис. 2.8 (короткие реализации), поскольку проявившиеся в

низкочастотной области максимумы, на которые нормируется спектр, изменили амплитудные значения графиков.

Анализируя графики, можно заметить, что в случае "в полости вода" информативно важный резонансный максимум вблизи 900 Гц, указывающий на тот или иной тип заполнителя, довольно хорошо просматривается в спектральной картине и не подавлен низкочастотным пиком. Можно предположить, что собственные колебания не станут существенной помехой при выявлении типа заполнителя.

Также с целью проанализировать возникновение резонансной картины в районе 900 Гц было исследовано изменение спектров при постепенном изменении таких параметров, как плотность и скорость в заполнителе полости. Начальные модели соответствовали случаю "в полости рыхлый грунт", финальные модели соответствовали случаю "вода в полости". В этих исследованиях при использовании исходных значений затухания в окружающем массиве и в материале полости, а также длинных реализаций, спектры на наиболее важных участках испытывались сильную "изрезанность". "Изрезанность" делала спектры нечитаемыми, в том числе и после применения сглаживания скользящим средним. Исходя из предположения, что на частоту пиков влияют не затухания, а скорость, плотность и модуль Юнга в модель были введены не расчётные затухания, а их изменённые значения.

Первоначальные значения скорости продольных волн C_p соответствовали значению 124 м/с. Эта оценка получена из выражения

$$C_p = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \mu)}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2 \cdot \mu) \cdot \rho}} \quad (2.13)$$

для параметров массива пород, указанных в таблице 2.1. Параметры конечного варианта указаны в таблице 2.2. Плотность изменялась от 2700 до 1000 кг/м³. Значения параметров заполнителей полостей сведены в таблицу 3. Результаты исследований представлены на рис. 2.13.

Таблица 2.3. Параметры заполнителей полости и результаты моделирования

Номер модели	ρ , кг/м ³	c_z , м/с	f_{res} Гц	λ , м	$\lambda/2$, м
Модель1	2400	124	–	–	–
Модель2	2300	220	216.8	1.01	0.51
Модель3	2200	320	284.18	1.13	0.56
Модель4	2100	420	357.42	1.18	0.59
Модель5	2000	520	435.06	1.2	0.6
Модель6	1900	620	503.91	1.23	0.62
Модель7	1600	920	694.34	1.32	0.66
Модель8	1300	1220	870.12	1.4	0.7
Модель9	1000	1500	1000.5	1.5	0.75

На рис. 2.13, *a* для более удобной визуализации дан не весь спектр, а наиболее его важный участок $10 \div 1000$ Гц. Пунктирной линией (цифра 1) изображен график для случая, когда полость заполнена грунтом. Графики, обозначенные цифрами 2-6, это случаи с увеличивающейся скоростью и уменьшающейся плотностью. Номер модели в таблице 3 соответствует номеру графика на рис. 2.13.

Анализируя рис. 2.13 *a*, в спектрах можно заметить резонансный пик с частотой f_{res} который на каждом графике последовательно смещается в область высоких частот (эти смещающиеся пики отмечены стрелками). При анализе моделей 6-9 (рис. 2.13 *б*), становится ясно, что именно эти пики превращаются в пик в районе 900 Гц, который становится ярко выраженным в случае, если полость заполнена водой. Шестая модель преднамеренно присутствует на обоих графиках рис. 2.13.

Можно заметить, что для случая "в полости грунт" этот спектральный максимум фактически не наблюдается. А при устремлении скорости упругих волн в заполнителе и плотности заполнителя к параметрам воды, пик формируется в области $100 - 200$ Гц и начинает смещаться к 1000 Гц. На основании приведённых результатов моделирования можно предположить, что наблюдаемые резонансные пики связаны с образованием стоячих волн в полости. Аргу-

ментом здесь является следующая особенность. Во всех моделях глубина полости составляет $h = 0.5$ м.

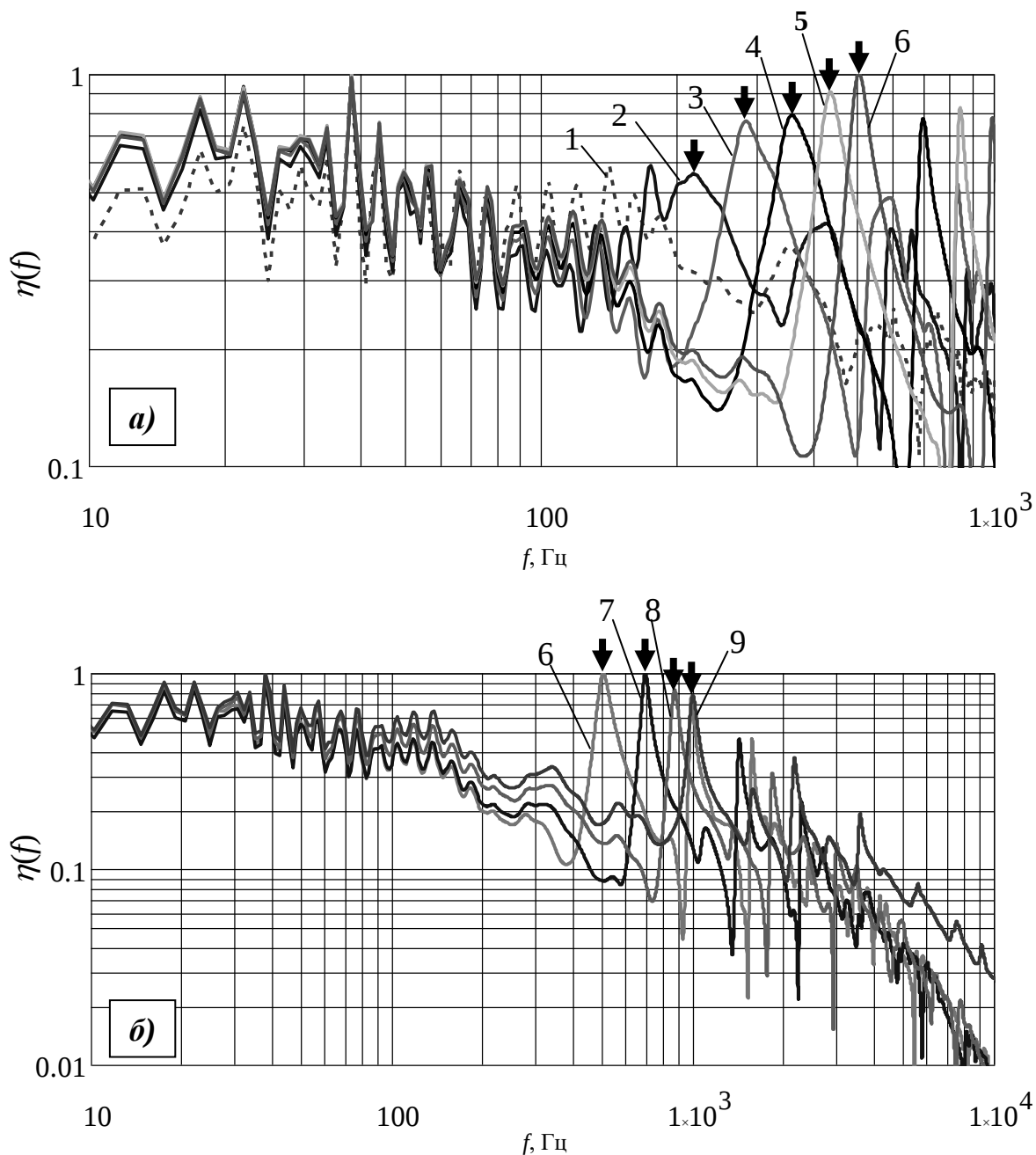


Рис. 2.13. Спектры, полученные в результате изменения параметров заполнителя полости: *a* – спектры моделей 1-6, *b* – спектры моделей 6-9; 1-9 – номера моделей, соответствующие таблице 2.3

В таблице 2.3 даны оценки длины волны λ , взятые на основании заданной в модели скорости в заполнителе C_z и частоты f_{res} . Для первых моделей условие образования стоячей волны $h = \lambda/2$ соответствует значению глубины полости h

= 0.5 м. Однако для моделей, приближающихся к случаю "вода в полости", всё больше возрастает ошибка. Это и позволяет предположить, что резонансные пики образуются, в частности, из-за стоячих волн в полостях, заполненных водой.

Таким образом, можно сделать следующие предположения о природе резонансных пиков. В случае, если полость отсутствует, на спектр влияют изгибные колебания обделки и собственные частоты всей конструкции тоннеля вместе. В случае, если полость заполнена материалом, всё более приближающимся по своим свойствам к воде, на спектр начинают влиять резонансные процессы другой природы, например, связанные с образованием стоячих волн в полости. В случае, если полость заполнена воздухом, эти резонансные явления проявляются слабее, поскольку в воздушной среде больше затухание сигнала, амплитуда бегущей волны слишком быстро падает, не образуя высокоамплитудной стоячей волны. Кроме того, в этом случае массы воздуха не хватает для эффективного воздействия на жёсткую обделку и создания её интенсивных колебаний.

Таким образом в исследовании предложена компьютерная модель, позволяющая рассчитывать акустические отклики на ударное воздействие и их спектры для случаев если в полости за обделкой содержатся вода, воздух или грунт. Отклики могут быть использованы для идентификации заполнителя. Показаны характерные особенности параметров сигналов и спектров в зависимости от материала заполнителя. Проверка модели показала ее работоспособность.

Частотный диапазон исследуемых колебаний обделки стоит разделить на области от 10 до 100 Гц и от 100 до 1000 Гц. В области 10-100 Гц спектральные компоненты связаны с собственными колебаниями обделки и присутствуют всегда. Спектральный максимум в диапазоне частот 100-1000 Гц связан со стоячей волной в полости при небольшой её глубине и при условии, что полость заполнена водой или рыхлым грунтом, перемешанным с водой. При заполнении полости воздухом резонансные явления в области от 850 до 4200 Гц проявлены слабо. При отсутствии полости спектральный максимум в этом диапазоне

также не выражен, что дает основание для идентификации заполнителя полости.

Показано удовлетворительное совпадение спектров модельного и натурального сигналов в информативной области частот от 840 до 4200 Гц для случая заполнения полости водой и их отличие для других заполнителей. Показана возможность идентификации материала заполнителя полости заобделочного пространства по максимуму коэффициента корреляции между спектральными составляющими модельного и натурального сигналов. Эти результаты позволили сформулировать первое научное положение.

2.3. Структурные особенности поведения заобделочного пространства, выявленные по результатам сейсмоакустических исследований

Для качественного прогноза поведения тоннеля в процессе его строительства и эксплуатации важно понимание всего комплекса причин, которые приводят к появлению полостей. Основной целью проведённого исследования являлось изучение возможности влияния на образование полостей одного из таких важных факторов, как напряжённо-деформированное состояние массива пород вблизи обделки. При определённых условиях грунт может перейти в пластическое состояние, способствующее увеличению проницаемости, интенсификации движения грунтовых вод и образованию полостей.

Основным принципом этого исследования было сопоставление результатов натурных исследований, произведённых методом IR и результатов компьютерного моделирования.

Исследование состояло из двух этапов. Первоначально на первом этапе с помощью компьютерного были выявлены особенности поведения напряжённо-деформированного состояния вблизи одного тоннеля. Выявленные особенности показали удовлетворительную сходимость с натурными исследованиями и позволили сделать ряд предположений. Второй этап представлял собой анализ поведения НДС в условиях сложных горнотехнических условиях (проходка двух новых тоннелей вблизи двух эксплуатируемых). Результаты этого моделирова-

ния также показали удовлетворительную сходимость с натурными наблюдениями.

2.3.1. Особенности методики компьютерного моделирования

Целью этой части работы являлось выявление особенностей НДС вблизи одного тоннеля с помощью компьютерного моделирования, с последующей верификацией результатов по натурным геофизическим измерениям.

Компьютерное моделирование напряжённо-деформированного состояния вблизи тоннеля метрополитена было произведено в среде COMSOL Multiphysics. Модель разрабатывалась на основе примера из библиотеки моделей COMSOL Multiphysics («Stresses in the soil surrounding a traffic tunnel») [245]. Основной целью был анализ напряженно-деформированного состояния массива пород вокруг выработки, в частности, интерес представлял размер и положение зон пластической деформации грунтов.

Задача решалась в двумерной постановке. В основу используемой модели положен критерий прочности Друкера-Прагера. При этом учитывалось, что при расчете в двухмерной постановке задачи моделирование производится в трехмерной постановке, соответствующей критерию Друкера–Прагера, но рассматриваются напряжения и деформации только в соответствующем двухмерном сечении. Поверхность текучести F в этом случае определяется выражением:

$$F = 3\alpha\bar{\sigma} + \sigma_e - K \quad (2.14)$$

где $\bar{\sigma}$ – среднее напряжение, σ_e – эквивалентное девиаторное напряжение, α и K – константы материала, описываемые следующими выражениями:

$$\alpha = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)}; \quad K = \frac{6c\cos\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)}, \quad (2.15)$$

где φ – угол внутреннего трения, c – коэффициент сцепления.

В случае двумерной структуры модели (т.е. трёхмерная структура может быть легко сведена к двумерной), критерий Друкера-Прагера становится иден-

тичным критерию Мора-Кулона, при условии, что коэффициенты материала будут вычислены следующим образом:

$$\alpha = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \varphi}}; K = \frac{3c}{\sqrt{9 + 12 \tan^2 \varphi}}. \quad (2.16)$$

При этом среднее напряжение $\bar{\sigma}$ определяют через нормальные компоненты напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ следующим образом:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}. \quad (2.17)$$

А эквивалентное девиаторное напряжение σ_e определяют следующим образом:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}(s_x^2 + s_y^2 + s_z^2) + s_{xy}^2 + s_{yz}^2 + s_{zx}^2} \quad (2.18)$$

где s_{ij} – девиаторные компоненты напряжения –

$$s_x = \sigma_x - \bar{\sigma}; s_y = \sigma_y - \bar{\sigma}; s_z = \sigma_z - \bar{\sigma}; \quad (2.19)$$

$$s_{xy} = \tau_{xy}; s_{yz} = \tau_{yz}; s_{zx} = \tau_{zx}.$$

Грунтовый массив моделировался как однородный слой толщиной 65 м и шириной 180 м, тоннель – как кольцо обделки диаметром 5.6 м, толщина обделки 0.3 м. Наличие тектонической составляющей напряжений может в значительной степени изменить распределение напряжений вокруг выработки и на границе «грунт–обделка» [246]. В данном случае моделируется действие только гравитационной составляющей, а тектоническая не учитывалась. Массив моделируется однородной изотропной линейно деформируемой средой, занимающей упругое полупространство. Схема модели показана на рис. 2.14, где также обозначены граничные условия. При этом $q = \nu / (1 - \nu)$ – коэффициент бокового распора, где ν – коэффициент Пуассона.

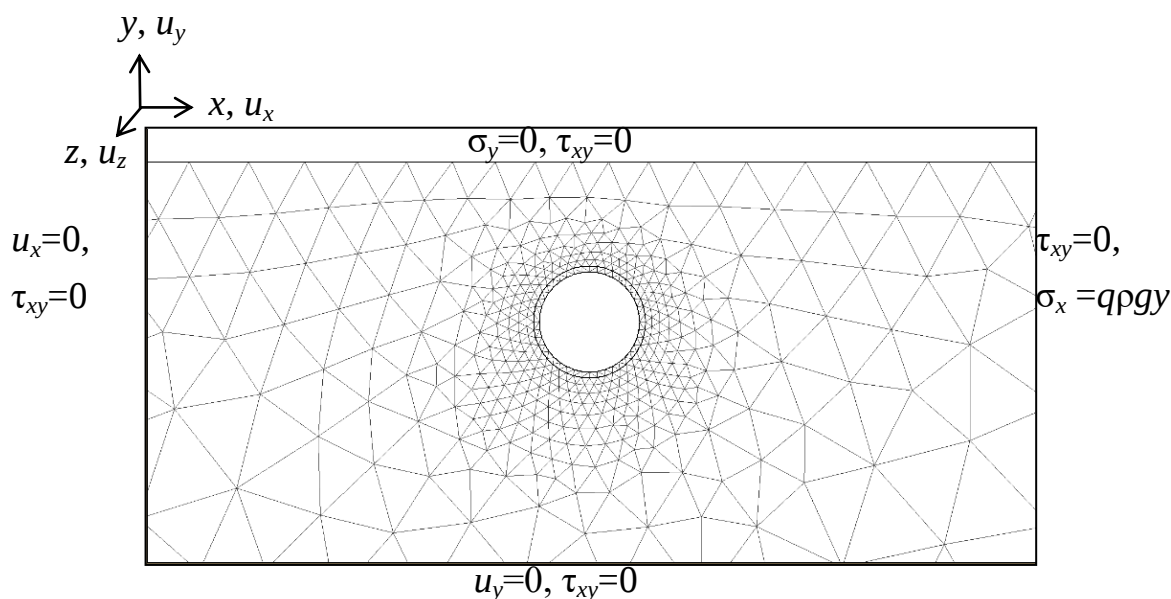


Рис. 2.14. Схема расчетной модели и разбивка по сетке с указанием граничных условий в глобальной системе координат COMSOL Multiphysics

Свойства элементов модели. Физические свойства массива пород и обделки задавались по результатам испытаний образцов грунта в лаборатории. Используемые значения представлены в таблице 2.4.

В процессе моделирования производилось дополнительное исследование с варьированием значений физических параметров модели, для выяснения, как и в какой степени, они могут влиять на результаты. Работа велась по большей части по методике однофакторного эксперимента, когда варьируется один фактор, при том, что все остальные зафиксированы. Было установлено, что результаты моделирования достаточно стабильны и слабо зависят от физических параметров.

Таблица 2.4. Первичные значения физических свойств модели

	φ, град	C, Па	γ, Н/м ³	E, Па	ν
Массив	36	50000	22000	50·10 ⁶	0.3
Обделка	—	—	25000	20·10 ⁹	0.2

Граничные условия, обозначенные на рис. 2.14 математическими символами, в системе COMSOL Multiphysics задавались как «Roller». В этом режиме на боковых и нижней границах модели возможны смещения вдоль них и запрещены смещения по нормали к ним. На верхней границе было выбрано условие «Free», при котором допустимы смещения по всем направлениям. Такое же условие было выбрано для границ «обделка - грунт» и «обделка - внутреннее пространство тоннеля».

В качестве решателя использовался вариант *Damped Newton*. При расчёте модели значения параметров (модуль Юнга E и объёмный вес γ) постепенно увеличивались пропорционально значению параметра **para**. В случае, если **para** достигал порогового уровня, расчёт останавливался, при этом E и γ достигали нужных значений. Подобный алгоритм расчёта был реализован для обеспечения его сходимости.

В случае, если при вычислениях не выполнялось условие сходимости до того, как были достигнуты целевые уровни значений E и γ , считалось, что сходимость не была обеспечена. Подобные ситуации возникали при некоторых из значений параметров грунта. Эти случаи отбрасывались и в дальнейшем анализе не использовались.

Результаты моделирования выводились как карты параметров σ_e (эквивалентное девиаторное напряжение, обозначаемое изолиниями) и ε_{pl} (эффективные пластические деформации, обозначаемые цветовой шкалой). При этом для ε_{pl} в большинстве случаев использовалась бинарная шкала, подразумевавшая использование двух цветов: для $\varepsilon_{pl} > 1$ (наличие пластических деформаций) и для $\varepsilon_{pl} \leq 0$ (отсутствие пластических деформаций). Таким образом, цветовая карта показывала зоны, в которых наблюдались пластические деформации и разуплотнение грунта. Примеры результатов изображены на рис. 2.15, где представлены как бинарная шкала (а), так и шкала с градациями оттенков (б).

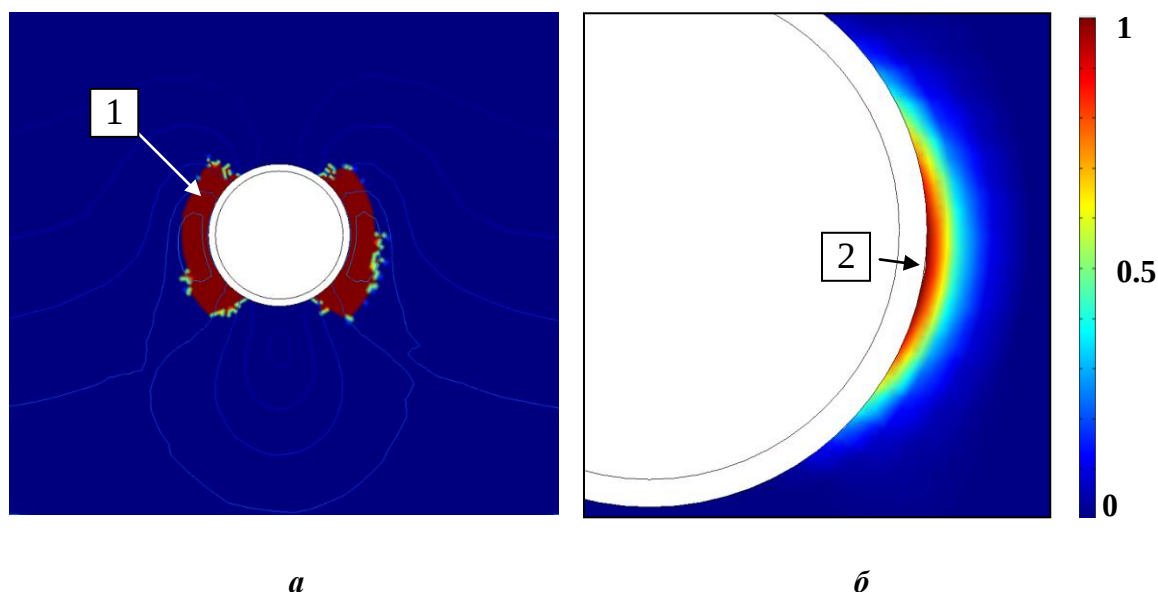


Рис. 2.15. Распределение зон пластической деформации в массиве вблизи от тоннеля: *а* – результаты, представленные в виде бинарной шкалы; *б* – те же результаты, представленные в виде градиентной шкалы

2.3.2. Результаты исследования для моделей с одним тоннелем

На рис. 2.15 представлены результаты моделирования для случая одного тоннеля в однослойном массиве. На рис. 2.15 *а* представлен вариант с пороговой кодировкой ε_{pl} , (цифрой «1» указаны области, где присутствуют пластические деформации). На рис. 2.15 *б* ε_{pl} оставлен в типичной градиентной шкале, что позволяет наблюдать, в какой точке находится максимум ε_{pl} . Точка максимума указана цифрой «2».

Анализируя полученную картину, можно отметить, что зоны пластических деформаций возникают сбоку от тоннеля и практически не наблюдаются вверху и внизу. Подобная картина оказалась очень стабильной, и практически все опробованные варианты модели демонстрировали подобную структуру. Для разных вариантов входных параметров области пластической деформации немного вытягивались либо вверх, либо вниз, однако принципиальных изменений не происходило.

Возвращаясь к натурным геофизическим исследованиям в тоннелях, можно сказать, что анализ большого количества карт качества контакта показал, что полости возникают чаще всего в нижних точках при $n = 1$ и $n = 5$. Существенно реже полости наблюдаются в точках при $n = 2$, $n = 4$, и почти не наблюдаются в верхней точке тоннеля при $n = 5$. На рис. 2.16 представлена гистограмма, позволяющая оценить вероятность наблюдения полости в тех или иных точках тоннелей. Объём выборки включал 102 значения. Данные собраны по 6 съёмкам на площадках, соответствующих диаметру и форме моделируемого тоннеля.

Анализируя результаты моделирования, можно сказать следующее. В области, находящейся над выработкой ($n = 3$), зоны пластической деформации грунта не образуются. Это соответствует наблюдаемому по натурным измерениям факту, что полости в верхней точке наблюдаются очень редко.

По-видимому, отсутствие в верхней точке зон пластической деформации связано с тем, что здесь преобладают нормальные сжимающие напряжения. В результате здесь сложно достигнуть того соотношения между нормальными и тангенциальными напряжениями, которое способно приводить к пластическим деформациям. Какие-то подобные процессы наблюдаются и в нижней точке тоннеля, где, как это видно по модели, зоны пластической деформации также не наблюдаются.

В то же время вблизи левого и правого боков тоннеля соотношения между нормальными и тангенциальными напряжениями таковы, что здесь наблюдаются зоны пластической деформации. И здесь же наиболее часто возникают полости в заобделочном пространстве, что отражается на результатах геофизических обследований.

То, что наличие полостей в точках $n = 2$ и $n = 4$ наблюдается существенно реже, чем в точках $n = 1$ и $n = 5$, можно объяснить различными дополнительными факторами. В частности, анализируя рис. 2.15 б, можно отметить, что максимумы ε_{pl} смещены вниз. Также, возможно большое влияние оказывают

вибрации от проходящих составов, которые могут проявляться сильнее в нижней части тоннеля.

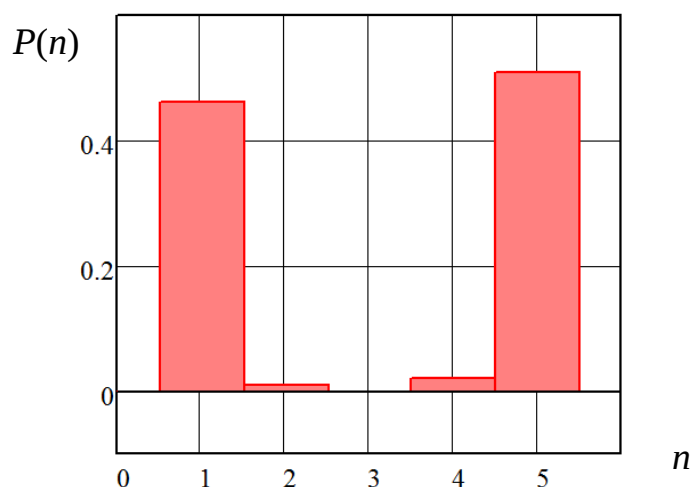


Рис. 2.16. Гистограмма, иллюстрирующая вероятность наблюдения полости в тех или иных точках тоннелях

Таким образом, при совместной интерпретации результатов численного моделирования и сейсмоакустических обследований тоннеля можно сказать, что сходимость между этими результатами удовлетворительна. А специфику напряжённно-деформированного состояния можно назвать одной из важных причин возникновения полостей в заобделочном пространстве.

По результатам исследований был сделан ряд выводов:

1. Часто называемые причины образования полостей в заобделочном пространстве, такие, как некачественный тампонаж, влияние вибрации от проходящих поездов, и прочие, можно дополнить еще одной причиной – влиянием напряжённно-деформированного состояния и разрушением грунта вблизи от выработки.

2. При множественных полевых акустических исследованиях методом регистрации отклика на ударное воздействие ИР наблюдается картина распределения полостей с частым их возникновением в боковой нижней части тоннеля.

Существенно реже возникают полости в боковой верхней части тоннеля. Наконец, в верхней части тоннеля полости практически не наблюдаются.

3. По результатам проведения численного моделирования можно отметить, что зоны пластической деформации грунта также концентрируются вблизи нижних боковых точек и в меньшей степени выражены в верхних боковых точках.

4. Опираясь на сходимость результатов натурных измерений и численного моделирования, можно предположить, что напряжённо-деформированное состояние и, в частности, специфика распределения зон пластической деформации, являются важным фактором при возникновении полостей в заобделочном пространстве. Оно также приводит к изменению акустических свойств контакта «обделка-грунт» при переходе от недеформированного состояния заобделочного пространства к пластическому и влияет на акустический отклик на ударное воздействие, позволяя обнаруживать пустоты.

Эти результаты позволили сформулировать второе научное положение.

2.3.3. Результаты исследований для ситуаций сложных горнотехнических условий

Цель этого этапа работы – анализ поведения грунтового массива в сложной горнотехнической ситуации, подразумевающей прогнозирование полостей в заобделочном пространстве с помощью совместных геофизических исследований и конечно-элементного моделирования.

Объектом исследования на этом этапе работы являлся грунтовый массив вокруг нескольких тоннелей метро. Ко времени произведения геофизических исследований участок породного массива уже содержал построенную линию метро, состоящую из двух тоннелей, что показано на рис. 2.17. Далее по тексту материала для этих тоннелей использовать обозначения «путь I» и «путь II». Ниже уровня уже построенной ветки была запроектирована новая ветка, также состоящая из двух тоннелей, рис. 2.17. Для этих тоннелей использованы обо-

значения «ЛПТ» и «ППТ» – левый и правый перегонный тоннели), проходившие один за другим. В октябре-июне 2017 года был пройден ЛПТ, а в марте-апреле 2018 года – ППТ). Обозначения тоннелей «путь I», «путь II» для действующих тоннелей и «ЛПТ», «ППТ» для строящихся соответствует принятой в рабочей документации номенклатуре.

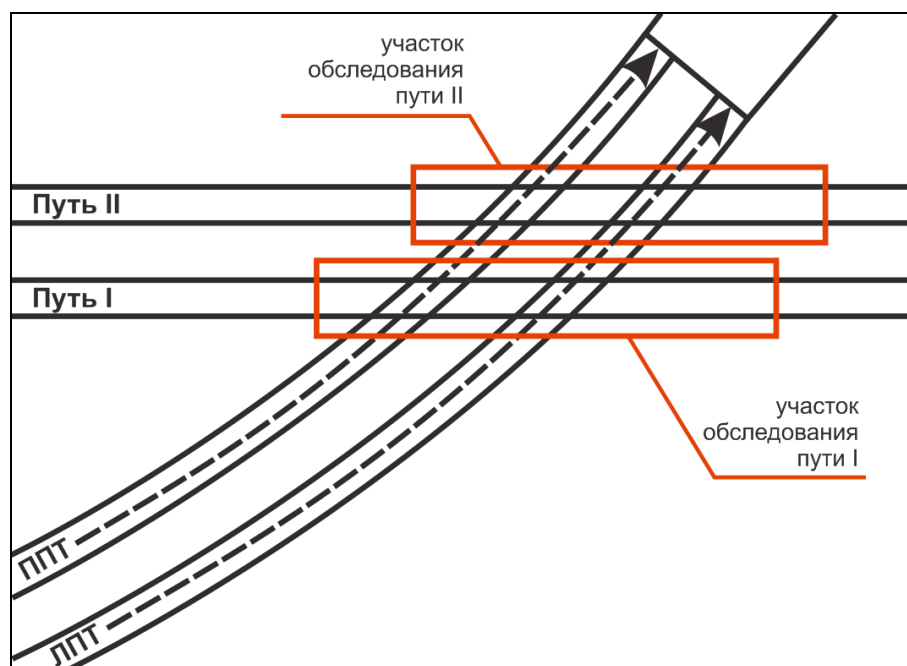
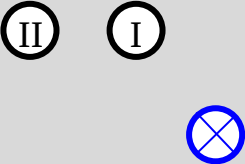
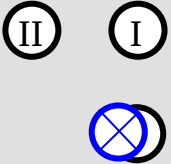
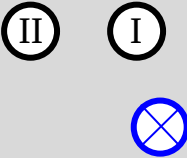
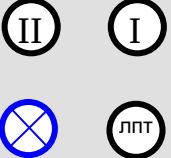
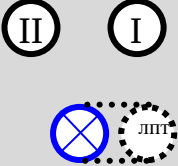
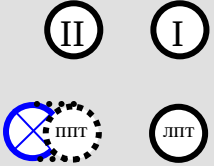
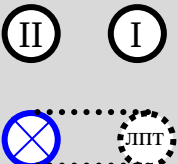
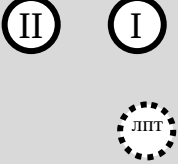
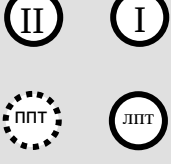


Рис. 2.17. Расположение тоннелей на плане с указанием участков обследования (при проходке ППТ)

В месте пересечения веток минимальное расстояние от лотка старых тоннелей до верхних точек новых составило всего 3 м.

Подобная сложная технологическая ситуация, представляющая собой четыре близко расположенных тоннеля (два действующих и два строящихся), потребовала двухразовой приостановки работы действующего метро на несколько дней, а также ведения мониторинга в процесс проходки. Мониторинг состоял из непрерывных маркшейдерских и периодических геофизических исследований.

Таблица 2.5. Расположение выработок и ротора щита в моменты проведения измерений

1	2	3	4	5	6
Цикл	Дата (проход- ка ЛПТ)	Расположение вы- работок и ротора щита	Цикл	Дата (проход- ка ППТ)	Расположение вы- работок и ротора щита
Л1	28.10.2017 Ротор перед сечением А-А		П1	25.03.2018 Ротор перед сечением А-А	
Л2	29.10.2017 Ротор подхо- дит к сечению А-А		П2	27.03.2018 Ротор подхо- дит к сечению А-А	
Л3	30.10.2017 Ротор за сече- нием А-А		П3	28.03.2018 Ротор за сече- нием А-А	
Л4	31.10.2017 Ротор за сече- нием А-А		–	–	–
Л5к	09.11.2017 Контрольный цикл		П4к	17.04.2018 Контрольный цикл	



– тоннели действующего метро



– положение ротора щита при проходке новой линии



– только что построенный участок (в месте пересечения тоннелей)

Геофизические исследования производились с целью выявления полостей в заобделочном пространстве. Методика их проведения соответствует, описанной в главе 2.1. Схема расположения точек также соответствует рисунку 2.1. Участок пересечения четырёх тоннелей обследовался несколькими подобными сечениями с шагом 5 м. При обработке зарегистрированных откликов использовался энергетический параметр E_p , также описанный в главе 2.1.

Геофизические измерения производились отдельными циклами – пять циклов при проходке ЛПТ и четыре цикла при проходке ППТ. Площадки геофизического обследования показаны на рис. 2.17 и подписаны «участок обследования пути I» и «участок обследования пути II». Также на рисунке выделен участок А-А, далее условно называемый «сечением А-А», в котором после строительства в массиве пород присутствуют все четыре тоннеля.

Циклы геофизических измерений описаны в таблице 2.5 где они обозначены по принципу: Л1 – первый цикл измерений при проходке ЛПТ, П1 – первый цикл измерений при проходке ППТ. В самых нижних ячейках таблицы описаны так называемые контрольные циклы, которые были произведены через длительный отрезок времени после строительства (обозначаются как Л5к и П4к). Описания циклов «Л» расположены в столбцах 1–3, а циклов «П» в столбцах 4–6.

В таблице 2.5 приведены также даты съёмки (столбцы 2 и 5) и схемы, описывающие расположение во времени конкретного цикла геофизических измерений ротора щита, а также старых и новых тоннелей в сечении А-А (столбцы 3 и 6).

Эти схемы следует читать следующим образом. Для «Л1» и «Л2» – пути I и II уже находятся в сечении А-А, ротор ТПМК (круг с перекрестием) находится перед сечением. В моменты проведения циклов измерений «Л3» и «Л4» ротор только что прошёл через сечение А-А и продвинулся дальше. Поскольку тоннель к этому моменту уже появился в сечении А-А, он показан пунктирным кругом.

Поскольку при проходке ППТ уже построен ЛПТ, он сразу же присутствует в схемах столбца 6. Для «П1» ротор аналогично «Л1» находится перед сечением А-А. Для «П2» он подходит к сечению. Для «П3» и «П4» – тоннель в сечении построен (показан пунктирной линией), ротор в этот момент находится за сечением.

Результаты геофизических исследований. По результатам проведения геофизических исследований и вычисления информативных параметров строилась карта свойств контакта. Значения E_p располагались на развёртке тоннеля в точках обследования, между точками значения E_p интерполировались. Наиболее часто использовались либо метод Криге, либо Шепарда. На картах по оси «Х» отложен номер кольца N , по оси «Y» – номер точки n . На рис. 2.18 представлены примеры таких карт для циклов П3 и П4к (обе карты сняты на I-м пути).

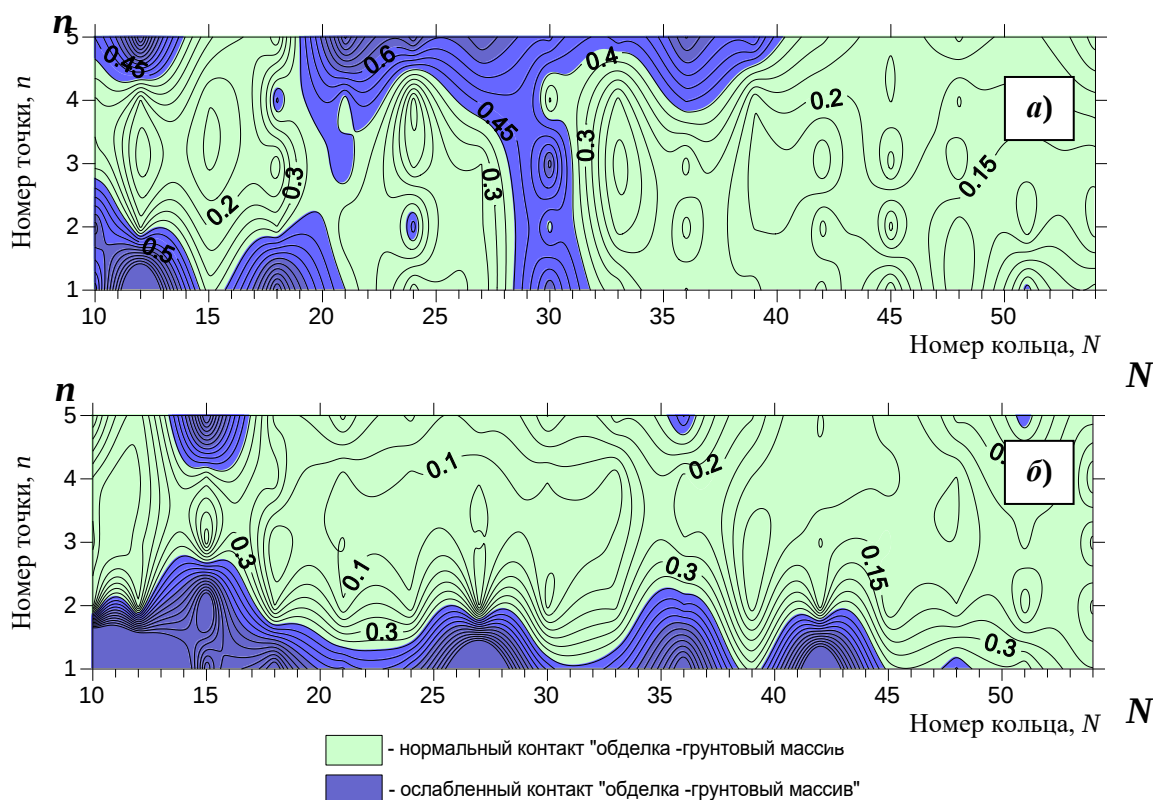


Рис. 2.18. Примеры карт свойств контакта для I-го пути: цикл П3 (а), цикл П4к (б)

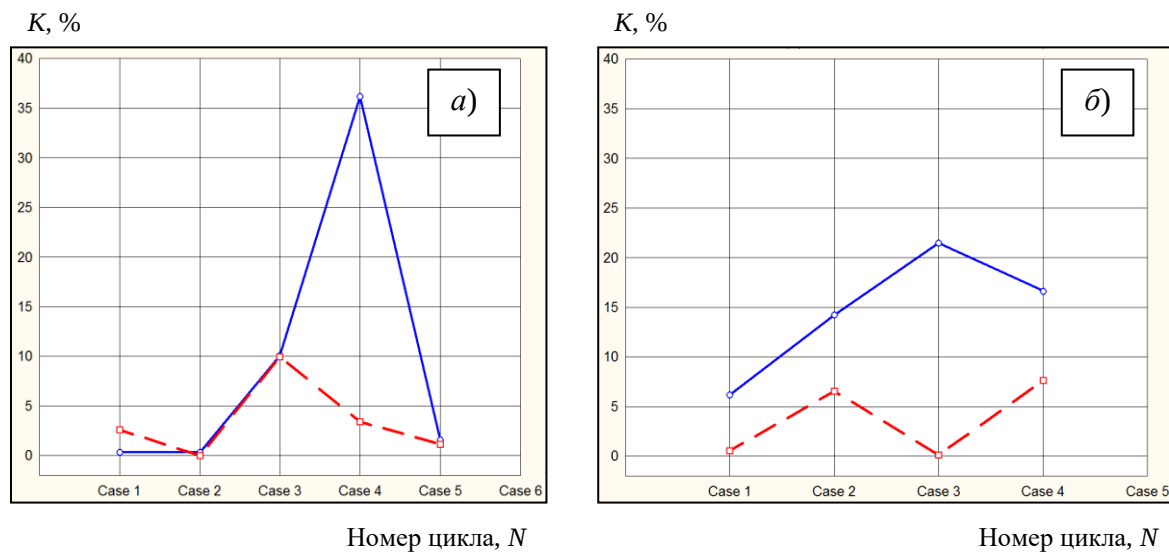


Рис. 2.19. Графики изменения K в зависимости от номера цикла: циклы Л1 – Л5к (а), П1 – П4к (б), I-II – номер пути

Тёмным цветом на картах обозначены области, в которых предполагался плохой контакт между грунтом и обделкой. Пороговое значение E_p , превышение которых означало, что за обделкой плохой контакт, были получены при обследовании, в которых качество контакта было известно заранее.

Для сравнительного анализа карт желательно использовать численные их характеристики. В качестве подобной характеристики был выбран процент площади карты, соответствующий плохому контакту K . На рис. 2.19 представлены графики изменения K от цикла к циклу.

Поскольку параметр K при обработке результатов подвержен влиянию выбранного интерполятора, было произведено дополнительное исследование. Одна из карт с высоким процентом K (цикл П3, карта I-го пути) была рассчитана с шестью различными интерполяторами. Результаты этих опробований представлены в таблице 2.6, сами карты, построенные с помощью этих интерполяторов, представлены на рис. 2.20.

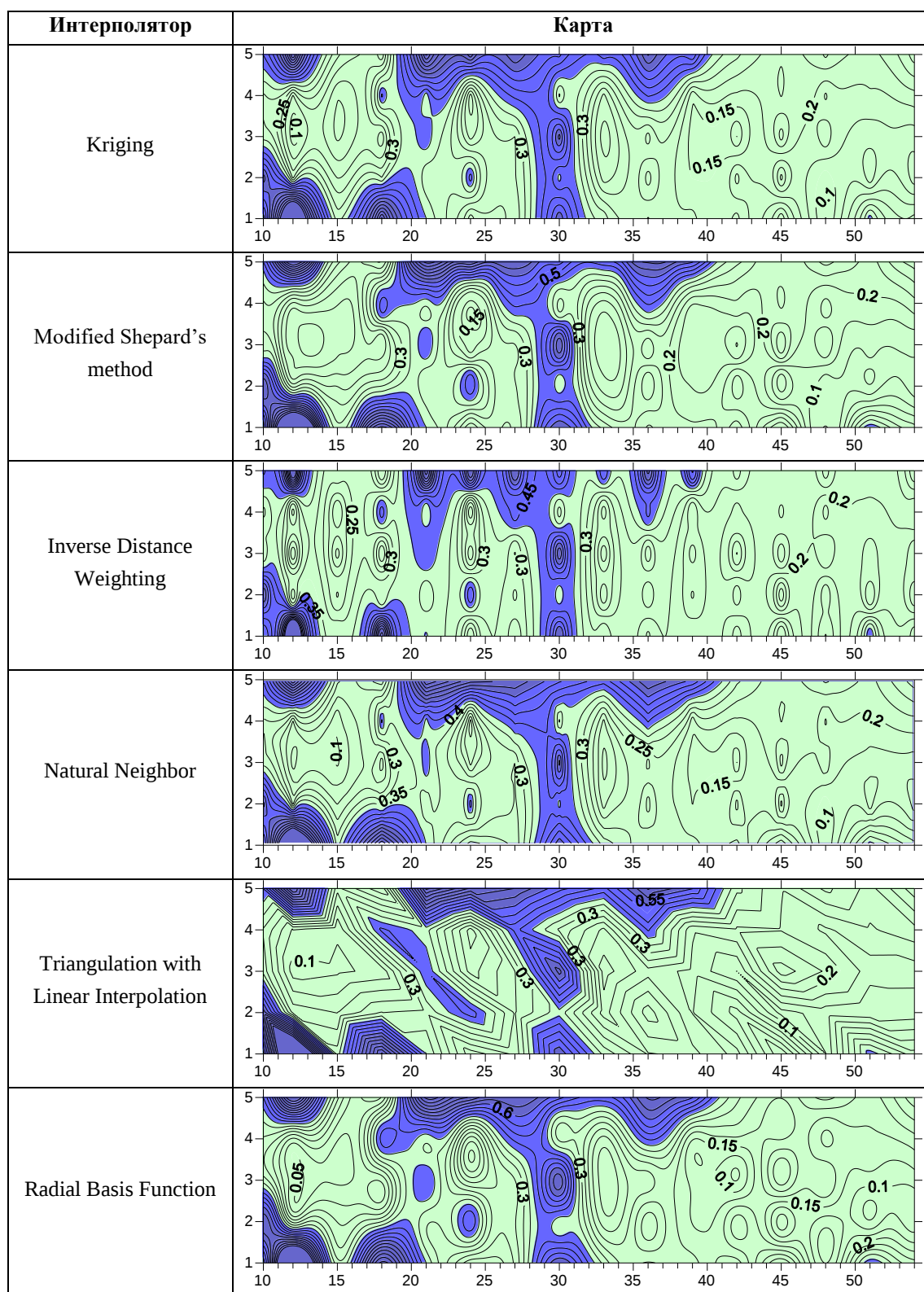


Рис. 2.20. Опробование различных интерполяторов для случая цикл ПЗ путь I

Таблица 2.6. Значения K для различных интерполяторов
(случай цикла ПЗ, путь I)

Интерполятор	K , %
Kriging	21,5
Modified Shepard's method	19,1
Inverse Distance Weighting	17,7
Natural Neighbor	20,4
Triangulation with Linear Interpolation	19,9
Radial Basis Function	20,8
Коэффициент вариации: 6.8 %	

Анализируя результаты, можно сказать, что значения K изменяются достаточно слабо. Коэффициент вариации для этих данных составил 6.8 %.

С целью более глубокого анализа полученных результатов было произведено моделирование в среде COMSOL Multiphysics, которое позволило объяснить некоторые из особенностей, наблюдаемых на картах свойств контакта и графиках K .

В основу модели положен критерий прочности Друкера-Прагера. Особенности модели, связанные с этим критерием изложены в разделе 2.3.

Использовалась двухмерная модель массива пород, представляющая собой однородный слой глины мощностью 65 м, в котором располагались тоннели. Тоннели моделировались как ничем не заполненное кольцо бетонной обделки. Диаметр тоннеля 5.6 м, толщина обделки 0.3 м. Свойства массива пород и обделки задавались, опираясь на результаты инженерно-геологических изысканий. Основной вариант значений параметров массива пород представлен в таблице 2.4. Глубина заложения действующих тоннелей 10.5 м, строящихся 18.3 (лоток).

Начальное поле напряжений, задававшееся в модели, учитывало только гравитационную составляющую, поскольку для Московского региона тектоническая составляющая незначительна. Граничные условия – «Free» на дневной поверхности (возможны любые смещения), «Roller» на остальных границах (возможны смещения вдоль границы, невозможны смещения перпендикулярно

границе). На рис. 2.21 представлена общая схема модели с указанием граничных условий в глобальной системе координат COMSOL Multiphysics.

Таблица 2.7. Основной набор значения физических свойств модели

	Угол внутреннего трения φ , градусов	Сцепление c , кПа	Удельный вес γ , кН/м ³	Модуль упругости E , МПа	Коэффициент Пуассона ν
Массив	36	50	22	50	0.3
Обделка	–	–	25	20 000	0.2

Результаты моделирования визуализированы на рис. 2.22 *а* и *б*. Здесь изолиниями даны значения эквивалентного девиаторного напряжения σ_e . Бинарной цветовой шкалой обозначены эффективные пластические деформации ε_{pl} . В областях, для которых $\varepsilon_{pl} > 0$, присутствуют пластические деформации. На рис. 2.15 *а* они обозначены цифрой 1. Там, где $\varepsilon_{pl} \leq 0$, пластические деформации отсутствуют. Такие области обозначены цифрой 2.

Производился расчёт нескольких моделей отличающихся количеством тоннелей. Разрабатывались варианты с 1, 2, 3 и 4-мя тоннелями, которые располагались в соответствии с реальным положением выработок. На результатах моделирования можно отметить, что правый нижний тоннель располагался чуть выше, что соответствует реальному положению дел. На рис. 2.22 *а* можно увидеть, как ведет себя массив грунта вокруг отдельного тоннеля (левого верхнего), и как себя ведет массив грунта вокруг двух тоннелей, располагающихся один под другим (правые тоннели). На рис. 2.22 *б* представлен вариант со всеми четырьмя тоннелями.

С целью оценки того, как сильно могут изменяться размеры, и форма областей, производилось дополнительное исследование с варьированием значений физических параметров модели P_i (где i – номер параметра, приведённый в таблице 2.8).

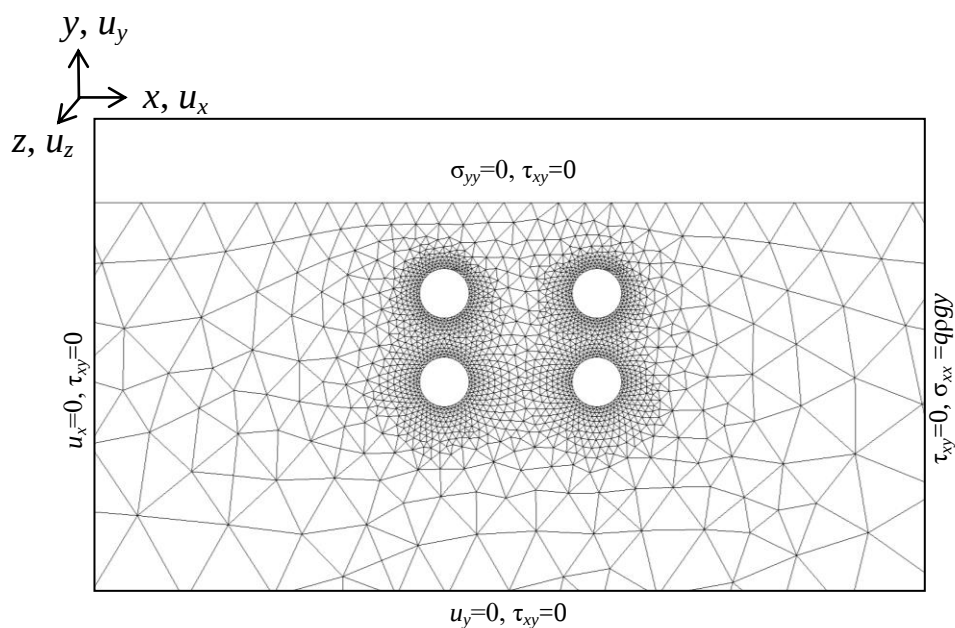


Рис. 2.21. Общая схема модели с четырьмя тоннелями с разбивкой на конечные элементы и указанием граничных условий в глобальной системе координат COMSOL Multiphysics

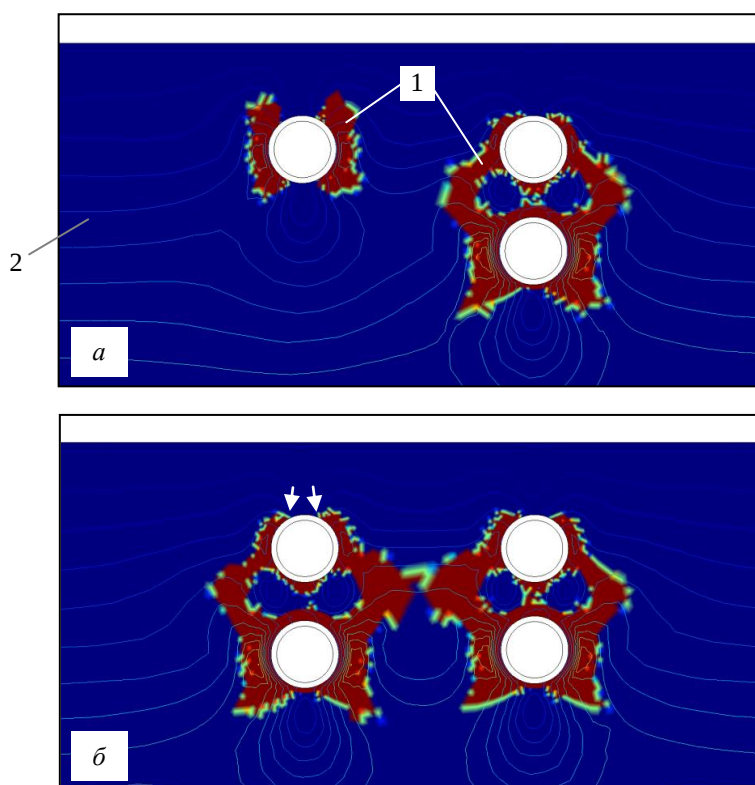


Рис. 2.22. Результаты моделирования в виде значений эквивалентного девиаторного напряжения σ_e (изолинии) и эффективных пластических деформации ε_{pl} (бинарная шкала, цифрой 1 указано наличие ε_{pl} , цифрой 2 – отсутствие ε_{pl}): стадия после проходки ЛПТ (а), стадия после проходки ППТ (б). Белыми стрелками показаны участки в которых происходит смещение областей пластической деформации

Работа велась на модели с одним тоннелем в массиве по методике однофакторного эксперимента, когда изменялся один фактор, а все остальные факторы были неизменны. Предварительное варьирование параметров обделки показало, что они практически не влияют на размеры и форму областей пластической деформации.

Варьирование параметров грунта производилось на пяти уровнях в рамках возможного максимума и минимума их значений. Использовались следующие диапазоны параметров: $\nu = 0.29...0.33$, $\varphi = 30...46^\circ$, $c = 35...55$ кПа, $E = 20...60$ МПа, $\gamma = 16...28$ кН/м³.

В процессе проведения этого исследования стало ясно, что изменение значений P_i в основном влияет на размер областей пластических деформаций. Эти области могут либо прижиматься к обделке, либо отходить от неё, однако форма и площадь их прилегания к обделке меняется относительно слабо.

Также была разработана методика оценки чувствительности модели к влиянию изменения значений параметра. В качестве критерия был выбран размер области L . Поскольку области сохраняли компактность при всех вариантах значений параметров, в качестве L было решено использовать максимальное расстояние от обделки до края области пластической деформации.

Далее были построены графики зависимостей $L(\nu)$, $L(\varphi)$, $L(c)$, $L(E)$, $L(\gamma)$. При этом для того, чтобы минимизировать влияние абсолютных величин значения L и параметров ν , φ , c , E , γ были нормированы на их максимумы. Полученные графики в большинстве случаев показывали либо монотонный рост, либо монотонное спадание. Поскольку графики обладали в основном слабой нелинейностью, было решено использовать их крайние значения для оценки чувствительности. На основании этих допущений для каждого параметра P_i были вычислены коэффициенты чувствительности

$$S_i = \frac{L(P_{\max,i}) - L(P_{\min,i})}{P_{\max,i} - P_{\min,i}} \quad (2.20)$$

где i – номер параметра, $L(P_{max,i})$ и $L(P_{min,i})$ – размер L области пластических деформации при максимальном и минимальном значении i -го параметра, $P_{max,i}$ и $P_{min,i}$ – максимальное и минимальное значение i -го параметра. Таким образом, S_i оценивает прирост размера области пластической деформации L относительно прироста значения параметра.

Полученные коэффициенты чувствительности представлены в таблице 2.8. Анализируя результаты можно отметить, что наименьшее воздействие на размер областей оказывает модуль Юнга, а наибольшее коэффициент Пуассона. Отрицательное значение S_i говорит, что приращение параметра вызывает уменьшение размера области, положительное – ее увеличение. Подобные коэффициенты можно использовать для оценки того, насколько допустимо переносить результаты моделирования на другие площадки строительства, где другие свойства массива могут отличаться.

Таблица 2.8. Коэффициенты чувствительности, оценивающие влияние варьирования параметров грунтов на размеры областей пластических деформаций

i	1	2	3	4	5
P_i	ν	ϕ	c	E	γ
S_i	-6.3	-2	-1.7	0.12	1.75

Анализируя результаты моделирования в целом, можно отметить, что проходка трёх и четырёх тоннелей в массиве создаёт сложное напряженно-деформированное состояние (НДС).

Также стоит отметить, что расположение зон пластической деформации вокруг отдельной выработки довольно хорошо соответствует типичной наблюдаемой картине, получаемой при геофизическом обследовании. Так, например, в точках $n = 1$ и $n = 5$ полости возникают наиболее часто, в точках $n = 2$ и $n = 4$ реже, в точке $n = 3$ наблюдаются очень редко. Отмечая эту особенность, можно подтвердить типичные результаты геофизических исследований и предположить, что высокая энергия отклика на ударное воздействие соответствует зонам пластических деформаций за обделкой и связана с разуплотнением грунта в об-

ласти контакта «обделка-грунт», выявляемым при геофизических исследованиях.

Что интересно, области пластической деформации могут смыкаться и образовывать единую систему, расположенную между всеми четырьмя тоннелями (см. рис. 2.22 б). Получение подобных результатов позволило объяснить некоторые особенности поведения областей разуплотнения, размеры которых были оценены с помощью метода IR.

Проведённое моделирование при совместной с результатами полевых исследований интерпретацией позволило кроме подтверждения результатов геофизических исследований получить также дополнительные выводы.

Наиболее заметные общие особенности, просматривающиеся по полученным графикам коэффициента K , состоят в том, что они содержат выраженные пики. При этом, пройдя через зону повышенных значений площади плохого контакта «грунт-обделка», значения K уменьшаются. Т.е. происходит перераспределение деформаций в массиве, и полости закрываются.

На рис. 2.19 а наиболее выраженный пик, выявленный при проходке ЛПТ, находится на четвёртом цикле съёмки по I-му пути. То, что пик наблюдался уже после того, как щит прошёл под площадкой обследования (на третьем цикле, табл. 1) легко объяснить временем, которое необходимо для того, чтобы из-за ползучести пластические деформации достигли зон массива, расположенных вблизи от тоннеля «путь I». То, что подобные процессы происходят, и зоны пластических деформаций не только возникают вблизи от новых тоннелей, но и достигают старых тоннелей, а также изменяют форму зон разуплотнения вблизи действующих тоннелей, хорошо видно по рис. 2.22.

Интересными особенностями обладает также график проходки ППТ (рис. 2.22 б). На графике пути I здесь хорошо выражен пик на третьем цикле. Карта этого случая представлена на рис. 2.18 а. Особенностью этой карты является то, что области плохого контакта здесь появляются даже в точке $n = 3$, где они бывают очень редко.

Стоит также отметить, что область, захватывающая точку $n = 3$, располагается непосредственно в том месте, где щит проходил под тоннелем пути I ранее при проходке ЛПТ (рис 2.18 а при $N = 30$). Другими словами, проходка соседнего тоннеля (ППТ) повлияла на уже пройденный участок и обострила ситуацию. Результаты моделирования с четырьмя тоннелями наглядно показывают, как мог бы происходить подобный процесс. На рис. 2.15 б хорошо видно, что области пластических деформаций могут возникать в пространстве между четырьмя тоннелями. И таким образом проходка ППТ может ухудшать ситуацию вблизи того места, где ранее велась проходка ЛПТ.

К сожалению, обе геофизические съёмки на пути II в значительной степени подвержены влиянию случайных факторов. В обоих случаях на первых циклах графики пути II ведут себя похоже с графиками пути I, однако в местах пиков эти графики показывают провалы (массив консолидируется). Оба эти случая можно объяснить тем, что момент максимального разуплотнения просто не попал в запланированную систему измерений, ограниченную технологическими особенностями работы метрополитена. Это особенно хорошо видно на циклах 3 и 4 проходки ППТ. Цикл 3 соответствует моменту, когда щит только отошёл от точки пересечения с тоннелем «путь II». Скорее всего, пластические деформации просто не успели достичь массива вблизи этого тоннеля. Четвёртый же цикл является контрольным и отстоял от третьего на довольно большой отрезок времени.

Стоит отметить ещё одну особенность, которую удалось объяснить при совместной интерпретации результатов моделирования и полевых измерений. Тоннель, не испытывавший влияние проходки нижележащей выработки, можно увидеть на рис. 2.22 а (левый верхний тоннель). Ситуация меняется, когда под ним ведётся проходка (рис. 2.22 б). В этом случае зоны пластических деформаций на контакте «грунт-обделка» немного продвигаются вверх, к точке $n = 3$. Эти участки показаны белыми стрелками на рис. 2.22 б. На этих участках соотношения между нормальными и тангенциальными напряжениями в соответствии с критерием прочности Мора-Кулона приводят к образованию областей

пластических деформаций, которые смещены вверх. Важно отметить, что речь идет не о площади этих областей, а о том, какая часть контакта «грунт-обделка» захвачена пластическими деформациями.

Анализируя карты свойств контакта, можно отметить, что при проходке под тоннелем в верхней его точке ($n = 3$) действительно чаще начинают наблюдаться области разуплотнения. В качестве примера можно рассмотреть карту свойств контакта рис. 2.22, *а*, полученную сразу после проходки под тоннелем. В отличие от карты рис. 2.22, *б*, здесь сразу несколько верхних точек указывают на плохой контакт «грунт-обделка».

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Наблюдается удовлетворительная сходимость между результатами геофизических исследований областей разуплотнения грунтового массива в заобделочном пространстве и численного моделирования зон пластической деформации. Это позволяет использовать полученный результат при проектировании объектов подземного строительства, выявлении причин аварийных и проблемных ситуаций.

2. При мониторинговых измерениях в обоих действующих тоннелях можно отметить возникновение задержки между моментом проходки нового тоннеля и образованием участков плохого контакта «грунт-обделка» действующего тоннеля. Через некоторое время процессы образования этих участков могут приобретать обратный характер развития (площади участков ослабленного контакта «грунт-обделка» сокращаются).

3. При строительстве в сложных горно-технологических условиях, подразумевающих проходку двух тоннелей под уже существующими двумя тоннелями, может наблюдаться довольно сложное НДС, при котором может сложиться ситуация, когда зоны пластических деформаций развиваются не в точке, где строящийся тоннель проходит под действующим, а там, где проходка велась несколько месяцев назад. При этом за счёт эффекта задержки, описанного вы-

ше, в точке пересечения действующего тоннеля и строящегося в момент проходки области разуплотнения ещё не наблюдаются.

4. Также при подобных условиях проходки может возникать ситуация, наблюдаемая как по геофизическим, так и по модельным исследованиям, когда участки плохого контакта будут развиваться не в стороны от точки пересечения действующих и строящихся тоннелей, а к верхней точке действующего тоннеля, таким образом, формируя кольцо разуплотненных грунтов вокруг него.

Выводы по второй главе

В результате многолетних работ в Московском метрополитене были собраны данные по сейсмоакустическому обследованию большого количества участков. При этом решались задачи различного уровня сложности: производились типичные обследования протяжённых участков тоннелей; производились исследования более сложных участков, таких как сопряжения выработок, обследования помещений, наклонных и вертикальных выработок. Отдельный интерес представляли изыскания, подразумевавшие контроль заобделочного пространства эксплуатируемых тоннелей при строительстве под ними новых тоннелей. Этот полученный материал был обработан и проанализирован, что позволило получить ряд результатов (материалы опубликованы в [247, 248, 249, 250]):

- был выявлен ряд закономерностей, описывающих изменения в спектре зарегистрированных откликов обделки на ударное воздействие в зависимости от того, чем заполнена (грунт, воздух, вода). Это позволило разработать методику определения заполнителя полости по максимуму коэффициента корреляции между спектральными составляющими модельного и натурного сигналов;

- установлено, что специфика возникающего рядом с тоннелем напряжённо деформированного состояния является существенным фактором, влияющим на образование полостей в заобделочном пространстве;

– выявлен ряд особенностей изменения напряжённо деформированного состояния в процессе ведение проходки новых тоннелей метрополитена под эксплуатирующимися тоннелями. В частности, выявлено, что зоны пластической деформации, развивающиеся вблизи тоннелей, могут формировать кольцо разуплотнённых грунтов вокруг тоннеля. Этот результат может иметь важное значение при прогнозировании развития полостей в заобделочном пространстве при аналогичных ситуациях.

Материалы этой части исследования опубликованы в следующих статьях: [247, 249, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257].

Глава 3. Развитие метода георадиолокационного контроля заобделочного пространства

Георадиолокационный контроль заобделочного пространства может быть реализован двумя основными подходами. Это, во-первых, высокочастотная георадиолокация из внутреннего пространства тоннеля – этот подход ограничен возможностью обследовать только железобетонные обделки. А, во-вторых, это обследование массива пород находящегося рядом с тоннелем с поверхности, с помощью низкочастотной георадиолокации. В течение длительного времени автором были собраны результаты подобных обследований на большом количестве объектов (многие десятки). Анализ этого собранного материала позволил предложить наиболее оптимальные графы обработки данных.

3.1. Специфика георадиолокационного выявления полостей в заобделочном пространстве

Экспериментальные натурные результаты были получены на обделках Московского метро (как эксплуатируемые, так и строящиеся объекты) с помощью георадара ОКО-2 с антенными блоками 1200 и 1700 МГц. Часть данных была получена при съёмке в котлованах и на полигоне Горного института (МГИ) НИТУ «МИСИС» на объектах для которых расположение полостей было известно.

Рис. 3.1 представляет собой один из подобных результатов, полученных на строительной площадке московского метрополитена (в котловане). На рис. 3.1 *а* представлена схема измерений (вид сверху): обделка представляет собой вертикальную железобетонную плиту в одной части прижатую грунтом, а в другой – не прижатую. Снимая георадаром по поверхности плиты, можно получить данные для ситуации, когда граница «обделка-грунт» сменится на границу «обделка-воздух», что приведёт к изменению коэффициента отражения:

$$K_{omp} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1'} - \sqrt{\varepsilon_2'}}{\sqrt{\varepsilon_1'} + \sqrt{\varepsilon_2'}} \quad (3.1)$$

где ε_1' – действительная часть диэлектрической проницаемости среды, из которой излучение падает на границу (обделка), ε_2' – действительная часть диэлектрической проницаемости среды, в которую излучение проходит (грунт, либо воздух). Изменение K_{omp} приведёт к изменению амплитуды отражённой волны.

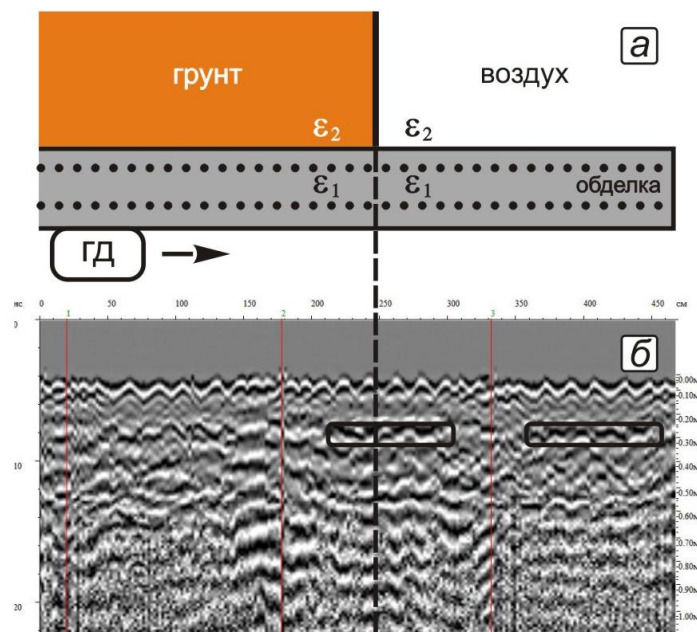


Рис. 3.1. Георадиолокационные измерения в котловане: *а* – схема обследования, *б* – результат обследования (радарограмма). ГД – георадар «ОКО-2», 1200 МГц

На рис. 3.1 *б* представлена одна из радарограмм, полученных в котловане. Горизонтальные масштабы схемы рис. 1 *а* и радарограммы рис. 1 *б* совпадают. Граница находится на глубине 20-25 см (см. правую шкалу радарограммы) и очень слабо просматривается из-за помехового влияния армирования. Можно заметить, что в правой части радарограммы, там, где за обделкой отсутствует массив, граница просматривается лучше (наиболее выраженные участки обведены прямоугольниками). Другими словами, контраст ε_1' для границы «обделка-грунт», ниже, чем для границы «обделка-полость». Однако, нужно признать, что по волновому полю это видно достаточно плохо. Подобных радарограмм

снято достаточно большое количество (представлен наиболее хорошо читающийся вариант). В большинстве случаев получить убедительную разницу не удавалось.

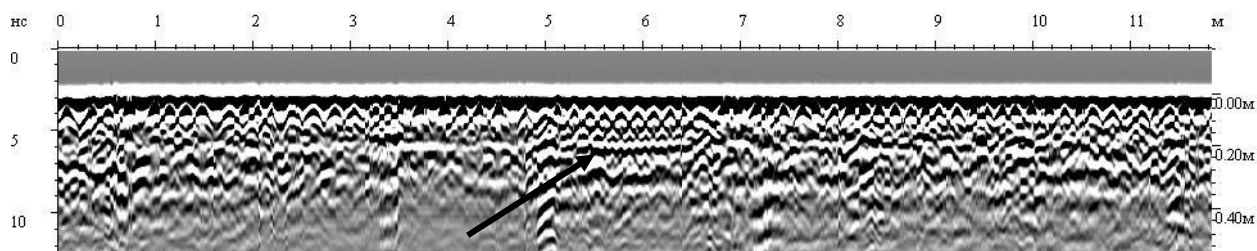


Рис. 3.2. Результаты георадиолокационных съёмок в тоннелях метрополитена. Пример изменения коэффициента отражения от границы «обделка-грунт» Георадар «ОКО-2», 1200 МГц

До некоторой степени этот негативный результат ожидаем. Разница контрастов основного параметра среды для георадиолокации (ϵ') на границе «обделка-грунт» и «обделка-воздух» менее выражена, чем основного параметра среды для методов, основанных на регистрации откликов упругих волн (акустическая жёсткость). Ещё одним негативным фактором здесь является хорошо просматриваемые волновые «портреты» многорядной арматуры. Арматура видна не только в месте своего заложения, но также, за счёт гиперболических осей синфазности, которые из-за небольшой глубины границы (20-30 см) накладываются на неё.

При обследовании тоннелей метрополитена были выявлены также случаи, когда граница из слабо просматриваемой становилась ярко выраженной (см. рис. 3.2, область указана стрелкой). Причём в некоторых случаях зона высокого контраста ϵ' была привязана к границам плит. Это было интерпретировано как увеличение ϵ' , которое может создавать вода в заобделочном пространстве.

На рис. 3.3 представлена другая ситуация. На рис. 3 а представлена схема измерений (вид сбоку): железобетонная плита, 12 см толщиной, положена на полости в грунте. На схеме прорисован профиль полостей. Так же, как и в слу-

чае с первым примером отснята серия радарограмм. На рис. 3.3 б представлена одна из таких радарограмм. Можно заметить, что с месторасположением полостей достаточно хорошо совпадает проявление на трассах так называемых «звонящих» записей. Под «звоном» понимается длительный периодический сигнал, повышенной амплитуды. Их можно подчеркнуть обработкой – см. рис. 3.3 в. Этот результат был гораздо более стабилен, чем в первом примере: «звоны» стабильно возникали при пересечении профилем полости под плитой.

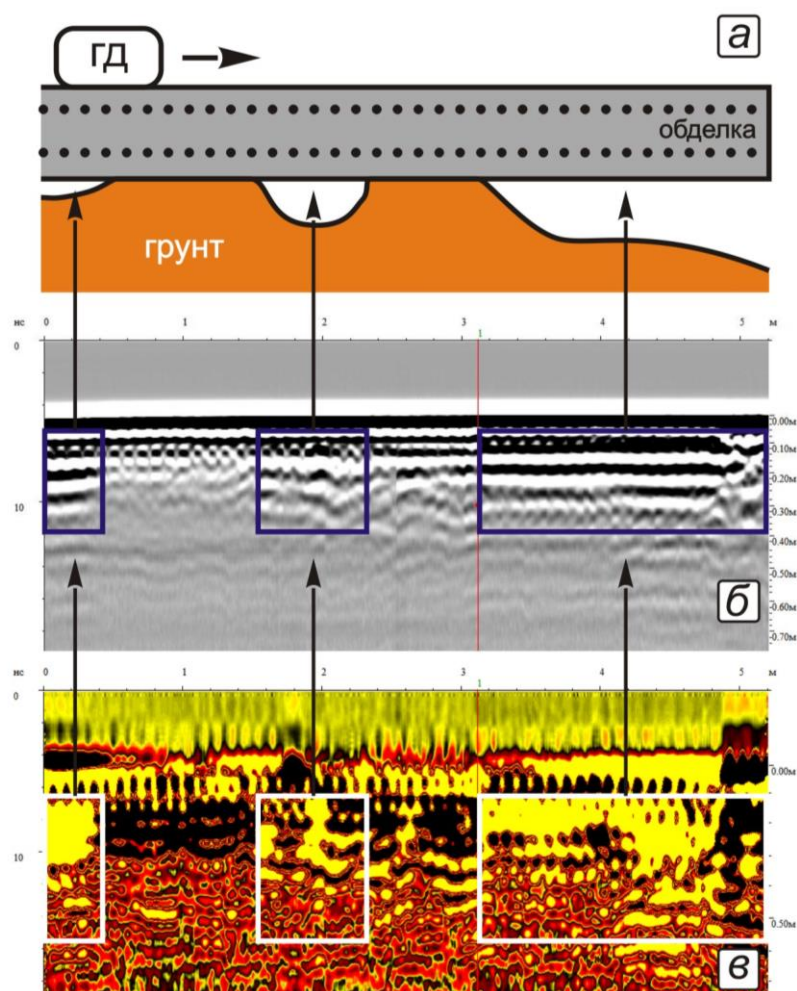


Рис. 3.3. Георадиолокационные измерения по плите: *а* – схема обследования, *б* – результат обследования (радарограмма), *в* – разрез мгновенных амплитуд.
ГД - георадар «ОКО-2», 1700 МГц

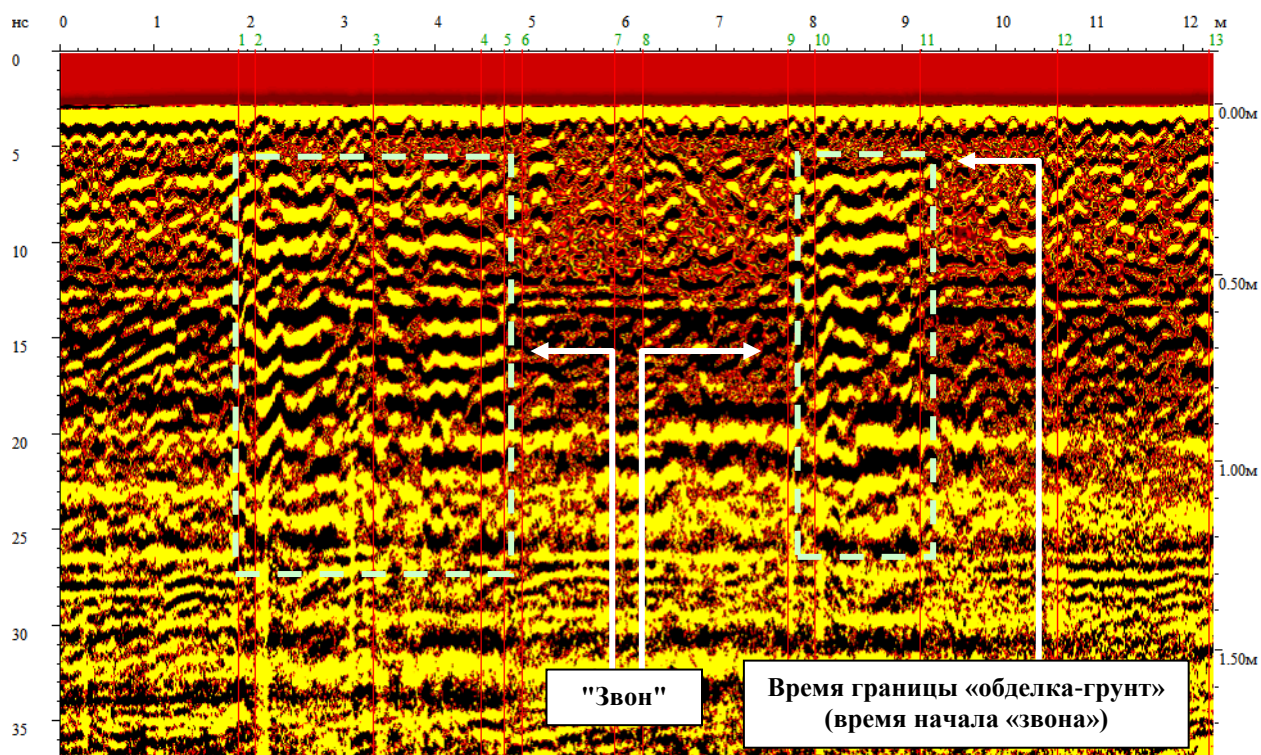


Рис. 3.4. Результаты георадиолокационных съёмок в тоннелях метрополитена. Примеры звенящих записей, указывающих на плохой контакт «грунт-обделка». Георадар «ОКО-2», 1200 МГц

На рис. 3.4 и 3.5 представлены результаты съёмки в тоннелях метрополитена. По большей части «звенящие» записи приходится выделять обработкой. На рис. 3.4 представлен один из вариантов такой обработки. Граница «грунт-обделка» в этих случаях может подавляться, для выделения границы приходится применять другую обработку. Анализируя картину, можно заметить, что оба выделенных участка имеют «звон», начинающийся со времён, соответствующих приходу отражений от обследуемой границы (20-25 см). Т.е. первые вступления «звонов» не просматриваются раньше отражений от границы «обделка-грунт».

При работе с данными, снятыми в тоннелях в большинстве случаев для радарограммы приходится искать тот граф обработки, который наиболее удачно выделить сигнал-идентификатор. Часто решение приходится принимать на основании анализа нескольких факторов, видных при различных обработках.

Однако, в некоторых случаях «звон» просматривается настолько хорошо, что не требует обработки по его выделению. Примером такой ситуации может быть радарограмма, представленная на рис. 3.5. Здесь метки (вертикальные линии на волновом поле радарограмм) обозначают границы плит. Видно, что ярко выраженный «звон» приурочен к размерам одной плиты. На рис. 3.5 б обработкой выделена граница «обделка-грунт». Сопоставив рис. 3.5 а и рис. 3.5 б можно заметить, что звон идёт от границы «обделка-грунт» и не начинается раньше её.

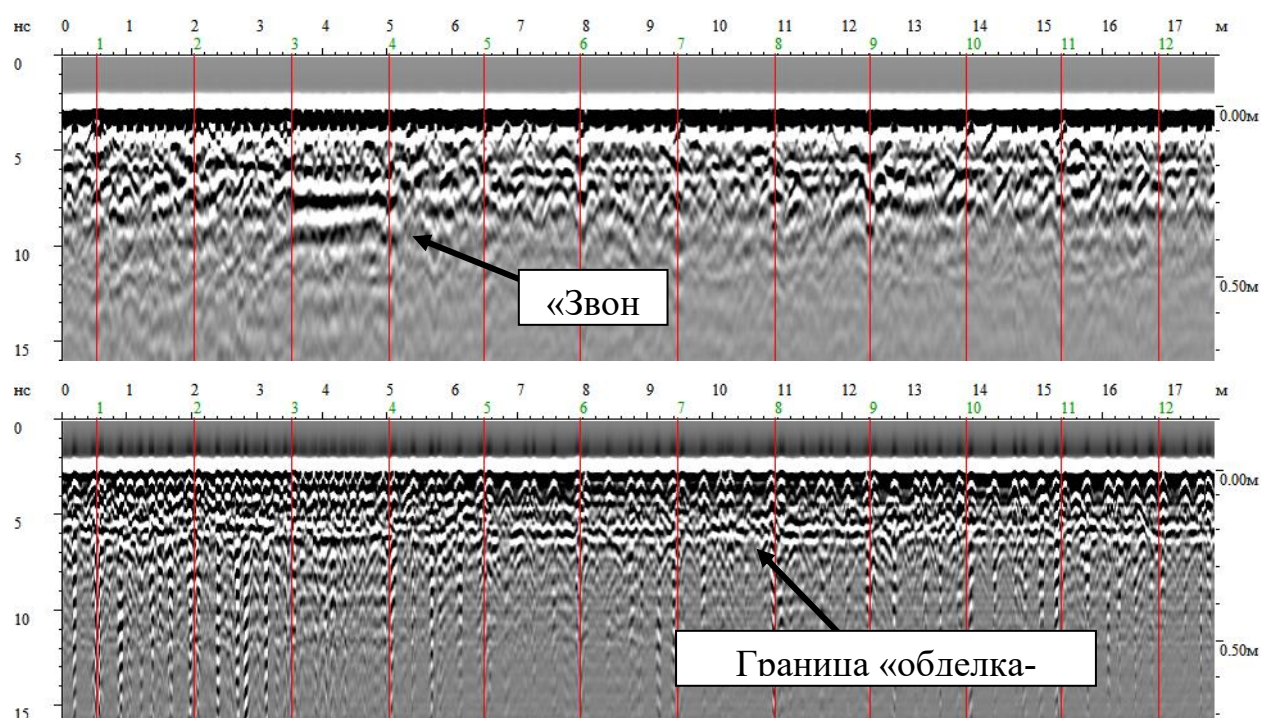


Рис. 3.5. Результаты георадиолокационных съёмок в тоннелях метрополитена: *а* – исходная радарограмма, *б* – радарограмма после обработки, направленной на выделение границы «грунт-обделка». Георадар «ОКО-2», 1200 МГц

Исходя из анализа полученных данных, можно сказать, что решения о том, чем заполнены полости принимать, обычно, сложно. Отрицательные значения коэффициента отражения описывают амплитудную инверсию сигнала. Анализируя выражение (3.1) можно сказать, что если волновой пакет отразился от границы, на которой ε' контрастно уменьшается, то $K_{отр} > 0$ и инверсия сигнала не произойдёт (наблюдается вариант «обделка-воздух»). Если волновой пакет отразился от границы, на которой ε' контрастно увеличивается, то

$K_{отр} < 0$ и полярность сигнала поменяется на обратную (это вариант «обделка–вода»).

К сожалению, при обследовании обделок помехи столь сильно влияют на границу, что анализировать полярность в большинстве случаев трудно. При этом обработка, направленная на выделение границы (в первую очередь подавление прямой волны с вычитанием среднего), часто сильно искажает информацию о полярности первого вступления. Часто теряется само первое вступление и не ясно какой полупериод видит интерпретатор. Такова ситуация с рис. 3.5 а – нельзя быть полностью уверенным, что отражение пришло не инвертированным. Приблизительно такие же результаты приходится в большинстве случаев наблюдать и при работе с георадарами с поверхности [258].

Судя по опыту работ, наличие так называемых воздушных помех, количество которых достаточно велико в условиях закрытого пространства тоннелей не является острой проблемой. И решается отчасти экранированием (которое обычно реализуется для высокочастотных георадаров), а отчасти опытом интерпретатора – разделить помехи и полезные отражения в большинстве случаев вполне возможно.

3.2. Подбор графа обработки георадиолокационных данных при выявлении полостей в заобделочном пространстве

Одной из проблем при интерпретации георадиолокационных данных, снятых в тоннелях при поиске полостей, можно назвать большой динамический диапазон сигналов. Это сказывается на том, что, во-первых, полезные сигналы быстро затухают, и амплитуда "звона" в его начале существенно уменьшается уже через несколько периодов. Во-вторых, на начальные участки трасс накладывается высокоамплитудная прямая волна (ПВ). При этом амплитуды сигналов-идентификаторов на фоне большой ПВ незначительны, что определяет их низкий контраст при визуализации. В результате они слабо читаются на радарограмме при кодировании амплитуд цветовой шкалой.

Неравномерность распределения амплитуд во времени приводит к необходимости использовать автоматическую регулировку усиления (АРУ), когда амплитуда сигналов, приходящих позже, увеличивается в большей степени, чем у сигналов, приходящих ранее. Эту процедуру можно описать следующим выражением

$$\tilde{A}(t, l) = A(t, l) \cdot k(t, l), \quad (3.2)$$

где $A(t, l)$, $\tilde{A}(t, l)$ – амплитуды радарограммы до и после введения АРУ, t – время трассы; l – расстояние от начала профиля до точки измерения; $k(t, l)$ – возрастающая функция, описывающая увеличение усиления со временем.

В ряде случаев эта функция рассчитывается на основании известных физических свойств объекта исследования. Но чаще всего на практике эти свойства неизвестны. И тогда функция $k(t, l)$ может получаться на основании изучения статистических характеристик самой радарограммы, вычисляемых в скользящем окне, например, следующим образом

$$k(t, l) = m \cdot \frac{1}{L(A_{t,l}, W_t, W_l)}; \quad (3.3)$$

где $k(t, l)$ – искомая функция усиления; m – масштабирующий коэффициент; $A_{t,l}$ – значения сигнала в двумерном скользящем окне; t, l – координаты центра окна по времени и на профиле соответственно; W_t – ширина окна по времени; W_l – ширина окна по длине профиля (количество трасс, попадающих в окно); $L(A_{t,l}, W_t, W_l)$ – статистическая характеристика, вычисленная по значениям сигнала $A_{t,l}$ в окне.

В качестве $L(A_{t,l}, W_t, W_l)$ могут использоваться: средняя величина абсолютных значений сигнала в окне $M(|A_{t,l}|)$, их медиана $Me(|A_{t,l}|)$, максимум $Max(|A_{t,l}|)$. Функция $L(A_{t,l}, W_t, W_l)$, как правило, является монотонно убывающей, хотя на отдельных локальных участках может наблюдаться отклонение от этой закономерности. При этом величина $1/L(A_{t,l}, W_t, W_l)$, входящая в выражение (3.3), будет компенсировать уменьшение величины сигнала со временем. Её

применение даст выравнивание уровня сигнала на радарограмме и уменьшение влияния ПВ, маскирующей затухающий полезный сигнал.

При максимальной ширине окна W_l , равной количеству трасс в профиле, т. е. при $W_l = N$, можно построить одну функцию $k(t,l)$ для всей длины l радарограммы. Таким образом, при вычислении $k(t,l)$ окно будет "скользить" только по времени. Если взять $W_l < N$, это позволит построить $k(t,l)$, изменяющуюся вдоль по профилю. Слишком малый размер окна W_t по времени приведёт к тому, что функция $k(t,l)$ перестанет быть гладкой. Это может привести к искажению радарограммы после введения АРУ. Эмпирически оптимальной для задачи обследования обделки была принята величина W_t , равная 20 отсчётам.

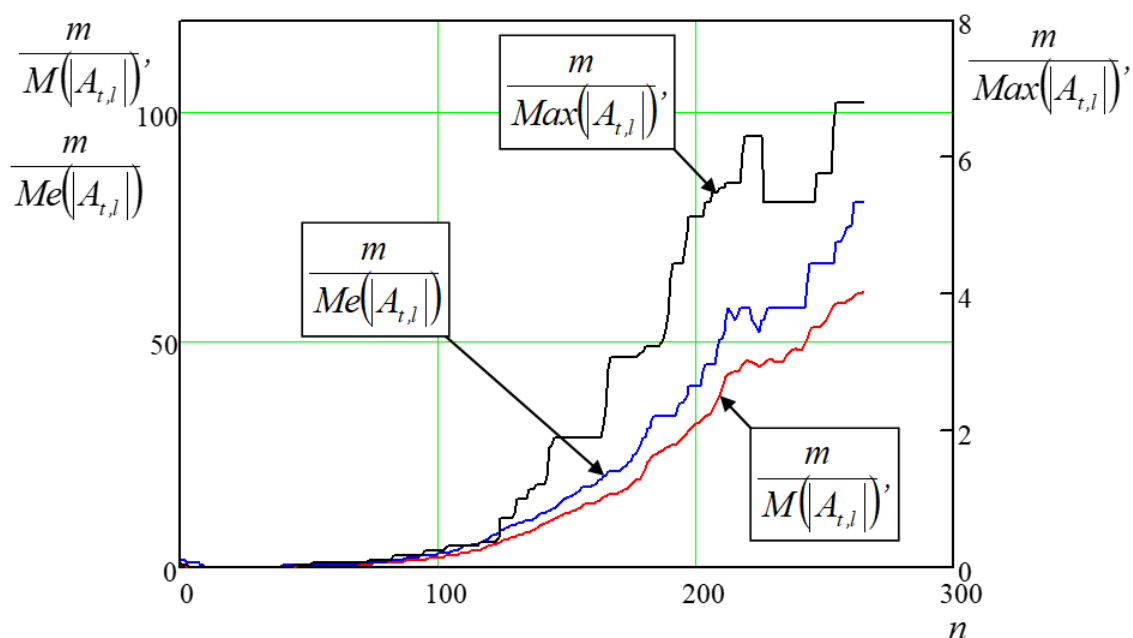


Рис. 3.6. Функции усиления для различных статистических характеристик, вычисленных в скользящем окне: n – номер отсчёта трассы, к которому привязан центр окна

На рис. 3.6 приведено несколько графиков функции $k(t,l)$ для соответствующих вариантов статистической характеристики $L(A_{t,l}, W_t, W_l)$ при $W_l = N$. Для их построения использованы данные радарограммы, представленной на рис. 3.7 а. Из графиков видно, что выбор средней величины абсолютных значений сигнала в окне в качестве статистической характеристики

$L(A_{t,l}, W_t, W_l) = M(|A_{t,l}|)$ является наиболее удачным решением, обеспечивающим максимальную гладкость $k(t,l)$.

При этом было выявлено, что использование в качестве основы $k(t,l)$ медианы имеет свои проблемы. В традиционной обработке данных медиана достаточно часто используется для уменьшения влияния выбросов. Однако при вычислении $k(t,l)$ её величины испытывают небольшие скачки, что снижает гладкость функции и ухудшает выделение сигналов-идентификаторов.

Несколько результатов применения функции $k(t,l)$ при $L(A_{t,l}, W_t, W_l) = M(|A_{t,l}|)$ приведено на рис. 3.7. Структура этого рисунка следующая. Рис. 3.7 *а* представляет собой исходную необработанную радарограмму, полученную на обделке тоннеля метрополитена. На рис. 3.7 *г* и *ж* представлены радарограммы после применения функции $k(t,l)$. Причём рис. 3.7 *г* представляет собой радарограмму рис. 3.7 *а*, после обработки. Помимо применения $k(t,l)$ здесь есть также результат работы с цветовой или яркостной шкалой, кодирующей уровни амплитуд при визуализации, а также подбор масштабирующего коэффициента m .

На радарограммах рис. 3.7 *г* и *ж* двойными белыми линиями и цифрой 1 обозначены места плохого контакта, когда за обделкой присутствует полость. Причём для радарограммы на рис. 3.7 *б* эти линии показаны по результатам интерпретации. А для радарограммы на рис. 3.7 *ж* они указывают на известные полости.

В правой части рисунка представлены трассы, а стрелками и цифрами 2 указаны точки радарограммы, из которых они взяты. Левые трассы взяты из точки с хорошим контактом, т.е. при отсутствии полостей (рис. 3.7 *б*, *д*, *з*); правые – с плохим (рис. 3.7 *в*, *е*, *и*), когда такие полости присутствуют.

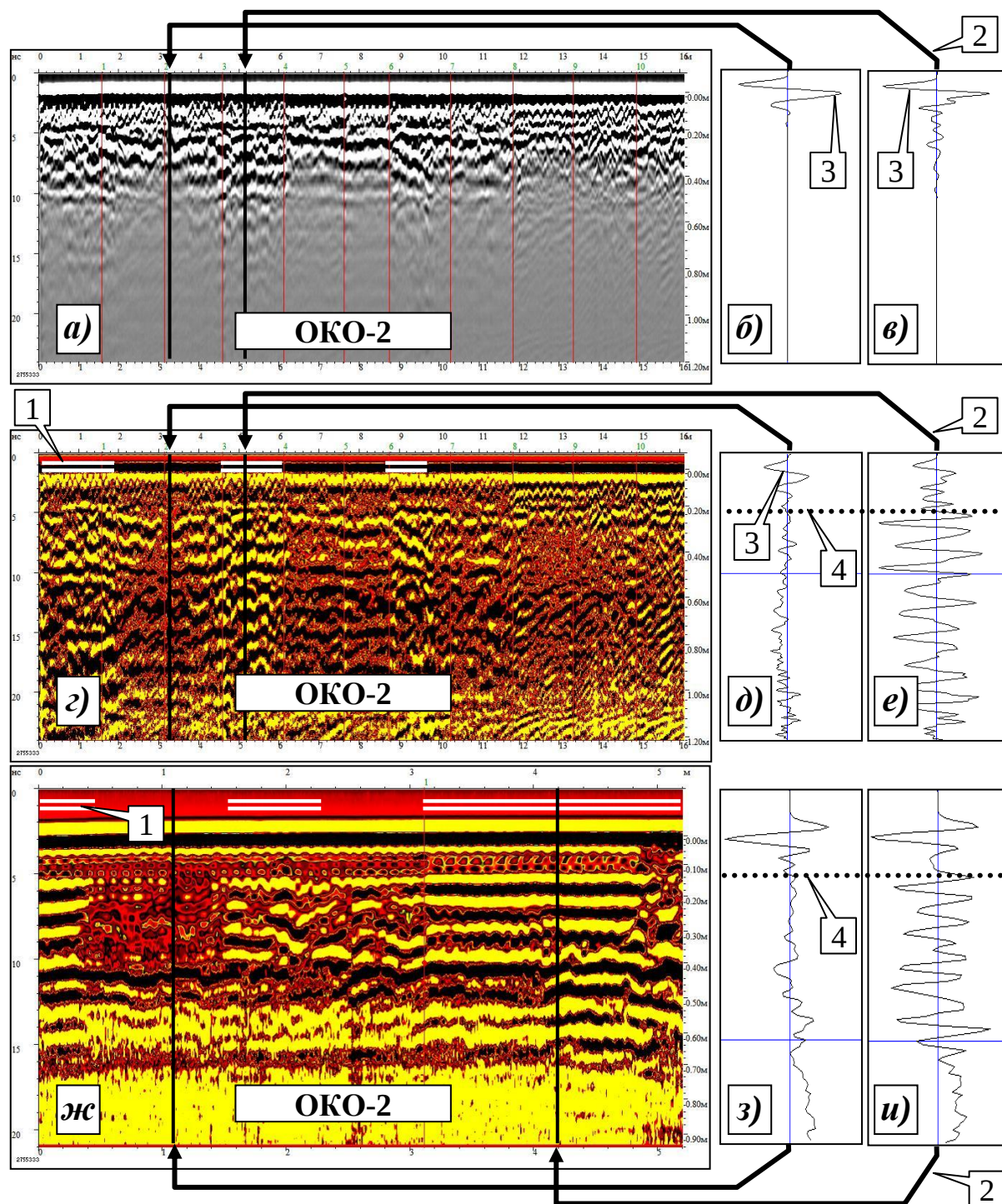


Рис. 3.7. Результаты применения АРУ: радарограмма, полученная на обделке тоннеля метрополитена – вариант до АРУ (а); трассы 217 (б) и 346 (в) радарограммы а; та же радарограмма, полученная на обделке тоннеля метрополитена после АРУ (г); трассы 217 (д) и 346 (е) радарограммы г; радарограмма, полученная на железобетонной плите с известным расположением полостей под ней (ж); трассы 110 (з) и 420 (и) радарограммы ж

В целом рис. 3.7 иллюстрирует следующие выводы. Рис. 3.7 *а* содержит "звоны" без обработки с АРУ, но они слабо читаемы из-за быстрого уменьшения амплитуд сигналов и влияния большой амплитуды ПВ. Это видно по приведённым примерам трасс на рис. 3.7 *б* и *в*. На них в основном просматривается ПВ, указанная цифрой 3. Однако, на радарограмме рис. 3.7 *д*, где была применена АРУ, ПВ оказалась существенно подавленной. Можно сравнить участки трасс, отмеченные цифрами 3 на рис. 3.7 *б* (до АРУ) и рис. 3.7 *д* (после АРУ).

После введения АРУ также стали хорошо видны особенности сигналов "звона". В зоне плохого контакта они обладают повышенной амплитудой, что видно из сравнения трасс на рис. 3.7 *д* и *е*, *з* и *и*. Также хорошо видна периодическая структура "звона". Следующая особенность состоит в том, что "звоны" начинаются от границы "обделка-грунт" и не выражены до неё. Чтобы это подчеркнуть, на трассы рис. 3.7 наложена горизонтальная пунктирная линия, соответствующая границе "обделка-грунт" и отмечающая начало «звона». Она обозначена цифрой 4. При обследовании больших площадей обделок этот эффект замечался достаточно часто [259].

Еще одной особенностью «звонов» является горизонтальная выдержанность (стабильность) осей синфазности, которая хорошо видна в зоне плохого контакта на рис. 3.7 *ж* и хуже видна на рис. 3.7 *г*. Более слабая выраженность связана с тем, что в первом случае толщина обделки $h = 13$ см меньше, чем во втором, где $h = 20$ см. Во втором случае на сигнал в большей степени влияет неоднородность электромагнитных свойств обделки за счёт большей длины пути георадиолокационного сигнала от георадара до полости и обратно. Наблюдаемую в обоих случаях стабильность осей синфазности можно объяснить тем, что "звоны" после границы "обделка-грунт" отражают не структуру массива за обделкой, а специфику возникновения сигнала на границе.

Длительность "звона" различна для радарограмм на рис. 3.7 *г*, где "звон" еще виден на 25-й наносекунде трассы, и на рис. 3.7 *ж*, где "звон" затухает уже на 10-й наносекунде трассы и лишь на некоторых достигает 15 нс. Это объясняется тем, что второй результат (рис. 3.7 *ж*) получен над полостями, заполнен-

ными воздухом. Вполне возможно, что на рис. 3.7 *г* более длительные осцилляции вызываются существенным увеличением проводимости среды за обделкой [160], которую создаёт вода в полости. А на рис. 3.7, *ж* причиной осцилляций являются кратные отражения или стоячие волны в полости, заполненной воздухом.

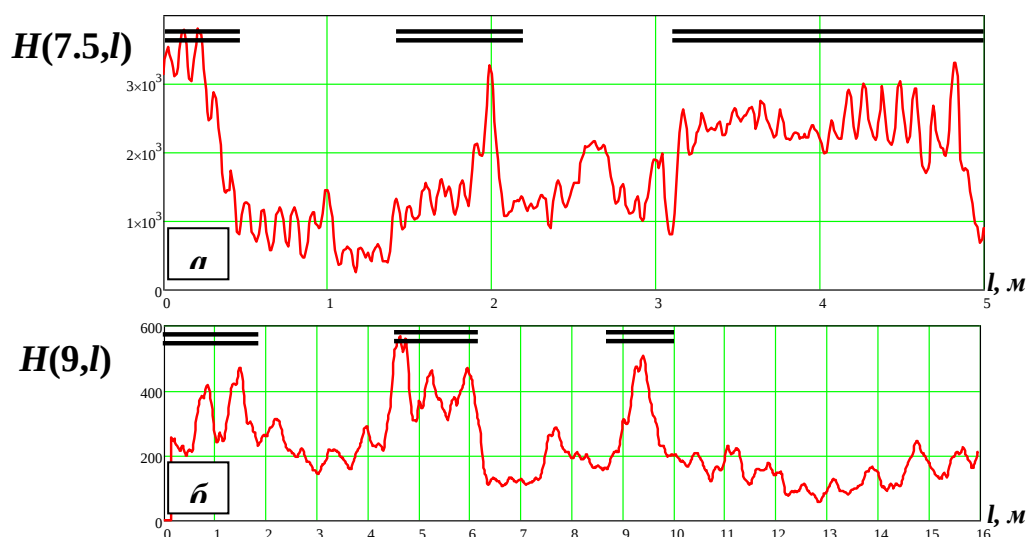


Рис. 3.8. Изменение мгновенных амплитуд после АПГ вдоль по профилю: *а* – съёмка на железобетонной плите, *б* – съёмка по обделке тоннеля метрополитена; двойная черта указывает на участок, на котором присутствует полость

Сигналы "звонов" имеют увеличенные амплитуды по сравнению с остальными сигналами. Этим можно воспользоваться для их выделения. Для идентификации важны в первую очередь максимальные и минимальные значения сигнала. Промежуточные же значения насыщают радарограмму излишними деталями, их можно так же отнести к помеховым факторам, мешающим интерпретации. Для того, чтобы снизить влияние промежуточных амплитудных значений можно использовать амплитудное преобразование Гильберта $H(A(t))$ (АПГ) которое позволяет выделить огибающую сигнала.

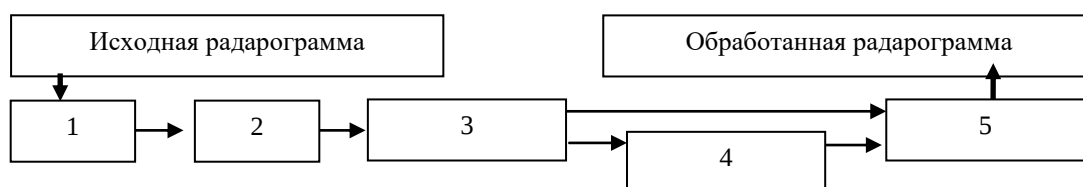


Рис. 3.9. Оптимальный граф обработки при обследовании обделок, включающий АРУ (1); АПГ (2); вычитание среднего значения в скользящем горизонтальном окне (3); сглаживание скользящим средним (4); коррекция цветовой шкалы (5)

Эффективность применения огибающей иллюстрирует рис. 3.8. На нём представлены графики одного отсчёта радарограммы после преобразования Гильберта $H(t, l)$. Над трассами произведено АПГ, но из всей матрицы, которую представляет собой радарограмма, взята только одна строка – своего рода срез мгновенных амплитуд вдоль по профилю. На рис. 3.8 подпись $H(9, l)$ означает, что представлена строка для момента времени $t = 9$ нс, $H(7.5, l)$ – для $t = 7.5$ нс. Примеры взяты из разных радарограмм. Так, рис. 3.8 а получен из радарограммы рис. 3.7 ж. Т.е. это случай измерений на плите, под которой известно расположения полостей. Увеличение размаха амплитуд из-за появления "звонов" хорошо просматривается на функции $H(9, l)$, что достаточно убедительно индицирует полости. Рис. 3.8 б получен из радарограммы рис. 3.7 з – это результат обследования реальной обделки тоннеля метрополитена. График сглажен скользящим средним с шириной окна 20 трасс. Мгновенные амплитуды возрастают в зоне, которая ранее была интерпретирована как плохой контакт.

В процессе ведения практической деятельности по обследованию обделок тоннелей Московского метрополитена удалось найти наиболее оптимальный граф обработки, опирающийся на изложенные выше особенности «звонов» и представленный на рис. 3.9. Обработка подразумевала следующие стадии: АРУ (1); АПГ (2); вычитание среднего значения в скользящем горизонтальном окне (3); сглаживание скользящим средним в одномерном либо в двумерном окне (4); коррекция цветовой шкалы, в том числе инверсия (5).

Вычисление среднего и его вычитание производилось по строке радарограммной матрицы после АПГ и позволяло удачно увеличивать контраст изображения. В этом случае среднее значение оказывается в нуле амплитуд и визуализируется серым цветом. Минимальные значения становятся отрицательными и отмечаются белым цветом, а максимальные – положительными, отмечаются чёрным цветом и, как правило, соответствуют области «звона». Этим достигается повышенная контрастность радарограммы. Значения отсчётов радарограммы, соответствующие "звону", теперь оказываются больше нуля, имеют слабые осцилляции и выделяются на фоне «незвонящего» блока. Перестановка АПГ и вычитания среднего в графе рис. 3.9 существенно ухудшало результаты обработки.

То, насколько удачнее визуализируются сигналы-идентификаторы после применения графа рис. 3.9, показано на ряде радарограмм, представленных на рис. 3.10. Двойная линия вверху радарограммы указывает на положение дефекта. Рис. 3.10 *а* и *б* показывают несколько хорошо читаемых аномалий, видных по чёрным пятнам, указанным цифрой 1. Выявленные аномалии начинаются от границы "обделка-грунт", положение которой указано горизонтальной пунктирной линией. Две радарограммы даны, чтобы показать стабильность результатов.

На рис. 3.10, *в* показаны результаты измерений на железобетонной плите после обработки с помощью графа рис. 3.9. Двойные линии указывают на полости, расположение которых достоверно известно. На изображении чётко прослеживаются области плохого контакта, обозначенные цифрой 1.

Рис. 3.10 *г* и *д* – одна и та же радарограмма: *г* – исходный вариант с очень слабо просматривающимися "звонами"; *д* – радарограмма после обработки с помощью графа рис. 3.9. Аномалии обозначены цифрами 1. В случае рис. 3.10 *д* читаемость аномалий существенно повысилась. Они просматриваются хуже, чем приведённые выше аномалии. Однако то, что они начинаются от границы "обделка-грунт" и являются зонами повышенных амплитуд, говорит в пользу того, что здесь наблюдается плохой контакт обделки с грунтом.

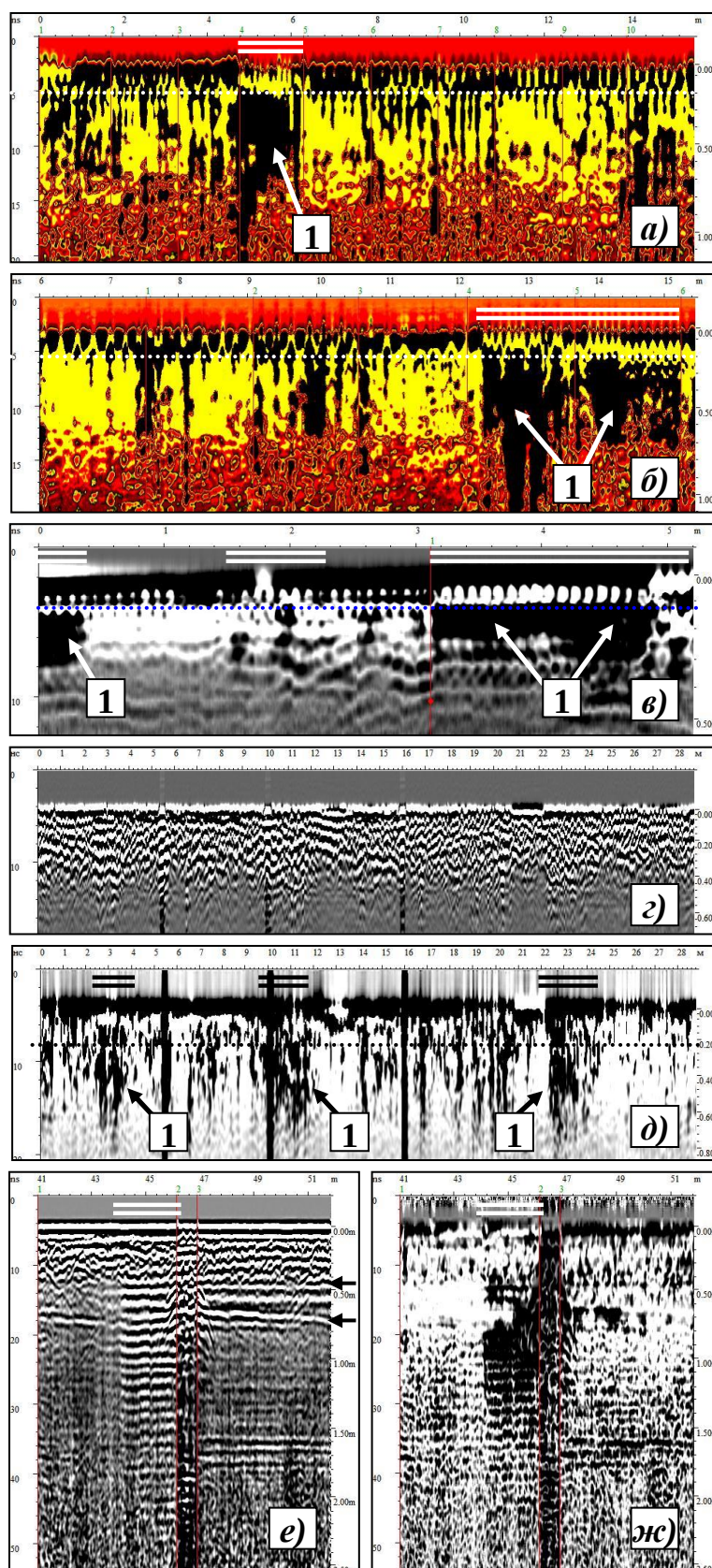


Рис. 3.10. Примеры обработок результатов обследования обделок тоннелей метрополитенов: а–б, д–ж – георадар ОКО-2 1200 МГц; в – георадар ОКО-2 1700 МГц

Так же показана одна и та же радарограмма, обработанная с использованием АРУ (рис. 3.10 *е*), а также с АРУ, АПГ и вычитанием среднего (рис. 3.10 *ж*). Этот пример дан чтобы наглядно показать, что обработка с АПГ не всегда предпочтительна. На рис. 3.10 *е* представлен случай многослойной обделки толщиной 70 см. Отражающие границы указаны стрелками справа от радарограммы рис. 3.10 *е*.

"Звон" выделяется на обоих вариантах обработки (рис. 3.10 *е* и *ж*). Видно, что "звон" идёт от внутренней границы на глубине 40 см. Другими словами в этом примере наблюдается расслоение обделки. При этом обработка через АПГ (рис. 3.10 *ж*) снизила читаемость границ и хуже даёт понимание о структуре обделки.

Таким образом был предложен граф обработки данных, предполагающий автоматическую регулировку уровня амплитуд с использованием скользящего среднего, амплитудное преобразование Гильберта и различные виды фильтрации в скользящих окнах, позволяющий наилучшим образом выделять области плохого контакта обделки с грунтом в условиях помех. Наблюдаемая стабильность выявленной картины плохого контакта указывает на возможность расчёта информативных параметров, которые могут позволить автоматизировать обработку радарограмм.

3.3. Локация течей с помощью георадаров при строительстве и эксплуатации подземных сооружений

Локация течей является довольно важной задачей при контроле заобделочного пространства при обследовании тоннелей метрополитенов и коллекторов. В местах где вода поступает в выработку реализуется процесс выноса грунта в выработку, что приводит к развитию полостей, а также к процессу постепенного разрушения самой обделки. Подобные обследования имеют важное значение при проектировании процедур ремонта, а также при контроле поло-

стей в заобделочном пространстве. В случае многослойной конструкции часто возникает ситуация, когда с внешней стороны обделка нарушена на одном участке, а в выработку вода проникает на другом.

Удачным аппаратурным выбором при решении задач локации течей являются высокочастотные георадары, использующие среднюю частоту излучения более 1000 МГц. Все приведённые в этой главе данные получены с помощью георадара ОКО-2 с антенными блоками АБ1200 и АБ1700. При локации течей помимо анализа радарограммы с различными вариантами подавления прямой волны [260, 261] наиболее удобно использовать обработку сочетающую амплитудное преобразование Гильберта и вычисления различных характеристик в скользящих окнах. Обработка была описана в [262]. Идентификаторами течей обычно являются: "звон", хаотическая волновая картина, участки с резким возрастанием энергии волнового поля.

При обследованиях течей перед контролем возникают задачи следующего характера.

1. Локация источника течи в плане. Известна зона притока воды, необходимо определить характер распределения влаги за конструкцией или в ней (в случае расслоения последней). Если речь идёт о вертикальных элементах конструкции (борта тоннеля, вертикальные стеновые блоки), то места нарушений лоцируются относительно легко. Подобные течи удобно находить серией горизонтальных профилей (площадная съёмка), располагая их сверху вниз. Тогда верхние профили не содержат идентификаторы течей, в то время как на нижних они начинают проявляться.

На рис. 3.11 представлены примеры результатов обследования в двух вариантах – исходная радарограмма (*а, в, д, ж, з*) и радарограмма после обработки с применением преобразования Гильберта (*б, г, е, и*).

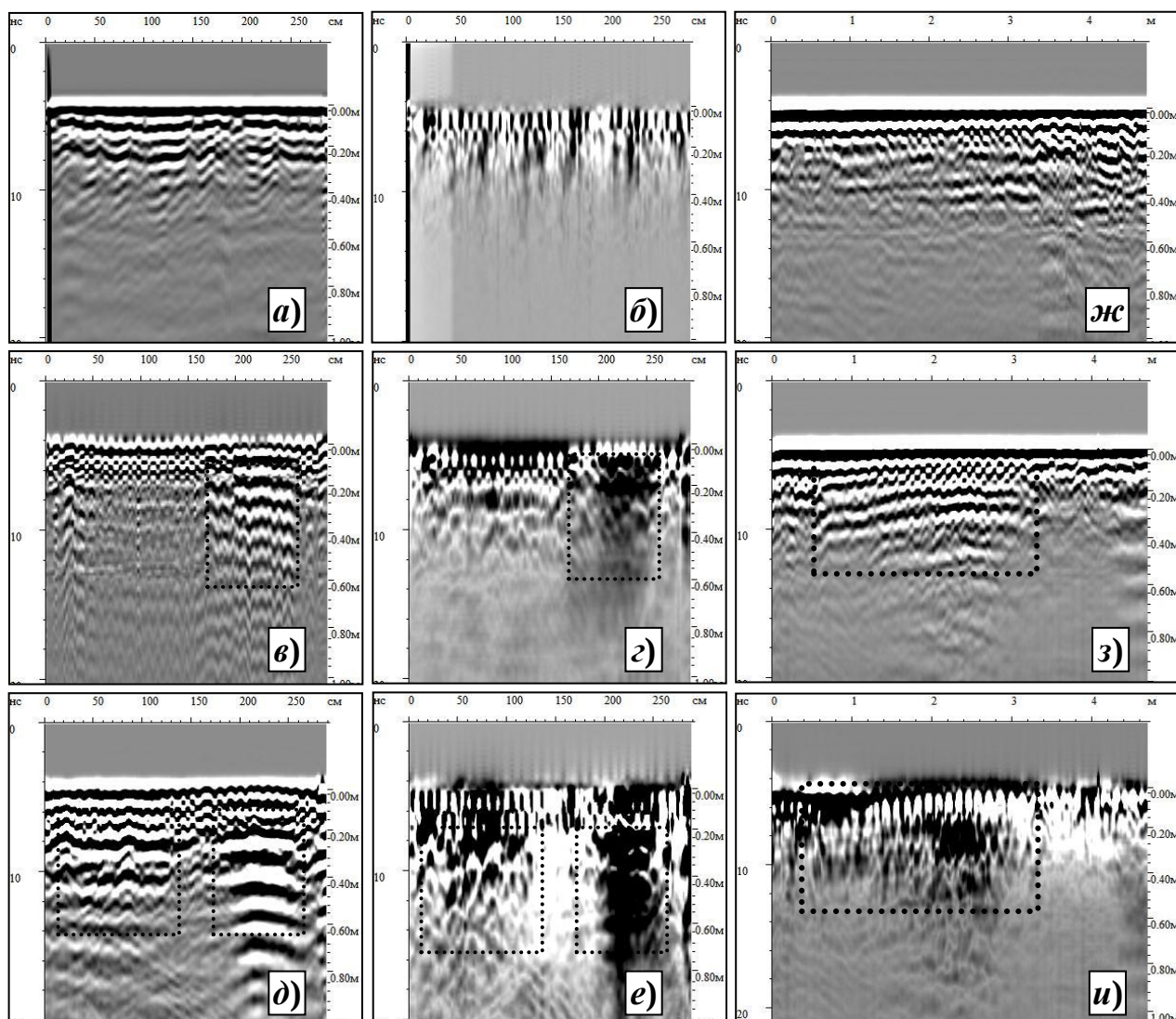


Рис. 3.11. Примеры результатов обследования вертикальных конструкций: *а–е* – ряд последовательных горизонтальных профилей, пройденных на объекте №1; при этом – *а, в, д* – исходные радарограммы, *б, г, е* – их варианты после амплитудного преобразования Гильберта; *жс, з* – ряд последовательных горизонтальных профилей, пройденных на объекте №2, *и* – вариант обработки профиля *з* после амплитудного преобразования Гильберта

Рис. 3.11 *а, б* – самый верхний профиль объекта №1, не содержащий идентификаторов, указывающих на влагу; *в, г, д, е* – два нижних профиля объекта №1, на которых проявляются "звоны". В варианте с обработкой видно увеличение энергии сигналов, локализованных на определённых участках волнового поля. Подобная же картина наблюдается и для объекта №2. Верхний профиль рис. 3.11 *жс* содержит незначительные волновые аномалии, нижний про-

фильм рис. 3.11 з и и, указывает не только на присутствие воды, но и, за счёт изменения геометрии осей синфазности, говорит о расслоенности обделки.

Таким образом можно локализовать место, где за обделкой находится полость, заполненная водой, или где есть расслоение конструкции, по которому вода перемещается вниз к точкам выхода воды в выработку.

В описываемых случаях проблемой может стать сложная картина распределения влаги, когда вода идёт с верхних этажей пристанционного сооружения, либо когда источником водопритока являются не грунтовые воды, а внутренние водопроводные сети.

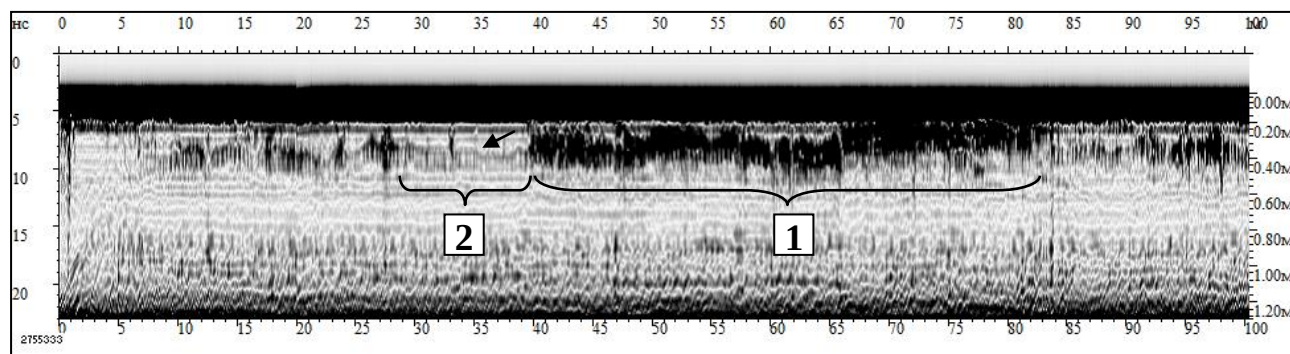


Рис. 3.12. Пример результатов обследования лотка подстанционного коллектора (радарограмма подвергнута преобразованию Гильберта): 1 – вода под лотком, 2 – участок с хорошим контактом "лоток-грунт"

При обследованиях бетонных подушек и лотков коллекторов задача усложняется в связи с многослойностью этих конструкций. В ряде случаев лотки могут быть однослойными, что позволяет определять качество контакта "грунт-конструкция", а также давать предположения есть ли на границе вода, по вариациям коэффициента отражения. Идентификаторы остаются такими же как и в предыдущих случаях.

В качестве примера обследования подобных конструкций, на рис. 3.12 представлен профиль, пройденный по однослойному лотку подстанционного коллектора. Хорошо выделяется зона с повышенной энергией отражённых волн (цифра 1), рядом с аварийным участком присутствует не обводнённый участок (цифра 2). Граница на нём тоже просматривается, но достаточно слабо

(она указана стрелкой). Принимать решения о том присутствует ли на означенной границе воздушная прослойка, или между грунтом и плитой присутствует вода приходится только по степени выраженности описанных эффектов.

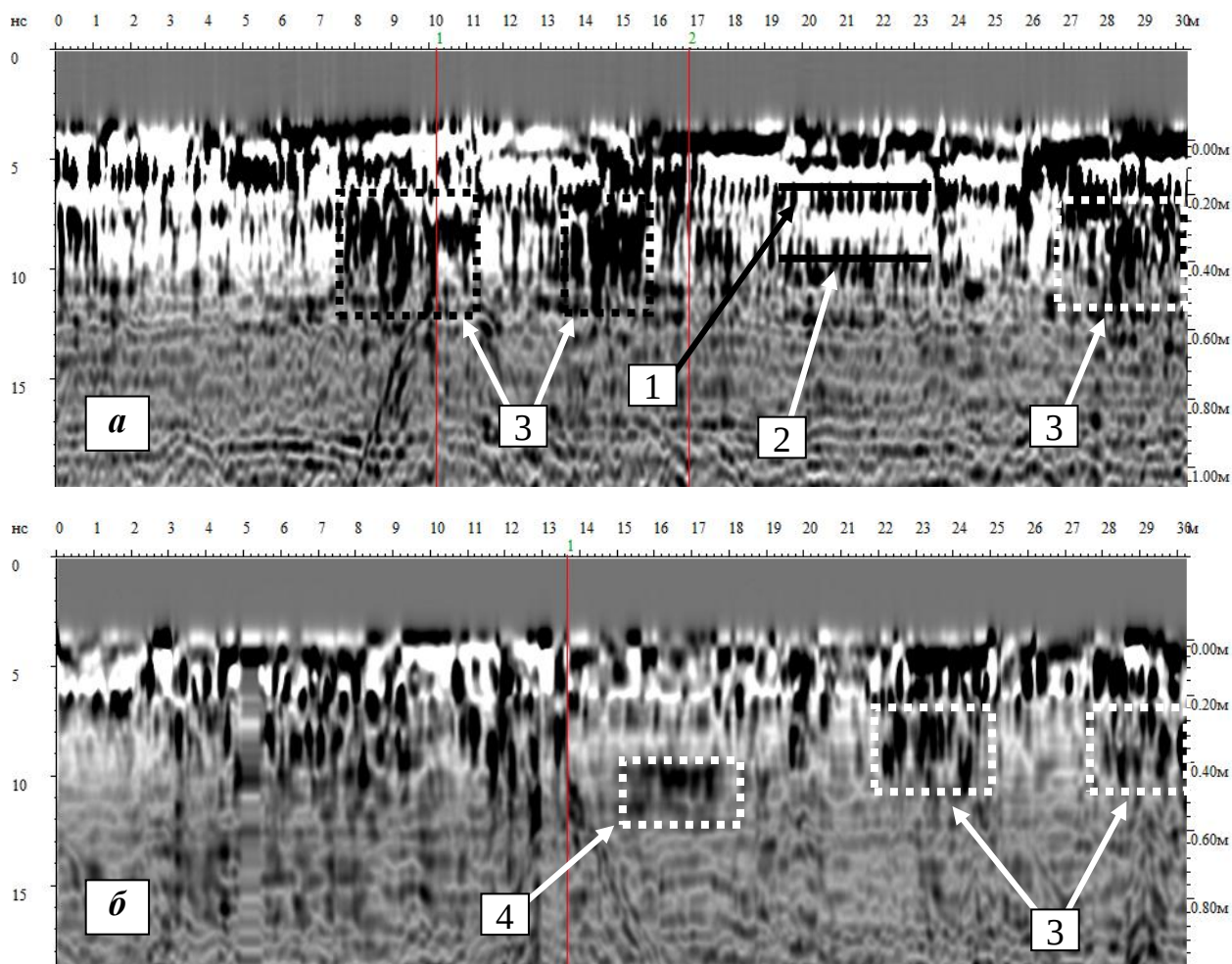


Рис. 3.13. Примеры *а* и *б* результатов обследования многослойных конструкций коллектора (обработка описана в [12]): 1,2 – ряды армирования; 3,4 – участки нарушенного контакта

При обследовании лотков коллекторов подобные лёгкие для интерпретации случаи встречаются реже. Лотки многослойны, к тому же в обследованных коллекторах лоток снизу нередко залит, поступающей из течи водой. Результаты георадиолокационного обследования через слой воды оказываются сильно зашумлены.

2. Локация источника течи по глубине. В случаях, когда конструкции являются многослойными, возникает задача локализации нарушенных областей в глу-

бину от поверхности тоннеля. При этом могут наблюдаться случаи, когда в конструкциях имеются зазоры между слоями достаточные для распространения воды. Часто подобную ситуацию можно встретить в лотке, или в коллекторе, оборудованным защитной рубашкой.

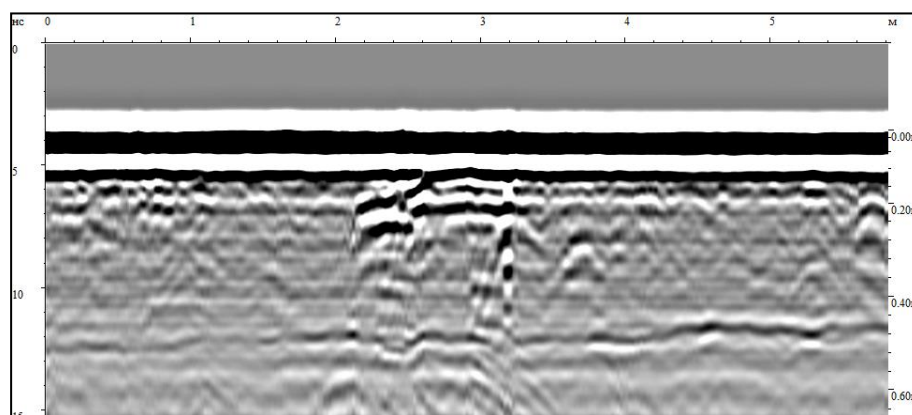


Рис. 3.14. Пример результатов обследования лотка тоннеля

На рис. 3.13 представлен случай обследования подобного коллектора. На радарограмме рис. 3.13 а можно выделить два ряда армирования (цифры 1 и 2), которые обозначают границы конструкции в глубине. По повышенным значениям энергии отражённых сигналов можно выделить несколько областей где на границе рубашка-конструкция присутствует вода (цифра 3). Помимо этого, можно найти и нарушение на границе грунт-конструкция. Пример где видны области разуплотнения и внутри стены тоннеля (цифра 3) и на границе грунт-конструкция (цифра 4) представлен на рис. 3.13 б.

Таким образом можно назначать области необходимые для ремонта. Однако лоцирование течи по глубине в многослойных конструкциях часто не решает проблему понимания откуда вода поступает в выработку. Точка выхода воды в коллектор или тоннель может существенно отстоять от мест где вода поступает в конструкции снаружи. Примером такой ситуации могут послужить результаты обследования лотка тоннеля, представленные на рис. 3.14 (радарограмма обрабатывалась минимально для того чтобы не исказить волновую картину). Область разуплотнения находится между 2 и 3.4 м профиля. На этом же

участке вода поступает в выработку. Обводнённый слой находится на глубине 20 см, однако полная толщина конструкции более 40 см. Скорее всего вода поступает в направлении перпендикулярному линии съёмки (профиль пройден вдоль тоннеля). Уточняющие профили, доступные для съёмки, дополнительной ясности не принесли.

Резюмируя результаты исследований можно отметить, что с помощью георадаров можно лоцировать нарушения и течи, в том числе оценивать их расположение по глубине многослойной конструкции. Однако при определении мест где вода проникает в конструкцию возможно возникновение сложностей, особенно если речь идёт о горизонтальных элементах.

3.4. Подавление прямой волны с помощью помеховых радарограмм

Помеховые факторы одна из самых острых проблем при георадиолокационных исследованиях. При обследовании подземных (тоннели метро, коллектора) и наземных сооружений (строительные конструкции) проблемой становятся так же и помехи, создаваемые самим георадаром. Достаточно сильно в этих задачах могут мешать воздушные помехи, а также влияние на результаты прямой волны (далее – ПВ).

Из-за близости антенн друг к другу и наличия между ними однородной слабо поглощающей среды (воздух) ПВ обладает большой амплитудой и малым временем первого вступления. Из-за многопериодности георадарного импульса ПВ обладает так же достаточно большой длительностью. Принято выделять собственно прямую волну (direct signal, direct air wave) и прямую грунтовую волну (direct ground wave) [263, 264]. Учитывая, что антенны высокочастотных георадаров в ряде случаев поднимают на колёсную базу, грунтовая волна может не наблюдаться, но на форму ПВ может влиять поверхность объекта контроля, над которой находится георадар. Описываемые волновые процессы образуют некую сложную помеховую картину, обладающую большой амплитудой и накладывающуюся на полезные отражённые импульсы. При этом задачи

обследования конструкций обычно таковы, что необходимо анализировать радиообразы объектов, находящиеся как раз на тех временах радарограмм на которых влияние ПВ еще очень существенно.

Существует практика подавления прямой волны с помощью различных методов фильтрации. Одно из распространенных решений представляет собой горизонтальную фильтрацию в виде вычитания среднего значения в горизонтальном скользящем окне (далее по тексту ВСЗ). Этот подход достаточно эффективен, но обладает рядом недостатков. Во-первых, он вносит артефакты обработки в результаты измерений. Во-вторых, будучи эффективным в подавлении любых горизонтальных осей синфазности, в некоторых случаях он подавляет и полезные оси. Однако фильтрация не единственный выход. В случае если бы на профиле можно было получить две различные радарограммы, одну типичную, а другую содержащую частично представленное помеховое волновое поле, то вычитание помеховой радарограммы могло бы подавить помехи и существенно облегчить интерпретацию данных исходной радарограммы.

Одним из простейших вариантов могли бы стать съёмки с учётом поляризации создаваемого георадаром излучения. На рис. 3.15 представлены не фильтрованные радарограммы одного и того же профиля. Использован георадар ОКО-2 1700 МГц; программа обработки – Geoscan32. На всех приведённых в этой главе радарограммах ось глубин справа, ось времён слева. Контролировалось, что бы профиль шёл вдоль одного из рядов армирования, т.е. не пересекал пруты под острым углом. Рис. 3.15 *а* отличается от рис. 3.15 *б* разворотом антенны на 90°.

На рис. 3.15 *а* отчётливо просматривается ряд армирования (несколько пруты выделено стрелками). На рис. 3.15 *б* ряд полностью отсутствует в связи с некорректно выбранной плоскостью поляризации излучения (геометрия профилей идентична). Причём ряд не выделяется ни миграцией, ни другими методами обработки: рис. 3.15 *в* это радарограмма рис. 3.15 *б* после ВСЗ – хорошо видно отсутствие гипербол от армирования.

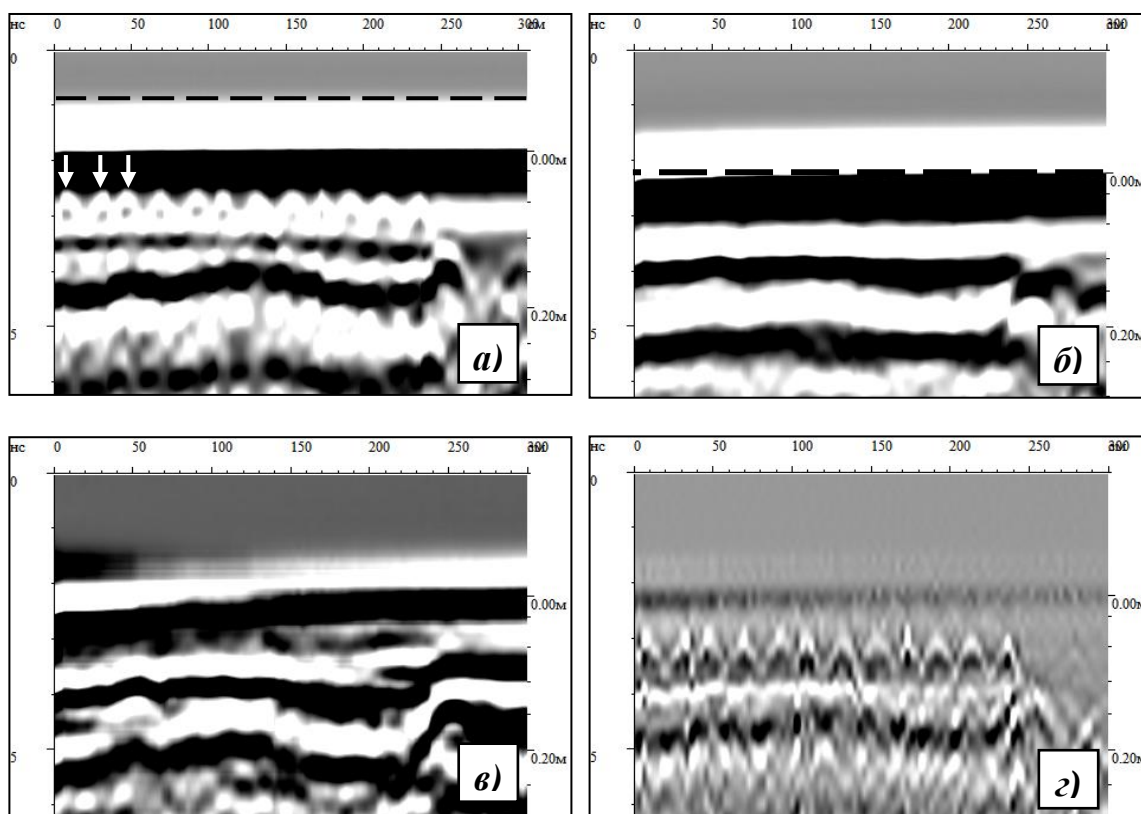


Рис. 3.15. Выявление параметров армирования: *а* и *б* – съёмка с разным положением антенны; *в* – результат применения ВСЗ; *г* – разностная радарограмма. Георадар ОКО-2 1700 МГц

Вполне допустимо предположить, что радарограмма рис. 3.15 *б* содержит ПВ, волновая форма которой (со всеми её возможными слабыми вариациями вдоль по профилю) приблизительно соответствует ПВ радарограммы рис. 3.15 *а*. Вычитая разрез *б* из разреза *а*, можно получить разностную радарограмму в которой подавлена ПВ (см. рис. 3.15 *г*). На рис. 3.15 *г* хорошо просматривается обратная сторона плиты и ряд армирования. Стало более очевидно, что ряд единственный (были сомнения из-за того, что, пересекаясь "усы" гипербола первого ряда образуют ложные вершины гипербола якобы присутствующего второго ряда). Часто с задачей выделения второго ряда такие подходы как ВСЗ и гиперболическая миграция не справляются, что связано с помеховым влиянием верхнего ряда арматуры. При обработке на радарограмме рис. 3.15 *г* выделены контура (пространственный фильтр, используемый для

обострения деталей, часто применяемый в обработке изображений с использованием так называемых масок фильтров [265]).

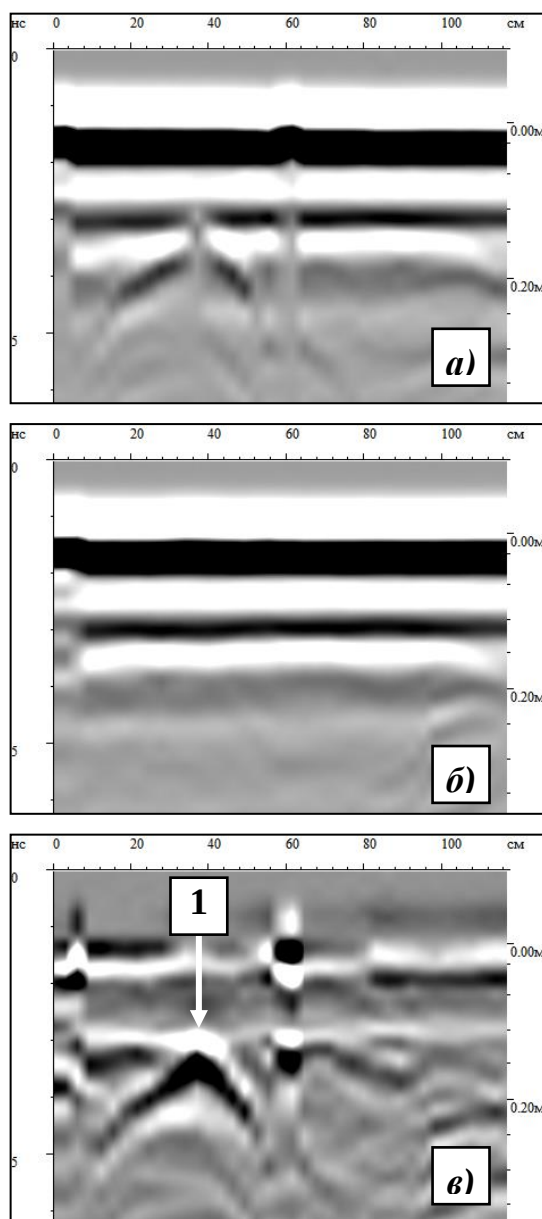


Рис. 3.16 Выявление объектов в конструкции: *а* и *б* – съёмка с разным положением антенны; *в* – разностная радарограмма. Георадар ОКО-2 1700 МГц

Еще один пример можно увидеть на рис. 3.16. Здесь – рис. 3.16 *а* и рис. 3.16 *б* различаются ориентацией антенны, рис. 3.16 *в* – результат вычитания радарограммы *б* из *а*. Конструкция не армирована, но содержит отдельные пруты, один из которых виден на точке 36 см (цифра 1). На рис. 3.16 *а* он слабо выражен. На рис. 3.16 *б* – отсутствует и не выделяем с помощью ВСЗ; зато на

этой радарограмме хорошо просматривается длительная многопериодная ПВ. На рис. 31.6 в объект достаточно хорошо просматривается. Видна верхняя точка гиперболы, а усы гиперболической оси синфазности достаточно длинные, чтобы можно было оценить диэлектрическую проницаемость (толщина конструкции при этом совпала с ожидаемой). Радарограммы дополнительно никак не обработаны и имеют одинаковую шкалу кодирования уровней амплитуд (включая охватываемый динамический диапазон) и профиль усиления.

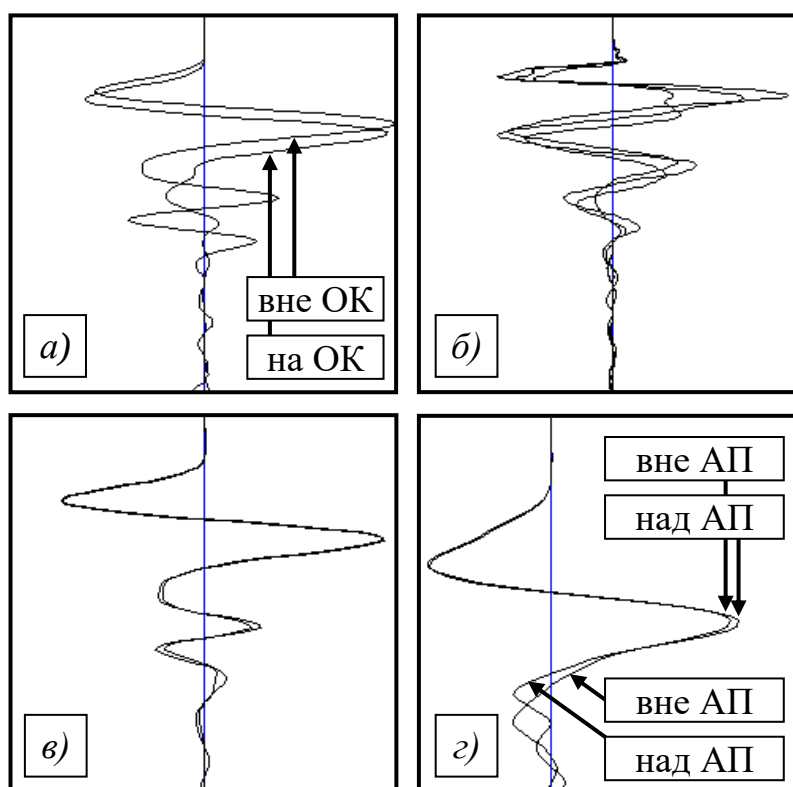


Рис. 3.17. Сравнение волновых форм ПВ полученных при измерениях на различных объектах: *а* – сравнение трасс для случая, когда георадар находится на объекте контроля и когда находится на большом расстоянии от объекта (ОКО-2 1200 МГц; по графикам можно заметить снижение средней частоты спектра при съёмке на объекте); *б* – три трассы, полученные при измерениях на грунтах (ОКО-2 Тритон 100 МГц; расстояния между точками на профиле 10-20 м); *в* – две трассы полученные на строительной конструкции вне влияния прутков армирования (ОКО-2 1200 МГц; расстояния между точками на профиле 4,5 м); *г* – трассы снятые над арматурным прутком (АП) и в стороне от него

В полевых условиях на ряде объектов снимать профиль с изменённым положением антенны не удобно. Однако полевую работу можно упростить, если в качестве помеховой радарограммы использовать размноженную единственную трассу (далее – опорная трасса). Например, взять трассу, в которой в основном присутствует только ПВ. Выбрать опорную трассу нужно так что бы она содержала в основном помеховое волновое поле, которое не меняется вдоль по профилю. Результатом вычитания будет разностный разрез профиля и опорной трассы.

На излучение антенны влияет прилегающий к ней массив, что может менять форму ПВ вдоль по профилю, так же возможно влияние аппаратного дрейфа.

При обследовании грунтов не приходится ожидать стабильности электрических свойств массива пород вдоль по профилю – волновая форма ПВ будет сильно варьировать (см. рис. 3.17 б). Особенно остро это будет проявляться при работе на грунтах мегаполисов. Однако строительные конструкции как раз представляют собой объекты со слабо меняющимися свойствами вдоль по профилю. Это иллюстрирует рис. 3.17 в – взятые на условно большом расстоянии трассы имеют практически идентичную форму ПВ. Исключением является точки над прутами армирования (см. рис. 3.17 г), поэтому для получения опорной трассы стоит использовать точки между прутами армирования. Подобную трассу можно взять из уже снятой радарограммы, или из радарограммы с изменённым положением антенны.

Возможной проблемой может стать аппаратный люфт, временное смещение ПВ, которое можно увидеть на радарограмме рис. 3.15 а и б. Одного и того же уровня амплитуд ПВ достигает на различном времени (в начале радарограммы позже, в конце – раньше). Для того, чтобы подчеркнуть сдвиг, на рис. 3.15 а и б нанесены пунктирные горизонтальные линии. Люфт этот просматривается на всех радарограммах рис. 3.15 и обостряется при ВСЗ (см. рис. 3.15 в). В случае с ОКО-2 люфт оказался достаточно мал (0,08 нс).

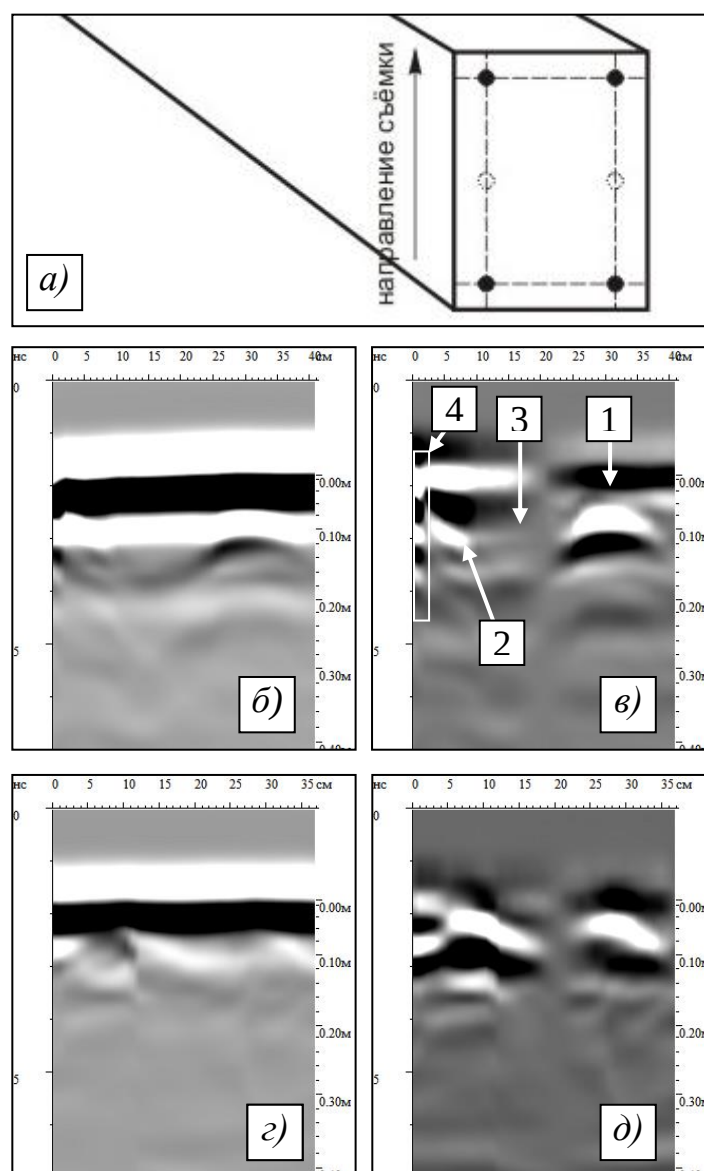


Рис. 3.18. Выявление характера армирования балок.
Георадар ОКО-2 1700 МГц.

На рис. 3.18 представлены примеры использования методики с вычитанием помеховой радарограммы составленной из опорной трассы. Рис. 3.18 б – результат съёмки по боковой вертикальной поверхности балки (см. рис. 3.18 а; съёмки в тоннелях метро). Задача – выявить, сколько прутков армирования содержит балка в этом направлении. Возможность снять только небольшое количество трасс и помеховое влияние близлежащих конструкций сильно осложняет задачу. Рис. 3.18 а – исходная радарограмма, рис. 3.18 б – разностная (обработка, кодирование амплитуд цветом и профиль усиления одинаковы). Стали хорошо видны пруты армирования (цифры 1 и 2), у левого прута видна только

правая часть гиперболической оси синфазности. Хорошо видно отсутствие прута между крайними прутами (цифра 3), цифра 4 – воздушная помеха. Рис. 3.18 г представляет собой пример съёмки вдоль по балке, осложнённой прямой волной и отражением от перекрытия. После вычитания помеховой радарограммы выделились хомуты (рис. 3.18 д). Обработка и кодирование амплитуд цветом на рис. 3.18 г и д одинаковы.

При работе на фундаментных плитах и обделках метро часто требуется обследовать границу "конструкция-грунт" (в основном нужно оценить качество контакта и расстояние до границы). На первый взгляд опорная трасса будет содержать не только прямую волну, но и донное отражение (отражение от границы "конструкция-грунт"). Т.е. при вычитании помеховой радарограммы, исчезнет и полезная ось синфазности, образованная важной границей. Однако ПВ распространяется в однородной среде. Отражённая же волна проходит через материал плиты (или обделки), электрические свойства которого варьируют вдоль по профилю. Этих вариаций в большинстве случаев недостаточно, чтобы сильно менять форму ПВ, но достаточно что бы менять форму отражённого импульса.

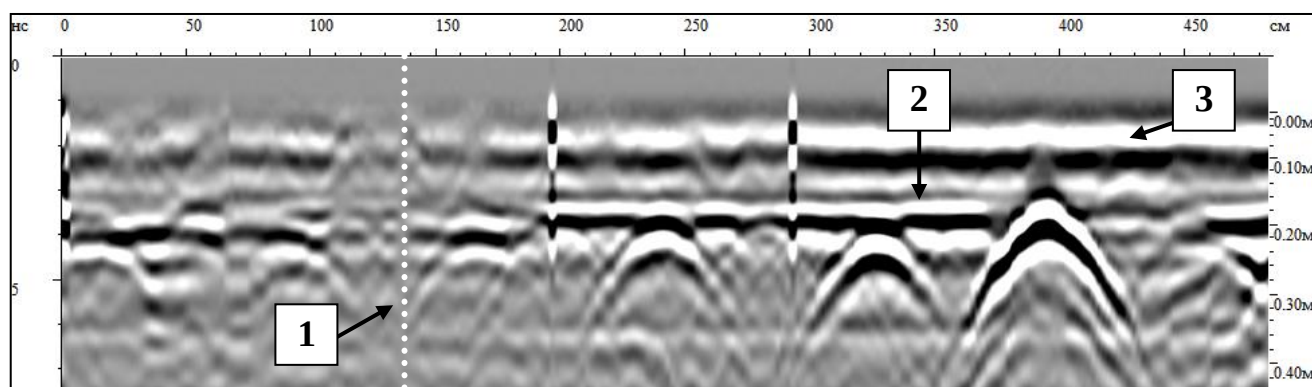


Рис. 3.19. Вариации электрических свойств вдоль по строительной конструкции: 1 – опорная трасса; 2 – донная ось синфазности; 3 – ПВ. Георадар ОКО-2 1200 МГц

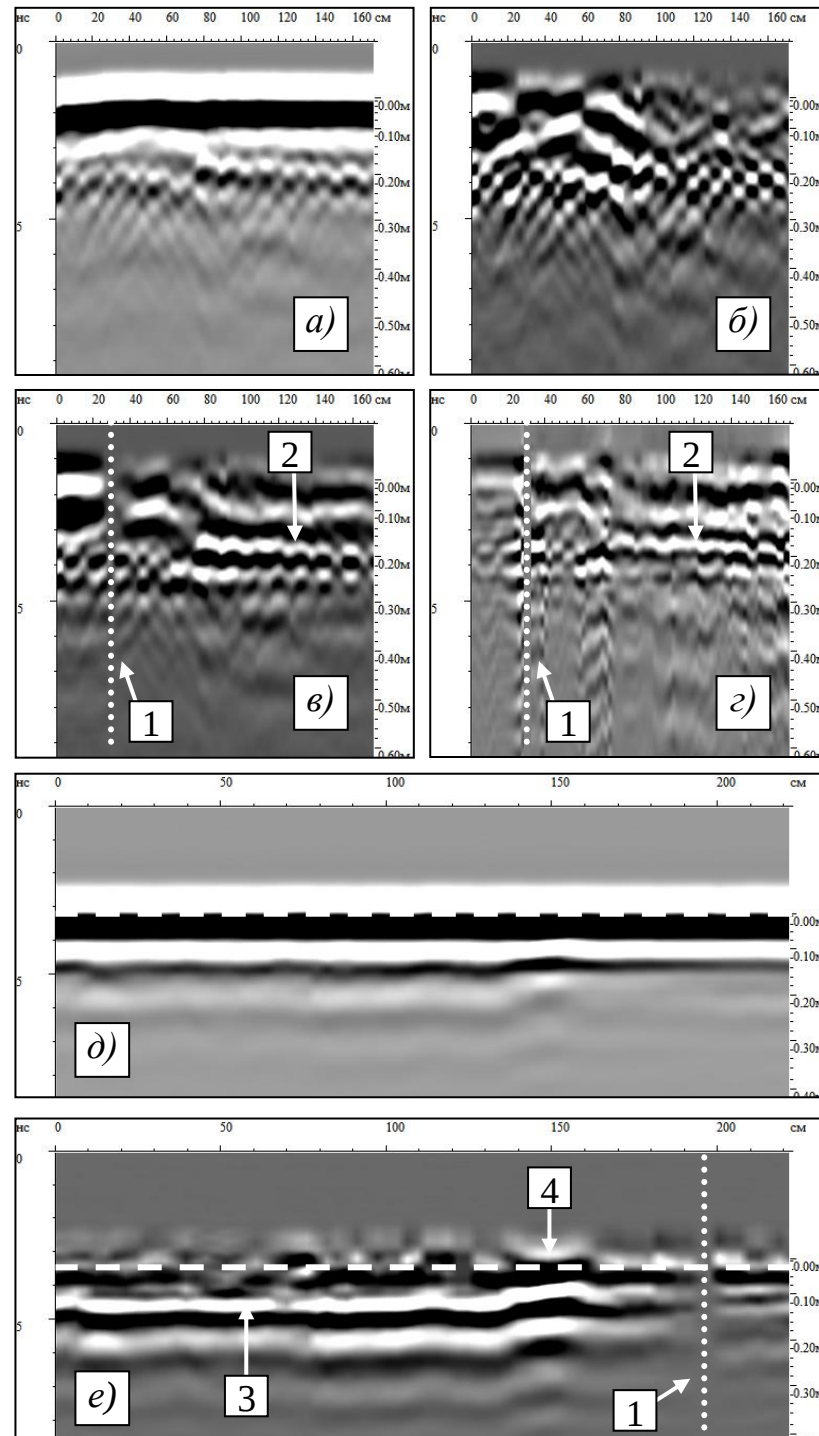


Рис. 3.20. Выделение границ с помощью помеховых радарограмм: *а – г* измерения в лотке и результаты их обработки; *д – е* измерения на бетонной подушке и результаты их обработки; 1 – опорная трасса; 2 – граница в путевом бетоне; 3 – граница "бетонная подготовка – бетонная подушка"; 4 – локальный объект. Георадар ОКО-2 1700 МГц. Пунктирной горизонтальной линией на последних двух радарограммах дано одно и то же время – 3,19 нс.

Это иллюстрирует разностная радарограмма рис. 3.19. Пунктиром показано то место, откуда взята опорная трасса (цифра 1). Можно заметить, что ось синфазности донного отражения (цифра 2) теряется в области опорной трассы и проявляется на некотором расстоянии от неё. Вполне допустимо предположить, что это происходит из-за изменяющихся свойств объекта контроля. Т.е. и форма, и время приходящего донного отклика изменяются тем больше, чем дальше находится трасса радарограммы рис. 3.19 от точки опорной трассы.

Это варьирование заметно и для ПВ (её "остатки" лучше просматриваются в правой части радарограммы рис. 3.19; ось синфазности ПВ указана цифрой 3). При этом подобный результат не обязателен: на рис. 3.20 *е* можно увидеть, что ПВ подавилась на всём профиле, а донная ось синфазности исчезает только в области опорной трассы.

Примеры выделения донной оси синфазности для случаев съёмок в тоннелях приведены на рис. 3.20. Рис. 3.20 *а – г* это результаты измерения в водосточном лотке (дренажная канава между рельсами вдоль путей тоннеля метро). Результаты сильно зашумлены воздушными помехами (измерения производятся фактически в протяжённой нише, окружённой шпалами, бортами лотка) и армированием. Снять можно было только короткий профиль. Рис. 3.20 *а* – исходные данные; *б* – попытка применить ВСЗ; *в* – разностная радарограмма; *г* – деконволюированная разностная радарограмма. На рис. 3.20 *в* и *г* стала хорошо просматриваться граница на глубине 15-20 см (цифра 2). Возможно, что здесь сыграло роль не только подавление ПВ, но и подавление воздушных помех, часть из которых слабо меняется вдоль по профилю (отражения от бортов лотка). Радарограммы рис. 3.20 *а – г* имеют одинаковую шкалу кодирования уровней амплитуд и дополнительно никак не обработаны.

Рис. 3.20 *д* и *е* это результаты измерения на бетонной подушке стационарного технического помещения. Рис. 3.20 *д* – исходные данные; *е* – разностная радарограмма. После вычитания стала хорошо просматриваться граница бетонной подушки и подготовки (цифра 3). Эта граница ранее плохо читалась на фоне ПВ. Можно заметить, что при удалении от точки взятия опорной трассы

(цифра 1) обсуждаемая граница просматривается лучше. Возможно, подобную схему можно использовать для оценки свойств конструкций. Армирование в этой конструкции отсутствует.

К сожалению, излагаемая методика имеет и серьёзный недостаток. Дело в том, что, вычитая помеховую радарограмму, особенно если она создана на основе одной опорной трассы возникает возможность внести в данные выраженную горизонтальную ось синфазности. В том случае если вносимая ось не вычлась из реально существующей в радарограмме помеховой оси синфазности, возникает инвертированная по амплитуде помеховая горизонтальная ось, которую можно принять за реально существующую границу.

На рис. 3.21 приведён пример подобной ошибки. Рис. 3.21 *а* – разностная радарограмма, на которой просматривается горизонтальная ось синфазности (цифра 1). Её размытость проблемой не является – ось может быть подчёркнута обработкой. Анализируя трассу №33 (см. рис. 3.21 *б*; место расположения этой трассы выделено вертикальной линией, обозначенной цифрой 2), можно прийти к выводу, что это донное отражение (отражение от обратной поверхности балки). На то, что это именно граница указывает относительная стабильность просматриваемости отражённого импульса (цифра 3) вдоль по длине профиля.

Однако, если сравнить разностную радарограмму с помеховой (рис. 3.21 *в*) можно заметить, что в ней присутствует такая же ось синфазности, с той же шириной импульса, на тех же временах (цифра 4). Другими словами, помеховая радарограмма не компенсировала паразитную ось синфазности, а создала её. Можно заметить, что ось "цифра 4" имеет отрицательную амплитуду (белый цвет), а ось "цифра 1" положительную (чёрный цвет) – т.е. это результат вычитания. Дело в том, что трасса для составления помеховой радарограммы была взята не с этой конкретной балки, а с другой, также находящейся в обследуемом помещении – было принято ошибочное предположение, что материал всех балок примерно одинаков и полученная помеховая радарограмма подойдёт для всех объектов контроля.

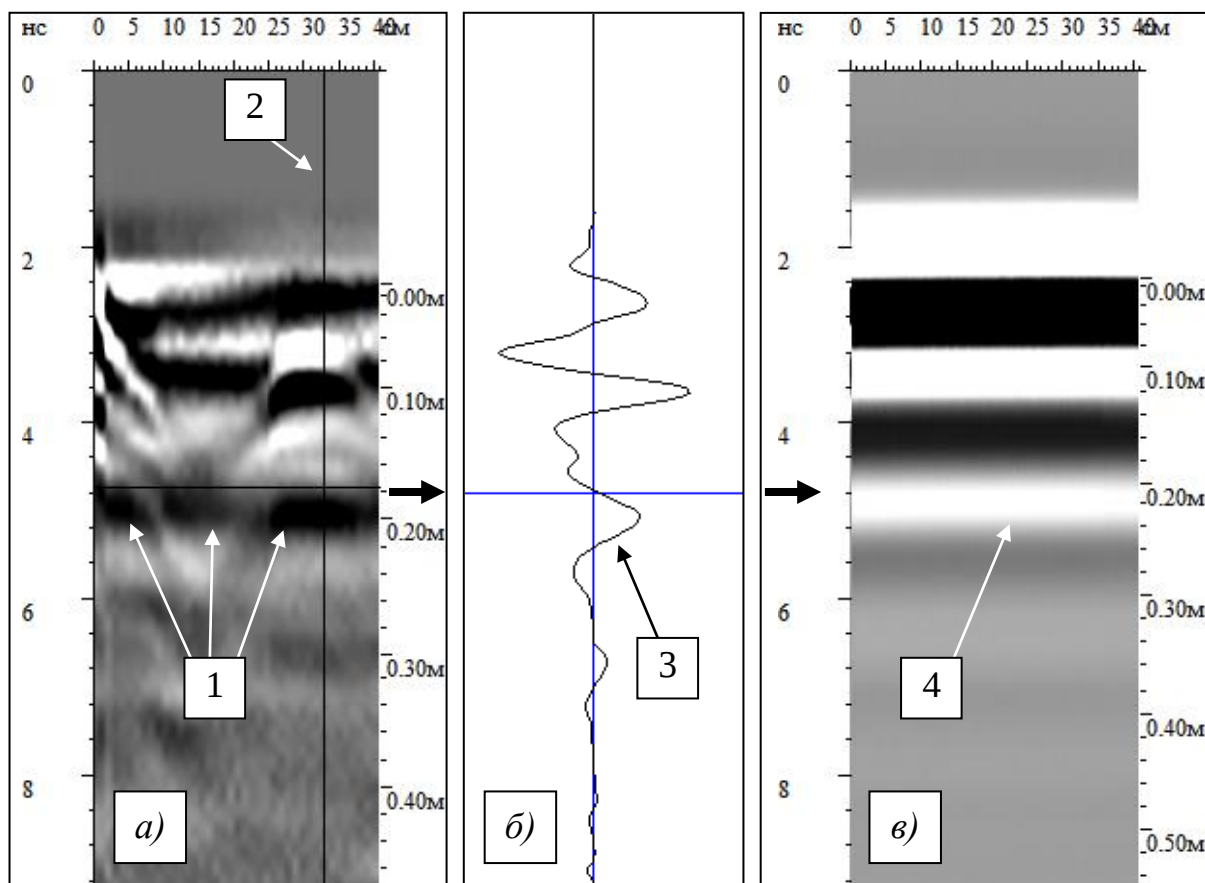


Рис. 3.21. Проявление ложных осей синфазности: *а* – разностная радарограмма; *б* – трасса №33; *в* – помеховая радарограмма.

Некоторое количество проб описываемой методики при опробовании её на грунтах давали в основном негативные результаты, радарограммы становились менее читаемыми. В дополнение к этому обостряется опасность интерпретировать ложную ось синфазности. Причиной этого является нестабильность, неодинаковость формы ПВ вдоль по профилю.

Описанные артефактры обработки можно подавить на основании того предположения, что модельная и вычитенная радарограммы будут хорошо коррелировать в тех местах, где находится не полезный сигнал, а паразитная ось синфазности. Эту особенность иллюстрирует рис. 3.22. Если ПВ присутствует и в исходных данных и в помеховой модели, то при вычитании ПВ подавится. Корреляция между модельной трассой и результатом вычитания будет приближаться к $R = 0$ (см. рис. 3.22 *а*). Если же в исходных данных ПВ на определённых временах отсутствует, а в модельной трассе присутствует импульс (либо за

счёт ПВ, либо за счёт других причин), возникнет ситуация с паразитным артефактом (рис. 3.22 б). При этом корреляция между модельной трассой и результатом вычитания будет приближаться к $R = -1$.

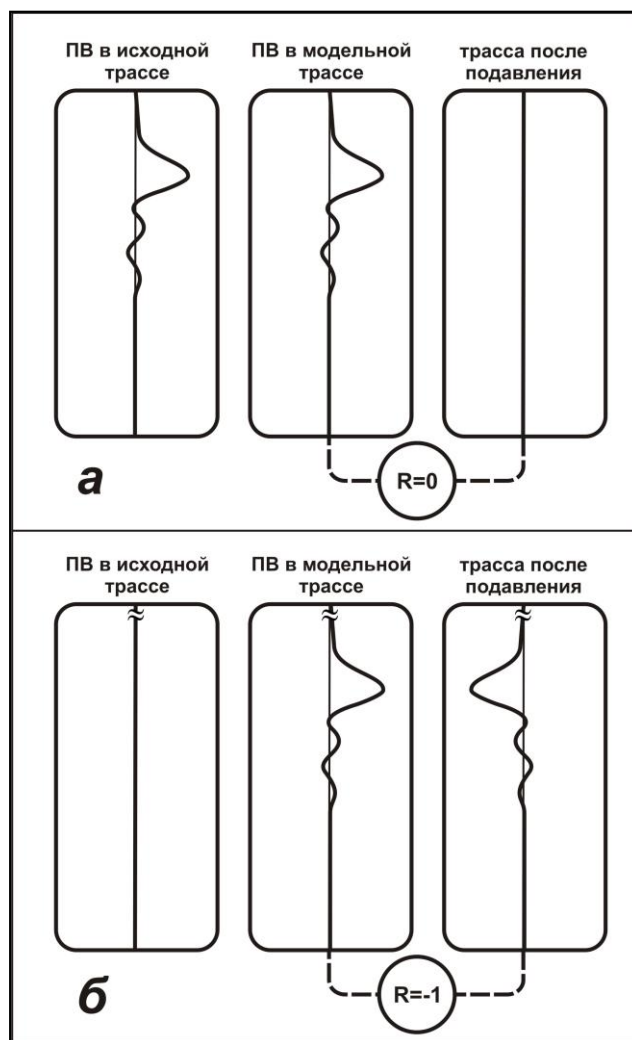


Рис. 3.22. Коэффициент корреляции как идентификатор артефакта обработки

Описываемый коэффициент корреляции R должен рассчитываться между двумя скользящими временными окнами (одно в конкретной трассе помеховой модели, второе в соответствующей ей трассе разностной радарограммы). Значение R привязывается к временной точке середины скользящего окна. Поотсчётное смещение окна позволит получить ряд значений коэффициента корреляции для каждой трассы, представляющий собой функцию $R(t)$. Далее эта

функция будет обозначаться как $R_N(n)$, где N – номер трассы, n – номер отсчёта на трассе.

Волновое поле состоит не только из помеховых составляющих ПВ, поэтому функция $R_N(n)$ не будет иметь строгих значений $R_N(n) = 0$, $R_N(n) = -1$, однако явное приближение к $R_N(n) = -1$ будет указывать на то, что на трассе наблюдается артефакт обработки.

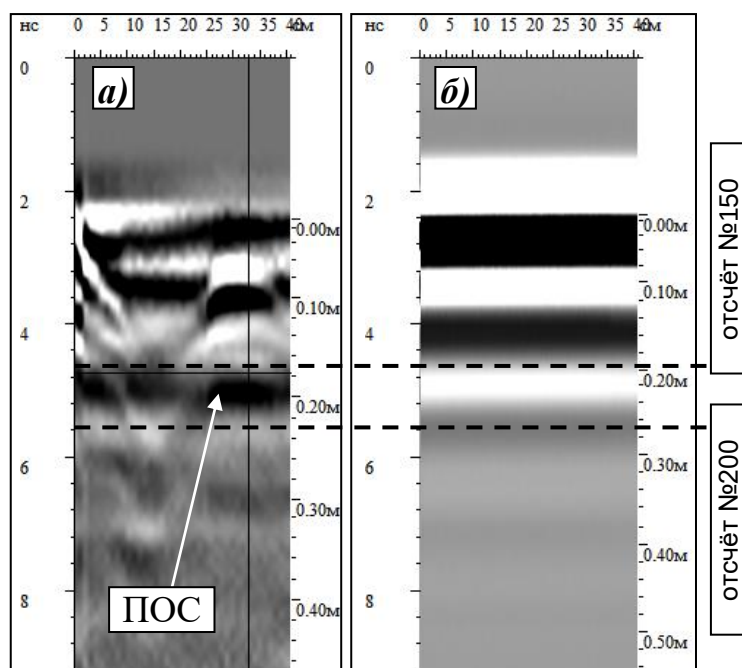


Рис. 3.23. Возникновение помеховой оси синфазности (ПОС): *а* – разностная радарограмма; *б* – помеховая модель; пунктирными линиями дан диапазон отсчётов трасс, в пределах которых паразитный сигнал оказывает наибольшее влияние на результаты. Георадар ОКО-2, 1700 МГц

На рис. 3.23 представлен случай образования артефакта обработки, полученного в результате того, что помеховая модель, созданная по результатам обследования одной балки, ошибочно была распространена на все остальные балки помещения эксплуатируемого сооружения метрополитена (этот пример разбирался выше). Наиболее выраженные амплитудные значения артефакта находятся между 150-м и 200-м отсчётами трасс радарограммы (указаны пунктирами).

На рис. 3.24 *а* дан пример вычисленной функции $R_N(n)$ для 20-х трасс двух радарограмм рис. 3.23 *а* и *б* (т.е. $N = 20$). Ширина скользящего окна – 40 отсчётов (при значениях меньше 30 график $R_N(n)$ ведёт себя слишком хаотично). Можно заметить, что в области $150 < n < 200$ $R(n)$ приближается к -1. Другими словами $R_N(n)$ индицирует артефакт на трассе.

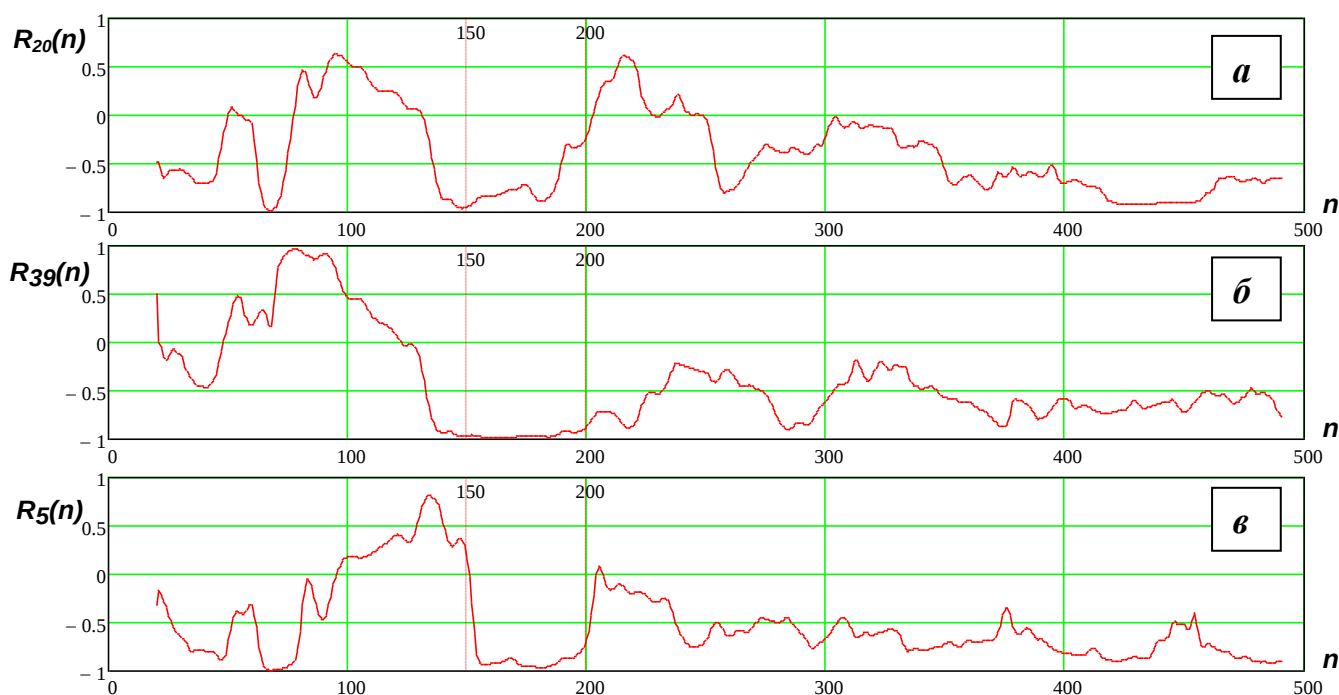


Рис. 3.24. Функции $R_N(n)$, вычисленные в скользящем окне для трасс №№20 (*а*), 39 (*б*), 5 (*в*). Пунктирными линиями указан диапазон отсчётов, на которых находится выявляемый артефакт обработки

Начало падения $R_N(n)$ раньше $n = 150$ можно объяснить шириной окна, а подъём раньше $n = 200$ можно связать с малостью амплитудных значений во втором полупериоде артефакта. Столь большого падения значений $R_N(n)$ достигает либо на локальных участках (район $n = 70$ для рис. 3.24 *а* и *в*; возможно там так же присутствует артефакт), либо в области шумов ($n > 400$), где исследование трасс не имеет практической значимости. На рис. 3.24 *б* и *в* так же дана еще пара функций $R_N(n)$, для других трасс (39-й и 5-й), чтобы показать стабильность результата. Попытки работать с коррелированием случайных величин в двумерных скользящих окнах привели к ухудшению выделяемости артефактов.

Полученный результат позволяет оператору принять решение, видит ли он донную ось синфазности, или артефакт обработки. Однако полученную функцию $R_N(n)$ можно использовать и для подавления артефакта, преобразовав её в весовую функцию. Было рассмотрено два варианта подобных преобразований – линейный и нелинейный. Линейное преобразование будет иметь следующий вид:

$$W_{L,N}(n) = k \cdot \frac{R_N(n) + s}{2}, \quad (3.4)$$

где $W_{L,N}(n)$ – весовая функция с линейным преобразованием, N – номер трассы, n – номер отсчёта на трассе, $R_N(n)$ – функция коэффициента корреляции, s – коэффициент смещения, k – коэффициент масштабирования.

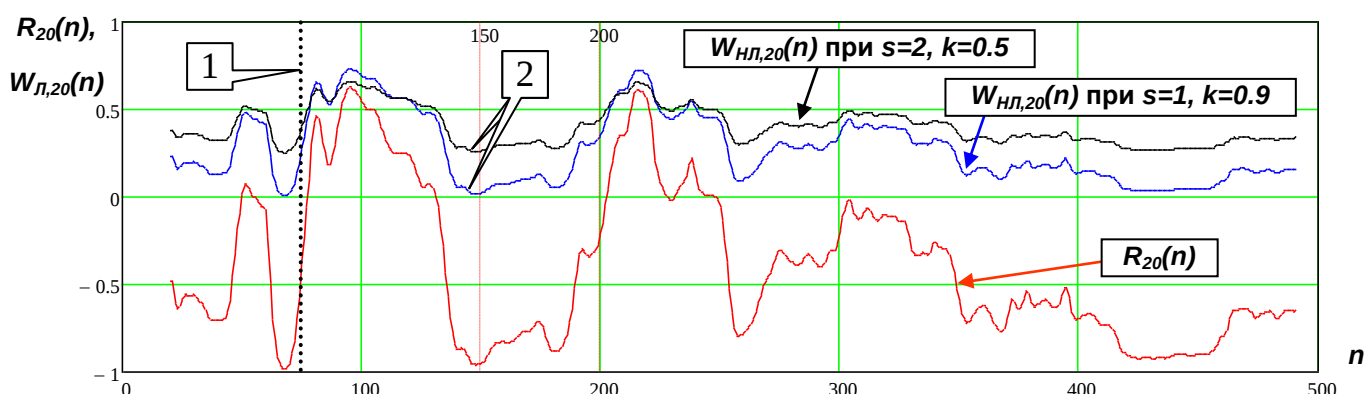


Рис. 3.25. Пример линейного преобразования функции $R_N(n)$

При $s = 1$ все значения $R_N(n)$ преобразовываются так, что изменённое значение корреляции $R'_N(n)$ оказывается в диапазоне $0 < R'_N(n) < 2$. Для того, чтобы сжать диапазон до $0 < R'_N(n) < 1$, значения разделены на 2. Коэффициент k нужен для того, чтобы дополнительно сжать или расширить диапазон чисел, в которых существует $W_{L,N}(n)$. Учитывая, что конкретная точка $W_{L,N}(n)$ соответствует конкретной точке n трассы N их умножение приведёт к тому, что $R_N(n) = -1$ преобразуется в $W_{L,N}(n) = 0$, а значения далёкие от $R_N(n) = -1$ будут приближаться к $W_{L,N}(n) = 1$. Паразитная ось синфазности будет подавлена.

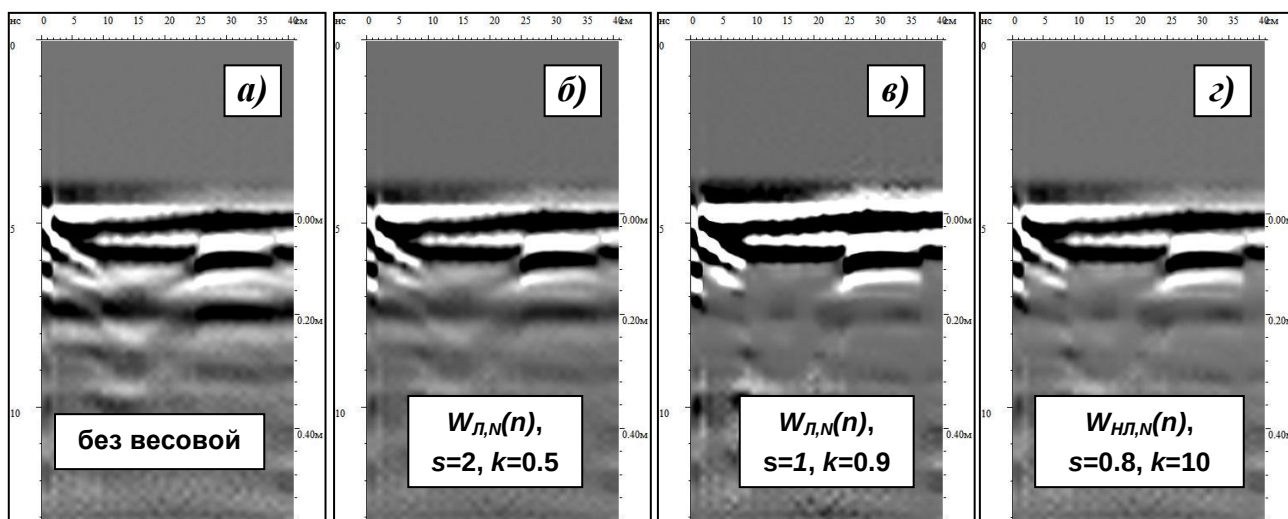


Рис. 3.26. Результаты подавления артефактов обработки

На рис. 3.25 представлены графики $R_N(n)$ и $W_{Л,N}(n)$ для разных значений коэффициентов s и k при $N = 20$. Результат применения весовой функции с линейным преобразованием для различных коэффициентов представлен на рис. 3.26 б – в. Удалось подавить артефакт обработки и не затронуть остальные данные.

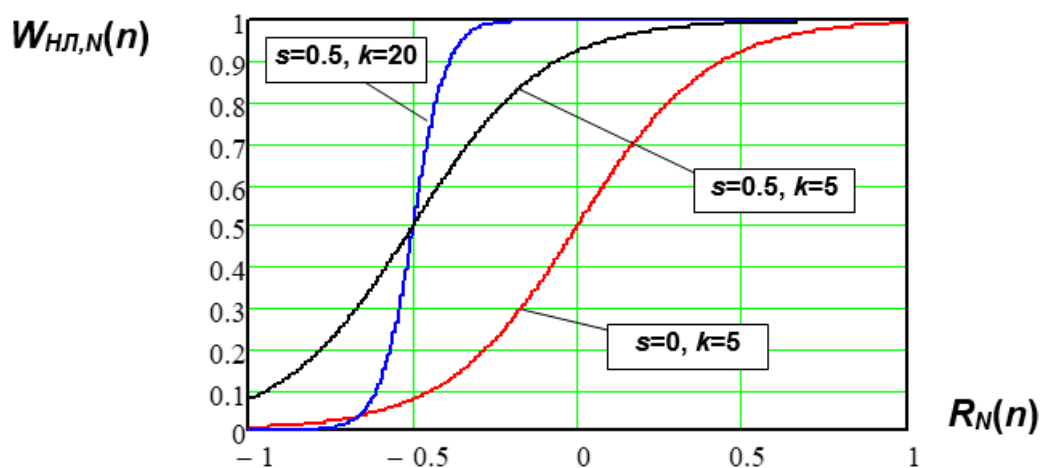


Рис. 3.27. Нелинейное преобразование $R_N(n)$ в $W_{НЛ,N}(n)$

Анализируя графики можно заметить, что при $-0.7 < R_N(n) < 0$ весовая функция $W_{Л,N}(n)$ может иметь достаточно малые значения. При $R_N(n) = -0.5$, $s = 1$, $k = 0.9$, $W_{Л,N}(n) = 0.225$ (см. пунктирную линию рис. 3.25 цифра 1). При таких $R_N(n)$ присутствие артефакта сомнительно, однако весовая функция будет

существенно подавлять амплитуды трасс (22,5% от исходной амплитуды). Вариации коэффициентов s и k проблеме не снимают, при низком k снижается влияние близких к -1 значений $R_N(n)$ (см. рис. 3.25 цифра 2). Выходом здесь может быть такая нелинейная функция преобразования $R_N(n)$ при которой значения $R_N(n)$ близкие -1 имеют очень малый вес и подавляют артефакт, а начиная с некоторого уровня $R_N(n)$ быстро становятся равны 1 и не влияют на полезные сигналы. Для получения такой весовой функции удобно использовать свойства сигмоида. Весовая функция с нелинейным преобразованием может выглядеть следующим образом:

$$W_{HL,N}(n) = 1 - \frac{1}{1 + e^{k \cdot (R_N(n) + s)}},$$

где $W_{HL,N}(n)$ – весовая функция с нелинейным преобразованием, остальные значения идентичны тем, что расшифровывались для линейной функции. Коэффициент s смещает функцию преобразования вдоль по оси x , коэффициент k делает функцию более пологой или более быстро нарастающей.

Преобразование, которое производится над $R_N(n)$ при вычислении этой весовой функции иллюстрирует рис. 3.27. Так, например при $s = 0.5$, $k = 5$ значение $R_N(n) = -1$ преобразуется в $W_{HL,N}(n) = 0.076$ (7.6 % от исходной амплитуды), значение $R_N(n) = -0.5$ в $W_{HL,N}(n) = 0.5$ (50% от исходной амплитуды), а $R_N(n) = 0$ в $W_{HL,N}(n) = 0.92$ (92%). Что и требовалось от функции преобразования. Всё это позволяет подобрать наиболее оптимальный вариант подавления артефактов. Примеры весовой функции для нескольких из трасс радарограммы рис. 3.23 представлен на рис. 3.28. Хорошо заметно, что как только $R_N(n)$ начинает слишком сильно отходить от значения -1 весовая функция $W_{HL,N}(n)$ становится равной 1 и перестаёт влиять на мгновенные амплитуды георадиолокационных трасс (см. рис. 3.28 цифра 1). Коэффициенты s и k позволяют регулировать эту особенность.

Результат применения $W_{HL,N}(n)$ к радарограмме рис. 3.23 представлен на рис. 3.26 г. По этим результатам трудно сказать, что нелинейный вариант луч-

ше линейного. Однако можно предложить практический пример, где нелинейная весовая функция более аккуратно и избирательно относится к обрабатываемым данным. На рис. 3.29 *а* представлена исходная радарограмма на которой ПВ подавляет полезные элементы волнового поля. Съёмка ведётся по боковой поверхности балки. Одной из задач является определение её структуры. Рис. 3.29 *б* – результат традиционной обработки (горизонтальная фильтрация в скользящем окне с вычитанием среднего). Удалось выделить пруты армирования, вместе с тем подавлена донная ось синфазности (специфика выбранного метода обработки).

Рис. 3.29 *в* и *г* получены следующим образом. Выбрана траса в левой части радарограммы, на её основании создана помеховая модель, из исходной радарограммы вычтена помеховая модель. Рассчитаны функции коэффициента корреляции $R_N(n)$, которые преобразованы в линейную $W_{Л,N}(n)$ и нелинейную $W_{НЛ,N}(n)$ весовые функции. Рис. 3.29 *в* – применение $W_{Л,N}(n)$, рис. 8 *г* – применение $W_{НЛ,N}(n)$. В случае $W_{НЛ,N}(n)$ (рис. 3.29 *г*) донная ось синфазности читается явно лучше. Остальная обработка радарограмм рис. 3.29 *в* и *г* – идентична.

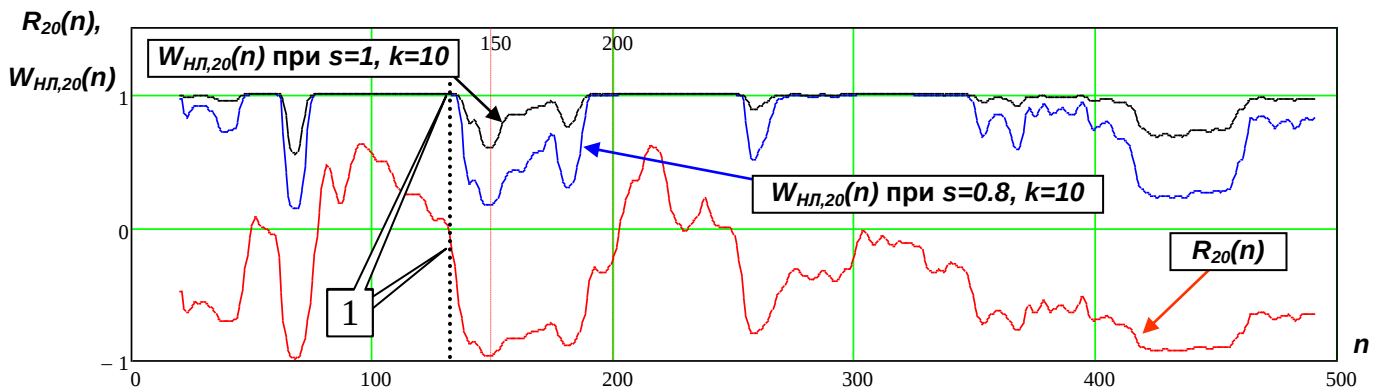


Рис. 3.28. Пример нелинейного преобразования функции $R_N(n)$

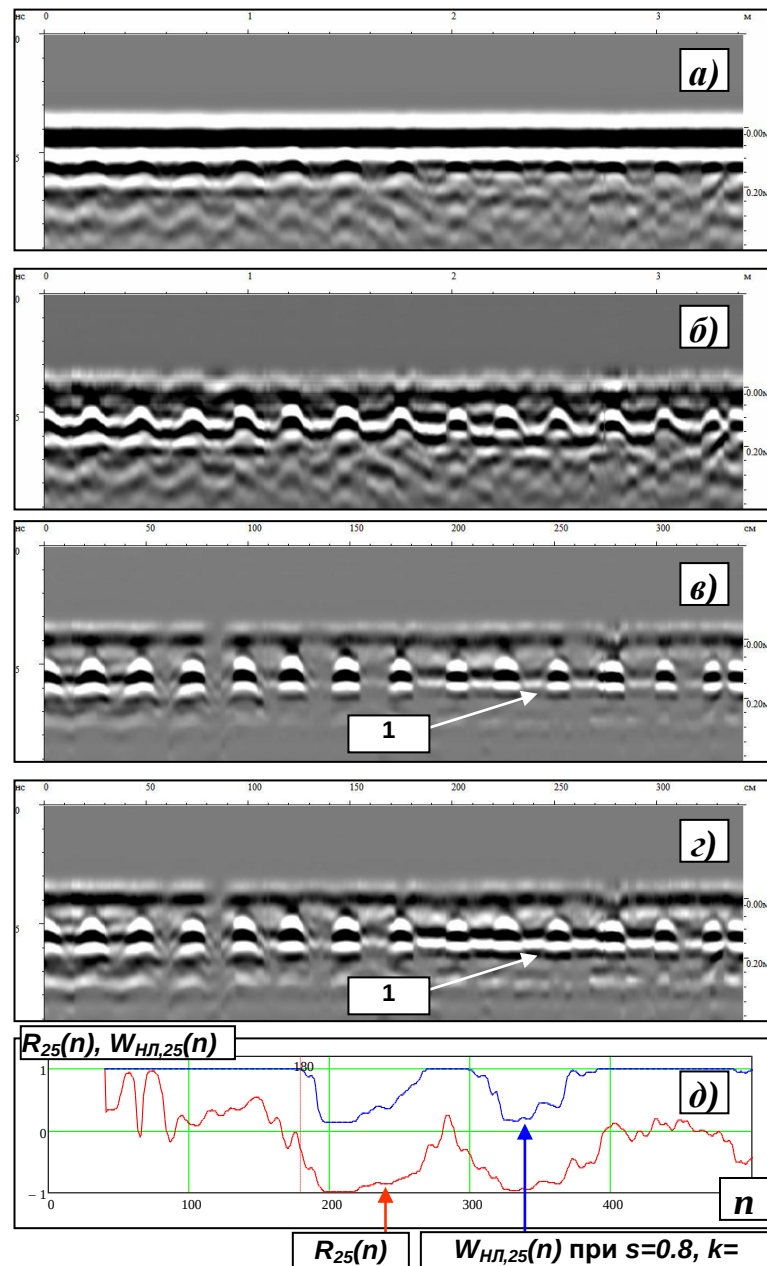


Рис. 3.29. Сравнение работы весовых функций, полученных линейным и нелинейным преобразованием $R_N(n)$. 1 – донная ось синфазности. Георадар ОКО-2, 1200 МГц

Рис. 3.29 д) иллюстрирует причины этого результата. На нём приведены примеры $R_N(n)$ и $W_{HL,N}(n)$ для 25-й трассы. Полезный сигнал занимает первые 180 отсчётов трассы (этот временной уровень выделен пунктирной линией на рис. 3.29 д). До $n = 180$ $W_{HL,25}(n)$ почти везде равна 1 и на сигнал не влияет (нет артефактов, нет подавления). При этом вариации $R_{25}(n)$ будут влиять на полезную часть радарограммы. Поскольку ось синфазности не исчезла на рис. 3.29 з,

можно сказать, что речь идёт именно о донном отражении на глубине ~10-13 см. Вычитание среднего часто хорошо справляется с задачей аккуратного подавления ПВ и далеко не всегда донные оси синфазности подавляются этой обработкой. Но приведённый пример показывает случай, когда предлагаемый подход оказывается эффективным.

Резюмируя результаты можно отметить, что предлагаемый метод подавления прямой волны с вычитанием помеховой модели позволяет выделять те полезные сигналы, которые искажаются при применении традиционной обработки (горизонтальная фильтрация в скользящем окне с вычитанием среднего). Артефакты в случае некорректности подобранной помеховой модели можно удалить, опираясь на функции коэффициента корреляции, преобразованные в весовые функции и рассчитанные для каждой из трасс. Получение помеховой модели с помощью характерного участка радарограммы работает только для строительных конструкций, в связи со слабой изменчивостью волновой формы ПВ вдоль по профилю.

3.5. Оценка параметров армирования с целью улучшения качества выявления полостей в заобделочном пространстве

Важной задачей контроля конструкций подземных сооружений является оценка параметров армирования, таких как шаг армирования, количество рядов, мощность защитного слоя. Эти задачи решаются для оценки соответствия реальных конструкций документации. Расхождения с документацией могут обнаруживаться в связи с нарушениями в процессе её исполнения, либо в местах строительства отличающихся повышенной сложностью выполняемых технологических задач и сложностью геологических условий.

Оценки структуры армированных конструкций используются для оценки деформаций и распределения напряжений в массиве и в конструкции с помощью моделирования методами конечных элементов.

Наиболее важный аспект для решаемой в диссертационном исследовании задачи связан с предварительной оценкой параметров армирования, необходи-

мой для корректной интерпретации результатов геофизических обследований, направленных на выявление полостей за обделкой сейсмоакустическими методами (более плотное армирование должно снижать пороговые значения информативных параметров при сейсмоакустическом исследовании).

Весь материал этой главы получен на георадаре "ОКО-2" 1200 и 1700 МГц на элементах конструкций и обделках Московского метрополитена. Типичные шаги между трассами 10-25 мм. Типичные накопления 4-128 (в редких случаях до 256) записи на точку профиля. В обработке преобладают: гиперболическая миграция (ГМ), или как её еще называют фокусировка [43]; амплитудное преобразования Гильберта (АПГ); деконволюция; автоматическая регулировка уровня амплитуд; вычитание среднего в скользящем горизонтальном окне (ВС); медианная фильтрация. Граф обработки «гиперболическая миграция» + «амплитудное преобразования Гильберта» далее обозначаются как ГМ-АПГ.

Параметры армирования в конструкциях подземных сооружений могут достаточно сильно варьировать. На рис. 1 представлены примеры подобных ситуаций. На рис. 3.30 *а-г* обработка – ГМ-АПГ; на рис. 3.30 *д* обработка – только ГМ, на рис. 3.30 *е* обработка – только АПГ. Рис. 3.30 *а* – пример строго регулярного армирования с равномерным, выдержанным шагом (цифра 1 – аномалия от одного прута). Рис. 3.30 *б* – пример изменения толщины защитного слоя (на участке 6-11 м). Рис. 3.30 *в* – изменение шага армирования. Рис. 3.30 *г* – выявлен участок, полностью лишённый армирования (однако толщина обделки здесь – 70 см, граница "обделка-грунт" в этом примере подавлена обработкой, которая была направлена на выделение армирования, а не границ).

Рис. 3.30 *д* – пример сложной ситуации, в которой обделка толщиной 40 см (ось синфазности указана цифрой 2) переходит в обделку толщиной 70 см (ось указана цифрой 3). Также видна ось, образованная дифрагированной волной (цифра 4). Выше границы цифра 3 находится арматурная сетка, которая отсутствует выше.

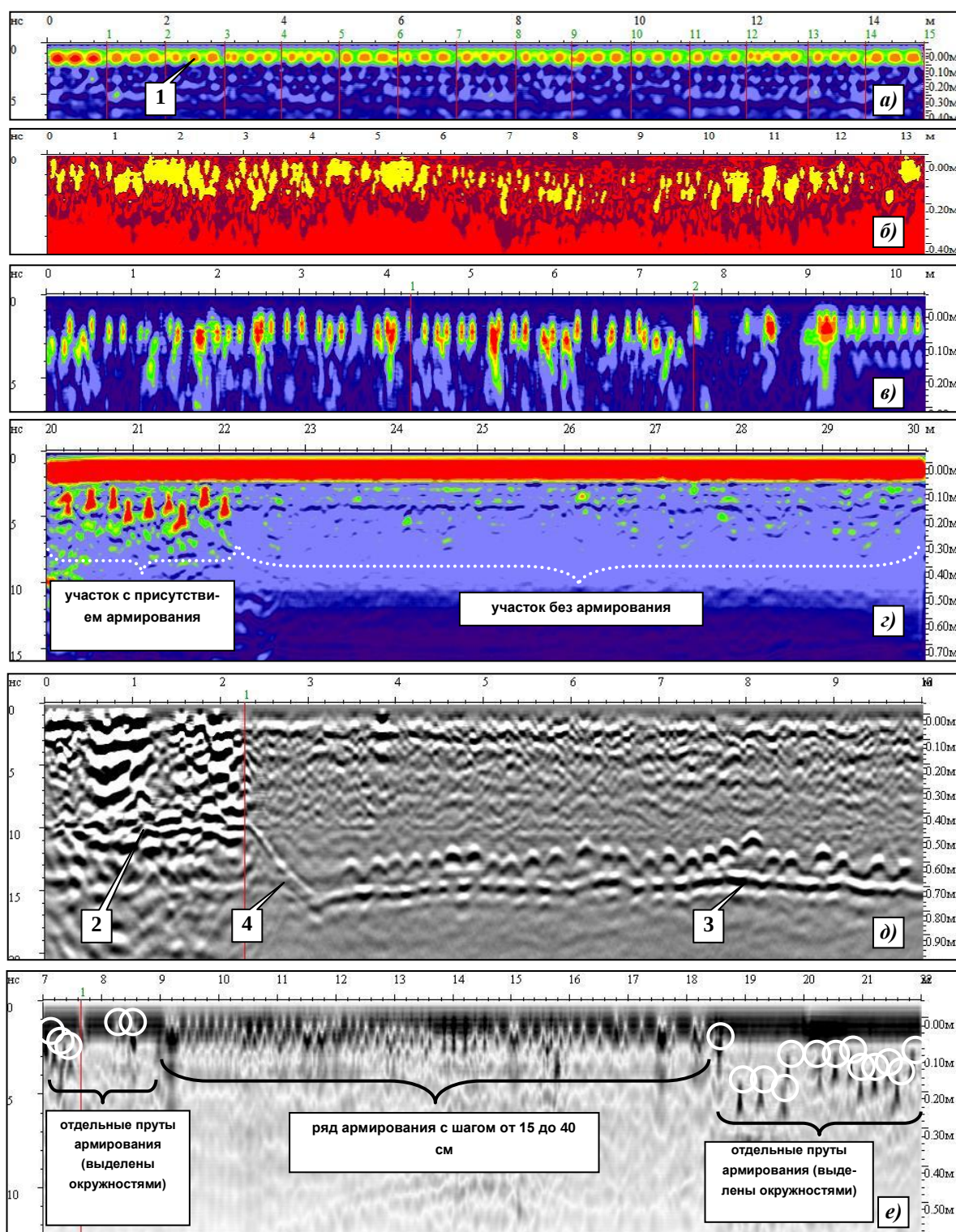


Рис. 3.30. Примеры результатов, полученных при контроле армирования

Не смотря на то, что разрез смигрирован, гиперболические оси синфазности (ГОС) не удалось подавить (диэлектрическая проницаемость ε' , подобрана по оси синфазности указанной цифрой 4). Арматурные пруты здесь имеют большой диаметр, не удивительно, что ряд хорошо просматривается на большой глубине.

Рис. 3.30 δ – пример сложного участка, где наблюдается изменение шага, его регулярности и глубины заложения армирования.

На первый взгляд проблема оценки параметров армирования одна из самых простых, что связано с существенно различными электрическими свойствами бетона и металла. Однако существует ряд задач, которые решаются с некоторыми трудностями из-за различных помеховых факторов.

1. Выявление шага армирования. Обычно на радарограммах первый ряд армирования достаточно хорошо выражен либо в виде ГОС, либо в виде амплитудных максимумов (особенно после ГМ-АПГ).

При достаточно малом шаге съёмки на радарограммах обычно можно выделить каждый арматурный прут первого ряда. Помеховым фактором при решении этой задачи может становится само армирование. При слишком плотном шаге оно начинает работать как непреодолимый для излучения экран – сигналы оказываются зашумлены так называемым "звоном" [266]. В ряде случаев помеховым фактором может становиться сама строительная конструкция, когда армирование перекрыто толстым слоем неармированного бетона (иногда такое перекрытие многослойно и радарограмма содержит отражения от границ этих слоёв). Сигнал затухает при двойном пробеге в бетонной подушке и интерферирует с помехами. Из-за затухания "усы" ГОС оказываются короткими, а отражённый сигнал характеризуется малой амплитудой. Это иллюстрирует рис. 3.31 *a* (армирование указано цифрой 1). Еще одним примером может послужить рис. 3.30 δ . Однако здесь на большой глубине находится армирование большей толщины прута и "усы" здесь более выражены (они обладают так же большой длительностью, что не видно из-за обработки, выбранной для рис. 3.31 δ).

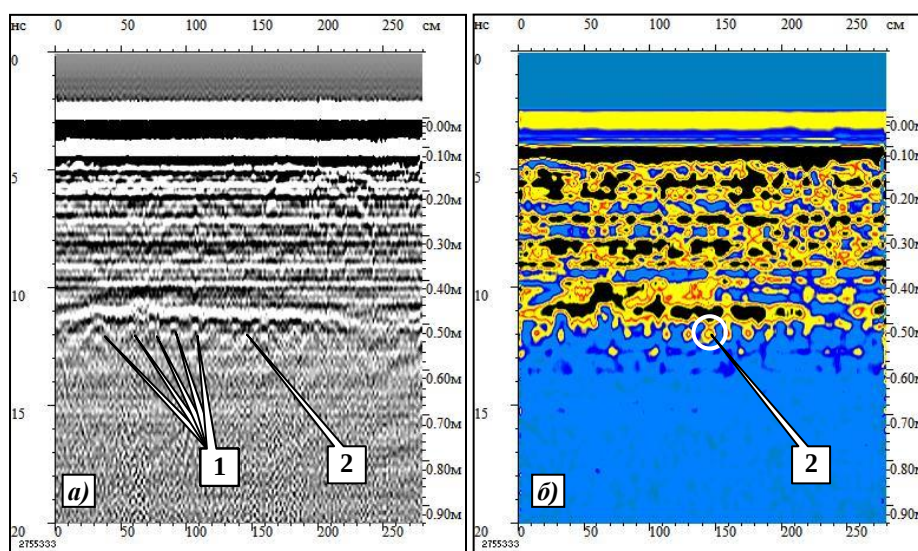


Рис. 3.31. Помеховые факторы при выделении армирования

2. Выделение второго ряда армирования, определение толщины обделки. Принятие решения о наличии второго ряда важно, поскольку это влияет на прочностные свойства конструкции и её поведение при изменении нагрузок. Основным признаком выделения 1-го и 2-го ряда является регулярность аномалий (см. рис. 3.32 б).

Основным помеховым фактором при выделении 2-го ряда является влияние 1-го: "усы" ГОС от соседних прутков 1-го ряда накладываются друг на друга, формируя сложную сеть помеховых артефактов. В результате при обследовании обделок, из-за интерференции помех достаточно часто бывает трудно выделить прут армирования, несмотря на то, что он создаёт достаточно существенный амплитудный максимум. В ряде случаев не удаётся выделить 2-й ряд даже по мигрированному разрезу – приходится снимать несколько радарограмм, рассчитывая на то, что в какой-то из этих съёмок свойства бетона или помеховая ситуация, или смещение первого ряда относительно второго позволят выявить регулярный ряд аномалий.

При этом пересечение "усов" ГОС может создавать ложный ряд аномалий ниже первого ряда. "Усы" будут продолжаться дальше точки пересечения, а их наклон будет соответствовать ε' среды, что при мигрировании создаст макси-

мум. В результате точки пересечения будут выглядеть как второй ряд армирования. Пример подобной ситуации представлен на рис. 3.31 б (это иначе обработанная радарограмма рис. 3.31 а) на котором обработкой выделен регулярный ряд локальных максимумов (один из них обведён окружностью и указан цифрой 2). Если взять номера отсчёта и трассы, на которых находится аномалия (рис. 3.31 б), то окажется что она попадает не в вершину ГОС исходной радарограммы (рис. 3.31 а), а в перекрестие "усов" (цифра 2 на рис. 3.31 а). Принимать решение в этом случае приходится на основании опробований различных вариантов обработки радарограммы, проверяя на какие участки исходной радарограммы указывают аномалии.

В ряде случаев по второму ряду можно оценить толщину обделки, оценив глубину заложения второго ряда и добавив к нему ожидаемую глубину защитного слоя. Граница "плита-грунт" может выделяться достаточно слабо и часто это единственный выход. Причиной здесь является не очень большой контраст по ε' границы "плита-грунт" (исключая случаи, когда на границе присутствует вода). Но в большей степени это вызывается помеховым влиянием самого армирования. При небольшой толщине обделки пруты армирования (оба ряда) находятся достаточно близко к георадару, поэтому ГОС имеют достаточно длинные "усы", которые накладываются на границу и снижают её читаемость. В этой ситуации смигрированные радиобразы армирования дают глубину заложения второго ряда арматуры, что позволяет, в том числе, и по нему искать границу "плита-грунт".

То на сколько лучше выделяется 2-й ряд вне влияния 1-го показывает рис. 3.32 а и б (одна и та же радарограмма в 2-х обработках) – это результат обследования фундамента в коллекторе – здесь присутствует две плиты с однорядным армированием в каждой из них. Подобная структура объекта привела к тому, что сетки армирования разнесены на ~ 30 см и не мешают друг другу. Рис. 3.32 а – исходный разрез, б – после ГМ-АППГ, хорошо видны оба ряда.

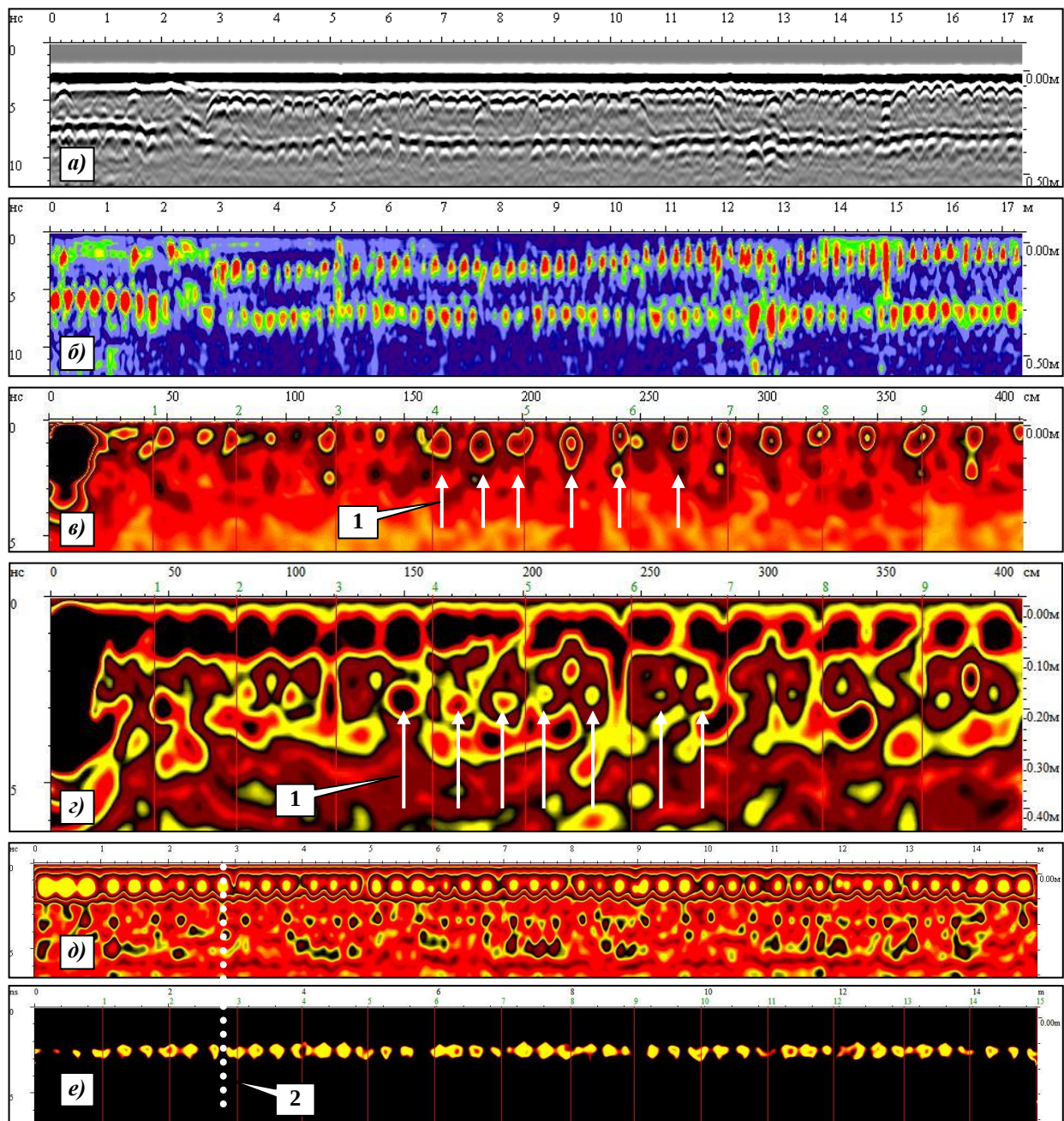


Рис. 3.32. Примеры выделения нескольких рядов армирования. Описания случаев даны в тексте. Все разрезы, кроме *a* – смигрированы

В примере рис. 3.32 *в* и *г* (2-е обработки, обе с ГМ) – сетки находятся на расстоянии ~ 10 см, это обычная плита обделки с двухрядным армированием. Здесь второй ряд удалось выделить с трудом (отдельные аномалии указаны стрелками, цифра 1). Однако, те же расстояния в 10 см в случае рис. 3.32 *д* и *е* позволяют легко видеть ряды в обделке – это не удалось сделать на одной радарограмме и пришлось создавать две разные с разной обработкой. Сопоставляя радарограммы рис. 3.32 *д* и *е* можно заметить, что ряды находятся на разной глубине – при этом специфика обработки (ГМ-АПГ), а также то, что максимумы второго ряда находятся не под максимумами первого, не позволяет предположить, что речь не идёт о выделенных последующих полупериодах отражений 1-го ряда. Детальный анализ также показал, что второй ряд на рис. 3.32 *е* не результат пересечения "усов" ГОС.

Возможно, сложности с выделением последующих рядов и границ частично можно снять за счёт развития методик обработки данных и выделения признаков наличия армирования в условиях помех. В частности, в некоторых случаях удавалось выделять второй ряд после частотного преобразования Гильберта.

3. Определение толщины защитного слоя (глубины заложения арматуры) и толщины обделки. Примером решения подобной задачи может послужить рис. 3.30 *б*, на котором можно заметить измерение глубины заложения армирования. Успешное решение этих задач зависит от корректной оценки кинематических параметров объекта обследования. Обычно предполагается использование калибровочного бурения, после которого становится известна толщина конструкции [267]. Сопоставление времён прихода донного отражения и толщины конструкции позволяет оценить скорость и диэлектрическую проницаемость ε' .

Проблемой здесь является нежелательность разрушающего воздействия в действующих тоннелях метрополитенов и трудоёмкость этих операций. Возможно, выходом в этой ситуации может стать использование ГМ, эффективность которой зависит от правильно подобранной скорости среды, в которой

формируются ГОС. Фактически железобетонная плита – объект, насыщенный ГОС-ми, маркерами, указывающими на скорость в ней (так называемая реми-грация).

Еще одна проблема связана с необходимостью указать временную точку, которую стоит принять за первое вступление сигнала, отражённого от прута (ситуация обостряется при слишком малых значениях защитного слоя). А также с корректным определением положения нуля глубин. Для георадаров "ОКО-2" существует рекомендация выставлять ноль по концу первого полупериода прямой волны [267, 268]. Однако в некоторых случаях аномалия, которую даёт прут присутствует на более ранних отсчётах чем этот временной уровень. Это иллюстрирует рис. 3.33. Радарограмма дана в двух обработках, направленных на подавление прямой волны (традиционное ВС и методика с вычитанием помеховой модели, которая была изложена в [269]), что бы показать что не обработка вызвала слишком рано начавшуюся аномалию от прута (аномалия указана цифрой 1).

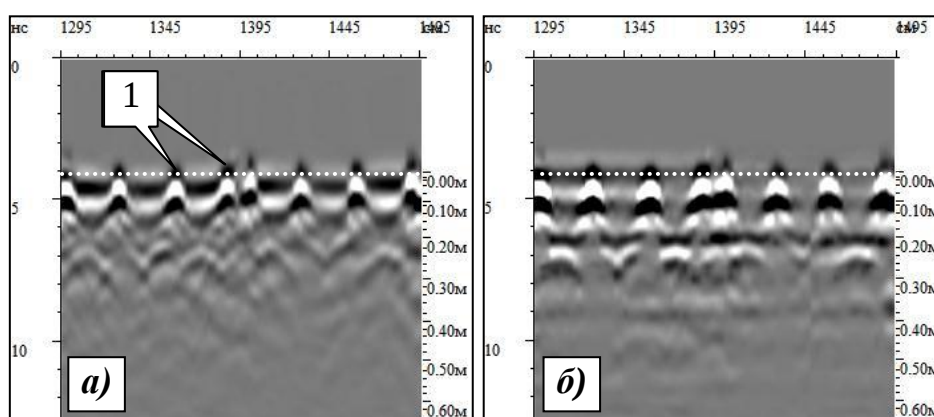


Рис. 3.33. Оценка толщины защитного слоя: *а)* – вычитание среднего; *б)* – вычитание помеховой модели; пунктирная линия – окончание первого полупериода прямой волны

3.6. Развитие метода георадиолокационного поиска зон разуплотнения в массиве пород вблизи тоннелей при обследованиях с поверхности с использованием информативных параметров

3.6.1. Выявление разуплотнений при съёмках с поверхности

При контроле заобделочного пространства важно не только выявлять полости на границе «грунта-обделка» при обследовании из пространства подземной коммуникации, либо транспортного тоннеля. Важно также анализировать геологическую среду вблизи подземного сооружения.

Одной из причин возникновения полостей в заобделочном пространстве может быть присутствие рядом с тоннелем геологических объектов, склонных к изменению своего состояния. В качестве таких объектов могут выступать: карсты, пливуны, речные палеоврезы. Такие области характеризуются высокой влагонасыщенностью, проницаемостью, способностью быстро изменять свою структуру и состояние. Это приводит к тому, что вблизи таких областей легко происходит образование полостей, плохо работает тампонаж, как на стадии строительства, так и при ремонтных работах (раствор уходит в полости). Также опасность этих областей может быть связана с быстрой их разгрузкой во внутреннее пространство тоннеля, способность к быстрому изменению НДС внутри и вблизи них. Подобные области выявляются с помощью геофизических методов, таких как сейсморазведка и низкочастотная георадиолокация.

Предпочтение в выборе именно георадиолокации для решения этой проблемы состояло в том, что сейсморазведка обладает довольно низкой разрешающей способностью, что, опираясь на практический опыт автора, является критической проблемой. Проблема небольшой глубинности георадиолокации в этом случае стоит менее остро, поскольку с помощью низкочастотных георадаров можно достигать глубин в первые десятки метров (достигим и большие глубины, в ситуации оптимальных условий). Это является типичной глубиной

залегания, как множество коллекторов, так и большого объёма тоннелей метрополитенов.

В этой главе изложен в основном опыт работы со сверхмощными георадарами, использующими резистивно-нагруженные антенны [270, 271]. Причиной выбора именно этого типа оборудования связан с рядом проблем обследования грунтовых массивов городов: неоднородность свойств пород, содержание большого количества помеховых объектов [272], наличие глинистых толщ в разрезах [273]. Всё это снижает глубинность исследований. Здесь можно использовать такие подходы как: повышение мощности излучения; понижение его средней частоты; разработка методов обработки сигналов, оптимальных для этих частот. Эти подходы реализованы в сверхмощных георадарах серии "Лоза". Обострение же "воздушных" помех, связанное с увеличением мощности излучения обычно не является камнем преткновения.

Все материалы этой главы получены на георадаре "Лоза-1Н" с трёхметровыми антеннами (50 МГц) в рамках обследований грунтов вблизи аварийных коллекторов г. Москвы. Часть работ выполнялась на георадаре "Лоза-1Н" с шестиметровыми антеннами (25 МГц). На всех представленных радарограммах левая вертикальная ось – время в наносекундах, правая вертикальная ось – глубина в метрах, горизонтальная ось – длина вдоль по профилю в метрах. Типичные шаги между трассами от 20 до 50 см. Накопления не использовалось, для того чтобы не обострять "воздушные" помехи. В обработке преобладают: логарифмирование значений амплитуд, высокочастотная и низкочастотная фильтрация (используются горизонтальный, вертикальный и наклонный варианты), вычисление производной, различные особенности работы со шкалой цветового кодирования амплитудных значений. Вся обработка производилась в программе Krot версий 179Ns1 и 1403.

Также в материале приводится анализ георадиолокационных годографов. В международной литературе этот метод часто называют WARR (wide-angle reflection-refraction [274]), либо CMP (common mid point [275]). В отечественной литературе его можно встретить под названием георадиолокационное зондиро-

вание [276]. При СМР разносят приёмную и излучающую антенны, получая годограф отражённой волны. Уравнение годографа отраженной волны представляет собой следующее выражение [273, 276]:

$$t = \frac{1}{V} \cdot \left(\sqrt{x^2 + 4 \cdot h^2} \right) = \frac{\sqrt{\varepsilon'}}{c} \cdot \left(\sqrt{x^2 + 4 \cdot h^2} \right), \quad (3.6)$$

где t – время задержки, V – скорость электромагнитной волны в среде, x – межантенное расстояние, h – глубина отражающей границы, ε' – действительная часть диэлектрической проницаемости среды, c – скорость электромагнитной волны в вакууме. Опираясь на (3.6), годограф позволяет получать оценку ε' :

$$\varepsilon' = \frac{t^2 \cdot c^2}{x^2 + 4 \cdot h^2}, \quad (3.7)$$

что даёт возможность пересчитывать времена первых вступлений в глубины, а также анализировать гидрогеологическую ситуацию в разрезе (за счёт высокого значения ε' воды).

Из-за особенностей диаграммы направленности годограф трудно получить для больших межантенных расстояний – т.е. получается анализировать только начальные участки годографов. Однако для большинства случаев этого вполне достаточно.

Касательно приводимых в этом материале годографов требуется произвести некоторые уточнения. Во всех случаях СМР-радарограммы снимались в диапазоне межантенных расстояний $0.6 \div 6$ м, т.е. первая трасса СМР-радарограммы имеет привязку 0.6 м. При этом визуализировать и подбирать модель годографа удобнее если СМР-радарограмма в Krot смещена на 2 м. Поэтому на рисунках первая трасса находится на отметке 2 м, а нулевое межантенное расстояние соответствует отметке 1.4 м – там же находятся начальные точки моделей годографов. Анализируя результаты СМР можно заметить, что начальная точка модели годографа не является точкой минимальной задержки. Это следствие аппаратных особенностей георадара "Лоза" [276].

Опыт, набранный в процессе обследований массивов пород вблизи аварийных коллекторов, позволяет выделить несколько типов объектов, выявляемых при георадиолокационных изысканиях. Первичной задачей обычно является выявление геологических объектов, которые ранее могли вызвать аварию и некоторые из которых могут в последствии повлиять на технологические процессы ремонтных работ. К таким объектам относятся линзы водонасыщенных пород и погребённые русла рек.

1. Линзы водонасыщенных пород. Как при строительстве, так и при восстановлении коллектора такие водонасыщенные области могут быть потревожены, что может привести к их разгрузке в коллектор с последующей осадкой поверхности. На рис. 3.34 представлены примеры радарограмм, полученных над областями водонасыщенных пород. На рис. 3.34 *а* хорошо видна подобная область, указанная цифрой 3.34. В этом примере аномальное изменение сигналов достаточно хорошо выражено, подчас такие объекты видны без специальной обработки радарограммы. Положительную роль здесь играют высокая мощность георадара и низкая частота, увеличивающие глубинность. А также апериодическая форма импульса, делающая радарограмму более читабельной. Описываемые объекты обычно достаточно компактны в плане, что удобно выявлять по срезам кубов амплитуд, полученных из площадной съёмки.

Линзы водонасыщенных пород характеризуются рядом волновых аномалий. В первую очередь эти признаки связаны с существенным изменением проводимости среды σ [160]. Эта особенность приводит к появлению низкочастотных "хвостов" (НЧХ) на трассах. Пример подобного "хвоста" можно увидеть на рис. 3.34 *в*, где представлена трасса №129, снятая над областью разуплотнения. Для сравнения также дана трасса №40 снятая вне области (см. рис. 3.34 *б*).

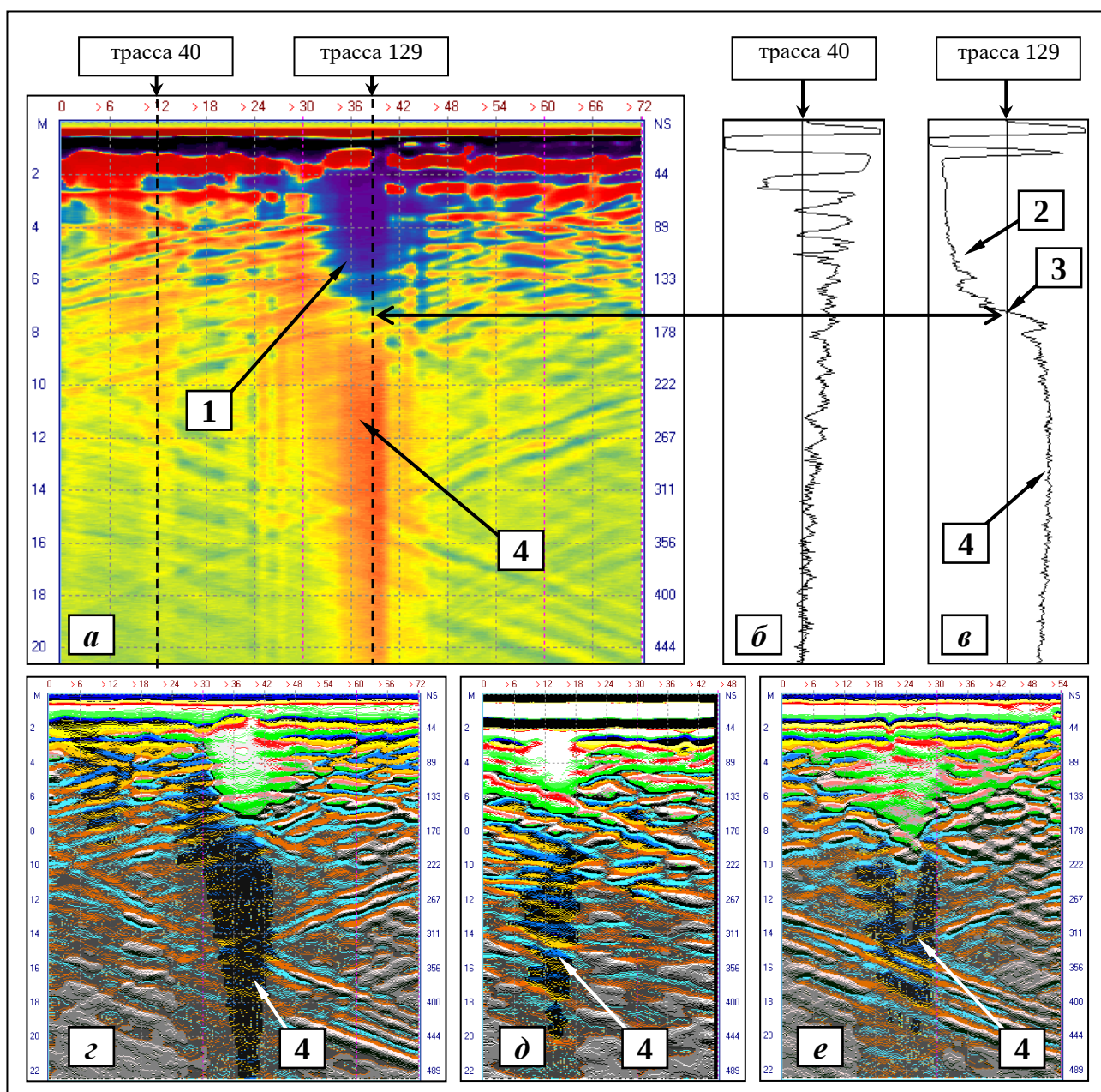


Рис. 3.34. Пример выявления водонасыщенных областей: *а* – радарограмма ($\epsilon' = 11.1$); *б* – трасса полученная вне области; *в* – трасса полученная над областью; *г–е* – различные примеры выявленных водонасыщенных областей; 1 – область разуплотнения; 2 – отрицательная амплитудная аномалия; 3 – точка перехода через ноль; 4 – положительная амплитудная аномалия

Достаточно часто такой НЧХ формируется при прохождении области с высокой проводимостью именно как отрицательная амплитудная аномалия (цифра 2), причём не переходящая через ноль. Приведённый же пример трассы №129 такой переход через ноль содержит (цифра 3). Это позволяет сделать

предположение, что вблизи от перехода наблюдается вступление отражённого от нижней границы области аperiodического сигнала с сильно искажённой волновой формой. Этот сигнал также можно назвать НЧХ, однако его характерной особенностью будет положительная амплитуда. Подобный характер сигнала – положительная амплитудная аномалия, возникающая после отрицательной – это достаточно распространённый признак, что можно проиллюстрировать рядом примеров (см. рис. 3.34 *a, г-е* положительные аномалии указаны цифрой 4).

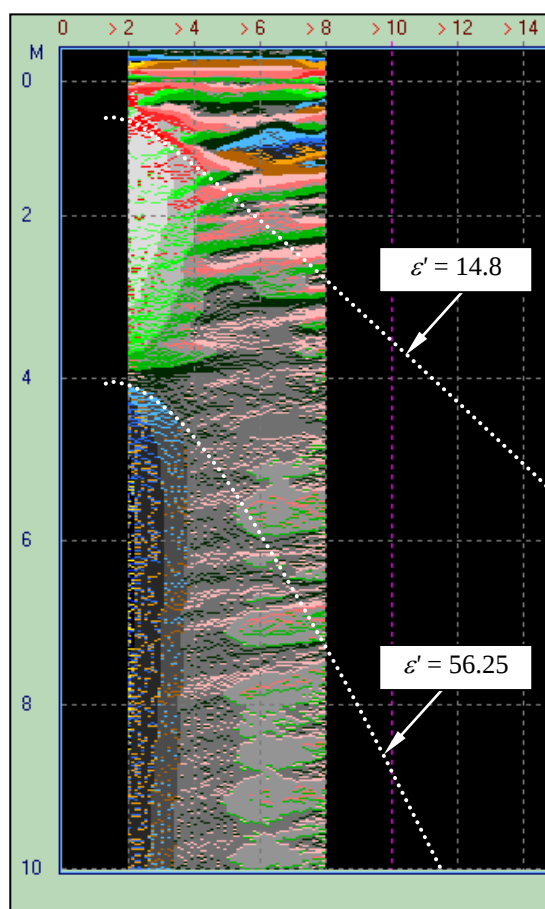


Рис. 3.35. Результат СМР-съёмки, проведённого над областью водонасыщенных пород

Отдельным признаком водонасыщенной области может являться изменение формы годографа, полученного с помощью методики СМР. На рис. 3.35 дан пример СМР-радарограммы, полученной над водонасыщенной линзой.

Здесь обработкой можно выделить два годографа – для границы на глубине 2 м и для границы на глубине 4 м (ось глубин корректна по отношению к четырёхметровой границе и искажена по отношению к двухметровой). Верхний годограф позволяет получить оценку $\varepsilon' = 14.8$, нижний $\varepsilon' = 56.25$. Оценка ε' верхнего годографа близка к типичной, полученной в окрестности разуплотнения по таким же годографам и гиперболическим осям синфазности (ГОС) от локальных объектов. Нижний годограф указывает на резкое увеличение ε' и падение скорости электромагнитных волн. Другими словами, нижний годограф даёт среднюю скорость за толщу, включающую обводнённые слои массива. Помимо этого признака признаками водонасыщенных областей на радарограммах являлись выраженные волновые аномалии, указывающие на обводнённость пород, их геометрическая компактность.

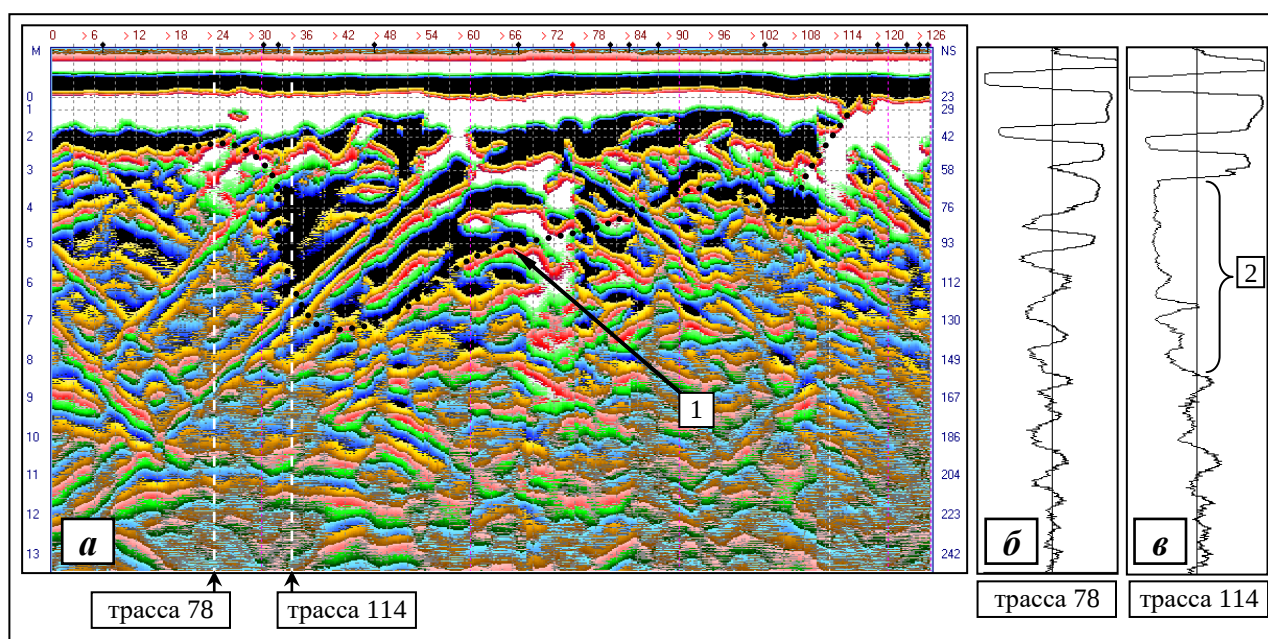


Рис. 3.36. Пример выявленного палеорусл: *а* – радарограмма ($\varepsilon' = 8$); *б* – трасса полученная вне палеорусл; *в* – трасса полученная над палеорусл; 1 – граница, интерпретированная как погребённый речной врез; 2 – участок трассы, испытывающий влияние низкочастотной компоненты

2. Погребённые русла рек (палеорусла). С этими объектами связан целый ряд проблем: резкие изменения прочностных свойств грунтов, подтопления, возможные подвижки грунтов. Сами по себе русла сохраняют функцию путей фильтрации грунтовых вод и их дренажа из окружающего массива. В некоторых случаях вблизи от палеорусел можно с помощью геофизических методов наблюдать депрессивные воронки [277]. Подобные области важно выявить до процедур строительства тоннеля, либо ремонта коллектора. Поскольку палеорусло протяжённый объект, его желательно выявлять площадной съёмкой, либо с помощью профилей, оконтуривающих площадку обследования.

На рис. 3.36 *а* дан пример выявленного палеорусла. Оно достаточно хорошо просматривается, не смотря на наложившуюся на радиообраз "воздушную" помеху. На рис. 3.36 *б* и *в* даны трассы, взятые вне влияния палеорусла и над ним. Можно заметить, что здесь также присутствует изменение формы трассы под влиянием водонасыщенности пород: на участке, обозначенном цифрой 2 проявляется низкочастотная компонента, с выраженным отрицательным полупериодом (низко-частотный "хвост"). Признаками палеорусел являются: их геометрическая протяжённость, форма осей синфазности, форма годографов и волновые аномалии, указывающие на обводнённость массива пород.

Далее рассмотрены примеры геологических особенностей массивов, которые возникли по причине уже случившейся аварии. К ним относятся полости вблизи коллекторов и массивы дренированных пород.

3. Полости вблизи коллекторов. Полости могут образовываться и как результат выпуска воды в коллектор и как результат его разрушения (результат сдвигения пород). Приведённые на рис. 3.37 примеры касаются второго случая – это два подтверждённых участка разрушения коллектора с образованием полостей выше него. Непосредственно сами радиообразы полостей указаны цифрой 1. Они выглядят как выраженные куполообразные структуры. В обоих случаях под куполами просматривается "звонящий" сигнал.

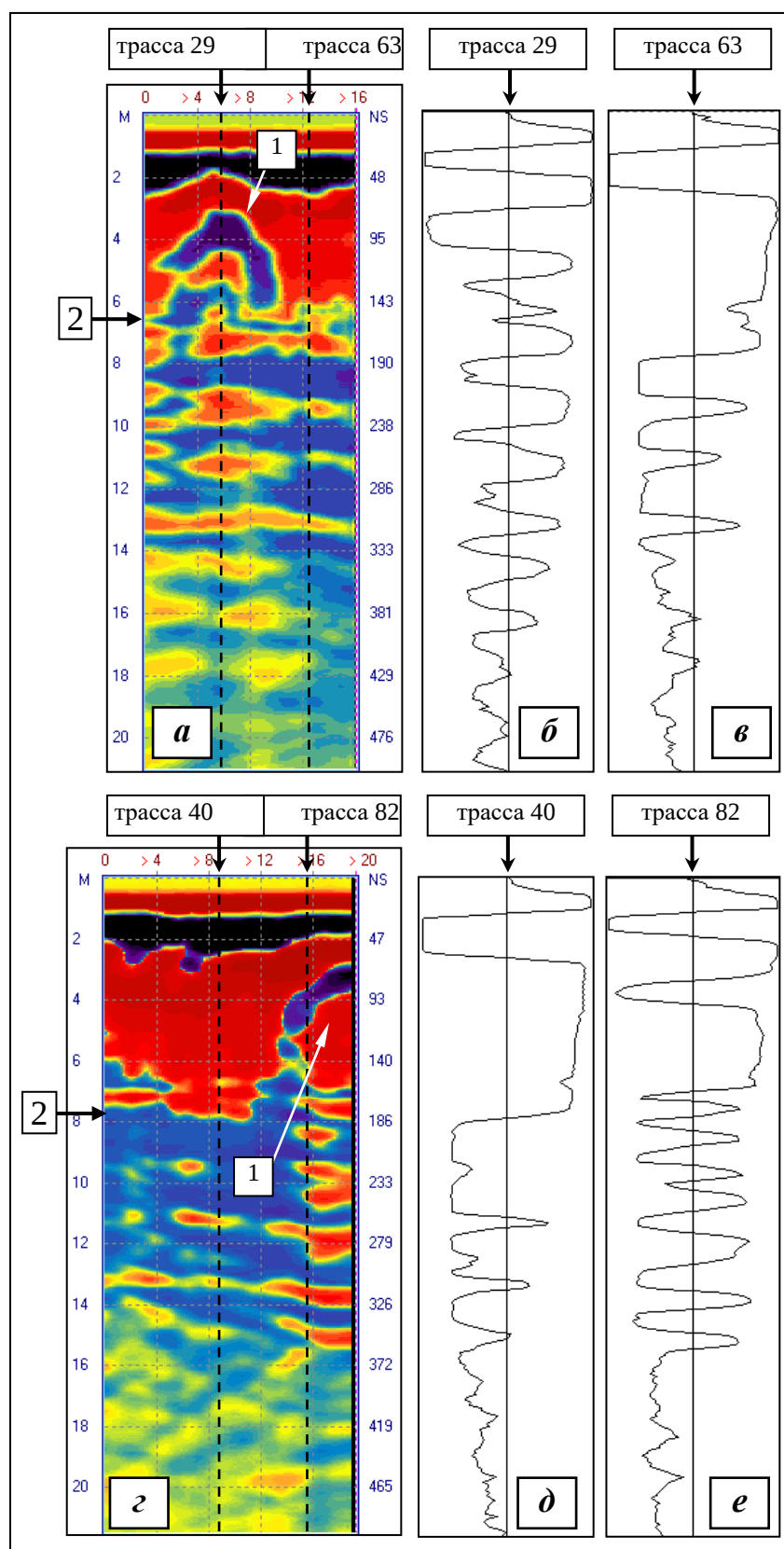


Рис. 3.37. Пример выявления техногенных полостей вблизи от аварийного коллектора: *а, г* – радарограммы ($\epsilon' = 12.8$); *б, е* – трассы, полученные над полостью; *в, д* – трассы, полученные вне полости; 1 – радиообраз полости; 2 – 2-й УГВ

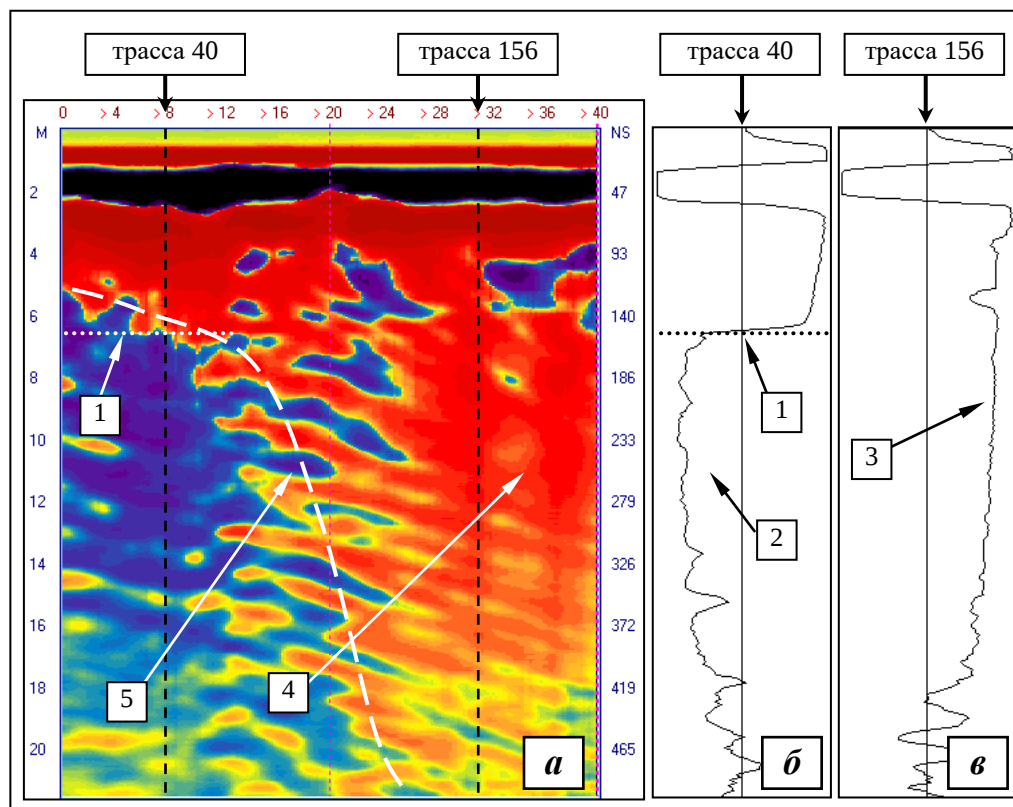


Рис. 3.38. Пример выявления зоны дренированных пород вблизи от аварийного коллектора: *а* – радарограмма ($\varepsilon' = 12$); *б* – трасса, полученная вне зоны дренированных пород; *в* – трасса, полученная над зоной дренированных пород; 1 – УГВ; 2 – отрицательная амплитудная аномалия; 3 – положительная амплитудная аномалия; 4 – зона дренированных пород; 5 – граница зоны дренированных пород

Форма верхней границы "купола" соответствует ГОС с ε' типичной для этого массива пород (оценена по СМР-измерениям на небольшом удалении от профиля). Однако, возможно, всё-таки купол образует сама подземная структура. Поскольку найденные на этой площадке несколько ГОС от подземных объектов проявлены значительно слабее приведённых примеров. При этом граница "купола" не соответствует ГОС "воздушной" помехи, также вблизи от профиля не было источников "воздушных" помех.

Для каждой радарограммы дана пара трасс (при съёмке над полостью и в стороне от нее). При анализе трасс можно заметить, что на трассах рис. 3.37 *б* и *в* (трассы сняты над полостью) после первого вступления отра-

жённой от полости волны не наблюдается отрицательных низкочастотных амплитудных аномалий. Это позволяет предположить, что полость не заполнена водой (полость находится ниже водоупора). Низкочастотные амплитудные аномалии можно увидеть на трассах рис. 3.37 *в* и *д*, однако на радарограмме они находятся значительно ниже радиообразов полостей. Эти волновые аномалии вызываются вторым УГВ, проходящим ниже водоупора.

4. Зоны дренированных пород. При выпуске большого количества воды в коллектор изменяется гидрогеология прилегающего массива (массив осушается, дренируется). Связанные с этим особенности георадиолокационных сигналов могут быть индикаторами, указывающими на аварию. Также могут наблюдаться депрессионные воронки в УГВ.

Примером выявленной зоны дренированных пород является радарограмма рис. 3.38. Левая часть радарограммы – обычный массив с УГВ, указанным цифрой 1. На трассе 40, снятой в этой части массива можно заметить описанную выше отрицательную амплитудную аномалию с низкочастотным "хвостом" (цифра 2), которая начинается ниже УГВ (цифра 1). Правая часть радарограммы (цифра 4) содержит обратную ситуацию – положительную аномалию (цифра 3). Часто подобная аномалия указывает на дренированные породы. Формы сигналов приводят к тому что на приведённой на рис. 3.38 радарограмме левая её часть кодируется синим цветом, а правая (дренированная) – красным.

Ось синфазности, обозначенную цифрой 5 на рис. 3.38 не желательно читать как границу депрессионной воронки, поскольку в этом случае слишком сильно проявляется эффект низкочастотного хвоста – сигнал фактически описывает не границы в массиве, а свойства массива. В большей степени смыслу границы, созданной депрессионной воронкой в УГВ соответствует другой пример, представленный на рис. 3.39. Здесь изображены вертикальные сечения куба амплитуд, полученного в процессе площадной съёмки. Хорошо просматривается воронка (цифра 1) в УГВ (цифра 2), вызванная выпуском воды в аварий-

ный коллектор. Трассы ниже границы УГВ имеют отрицательные амплитудные аномалии, о которых говорилось ранее.

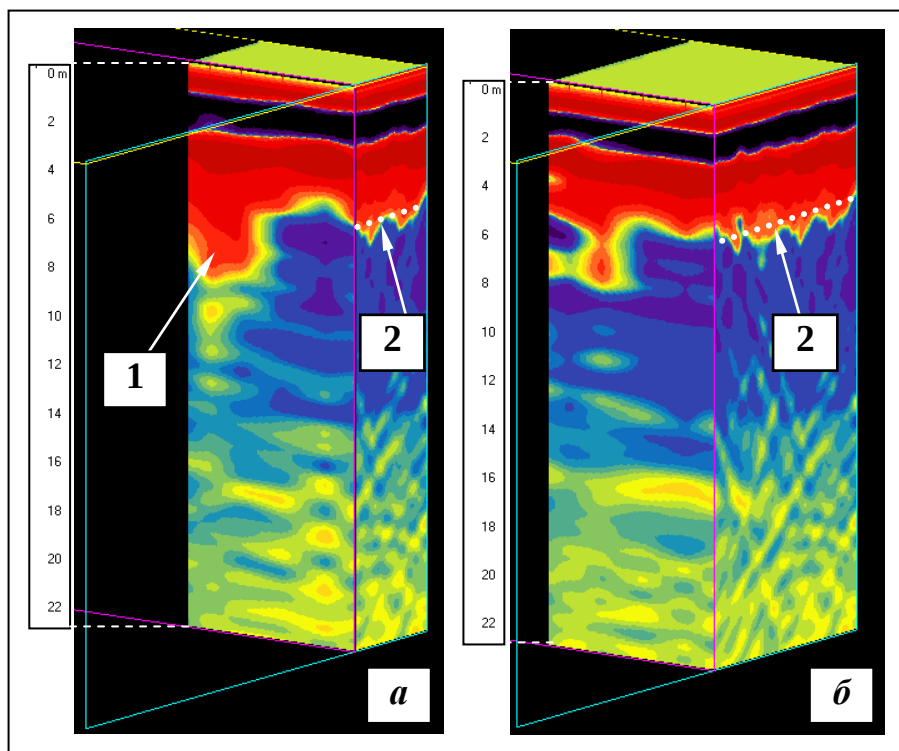


Рис. 3.39. Вертикальные сечения куба амплитуд указывающие на развитие депрессивной воронки в УГВ ($\varepsilon' = 13$): *а* – сечение через воронку, *б* – сечение за пределами воронки; 1 – воронка; 2 – УГВ

На дренированность массива пород также могут указывать изменения формы годографов, снятых с помощью СМР. При проведении работ, позволивших построить куб амплитуд рис. 3.39, был произведён и ряд СМР-измерений. Два годографа из этих съёмок представлено на рис. 3.40. Годограф рис. 40 *а* снят на расстоянии от воронки и имеет типичную форму, соответствующую средней диэлектрической проницаемости верхнего слоя пород $\varepsilon' = 12.76$. Это значение характерно для этой площадки обследования и подтверждено серией других СМР-съёмок и ГОС от локальных объектов. Годограф рис. 3.40 *б* снят *над* воронкой (цифра 1 рис. 3.39). Его среднее значение $\varepsilon' = 6.69$, что является заниженным, аномальным значением, вместе с воронкой указывающим на аварийное место.

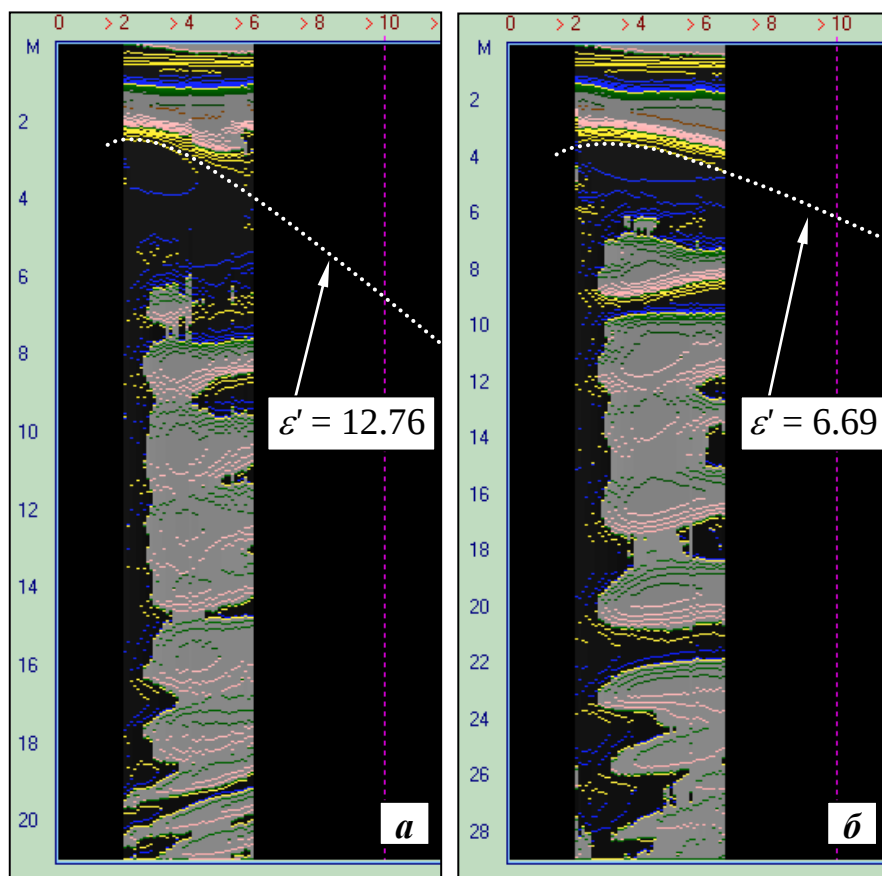


Рис. 3.40. Изменение формы годографа при съёмке над дренированными породами: *а* – годограф, снятый над обычными массивами, *б* – годограф, снятый над дренированным массивом

5. Оценка карство-суффозионной безопасности. Отдельный полевой материал был собран при обследованиях закарстованных участков. В качестве примера нарушенного массива на рис. 3.41 даны радарограммы двух перпендикулярных профилей (*а* и *б*) из серии профилей полученных площадной съёмкой («Лоза 1Н», 25 МГц). С помощью георадара удалось отбить подошву насыпных грунтов и песков (4 - 10 м) и кровлю известняковых толщ (22 - 28 м). Ось синфазности кровли известняков, испытывая перепады по глубине, тем не менее, образуют одну линию, просматривающуюся и при достаточно слабых значениях горизонтальной фильтрации. Форма границ достаточно точно соответствует геологическому разрезу (включая поднятие границы насыпных грунтов на участке 12-26 м профиля рис. 3.41 *а* и на участке 24-30 м профиля рис. 3.41 *б*).

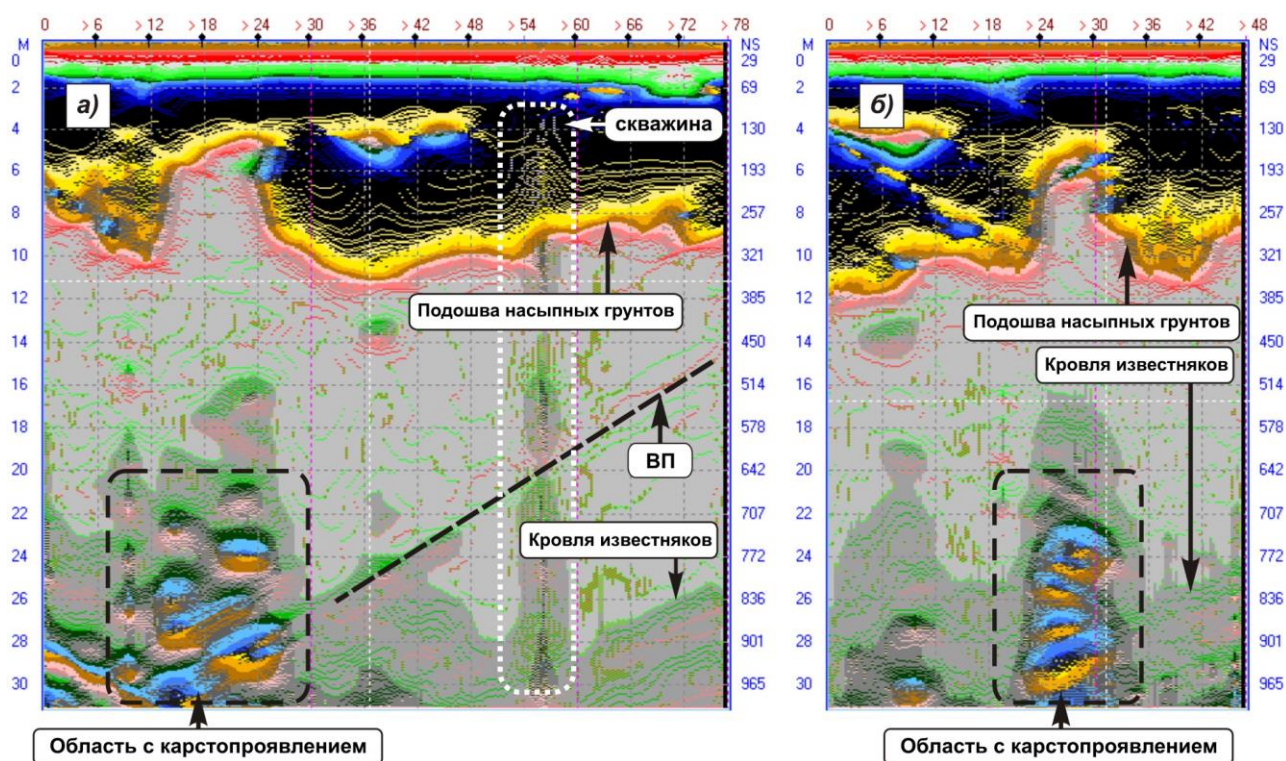


Рис. 3.41. Пример массива пород с выявленным карстовым процессом: *а* и *б* – перпендикулярные профили; ВП – «воздушные помехи». Георадар «Лоза-1Н» 25 МГц. Левая ось - глубина, м; правая - время, нс.

В толще известняков просматривается область высокоамплитудных «звонящих» записей, которая интерпретирована как область карстопроявления. При этом область повторяется на перпендикулярном профиле (рис. 3.41 *б*), приурочена к известняковой толще. Исходя из анализа площадки, эти сигналы не могли быть получены за счёт «воздушных» помех (нет отражающих объектов на ожидаемом расстоянии) или влияния поверхности на результаты съёмки (в этом случае «звон» не был бы локализован на глубине). При обработке не применялась коррекция затухания, поэтому здесь трудно предположить, что это шум, подчеркнутый усилением. Неровность рельефа вышележащих пород, просматриваемая при анализе всех снятых профилей, так же позволяет выдвинуть предположение о наличии здесь карста.

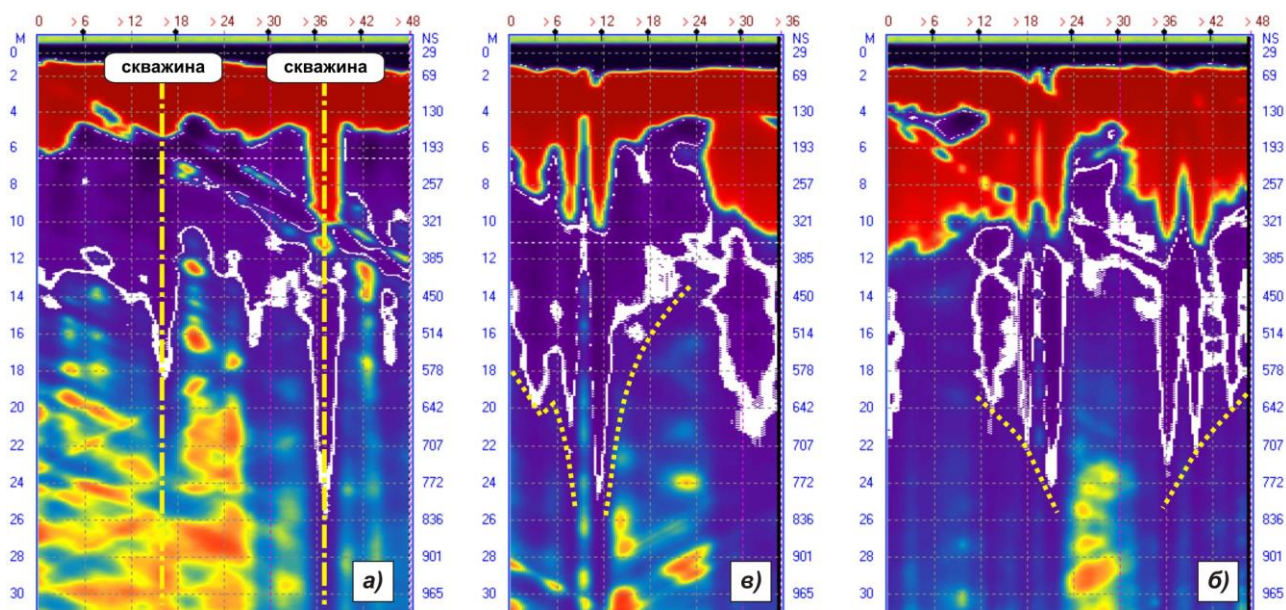


Рис. 3.42. Влияние скважин и закарстованной области на распределение воды в массиве: *а* – влияние скважин, *б* и *в* – влияние карстовой воронки. Георадар «Лоза-1Н» 25 МГц. Левая ось – глубина, м; правая – время, нс

В тех местах, где профиль проходил по скважине, можно было при определённой обработке заметить конусообразные структуры на радарограммах (см. рис. 3.42 *а* – в этой обработке определённый диапазон уровней амплитуд закрашивается конкретным контрастным цветом – в данном случае белым). Привязка скважин на рис. 3.42 *а* отмечена штрихпунктирными линиями. Эти конусообразные структуры так же образуют непрерывные оси синфазности (на этот раз субвертикального характера), достигающие глубин 25 м.

Описываемые структуры были интерпретированы как границы депрессивных воронок. Подразумевается, что распределение влаги в массиве создаёт отражающие границы. Здесь рис. 3.42 *а* дан, чтобы показать воронки в отдалении от карстопроявления (т.е. как образовавшиеся только за счёт скважин) – они просматриваются в результатах достаточно часто (на участке много точек, где в разное время были пробурены геолого-разведочные скважины). А рис. 3.42 *б* и *в*, представляют собой радарограммы, снятые вблизи карстопроявления и являются просто другой обработкой радарограмм рис. 3.41 *а* и *б* (радарограмма рис. 3.41 *б* обрезана). Видно, что здесь «воронки» становятся более широкими и явно выраженными – видимо, переток вод здесь связан с нарушением массива и процессами суффозии.

На описываемой площадке также были проведены сейсморазведочные исследований, которые также дали возможность предполагать в этой части обследуемой площади карстоопасную область.

3.6.2. Использование информационной энтропии в качестве идентификатора при выявлении строения массива горных пород с помощью низкочастотных георадаров

Эта глава посвящена вопросам использования в качестве признака информационной энтропии, вычисляемой по распределениям амплитуд георадиолокационных трасс. Работа велась на материале предыдущей главы, снятом с помощью георадара «Лоза-1Н» 50МГц.

Энтропия нередко используется в самых разных аспектах применения методов геоконтроля: в качестве оценок информативности и необходимости мониторинга [155, 278], в качестве критерия, позволяющего принимать решение о минимальном количестве параметров контроля при прогнозировании устойчивости горных выработок [279], в качестве метода обработки волнового поля [280]. Однако для поиска водонасыщенных линз вблизи выработок этот параметр используется впервые.

При ряде изысканий было замечено, что информационная энтропия H на участках профиля, где присутствуют приповерхностные водонасыщенные линзы, испытывает заметные и стабильные изменения (появляется выраженная низкочастотная компонента в сигнале), что позволяет использовать H как идентифицирующий признак.

Понятие информационной энтропии впервые введено в теории информации, где она характеризует неопределённость реализации какого-либо состояния системы. Энтропия определяется вероятностями всех дискретных состояний системы следующим образом:

$$H = - \sum_{i=1}^N P_i \log_g P_i,$$

где P_i – вероятности реализации i -го из N состояний системы, g – основание логарифма, определяющее единицы измерения энтропии, при $g = 2$ единицами измерения являются биты.

Энтропия H также используется как характеристика распределения случайной величины. В этом случае энтропия, описывающая неопределённость поведения случайной величины H_R , определяется через значения ряда значений вероятностей случайной величины $P_i = f_i \cdot \Delta x$, взятые в m дискретных интервалах шириной Δx (так называемых разрядах) следующим образом [281]:

$$H_R = - \sum_{i=1}^m f_i \Delta x \log_g f_i - \sum_{i=1}^m f_i \Delta x \log_g \Delta x \quad (3.8)$$

где f_i – дискретные отсчёты плотности вероятности, взятые в каждом разряде. В таком виде значения $f_i \cdot \Delta x$ по своему смыслу соответствуют вероятностям P_i , описывающим попадание очередной реализации случайной величины в отрезок в интервале $x_i + \Delta x$.

Само понятие неопределённости, оценкой которого является H_R , можно проиллюстрировать с помощью следующей модели. В среде MathCAD была задана функция распределения в виде пяти дискретных значений f_i , которые вводились в программу как количество реализаций k_i случайной величины в рамках i -го разряда случайной величины x . Далее была задана группа распределений, основным отличием которых друг от друга являлось количество реализаций в пределах третьего разряда. Это количество попаданий в третий разряд k_3 изменялось от 1 до 20 с шагом 1. На рис. 3.43 представлены распределения со значениями $k_3 = 1$ (цифра 1), $k_3 = 4$ (цифра 2), $k_3 = 20$ (цифра 3). По всем распределениям рассчитана величина H_R (при $g = 2$), значения которой отстроены в виде графика $H_R(k_3)$, представленного на рис. 3.44.

Анализируя распределения можно заметить следующее. Распределение, отмеченное на рис. 3.43 цифрой 1 стоит оценить, как распределение с относительно низкой по сравнению с другими примерами неопределённостью. В этом случае о поведении случайной величины x можно сказать, что при следующей реализации она скорее всего не попадёт в третий разряд. Подобную оценку

можно дать и графику, отмеченному на рис. 3.43 цифрой 3 с тем отличием, что здесь, наоборот, стоит ожидать более высокой вероятности попадания x в третий разряд. Относительно высокая определённости поведения случайной величины должна приводить к низкой энтропии распределения. Это и наблюдается на рис. 3.44 в точках обозначенных цифрами 1 и 3.

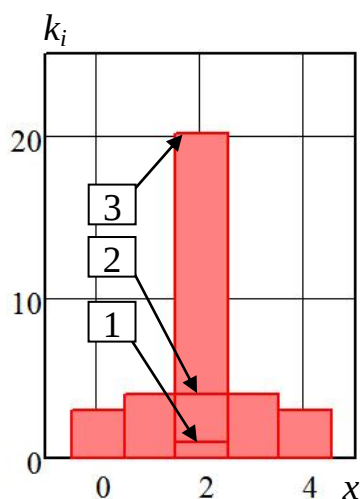


Рис. 3.43. Модель распределения с изменяющимся значением n_3 :
 $1 - n_3 = 1$; $2 - n_3 = 4$; $3 - n_3 = 20$

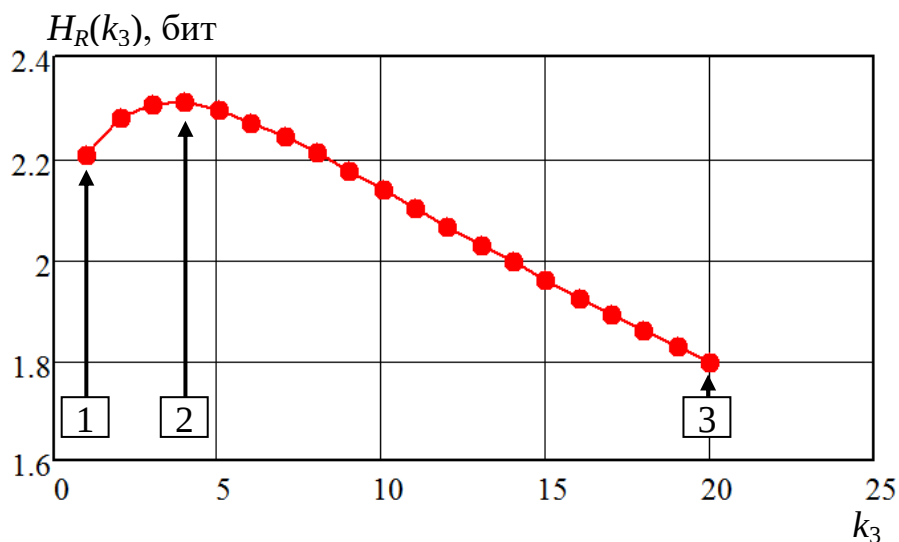


Рис. 3.44. График значений энтропии для ряда распределений: цифры 1-3 соответствуют цифрам 1-3 рис. 3.43

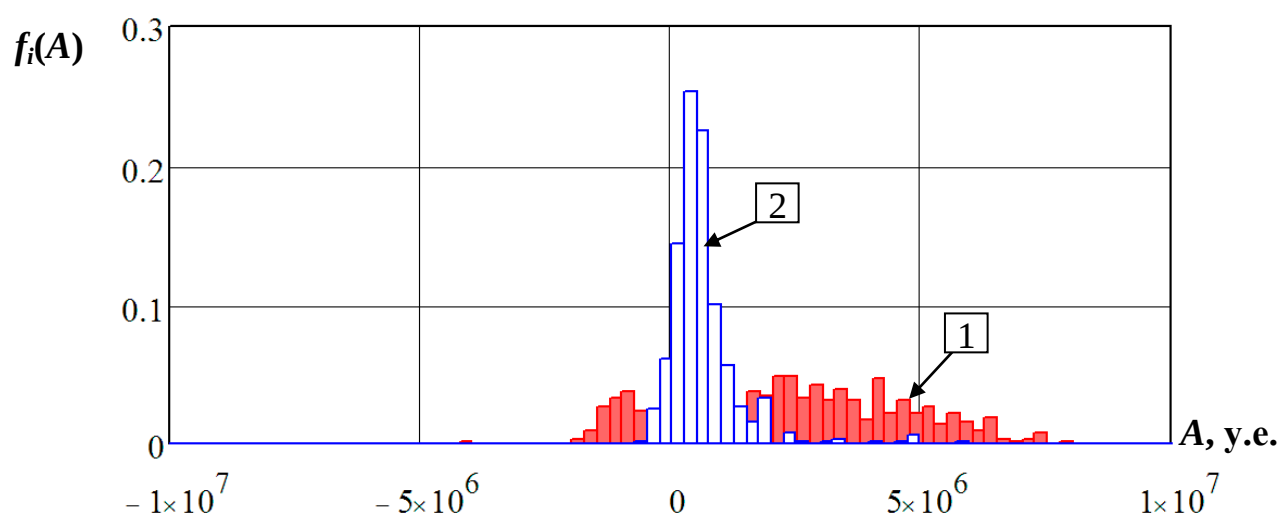


Рис. 3.45. Примеры распределений выровненных значений (амплитуд) георадиолокационных трасс: 1 – трасса получена над водонасыщенной линзой, 2 – трасса получена вне влияния водонасыщенной линзы

Про распределение, отмеченное на рис. 3.43 цифрой 2 можно сказать, что здесь случайная величина ведёт себя более неопределённо. Значения f_3 , f_4 , f_5 равны друг другу (количество попаданий в третий разряд сравнивалось с количеством попаданий во второй и четвёртый), и труднее определить, в какой из них попадёт случайная величина при её очередной реализации. Неопределённость поведения случайной величины возросла, что показывает график $H_R(f_i)$ рисунка 3.44, на котором точка, соответствующая описываемому распределению, указана цифрой 2.

Описываемую характеристику H_R можно получить и для распределений значений (амплитуд) A георадиолокационной трассы. На рис. 3.45 представлены два примера таких распределений (георадар "Лоза-1Н", амплитуды выровнены). Распределение, отмеченное на рис. 3.45. цифрой 1 получено при анализе трассы, снятой над водонасыщенной линзой. Распределение, отмеченное на рис. 3.45 цифрой 2 – при анализе трассы вне влияния линзы. Видно, что в случае наличия водонасыщенной линзы распределение расширяется и начинает стремиться к равномерному, что повышает неопределённость поведения случайной величины и увеличивает значение H_R .

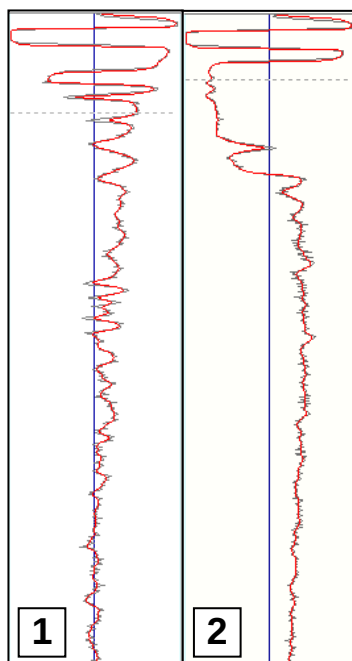


Рис. 3.46. Примеры георадиолокационных трасс: 1 – трасса получена вне водонасыщенной линзы; 2 – трасса получена над водонасыщенной линзой

Объяснить вариации формы распределений можно при помощи примеров трасс, приведённых на рис. 3.46. Если волновая форма, полученная вне водонасыщенной линзы, имеет амплитудные значения, находящиеся вблизи нуля (трасса 1), то сигнал, прошедший через водонасыщенные породы, испытывает смещения (трасса 2), в нём появляется низкочастотный "хвост", делающий распределение амплитуд более растянутым. Причиной этого явления часто называют прохождение сигнала через среду с высокой проводимостью [282, 160, 283].

Приведённый на рис. 3.45 пример является одним из наиболее ярких. В типичном же наборе распределений амплитуд различия между распределениями аномальных и обычных трасс менее заметны визуально, и распределения не так сильно различаются по ширине. Однако, большие значения H_R , взятые вдоль профиля в виде функции $H_R(l)$, где l – привязка точки на профиле, ста-

бильно указывают на те участки массива, под которыми находятся водонасыщенные линзы.

Для хорошей выделяемости аномальных мест потребовалось учесть ряд специфических особенностей. Во-первых, для вычисления H_R потребовалось использование выражения, отличного от (1). Элемент $\log_g \Delta x$ ($\sum_{i=1}^m f_i \Delta x \approx 1$ при малом Δx) зависит от ширины интервала случайной величины $x_i + \Delta x$ и за счёт вариаций диапазона значений, в котором существует случайная величина (т.е. значения амплитуд георадиолокационной трассы), может варьироваться сам и создавать зашумляющее воздействие на график $H_R(l)$. От трассе к трассе размах амплитуд меняется, поэтому элемент $\log_g \Delta x$ опускался – подобным образом вычисляемую энтропию называют приведённой [281].

Далее функция изменения приведенной энтропии вдоль профиля будет обозначаться как $H_A(l)$.

Во-вторых, при отсутствии выравнивания слишком большие амплитуды прямой волны искажали форму распределений, и идентифицирующий эффект $H_A(l)$ становится либо слабо выраженным, либо отсутствующим. В процессе разработки методики было опробовано несколько выравнивающих функций: прямая, экспоненциальная, сигмоидальная. Функция выравнивания $S(n)$ применялась следующим образом:

$$A_E(n) = A(n) \cdot S(n), \quad (3.9)$$

где $A_E(n)$ – выровненная трасса, $A(n)$ – исходная трасса, n – номер отсчёта сигнала. Воздействие выравнивания на результат определялось по контрастности Z функции $H_A(l)$ следующим образом:

$$Z = \frac{\max(H_A(l))}{\overline{H_A(l)}}, \quad (3.10)$$

где $\max(H_A(l))$ – максимальное значение $H_A(l)$ на профиле, $\overline{H_A(l)}$ – среднее значение $H_A(l)$ на профиле. По результатам опробований различных функций выравнивания с различными коэффициентами стало ясно, что наиболее контраст-

ные функции $H_A(l)$ даёт сигмоидальное выравнивание. Форма сигмоидальной функции описывается следующим выражением:

$$S_1(n) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha \cdot n + \beta}}, \quad (3.11)$$

где $S_1(n)$ – амплитудное значение сигмоида в отсчёте n ; α и β – коэффициенты сигмоида. Для подбора оптимальных коэффициентов использовалась функция контрастности $Z(\alpha, \beta)$, пример которой представлен на рис. 3.47. Подбирать по подобным функциям значения α и β можно либо по максимуму, оцениваемому в результате перебора всех значений α и β в некоторых пределах, либо, используя методы, аналогичные методу градиентного спуска.

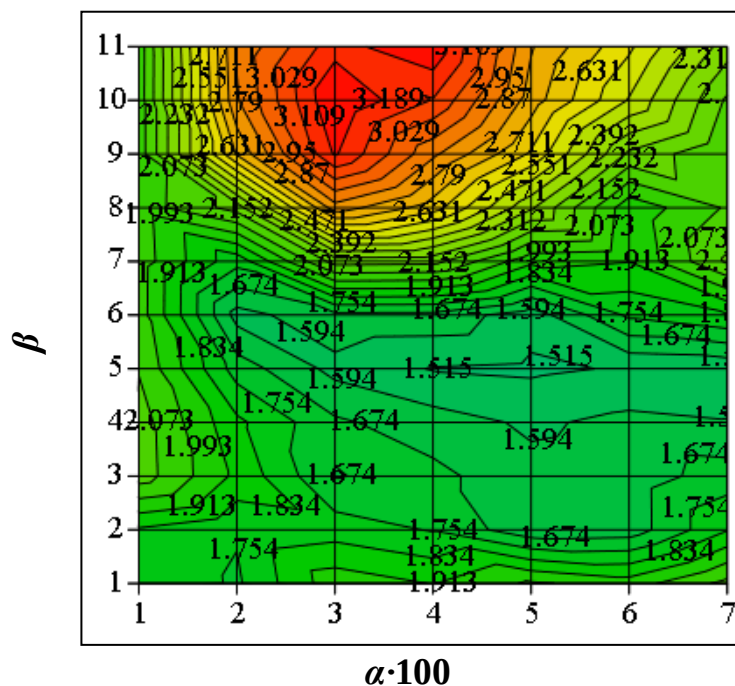


Рис. 3.47. Функция контрастности $Z(\alpha, \beta)$

Примеры результатов оптимального выравнивания представлены на рис. 3.48. Трасса 1 на рис. 3.48 получена в точке вне аномалии (вне влияния водонасыщенной линзы). Трасса 2 на рис. 3.48 цифра 2 получена в точке профиля, под которым находится водонасыщенная линза. На трассы также нанесены выравнивающие сигмоиды 3. Видно, что при том, что в обоих случаях распределение амплитуд при выравнивании должно расширяться, сигнал, полученный

над линзой и испытывавший волновые искажения, расширяется в большей степени, что и приводит к увеличению энтропии случайных величин.

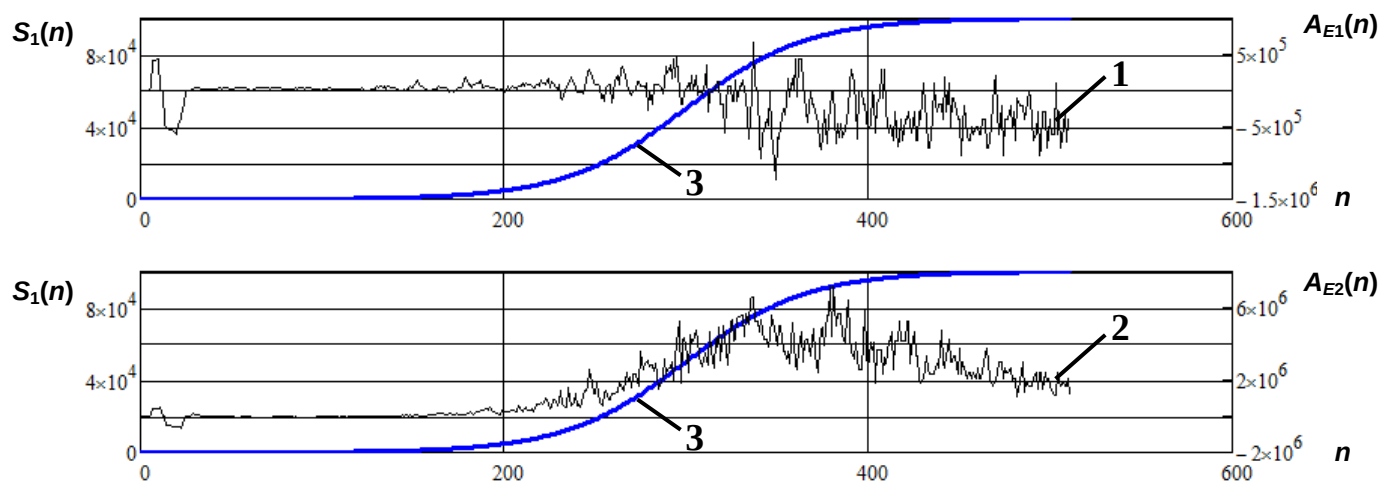


Рис. 3.48. Трассы, выровненные идентичной сигмоидальной функцией: 1 – трасса $A_{E1}(n)$, полученная вне влияния водонасыщенной линзы, 2 – трасса $A_{E2}(n)$, полученная над водонасыщенной линзой, 3 – выравнивающий сигмоид

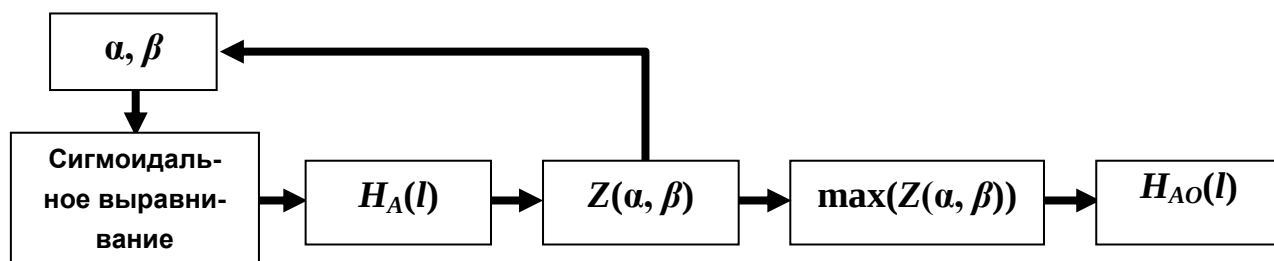


Рис. 3.49. Граф обработки данных с получением оптимальной функции изменения энтропии вдоль по профилю $H_{AO}(l)$

В конечном счёте граф обработки выглядит следующим образом (см. рис. 3.49): задаются значения α и β ; производится выравнивание амплитуд сигмоидами с коэффициентами α и β ; отстраивается график изменения приведённой энтропии трасс вдоль по профилю $H_A(l)$; вычисляется параметр, оценивающий контрастность в зависимости от коэффициентов $Z(\alpha, \beta)$; после множественного опробования значений α, β получается функция $Z(\alpha, \beta)$; соответству-

ющие максимуму функции $Z(\alpha, \beta)$ коэффициенты α, β используются для вычисления оптимальной функции $H_{AO}(l)$. Полученная функция $H_{AO}(l)$ позволяет принимать решение о структурных особенностях массива пород (наличие либо отсутствие линз) по порогу.

Результаты полевых наблюдений. Описанная выше методика применялась в ряде случаев при выявлении водонасыщенных линз вблизи объектов подземного строительства. Результаты этих исследований представлены на рис. 3.50. Наличие линз либо заверено по нарушениям (в частности известны аварийные участки коллекторов), либо по анализу годографов. На рис. 3.50 приведена радарограмма и результат её обработки в виде функции $H_{AO}(l)$. Трассы, которые испытали влияние водонасыщенных линз, выделены пунктирными прямоугольниками (цифра 3). Для приведённого случая контрастность составила $Z = 3.36$. Для других профилей контрастность доходила до уровня $Z = 6.59$.

С точки зрения теории информации эффективность энтропии, взятой в качестве идентификатора, можно объяснить следующим образом. В месте усложнённого строения массива пород неопределённость поведения некоторых измеряемых параметров возрастает. По сравнению с более простой структурой возникает большее количество вариантов строения, таких, как выраженность структур, глубина их расположения, варианты неоднородности распределения физических параметров, которые могут принимать широкий спектр значений. В этой ситуации процесс измерения снимает неопределённость. Для георадиолокации эта неопределённость связана с диэлектрической проницаемостью, в большой степени определяемой содержанием воды в породах. В тех местах, где структура массива проще, снимаемая измерением неопределённость ниже, чем в местах с более сложной структурой массива.

Анализ специальной литературы говорит о том, что результаты, получаемые на георадарах "Лоза-1Н" при обследовании бортов карьеров [284] и медно-золоторудных месторождений [282] содержат искажения амплитуд подобные тем, что приведены на трассе 2 рис. 3.46. Таким образом можно предположить,

что описываемая методика может использоваться не только на объектах подземного строительства, но и на горных предприятиях.

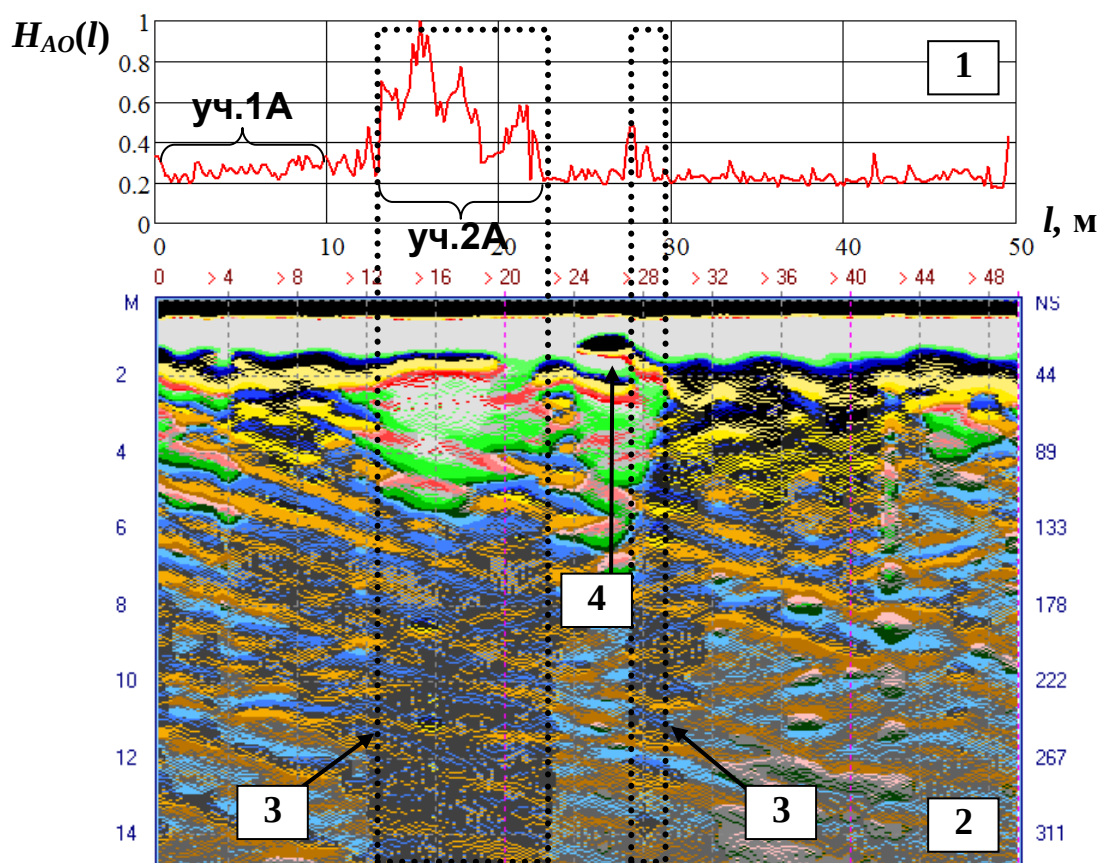


Рис. 3.50. Результат применения идентификатора: 1 – вычисленная по радарограмме функция $H_{AO}(l)$, 2 – исходная радарограмма, 3 – аномальные зоны, 4 – влияние подземной коммуникации

По результатам применения описанного выше подхода стоит показать, что он слабо чувствителен к помехам, а также, что выбранная характеристика хорошо выделяет искомые аномалии по сравнению с другими характеристиками.

Пример, представленный на рис. 3.11, демонстрирует специфичность работы идентификатора. Этот участок не содержит водонасыщенных линз, а полученная радарограмма существенно зашумлена помехами – "звоном", хаотической волновой картиной (3), "воздушными" помехами (4), присутствует существенное изменение волновой картины вдоль по профилю (левая часть радарограммы).

рограммы отличается от правой). Несмотря на это, функция $H_{AO}(l)$ не имеет выраженных максимумов, не реагирует на изменения вдоль по профилю. Т.е. пример иллюстрирует устойчивость идентификатора к помехам. Устойчивость иллюстрирует и рис. 3.50. Здесь на радарограмме просматривается радиообраз от подземной коммуникации (рис. 3.50 цифра 4), однако $H_{AO}(l)$ на него никак не реагирует.

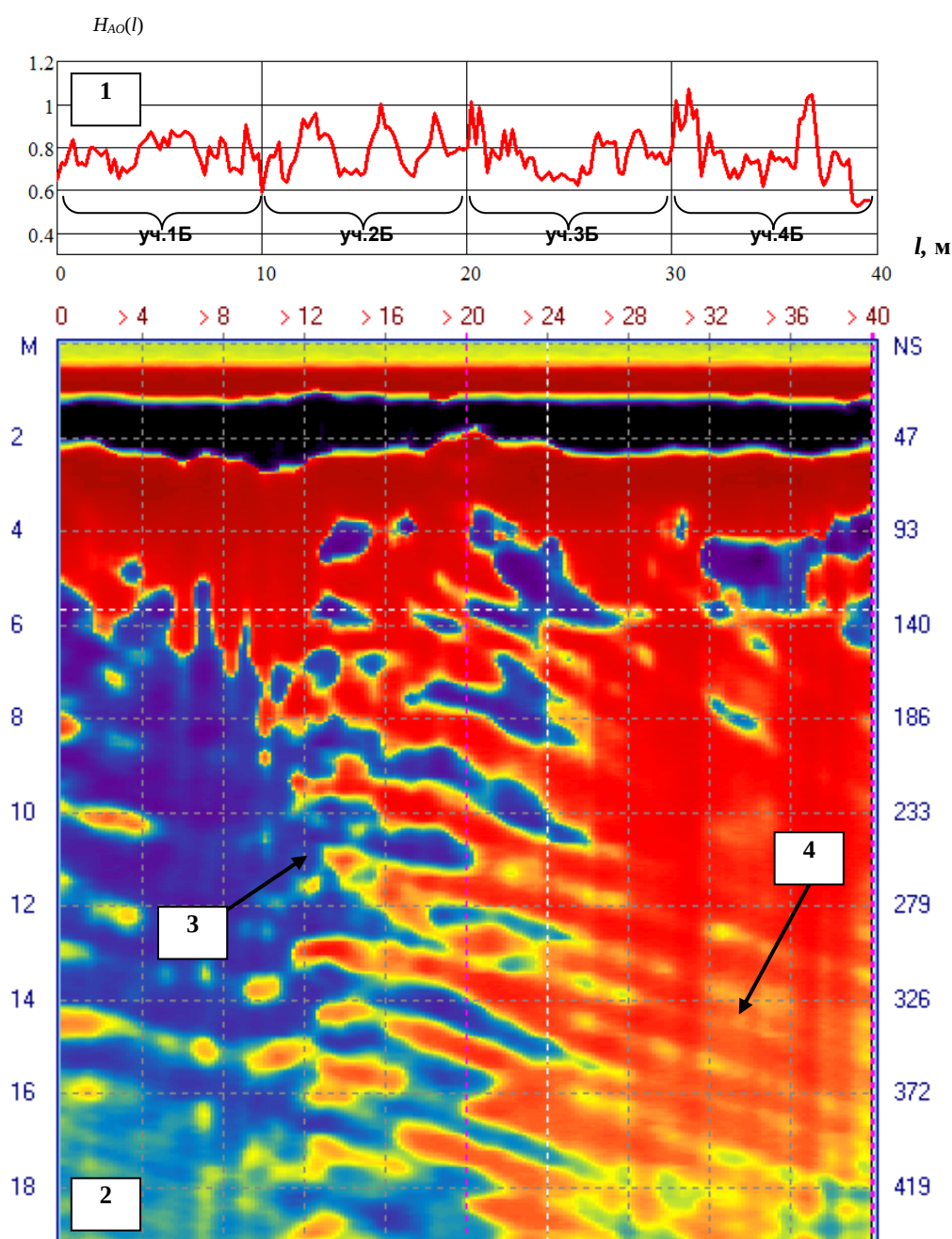


Рис. 3.51. Специфичность работы идентификатора: 1 – вычисленная по радарограмме функция $H_{AO}(l)$, 2 – исходная радарограмма, 3 – "звон" и хаотическая волновая картина, 4 – "воздушные" помехи

Тезис о специфичности метода можно проиллюстрировать с помощью проверки гипотезы о равенстве средних. Так, например, участки функции $H_{AO}(l)$ на рис. 3.50 в диапазоне 0 – 10 м (участок 1А) и 12 – 24 м (участок 2А) должны иметь разные средние, поскольку на участке 2А наблюдается аномалия. А ряд участков функции $H_{AO}(l)$ на рис. 3.51, такие как 0 – 10 м (участок 1Б), 10 – 20 м (участок 2Б), 20 – 30 м (участок 3Б), 30 – 40 м (участок 4Б), отличаться по средним не должны, поскольку здесь аномалия отсутствует. Фактически речь идёт о выборках случайных величин. Для проверки равенства их средних используют t -статистику [285]:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1) \cdot \sigma_1^2 + (n_2 - 1) \cdot \sigma_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}, \quad (3.12)$$

где $\bar{X}_1$ и $\bar{X}_2$ – средние выборок, n_1 и n_2 – объёмы выборок, σ_1 и σ_2 – дисперсии выборок. Получаемая таким образом t -статистика, имеет распределение Стьюдента со степенями свободы $d = n_1 + n_2 - 2$. Последнее имеет двухстороннее критическое значение t -статистики $t_{кр}$, определяемое уровнем значимости p . В случае если t оказывается за положительным либо отрицательным пределом $t_{кр}$ отвергается гипотеза о равенстве средних, в противном случае используют формулировку о недостаточности оснований для отвержения гипотезы [285].

Среди предъявляемых к случайным величинам требованиям о несвязанности выборок, нормальности распределений, однородности дисперсий, последнее может нарушаться. Особенно это заметно для указанных выше участков 1А и 2А. Для преодоления этой проблемы извлечение выборок производилось так, чтобы они имели одинаковый объём. В этом случае нарушение требования однородности дисперсии считается несущественным [286].

При $p = 0.05$, $n_1 = n_2 = 49$, $t_{кр} = \pm 1.985$. При этом для участков 1А и 2А величина t составляет $t = -10.56$, т.е. на участках с аномалией и без неё средние различаются. В то же время, если вычислять для всех пар указанных выше участков 1Б–4Б t -статистики, они оказываются внутри диапазона $t_{кр} = \pm 1.985$,

т.е. равенство средних не отвергается. Описываемые значения t сведены в таблицу.

Табл. 3. Сравнение средних по участкам, указанным на рис. 3.51 а

Номера участков	t
1Б-2Б	−0.67
1Б-3Б	+0.78
1Б-4Б	+0.55
2Б-3Б	+1.27
2Б-4Б	+0.98
3Б-4Б	−0.03

Помимо работы с энтропийными характеристиками случайной величины были также опробованы другие характеристики, такие, как моменты случайных величин и спектральные параметры.

На рис. 3.52 представлены функции изменения вдоль по профилю статистических моментов выровненных амплитуд георадиолокационных трасс вычисленных по данным радарограммы рис. 3.50. На рис. 3.52 цифрой 1 указан график изменения асимметрии $Sk(l)$ вдоль по профилю, цифрой 2 – коэффициент эксцесса $Kr(l)$. Для получения максимально контрастной функции амплитуды выравнивались в соответствии с графом обработки рис. 3.49. Анализируя результаты, можно заметить, что характер изменчивости $Sk(l)$ становится другим в аварийной зоне ($l = 12 - 23$ м), однако этот результат подавлен хаотичным поведением $Sk(l)$ слева и справа от неё. Характеристика $Kr(l)$ совсем не реагирует на аварийную зону.

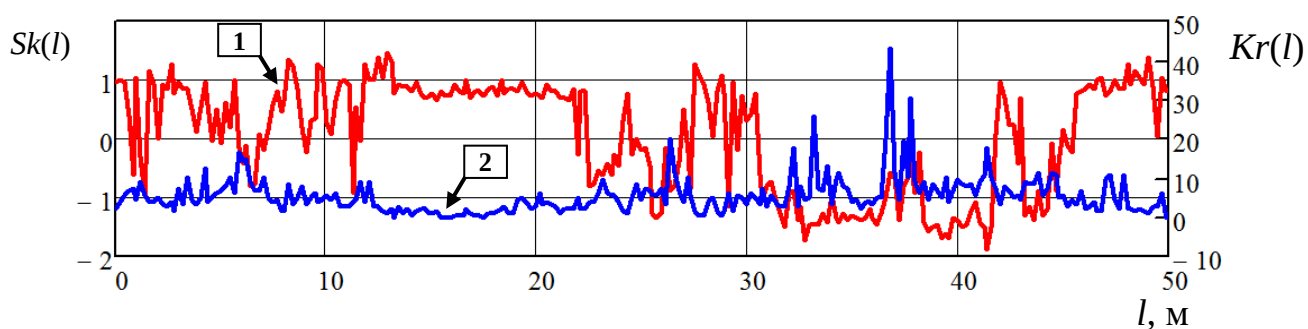


Рис. 3.52. Примеры использования признаков: 1 – коэффициент асимметрии $Sk(l)$; 2 – коэффициент эксцесса $Kr(l)$

Дисперсия $D(l)$ очень хорошо реагирует на аварийный участок. Характер поведения функции $D(l)$ относительно близок к поведению функции энтропии $H_{AO}(l)$, которая приведена на кривой 1 рис. 3.50. При этом контраст $Z=13.46$ по $D(l)$ существенно превосходит контраст по $H_{AO}(l)$. Однако для дисперсии как признака водонасыщенной области недостаток связан со её низкой специфичностью.

Это иллюстрирует рис. 3.53, на котором представлена радарограмма и функции $H_{AO}(l)$ и $D(l)$, полученные из неё (кривые 2 и 3 соответственно). Здесь между 4-м и 9-м метром профиля находится аварийная коммуникация, текущая труба. Аварийный участок профиля выделен цифрой 4. Оба признака, и $H_{AO}(l)$ и $D(l)$, реагируют на аварийный участок максимума, которые по пороговому правилу позволяют выделить в объёме съёмок аварийную область (цифра 5 на рис. 3.53). Однако в правой части, на неаварийном участке, $H_{AO}(l)$ не даёт никаких аномалий (цифра 6 на рис. 3.53), в то время как $D(l)$ указывает на ничем не подтверждённый аномальный участок (цифра 7 на рис. 3.53). Можно предположить, что это ложное срабатывание связано с воздушными помехами, которые наблюдаются внизу радарограммы. Слева от аварийной области можно наблюдать подобную же ситуацию – ложные срабатывания $D(l)$ и отсутствие срабатываний $H_{AO}(l)$.

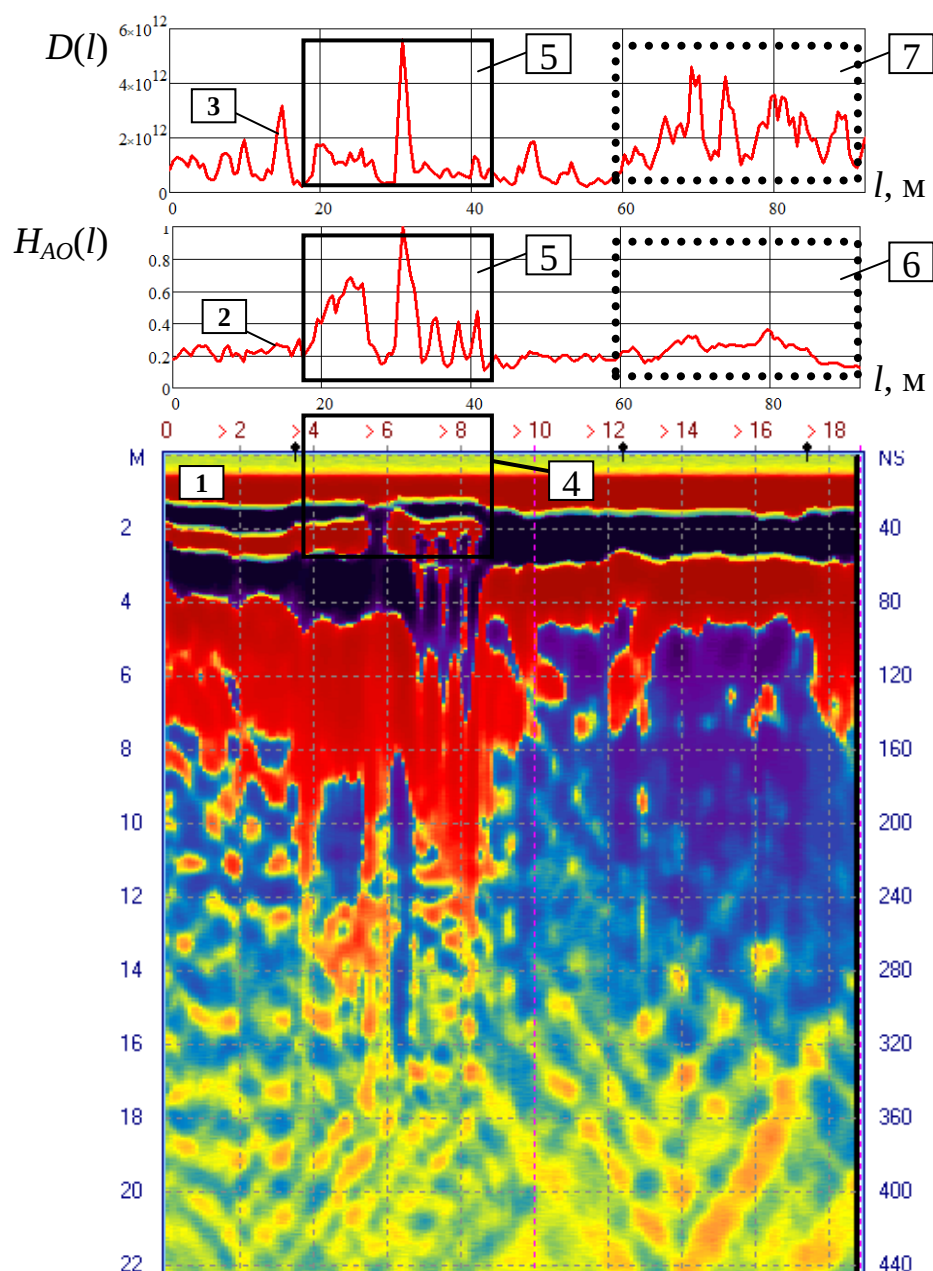


Рис. 3.53. Сравнение функций энтропии и дисперсии: 1 – исходная радарограмма; 2 – функция энтропии $H_{AO}(l)$; 3 – функция дисперсии $D(l)$; 4 – аварийная зона, 5 – область верного срабатывания, 6 – область корректного срабатывания $H_{AO}(l)$, 7 – область ложного срабатывания $D(l)$

Появление низкочастотной компоненты в сигнале (кривая 2 на рис. 3.46) способно влиять на амплитудный Фурье-спектр. Однако опробования спектральных характеристик показали, что изменения частоты спектрального пика слишком малы и нестабильны, тонут в вариациях значений, полученных на неаварийных участках профиля.

Работа с вейвлетными спектрами показала, что скалограммы на определённых масштабах в случае, если трасса снята над водонасыщенной линзой, испытывают изменения законов распределения получаемых вейлет-коэффициентов. Условием работы этого подхода по-прежнему является оптимальное выравнивание амплитуд исходной трассы, получаемое перебором коэффициентов выравнивающей функции. Недостатком работы со скалограммами можно назвать избыточно сложный граф обработки, требующий помимо функции выравнивания подбирать оптимальный масштаб вейвлета.

Обобщая результаты работы можно отметить, что в процессе исследований был подобран граф обработки, а также вычисляемый с его помощью признак, который позволяет выявлять водонасыщенные линзы в приповерхностной части массива пород при работе с данными, полученными на георадарах с резистивно-нагруженными антеннами. В качестве признака для каждой трассы выступает приведённая энтропия выровненных амплитуд.

При сравнении с другими характеристиками, такими как спектральные характеристики и статистические моменты выровненных амплитуд, показано, что потрассовая энтропия обладает большей способностью выявлять объекты, а также обладает избирательностью по отношению к помехам.

Описанная методика опробована на объектах подземного городского строительства, вблизи которых выполнялся поиск водонасыщенных линз, а также картировались зоны разлива вод, поступающих из подземных коммуникаций. Полученные результаты подтверждены согласованностью результатов выявления разуплотнений с геометрическим расположением аварийных участков. А также хорошо коррелируют с деформациями поверхности. Результаты этой главы позволили сформулировать третье научное положение.

Выводы по третьей главе

В основу третьей главы легли результаты множественных полевых георадиолокационных исследований, произведённых автором как при обследованиях

заобделочного пространства из тоннеля, так и с поверхности. В результате длительной работы на сотнях различных объектов были собраны данные, работа с которыми позволила:

- подобрать оптимальные графы обработки георадиолокационных данных при выявлении полостей по результатам съёмки железобетонных обделок из внутреннего пространства тоннелей метрополитенов;

- разработать графы обработки, позволяющей эффективно подавлять прямую волну и анализировать зашумлённые ей участки трассы;

- выявить информативный признак, который способен указывать на наличие разуплотнения в массиве пород при георадиолокационном обследовании породного массива вблизи тоннеля с поверхности, а также разработать граф обработки исходных данных, повышающий эффективность этого признака.

Материалы этой части исследования опубликованы в следующих статьях: [259, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 255].

Глава 4. Отбор и предварительная обработка информативных параметров при объединении их в комплексы

Одной из наиболее существенных проблем контроля заобделочного пространства является частое возникновение ситуации "ложное срабатывание" и "пропуск цели". Перспективным подходом при решении проблемы ошибочного принятия решения является использование информативных параметров (так же называемых признаками), вычисляемых при обработке сигналов зарегистрированных по результатам съёмок различными методами. После вычисления подобные информативные параметры могут составлять комплексы, эффективность которых при принятии решения о наличии либо отсутствии полости может быть значительно выше, чем эффективность принятия решения по одному параметру, или одному методу.

Формирование эффективного комплекса в этом случае зависит от ряда предварительных стадий: предварительной обработки данных (до вычисления значений признака); последующей обработки данных (после вычисления). Также эффективный комплекс может отличаться способом отбора тех или иных признаков в комплекс, который может меняться от участка обследования к участку. Вопросам работы с информативными параметрами, их отбору и предварительной подготовке посвящена четвёртая глава.

Далее по тексту ситуация присутствия полости, в соответствии с общепринятой терминологией будут обозначаться как Positive (или «цель», т.е. «есть полость за обделкой»), а ситуации отсутствия полости как Negative («отсутствие цели», т.е. «нет полости за обделкой»). Соответственно ошибочно принятое решение о наличии полости будет обозначаться как: «пропуск цели», False Negative или сокращённо FN. А ошибочно принятое решение об отсутствии полости как «ложное срабатывание» – False Positive или FP. Верные решения будут обозначаться как: «верное выявление полости» – True Positive или TP, «ошибочное выявление полости» – False Positive или FP.

4.1. Общие принципы отбора информативных параметров

Стоит отметить, что на информативные параметры могут оказывать довольно существенное воздействие различные помеховые факторы. Например, опираясь на опыт съёмок можно сказать, что на результаты сейсмоакустического обследования влияют: геометрические параметры обделки, особенности самой полости (тип заполнителя); характер удара; поверхность, по которой наносится удар и к которой прижимается сейсμοприемник; моменты соскальзывания сейсμοприемника, не всегда легко контролируемые оператором и другие особенности. Для георадиолокации важными могут быть геометрические параметры обделки и её конструктивные особенности, возраст обделки, её нарушенность, условия её эксплуатации, наличие большого количества источников так называемых воздушных помех.

В большой степени эти помеховые факторы приводят к тому, что законы распределения признаков реализующиеся в случае наличия полости и в случае отсутствия полости перекрываются, что может приводить к ошибкам. Для различных информативных параметров влияние помеховых факторов может отличаться. Поэтому можно рассчитывать на то что многомерные законы распределения нескольких параметров будут пересекаться в меньшей степени что обеспечит более надёжное распознавание ситуации с наличием полости.

До того, как принимать решение о том стоит ли включать тот или иной параметр в комплекс, анализируя насколько хорошо они сочетаются, необходимо понять какие информативные параметры можно использовать, как их вычислять, как предварительно обрабатывать данные. Для решения этих вопросов желательно выбрать ряд характеристик, которые позволят на стадии до комплексирования отбирать наиболее оптимальные информационные параметры.

Для принятия таких решений желательно обладать определенным объемом данных, для которых факт наличия либо отсутствия полости известен. В этой работе такой объем данных был собран по ограниченному набору площадок обследования.

Здесь важным вопросом является выбор характеристик-критериев, по которым можно принимать решение об эффективности конкретного информативного параметра при конкретных особенностях его вычисления. В качестве таких критериев могут выступать следующие характеристики.

1. Интенсивность аномалии. Этот критерий описывает различие между средними значений признаков в области аномалии и в области фона. Простейшей оценкой этого критерия может быть:

$$\mu = \frac{\bar{A}_A - \bar{A}_\Phi}{\sigma_\Pi}, \quad (4.1)$$

где $\bar{A}_A$ – среднее значение признака в области аномалии, $\bar{A}_\Phi$ – среднее значение признака вне аномалии (фоновое), σ_Π – с.к.о. признака для всего объёма измерений [303]. При $\mu > 3$ аномалия считается достоверной, при $1 < \mu < 3$ аномалию считают слабой, при $\mu < 1$ признак не рекомендуется включать в комплекс.

С.к.о. признака σ_Π рассчитывается только для внеаномальных значений признака (критерий достоверности аномалии $\mu > 3$ фактически является применением «правила 3σ »).

2. Независимость признаков. Довольно часто возникает ситуация, когда некоторые из признаков оказываются созависимыми, что приводит к тому, что они однотипно реагируют на помеховые факторы. Оценкой этого критерия могут выступать значения модулей коэффициентов линейной корреляции $|R|$. Слишком низкие значения R указывают, на то, что признаки по-разному реагируют на аномалию. Контроль независимости признаков вёлся с помощью корреляционных матриц (попарная корреляция с отображением матрицы с помощью цветовой шкалы).

При этом стоит отметить, что R стоит использовать, как только ориентировочное значение. В пятой главе показано, что возможны случаи, когда за счёт корреляции между помехами корреляция между признаками при увеличении погрешностей измерения увеличивается.

3. Надёжность разделения. Одной из проблем принятия решения о наличии полости за обделкой является тот факт, что даже признак с высокой интенсивностью на отрезке профиля, соответствующего ситуации «полость за обдел-

кой», может в ряде случаев давать близкие к фоновым значения (реализуется ситуация так называемого «пропуска цели»). Также существуют ситуации, когда значение признака указывает на наличие полости в той части профиля, где полость отсутствует («ложное срабатывание»).

Оценка надёжности разделения опирается на вероятности верного или ошибочного распознавания ситуаций Positive и Negative, получаемые на эталонных участках:

P_{TP} – вероятность верно обнаружить полость (принято обозначать как True Positive Rate, или TPR), эта характеристика также носит название чувствительности метода распознавания;

P_{TN} – вероятность верно обнаружить отсутствие полости (True Negative Rate, или TNR), эта характеристика также носит название специфичности метода распознавания.

P_{FP} – вероятность ошибочно обнаружить полость (False Positive Rate, или FPR), так называемое «ложное срабатывание»;

P_{FN} – вероятность ошибочно пропустить полость (False Negative Rate, или FNR), так называемый «пропуск цели».

На рис. 4.1 приведена схема, иллюстрирующая эти понятия. Даны два распределения (для эталонов Positive и Negative), дано одно из пороговых значений признака A_{Π} , которое работает как классифицирующее правило: $A > A_{\Pi} \Rightarrow \text{Positive}$; $A < A_{\Pi} \Rightarrow \text{Negative}$. Указаны вероятности TPR, TNR, FPR, FNR.

Часто используют такие характеристики, как TPR и TNR. Основная проблема при работе с ними состоит в том, что они не дают совместной оценки поведения классификатора – не понятно, как выбирать предобработку информативного параметра в условиях, например, высокого TPR и одновременно очень низкого TNR (классификатор, использующий параметр, легко находит полости, но часто показывает их там, где их нет).

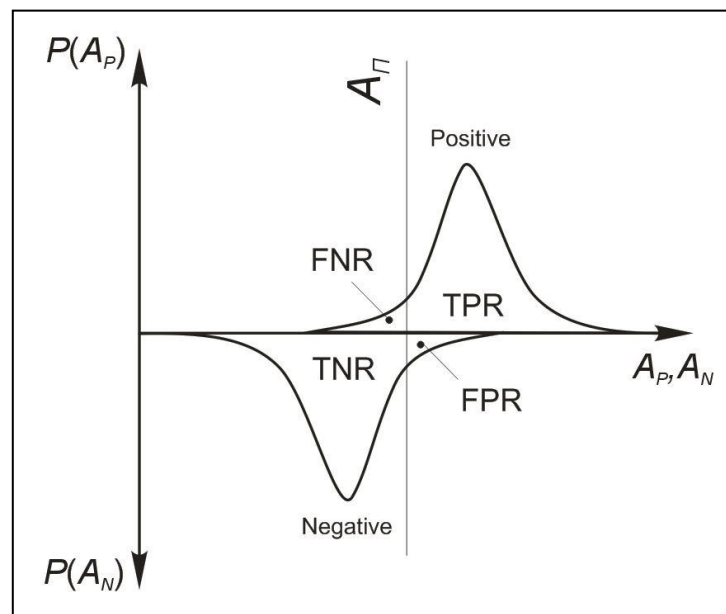


Рис. 4.1. Иллюстрации понятий TPR, TNR, FPR и FNR при верном и ошибочном распознавании ситуации «полость за обделкой»: A_P – значения исследуемого признака при съёмке на эталоне Positive, A_N – значения исследуемого признака при съёмке на эталоне Negative

Этой проблемы лишён такой инструмент, как ROC-кривые. Пример ROC-кривой представлен на рис. 4.2. Подобная кривая строится в координатах TPR от FPR с помощью перебора всех значений порога A_{Π} (каждая точка кривой это одно из положений порога). В случае, если ROC-кривая представляет собой прямую (обозначена «а» на рис. 4.2), считается, что классификатор реализует случайное угадывание. Нетрудно заметить, что на этой прямой $TPR = FPR$, то есть вероятность правильно распознать Positive-случай равна вероятности ошибочно принять Negative-случай за Positive. В случае ROC-кривой, обозначенной на рис. 4.2 буквой «б», будет наблюдаться ситуация $TPR > FPR$. А ROC-кривая, обозначенная на рис. 4.2 буквой «в», реализует то, что называется идеальным классификатором. Чем ближе линия «б» к линии «в», тем лучше классифицирующая способность информативного параметра.

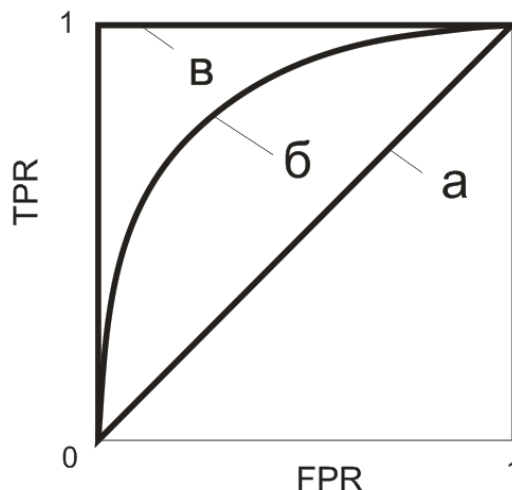


Рис. 4.2. Примеры ROC-кривых: *a* – случайное угадывание; *б* – типичная ROC-кривая; *в* – идеальный классификатор

Достоинствами ROC-кривой являются слабая зависимость от несбалансированности выборок Positive и Negative; возможность выбирать оптимальный порог; независимость от выбора порога $A_{\text{п}}$ при оценке надёжности признака.

Для сравнения надёжности разделения по тем или иным признакам необходима численная оценка. Для этого принято использовать оценку AUCROC, представляющую собой площадь под ROC-кривой. Диапазон значений AUCROC располагается от 0.5 (случайное угадывание) до 1 (идеальный классификатор). Такая шкала не очень удобна, поэтому распространение получила такая характеристика, как коэффициент Джини:

$$G = 2 \cdot \text{AUCROC} - 1. \quad (4.2)$$

В этом случае значения G изменяются от 0 (случайное угадывание) до 1 (идеальный классификатор). Для оценки надёжности разделения случаев «полость» и «нет полости» в этом исследовании использовался именно коэффициент G .

4.2. Отбор основных информативных параметров при георадиолокационном контроле заобделочного пространства

4.2.1. Основные особенности идентифицирующих сигналов

Для того, чтобы наметить основные пути поиска эффективных георадиолокационных информационных параметров первоначально стоит проанализировать, какие особенности сигналов указывают на наличие полости, подобрать оптимальную предварительную обработку сигнала, вычислить параметр и провести постобработку его значений. Далее оценить поведение этого параметра с точки зрения его эффективности.

Основной идентифицирующей полость особенностью сигнала при интерпретации является появление на трассах специфического сигнала, так называемого "звона" [304, 305, 306]. В качестве причины возникновения этого сигнала часто называют либо множественные переотражения [43], либо искажение волновой формы сигнала при отражении и прохождении сигнала через среду с высокой проводимостью [160]. Возможно, что работают оба эффекта, поскольку "звоны" наблюдаются и в случаях, когда полость заполнена воздухом [307].

Примеры этого типа сигнала на трассах и радарограммах, а также способы его выделения описаны в 3-ей главе (пункты 3.1, 3.2).

Опираясь на собранный в тоннелях московского метрополитена материал, можно выделить ряд особенностей "звона". На рис. 4.3 *а* представлен пример радарограммы (георадар ОКО-2 АБ-1200), снятой по боковой поверхности тоннеля. Участок со "звоном" представлен в нескольких вариантах обработки и выделен на всех изображениях белой двухсторонней стрелкой. Хорошо заметной особенностью "звона" является его повышенная амплитуда. Это иллюстрирует трасса, взятая в области влияния "звона" (см. рис. 4.3 *б*), а также "звонящий" участок радарограммы после амплитудного преобразования Гильберта

(АПГ) (рис. 4.3 в). Тёмное пятно на радарограмме показывает повышенные значения сигнала после АПГ.

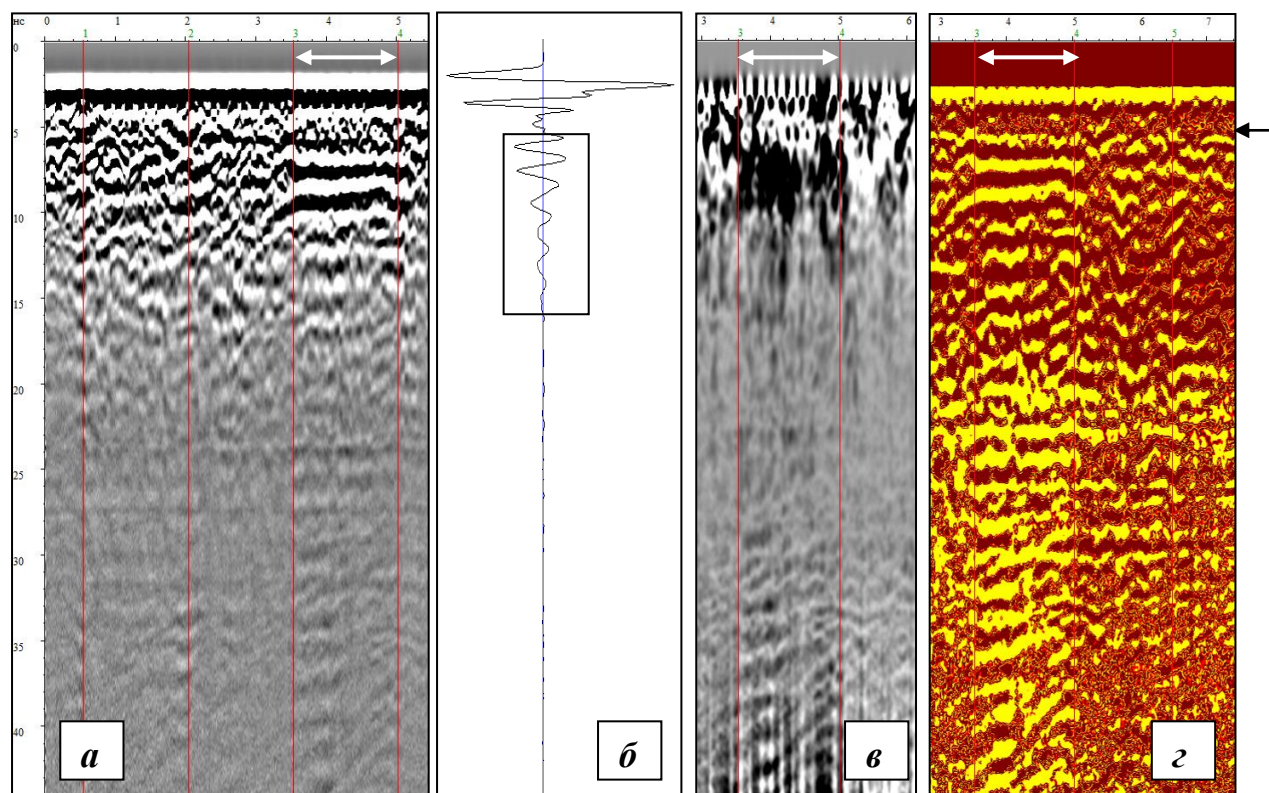


Рис. 4.3. Пример радарограммы, содержащей участок с выраженными сигналами-идентификаторами: *а* – исходная радарограмма, *б* – трасса в области "звона", *в* – участок радарограммы после амплитудного преобразования Гильберта, *г* – участок радарограммы после выравнивания сигнала и коррекции цветовой шкалы. Двойной стрелкой указано место расположения полости

Также характерной особенностью "звона" является то, что он начинается со времён, на которых должна присутствовать граница "обделка-грунт". Особенно хорошо это видно на рис. 4.3 *в* и *г* (положение границы "обделка-грунт" показано чёрной горизонтальной стрелкой). Сама граница при этом может не просматриваться из-за влияния "усов" гиперболических осей синфазности, образуемых прутами армирования.

Следующая особенность, это высокая длительность "звона" и гармонический характер его волновой формы. На необработанной радарограмме "звон" присутствует на небольшом участке в начале трассы, после чего испытывает

быстрое падение амплитуды (этот участок выделен прямоугольным окном на рис. 4.3 б). Однако в действительности "звон" может занимать всю длину трассы и быть незаметным из-за уменьшения амплитуды. Это иллюстрирует рис. 4.3 г, на котором радарограмма подвергнута выравниванию амплитуд (методика выравнивания описана в главе 3.2). Трассы под двухсторонней стрелкой зашумлены "звоном" практически до их конца. В то же время на соседних участках, не смотря на выравнивание, трассы имеют небольшие амплитуды.

В некоторых случаях "звон" реализуется как хаотическая волновая картина (ХВК) – тип волнового поля, которое может характеризоваться высокими амплитудами, но существенной изменчивостью значений амплитуд как по длине трассы, так и вдоль по профилю. Причиной появления таких особенностей сигнала могут быть множественные отражения сигнала при пробеге в неоднородной среде.

4.2.2. Основные информативные параметры

На начальной стадии исследования был определен предварительный набор признаков, способных указывать на наличие полости за обделкой. Основанием для включения в этот набор был либо обзор литературных источников [308, 309, 310, 311], либо предварительный анализ результатов георадиолокационной съёмки на строящихся и эксплуатируемых объектах московского метрополитена. Признаки должны подчёркивать такие особенности радарограмм, как «звон», хаотическая волновая картина, изменение энергии сигнала на локальных участках трасс и пр. Признаки, связанные с изменением коэффициента отражения на границе «грунт-обделка», не рассматривались, поскольку эта граница обычно испытывает существенное помеховое воздействие от армирования и при обследовании обделок анализ коэффициента отражения работает плохо.

Анализирувавшиеся признаки представлены в таблице 4.1. В таблице даётся обоснование за счёт чего эти признаки могут работать, какая предполагает-

ся обработка до вычисления признака и обработка после вычисления, даётся рекомендации какие признаки стоит оценивать.

Выбранные признаки можно разделить на три группы:

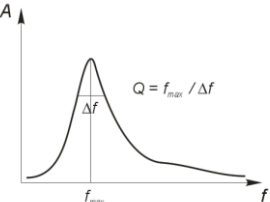
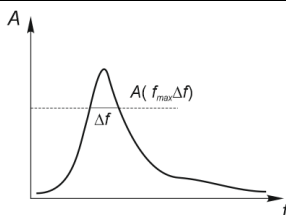
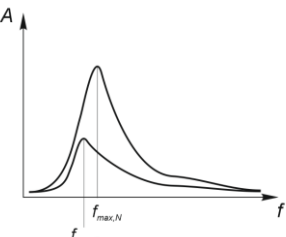
1. Спектральные признаки (указывающие на изменения параметров спектрального максимума, который обычно представлен одним выраженным пиком), в качестве которых анализировались Q -фактор; обратная ширина спектрального пика Δf^{-1} ; частота спектрального максимума f_{max} ; эффективная ширина спектра F_3 .

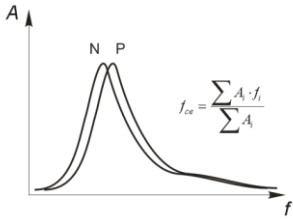
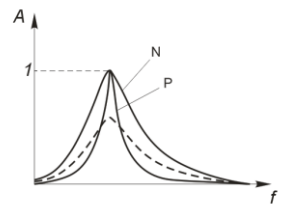
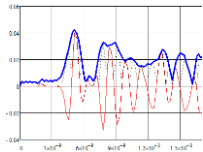
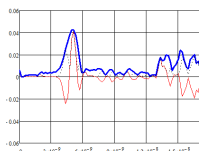
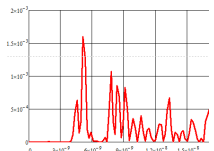
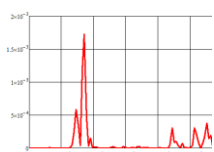
Для признаков этой группы исключалась предварительная обработка трасс (выравнивание, обрезка, сглаживание), поскольку это может существенно исказить спектр. Также специфика поведения спектра часто требовала оценивать ширину спектрального пика на уровне отличном от 0.707 амплитуды спектрального максимума, что было связано с изрезанностью спектра. Вопросам исследования как ведут себя спектральные признаки Q -фактор, Δf^{-1} , f_{max} посвящен отдельный раздел этой главы.

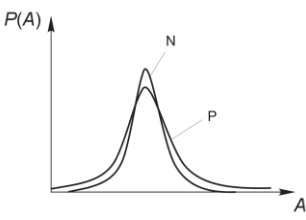
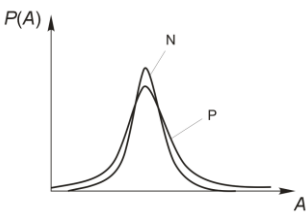
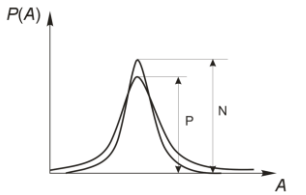
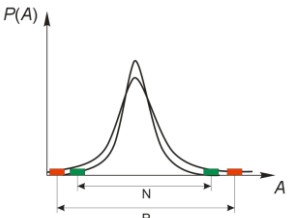
Площадь нормированного спектра S_n (она же эффективная ширина спектра) и указанная в таблице ниже протяжённость корреляционных связей τ даются в таблице как две различные характеристики, поскольку считаются по различной длине трассы. Для τ допустимо сокращать длительность трассы до участка, на котором присутствует «звон».

2. Динамические признаки (указывающие на изменение энергии сигнала, возникающее на локальных участках трасс за счёт «звона» либо отражения от неоднородностей), в качестве которых анализировались сумма значений амплитуд огибающей, полученной с помощью преобразования Гильберта H_s и энергия сигнала E_s . Для этих признаков требовались выравнивание амплитуд и обрезка трассы (отсечение зашумлённой части трассы, которая после выравнивания оказывает на признак слишком существенное воздействие).

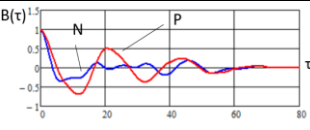
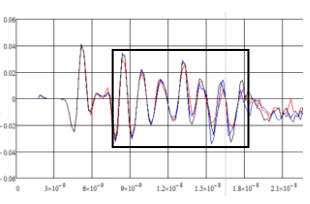
Таблица 4.1. Результаты опробования различных георадиолокационных информативных параметров

№	Информативный параметр	Обоснование применение признака	Иллюстрация	Рекомендации по включению в комплекс
1. Спектральные параметры				
1.1	Q-фактор	Присутствие на участках георадиолокационной трассы «звона» приводит ко всё большему влиянию его гармонической волновой формы на спектр. В результате спектральный максимум приобретает резонансную форму. Также оценивается изменение частоты спектрального пика, связанное с более эффективным затуханием в высокочастотной части спектра.		Не желательно включение в комплекс совместно с Δf^1 (избыточно высокая корреляция). Предпочтительным вариантом является использование Δf^1, поскольку f_{max}, входящий в Q, на полость реагирует слабо, но обладает собственной дисперсией, искажая результаты. В связи с изрезанностью спектрального максимума предпочтительно подбирать уровень, на котором оценивается ширина полосы (между 0.7 и 0.95). Необходимо исключить выравнивание и выделение участков трассы.
1.2	Обратная ширина спектрального максимума, Δf^1	Присутствие на участках трассы «звона» приводит ко всё большему влиянию его гармонической волновой формы на спектр. По сравнению с информативным параметром Q, изменение частоты спектрального максимума не учитывается.		Не желательно включение в комплекс совместно с Q (избыточно высокая корреляция). Является предпочтительным вариантов из группы спектральных признаков. В связи с изрезанностью спектрального максимума предпочтительно подбирать уровень, на котором оценивается ширина полосы (между 0.7 и 0.95). Необходимо исключить выравнивание и выделение участков трассы
1.3	Частота спектрального максимума, f_{max}	Оценивается изменение частоты спектрального максимума, связанное с более эффективным затуханием в высокочастотной части спектра в случае наполненности полости водой.		Не желательно включать. Высокий уровень ошибок, слабый отклик на наличие полости. Необходимо исключить выравнивание, поскольку слишком сильно искажается спектр. Выделение участков трассы так же не желательно, поскольку снижает разрешение спектра по частоте.

1.4	Средневзвешенная частота, $f_{св}$	Оценивается уровень амплитудных значений на различных частотах. Этот информативный параметр может быть более чувствителен к смещениям спектрального максимума вдоль частотной оси, чем f_{max} , поскольку участвует весь спектр.		Разделимость случаев Positive и Negative меняется от участка к участку. Признак можно включать в комплекс, принимая решения в конкретном случае. Необходимо исключить выравнивание, поскольку слишком сильно искажается спектр. Выделение участков трассы так же не желательно, поскольку снижает разрешение спектра по частоте.
1.5	Площадь нормированного спектра, S_n (эффективная ширина спектра)	Более пологий резонансный максимум, характерен для случая с отсутствием «звона» на георадиолокационной трассе, это приводит к тому, что после нормирования этот параметр будет давать большую площадь под кривой спектра.		Разделимость случаев Positive и Negative меняется от участка к участку. Признак можно включать в комплекс, принимая решения в конкретном случае. Необходимо исключить выравнивание, поскольку слишком сильно искажается спектр. Выделение участков трассы так же не желательно
2. Динамические				
2.1	Сумма мгновенных амплитуд (АПГ), H_s	Сумма значений огибающей сигнала, вычисляемого через амплитудное преобразование Гильберта. Высокая амплитуда выровненного «звона» увеличивает значение H_s .	Positive  Negative 	Хорошая разделимость в большинстве случаев, на некоторых участках может давать пониженные значения. Не желательно включение в комплекс совместно с E_s и σ (избыточно высокая корреляция). Предпочтительным вариантом является H_s, по причине большей его устойчивости к помехам. Необходима автоматическая регулировка уровня и выделение оптимального участка трассы
2.2	Энергия выровненного сигнала, E_s	Высокая амплитуда выровненного «звона» увеличивает значение E_s .	Positive  Negative 	Не желательно включение в комплекс совместно с H_s и σ (избыточно высокая корреляция). Предпочтительным вариантом является H_s, по причине большей его устойчивости к помехам. Необходима автоматическая регулировка уровня и выделение оптимального участка трассы.

3. Статистические				
3.1	Коэффициент эксцесса, γ	Эффект «тяжёлых хвостов» будет приводить к увеличению эксцесса		Не желательно включать в комплексы. Высокий уровень ошибок. Необходима автоматическая регулировка уровня и выделение оптимального участка трассы.
3.2	С.к.о. амплитудных значений, σ	Большой размах амплитуд при наличии «звона» будет приводить к увеличению с.к.о.		Не желательно включение в комплекс совместно с H_s и E_s (избыточно высокая корреляция). Предпочтительным вариантом является H_s, по причине большей его устойчивости к помехам. Необходима автоматическая регулировка уровня и выделение оптимального участка трассы.
3.3.	Инвертированный максимум гистограммы, N_{max}^{-1}	Эффект тяжёлых хвостов будет занижать вероятность попадания в разряд с максимальной вероятностью в случае наличия «звонов»		Разделимость случаев Positive и Negative меняется от участка к участку. Признак можно включать в комплекс, принимая решения в конкретном случае. Необходимо подбирать оптимальное количество разрядов. Необходима АРУ и выделение оптимального участка трассы.
3.4	Размах между разрядами, ΔA	Размах амплитуд, взятых по крайним либо близким к ним разрядам гистограммы		Разделимость случаев Positive и Negative меняется от участка к участку. Признак можно включать в комплекс, принимая решения в конкретном случае. Отдельное внимание стоит обращать на уровень FP. Необходимо подбирать оптимальное количество разрядов, а также номера разрядов для которых будет считаться параметр. Необходима АРУ и выделение оптимального участка трассы.

Окончание таблицы 4.1

3.5	Протяжённость корреляционных связей, τ	Регулярная структура сигнала, возникающая под влиянием «звона», приводит к тому, что на больших лагах автокорреляционная функция имеет высокие значения, что приводит к повышенным значениям протяжённости корреляционных связей		Разделимость случаев Positive и Negative меняется от участка к участку. Признак можно включать в комплекс, принимая решения в конкретном случае. Необходима автоматическая регулировка уровня и выделение оптимального участка трассы.
3.6	Корреляция соседних трасс, R_t	Участки радарограмм, подверженные влиянию «звона», создают волновую картину, слабо меняющуюся от трассе к трассе, что увеличивает корреляцию между соседними трассами		Не желательно включать. Высокий уровень ошибок, низкая корреляция

Примеры для случаев наличия и отсутствия полости представлены на рисунке 4.4. Здесь на всех рисунках сигналы подвергнуты выравниванию, представлен только небольшой участок трассы на котором «звон» ещё не успевает закончиться. Рисунок 4.4 *а* и *б* показывает случаи вычисления огибающей, для вариантов Negative и Positive. В случае рис. 4.4 *а* (Negative) после импульса представляющего собой прямую волну идёт участок с низким уровнем амплитуд (выделен пунктирным прямоугольником). В отличие от него на рисунке 4.4 *б* хорошо видно, что на этих же временах присутствуют высокие уровни амплитуд и большие значения огибающей, наблюдаемые начиная с времён, соответствующих времени отражения от границы «обделка-грунт». Очевидно, что сумма значений огибающей будет давать повышенный уровень на трассах где присутствует «звон», вызванный полостью.

Рисунок 4.4 *в* и *г* показывает случаи вычисления энергии сигнала E_s , для вариантов Negative и Positive. Также хорошо видны отличия на участке влияния «звона» (участок выделен пунктирным прямоугольником).

Необходимость обрезки трассы связана с тем, что окно, в котором происходит выравнивание после окончания «звона» начинает увеличивать ампли-

туды, связанные только с шумом. В результате на этих участках сигнал полученный в точке, где за обделкой полость либо присутствует, либо отсутствует индицирует не влияние полости, а случайные компоненты шума. Это резко снижает разделимость случаев Positive и Negative. Также хорошо заметны отличия в уровне амплитуд на критическом участке.

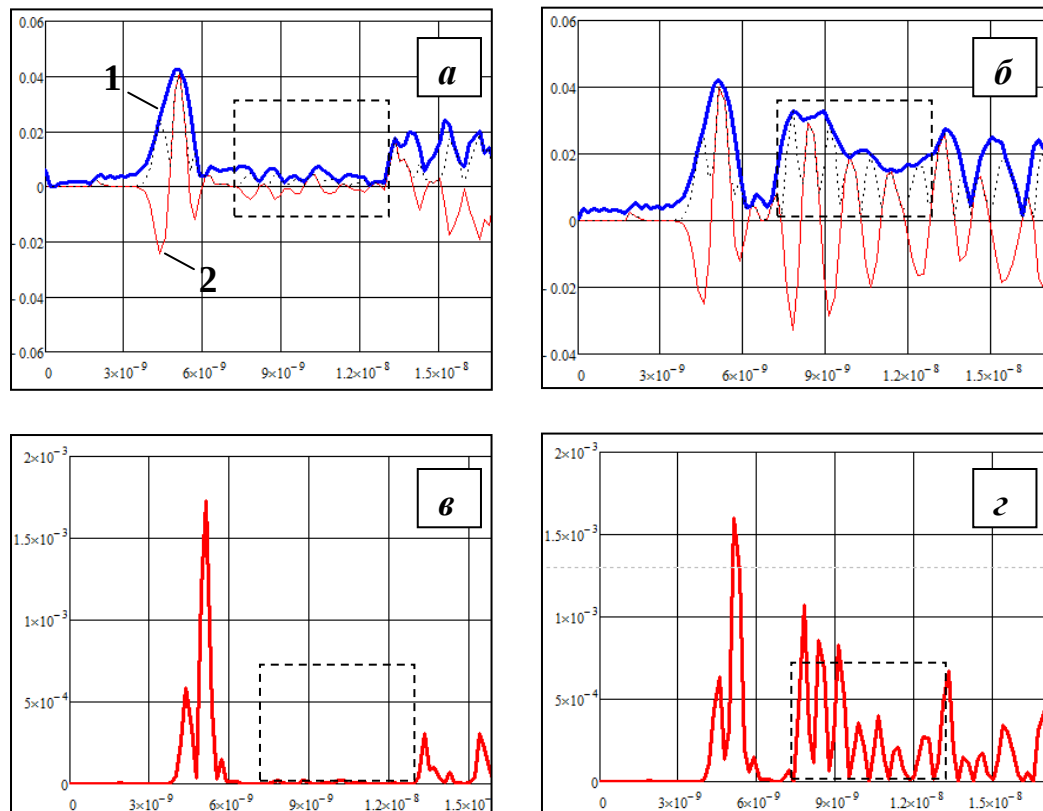


Рис. 4.4. Примеры преобразований сигналов для вычисления информативных признаков сумма значений огибающей H_s и энергия сигнала E_s ; *a* – вычисление огибающей для случая Negative; *б* – вычисление огибающей для случая Positive; *в* – квадраты модулей амплитуд для случая Negative; *г* – квадраты модулей амплитуд для случая Positive; 1 – огибающая, 2 – исходный сигнал

Попытки применения обоих информативных параметров для индицирования участков с наличием полостей показал, что энергия сигнала ведёт себя более случайно по сравнению суммой значений огибающей и хуже подходит для распознавания наличия полости за обделкой. Это можно объяснить тем, что при вычислении амплитудного преобразования Гильберта оно выделяет информацию о мгновенной амплитуде и удаляет информацию о мгновенной ча-

стоте и мгновенной фазе. Этим минимизируется влияние на сигнал фазовых сдвигов возникающих за счёт множественных переотражений, также энергия сигнала E_s более чувствительна к шуму [312]. В результате у суммы значений амплитуд огибающей H_s выше устойчивость к помехам.

Единственной проблемой применения H_s было возникновение помеховых «звонов», которые были связаны: со стыками тьюбингов, с помеховым воздействием крепёжных элементов, а также с «воздушными» помехами. Эти аспекты не создавали серьёзных проблем: зашумлённые участки занимают небольшой отрезок профиля и легко выявляемы на радарограммах и графиках информативных параметров, построенных вдоль по профилю.

3. Статистические признаки (указывают на изменения в форме законов распределения амплитуд георадиолокационных трасс).

Такие характеристики как коэффициент эксцесса γ и размах между разрядами ΔA фактически анализируют изменяющийся в случае «звона» и хаотической волновой картины размах выровненного сигнала. Сам по себе размах работает плохо, поскольку подвержен случайным факторам. Коэффициент эксцесса также работает довольно плохо, оказываясь эффективным лишь в редких случаях.

Для вычисления размаха между разрядами, ΔA берутся не крайние амплитуды, а крайние разряды гистограммы, описывающей закон распределения амплитуд, что снижает случайность поведения информативного параметра. В некоторых случаях предпочтительнее брать не крайние разряды, а прилегающие к ним (второй и предпоследний), поскольку крайние также ведут себя довольно случайно, внося дополнительную ошибку. Решение о количестве разрядов в гистограмме, а также о том какие разряды брать нужно принимать для конкретной площадки, настраивая обработку признака. В большом количестве случаев этот параметр давал хорошую делимость и не вёл себя слишком похоже на другие параметры. Однако его проблемой была необходимость выбирать какие разряды использовать при вычислениях.

Инвертированный максимум гистограммы, N_{max}^1 опирался на такие особенности сигнала, как «звон» и хаотическая волновая картина, которые приводили к тому, что в распределении появлялись так называемые «тяжёлые хвосты». В этих случаях вероятность попасть в крайние разряды гистограммы, описывающей законы распределения амплитуд, становится выше, а в центральный разряд ниже. Сравнивая характеристики можно сказать, что более стабильно себя ведёт оценка вероятности попасть в центральный разряд. При этом иногда удобно ориентироваться на обратное значение этой величины. Для этого признака требовалось выравнивание амплитуд и обрезка трассы.

С.к.о. амплитудных значений, σ давало очень высокую корреляцию с E_s и H_s и фактически не использовалось.

Такой признак, как протяжённость корреляционных связей τ являлся оценкой гармонической структуры сигнала, возникающей под влиянием «звона». Этот эффект приводит к тому, что на больших лагах автокорреляционная функция имеет высокие значения, что приводит к повышенным значениям протяжённости корреляционных связей. Эта характеристика не является аналогом F_s , поскольку считалась по изменённой (выровненной и обрезанной) трассе. Функция изменения τ вдоль профиля требовала процедуры сглаживания скользящим окном.

Оценки применимости этих признаков представлены в таблице 4.1.

4.2.3. Особенности использования спектральных информативных параметров

Особенности поведения таких спектральных характеристик как Q , Δf^1 , f_{max} исследовались отдельно. Очевидно, что присутствие в волновом поле гармонических компонент должно изменять спектры. Изменения в спектре действительно можно обнаружить – спектр трассы со "звоном" имеет более узкий максимум. Это позволяет выявлять полости по такому параметру как Q -фактор, рассчитываемому аналогично тому, как по спектрам сигналов оценивается добротность колебательной системы:

$$Q = \frac{f_{\max}}{\Delta f}, \quad (4.3)$$

где $f_{\max}$ – частота максимума спектра, Δf – ширина резонансного пика взятого на уровне $h = 0.707$.

Стоит отметить, что изменения Q в зависимости от качества контакта "грунт-обделка" хорошо выражены при работе на простых объектах (малое время эксплуатации, малая мощность конструкции, не высокая плотность армирования, нет источников воздушных помех), однако в реальной практике, при работе в эксплуатируемых тоннелях его применение сталкивается с проблемами. Это можно показать на примере объекта малой толщины (плита 12 см). Поскольку монтаж конструкций в котловане был еще не окончен, при георадиолокационной съёмке можно было наблюдать расположение и характер полостей за плитой. Далее в этой главе зоны различного контакта будут обозначаться буквами: зоны А и Г – пустота за обделкой, зона В – рыхлый грунт, частично примыкающий к обделке, зона Б – хороший контакт (см. схему на рис. 4.5 а).

На рис. 4.5 б дана радарограмма, снятая по этому объекту (георадар ОКО-2 1700 МГц). Здесь можно выделить три волновых картины, которые можно связать с воздействием полостей. Они так же обозначены буквами А, В, Г. Причём волновые картины А и Г реализовались как "звон", а волновая картина В как хаотическая волновая картина (ХВК). Между описываемыми участками находится участок, соответствующий зоне Б. Он не содержит сигналов-идентификаторов плохого контакта.

По полученным данным было рассчитано значение Q для уровня $h = 0.707$, а также её составляющих $f_{\max}$ и Δf^1 . Выравнивание для этих признаков не применялось, поскольку оно слишком существенно искажает спектр сигнала. Результаты расчётов представлены на рис. 4.6 в виде графиков $Q(N)$, $f_{\max}(N)$ и $\Delta f^1(N)$, описывающих изменение признака вдоль по профилю, где N это номер георадиолокационной трассы. На графики нанесены зоны А-Г описанные выше.

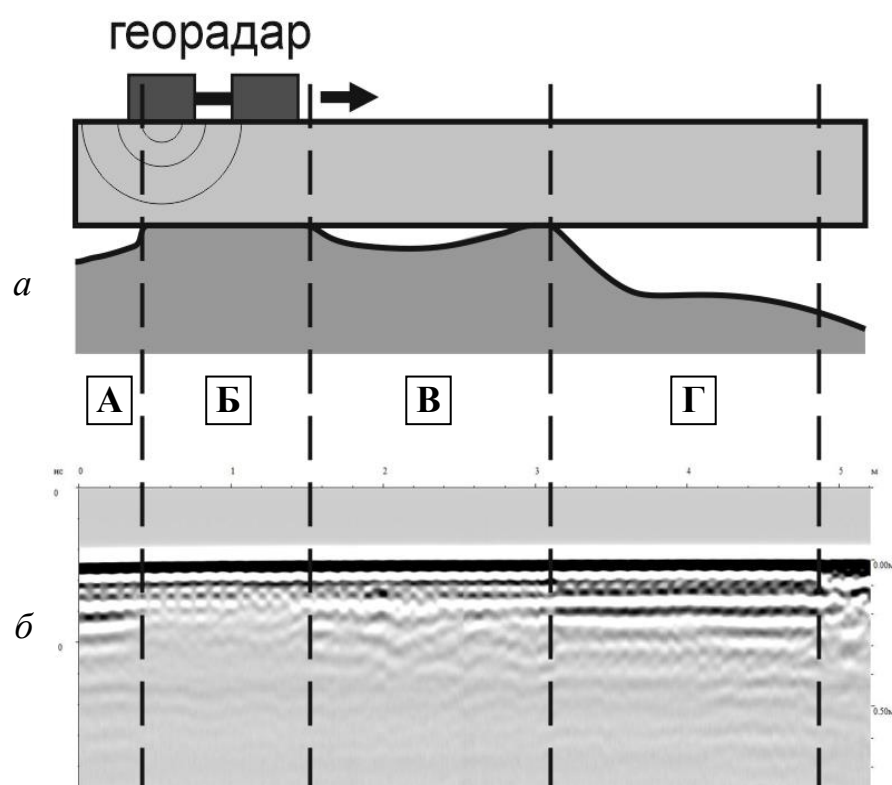


Рис. 4.5. Результаты измерений на железобетонной плите (АБ1700): *а* – схема расположения полостей, *б* – радарограмма полученная при съёмке

Анализируя график $Q(N)$ можно отметить высокую разделимость случаев плохого (зона Г) и хорошего контакта (зона Б). Однако случаи Б и В практически не разделимы. Другими словами, Q -фактор плохо выявляет ХВК и условия частичного контакта. Этот результат можно объяснить тем, что ХВК формирует "звоноподобные" сигналы небольшой длины занимающие короткий участок трассы и не способные существенно повлиять на спектр сигнала.

На втором этапе производились съёмки и оптимизация Q -фактора и его составляющих на реальной обделке действующего тоннеля Московского метрополитена. Толщина обделки 25 см. Уровень h , на котором оценивалась обратная ширина, не всегда выбирался в соответствии с правилом $h = 0.707$, в некоторых случаях это значение было необходимо менять.

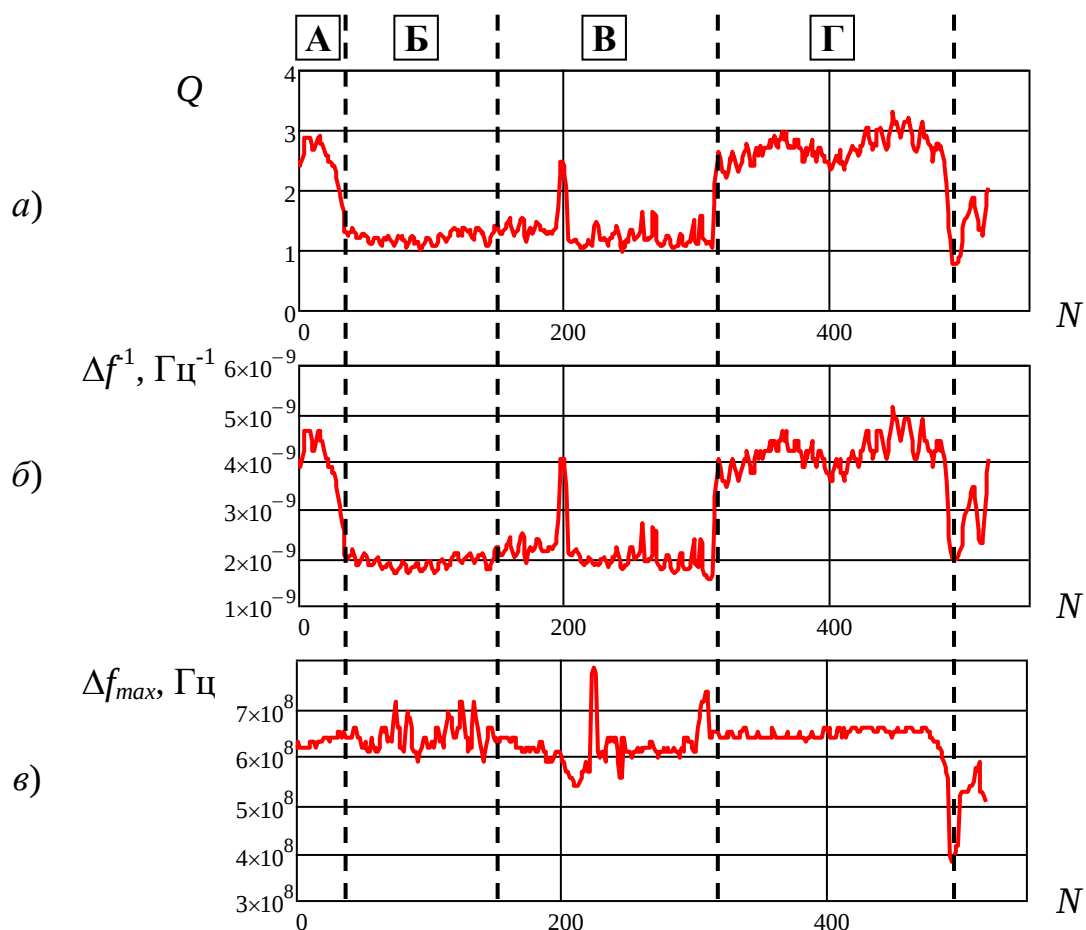


Рис. 4.6. Результаты вычисления значений признаков:
 $a - Q(N)$, $б - \Delta f^1(N)$, $в - f_{max}(N)$

Также при работе с Q -фактором было выяснено, что на самом деле основной вклад в выявляемость разуплотнения за обделкой производит не сам Q -фактор, а одна из его составляющих. На графиках рис. 4.6 хорошо видно, что $\Delta f^1(N)$ фактически повторяет поведение графика $Q(N)$, а $f_{max}(N)$ показывает случайные отклонения от своего среднего значения. Коэффициент корреляции для пары " Q " – " f_{max} " составил $R(Q, f_{max}) = 0.18$. В то же время как корреляция для пары " Q " – " Δf^1 " составила $R(Q, \Delta f^1) = 0.99$. Таким образом, детерминации для этих случаев $R^2(Q, f_{max}) = 0.032$ и $R^2(Q, \Delta f^1) = 0.98$. Это означает, что дисперсия Q -фактора на 98% определяется такой её составляющей как Δf^1 и практически не зависит от f_{max} .

Включение Q-фактора, поведение которого зашумлено составляющей с низкой эффективностью (f_{max}), скорее всего, сделает комплекс менее помехоустойчивым. Более обоснованным будет включение в него обратной ширины спектрального максимум Δf^1 или просто ширины Δf .

Дальнейшая работа была проведена в действующих тоннелях Московского метрополитена (использована антенна 1200 МГц). Один из результатов вычисления признаков представлен на рис. 4.7. Пунктирными прямоугольниками показано расположение полостей. Можно отметить, что признак $\Delta f^1(N)$ способен указывать на расположение полостей (см. рис. 4.7 а), хотя по сравнению с исследованием на плите 12 см его график стал более изрезанным. Функция f_{max} как и с плитой ведёт себя хаотично (см. рис. 4.7 б) и выявлять полости не позволяет.

Первичные опробования $\Delta f^1(N)$ велись с уровнем $h = 0.707$, однако они приводили к сильно зашумлённому результату. Повышение уровня до $h = 0.9$ существенно улучшило ситуацию.

Объяснить это можно с помощью примеров спектров, представленных на рис. 4.8 (оба спектра взяты из тех частей радарограмм, где присутствует "звон"). В случае работы на эксплуатируемой обделке на спектр начинает воздействовать большее количество помеховых факторов – трещины, вариации электрических свойств объекта контроля в результате старения конструкции, помехи от объектов внутри тоннеля, влияние армирования. Это приводит к тому, что спектр начинает вести себя более хаотично.

В нём появляются и становятся более выраженными дополнительные спектральные максимумы, делающие его шире (такая ситуация просматривается на рис. 4.8, где уровень $h = 0,707$ дан пунктирной линией). То насколько существенно может влиять армирование на спектр показывают спектрограммы рис. 4.9 а и б. Оказываясь под влиянием нескольких резонансных эффектов, ширина центрального пика начинает вести себя случайно. Если же оценивать ширину вблизи самого большого пика, эти факторы становятся менее выраженными.

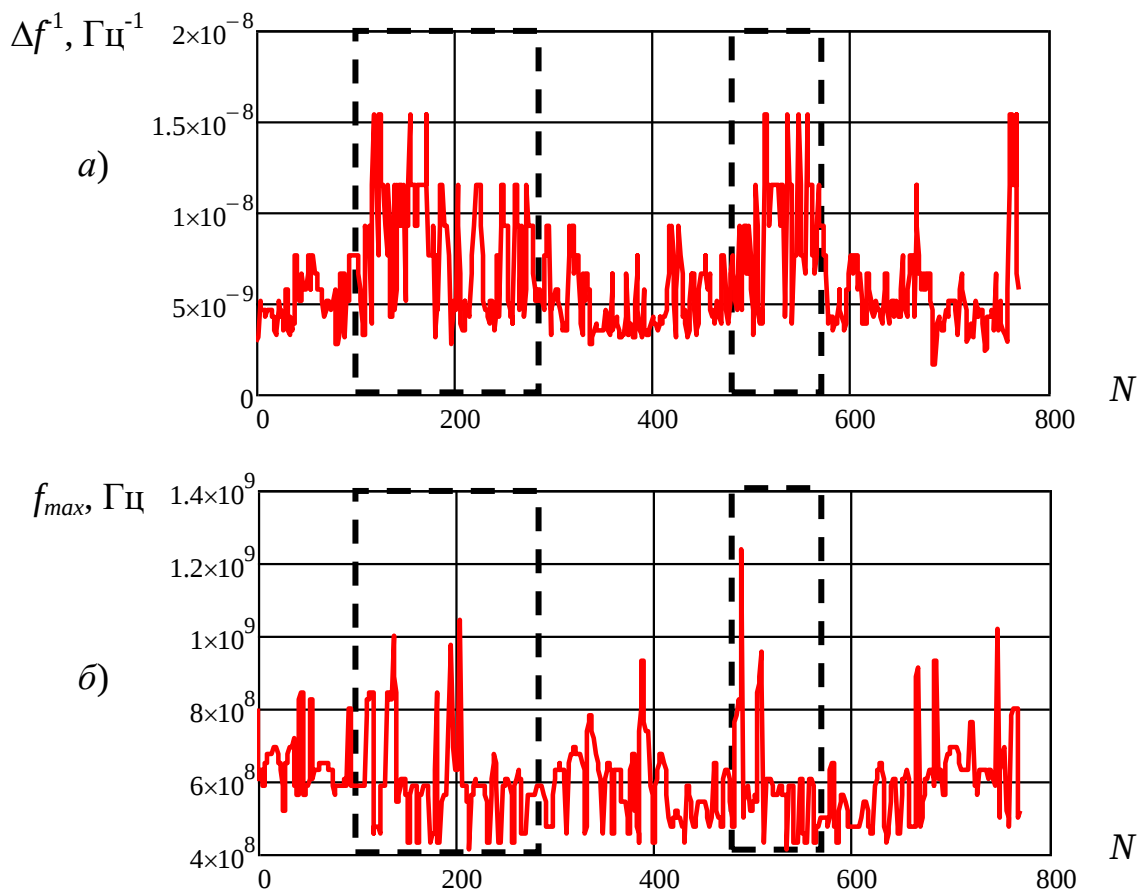


Рис. 4.7. Результаты вычисления информативных параметров для случая обделки эксплуатируемого тоннеля: $a - \Delta f^1(N)$, $б - f_{max}(N)$

Анализ поведения составляющих Q -фактора в случае работы на обделке действующего тоннеля дал схожие результаты с обследованием плиты 12 см. Визуальное подобие графиков $Q(N)$, $\Delta f^1(N)$, $f_{max}(N)$ из-за помеховых факторов анализировать сложно, однако оно хорошо просматривается по диаграммам рассеяния (см. рис. 4.10). Можно отметить, что облако, образованное парой Q и f_{max} более широкое, то есть обладающее существенно меньшей соизменчивостью, чем облако образованное парой Q и Δf^1 .

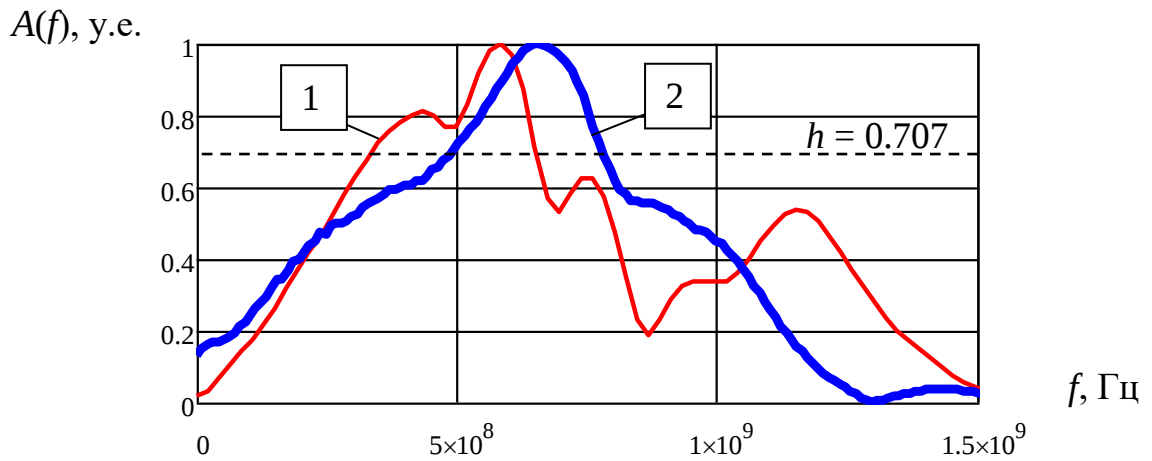


Рис. 4.8. Примеры спектров: 1 – съёмки на модели, 2 – съёмки на обделке действующего тоннеля

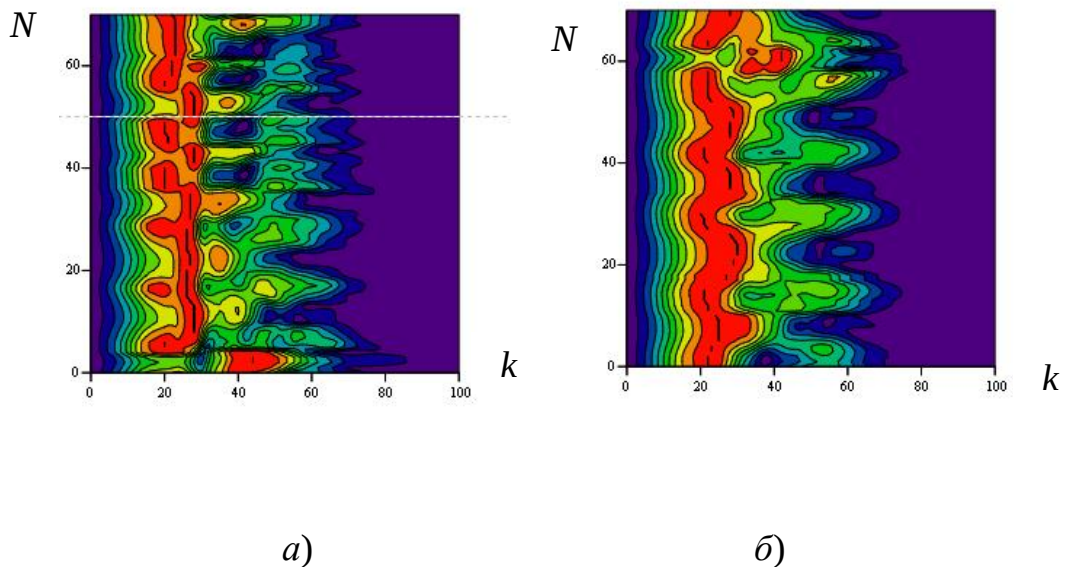
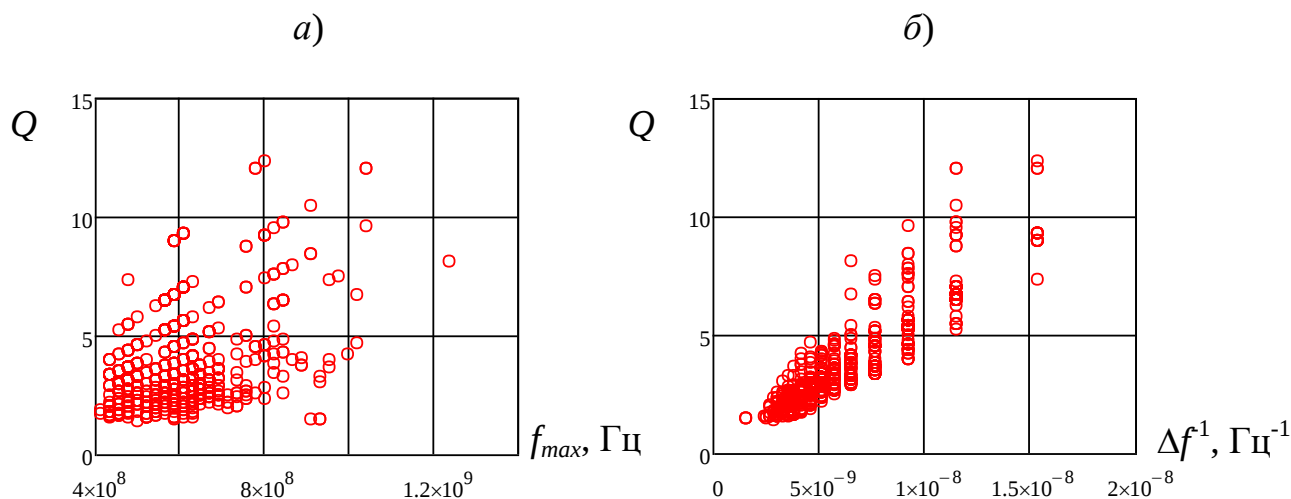


Рис. 4.9. Примеры спектрограмм полученных при обследовании обделок тоннелей метрополитенов (*а* и *б* – различные варианты), N – номер трассы, k – номер гармоники

Коэффициенты корреляции для этих случаев: $R(Q, f_{max}) = 0.36$ и $R(Q, \Delta f^1) = 0.909$. Это даёт детерминации: $R^2(Q, f_{max}) = 0.13$ и $R^2(Q, \Delta f^1) = 0.83$. Т.е. дисперсия Q на 83% объясняется влиянием Δf^1 и всего-лишь на 13% влиянием f_{max} . Понижение значения объяснённой дисперсии для пары Q и Δf^1 легко объяснить влиянием помеховых факторов, которые обострились при переходе на эксплуатируемый объект.



Q от f_{max} , б – Q от Δf^1

В целом высокое значение коэффициента корреляции говорит о том, что для эффективного комплекса признаков желательно использовать какой-то один из описываемых признаками – Q либо Δf^1 , опираясь на их корреляцию с другими признаками. В противном случае комплекс будет перегружаться однотипной информацией. При этом f_{max} не указывает на полости – его добавление в комплекс не желательно.

4.2.4. Особенности поведения признаков, вычисляемых по результатам обработки георадиолокационных трасс

Описанные выше информативные параметры активно использовались при анализе радарограмм, снятых в Московском метрополитене на железобетонных обделках. В основном использовался подход, когда для каждой трассы конкретной радарограммы вычислялась характеристика, отстраивавшаяся как функция от расстояния на профиле. В редких случаях было необходимо использовать скользящее среднее, для того чтобы сглаживать резкие перепады

значений. Недостаток этого подхода состоял в том, что это снижало интенсивность аномалии.

По факту проведённых натурных исследований был выявлен ряд особенностей поведения признаков и их оценок. В первую очередь стоит отметить специфику поведения модулей коэффициентов корреляции $|R_P|$ и $|R_N|$ для участков Positive и Negative, которую можно использовать для предварительной оценки сочетаемости признаков. Проблемой здесь является слишком высокая корреляция между признаками, которая приводит к тому, что помеховое влияние при включении однотипных признаков в комплекс усиливается. Вопрос, который здесь всегда возникает состоит в том, какой уровень значения корреляции считать избыточно высоким.

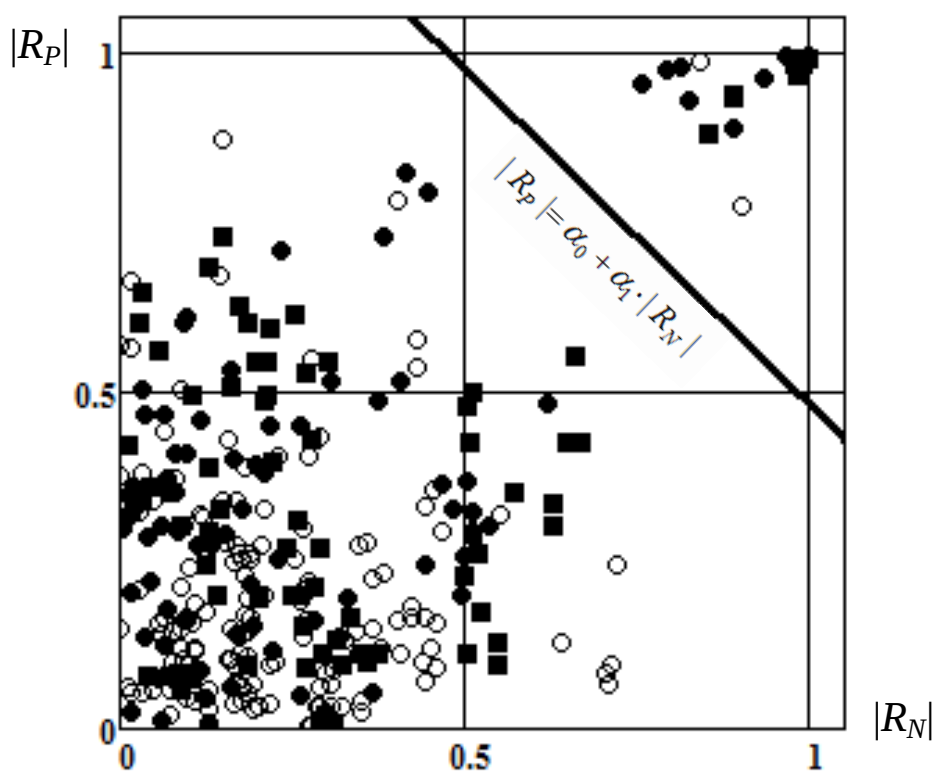


Рис. 4.11. Диаграмма рассеяния « $|R_P| - |R_N|$ » с нанесённой дискриминантной линией

Весь объем полученных подобным образом коэффициентов корреляции наносился на диаграмму рассеяния « $|R_P| - |R_N|$ ». В процессе опробования оказа-

лось, что на таких диаграммах практически всегда можно было наблюдать два хорошо разделяемых кластера, которые интерпретировались как кластер высоких значений и кластер низких значений. Это различие можно использовать для отсеивания высококоррелирующих пар.

На рис. 4.11 представлена диаграмма рассеяния « $|R_P| - |R_N|$ », в которой собраны значения $|R|$ с трёх различных объектов (различаются типы обделок и времена эксплуатации), отображенных разными маркерами. Заметно, что кластеры оказываются хорошо разделяемыми независимо от объектов.

Стоит отметить, что в кластеры на рис. 4.11 нельзя разделить без ошибок по одномерному пороговому правилу (множества по $|R_P|$ перекрываются, а по $|R_N|$ остаётся очень небольшой диапазон значений для порога). Поэтому двумерный порог (дискриминантная линия) является наилучшим решением. Для полученного набора данных дискриминантная линия может быть описана уравнением: $|R_P| = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot |R_N|$. Эта линия подбиралась по средневзвешенной координате центроидов кластеров из условия, что она должна быть перпендикулярна линии, проходящей через эти центроиды и приближена к тому кластеру, у которого дисперсия ниже. Были получены следующие значения коэффициентов: $\alpha_0 = 1.47$, $\alpha_1 = -1.01$.

Стабильность положения дискриминантной линии можно подтвердить через стабильность координат центроидов (это средние по координатам) и стабильность значений дисперсии. Для этого использовались t -критерий Стьюдента и F -критерий Фишера. Сравнение средних и дисперсий производилось между выборками каждого из объектов и обобщённой выборкой (все три объекта вместе). Во всех случаях не было основания принять гипотезу о неравенстве.

Полученная дискриминантная линия может быть использована в качестве оценки разделения зависимых и независимых признаков:

$|R_P| > \alpha_0 + \alpha_1 \cdot |R_N|$ — признаки зависимы;

$|R_P| < \alpha_0 + \alpha_1 \cdot |R_N|$ — признаки не зависимы, где $\alpha_0 = 1.47$, $\alpha_1 = -1.01$.

Анализ результатов вычислений $|R|$ показал, что в некоторых случаях обладают высокой корреляцией не только пары, а и группы по три или четыре

признака. В подобных случаях в комплекс стоит отбирать только какой-то один признак из группы, опираясь на дополнительные критерии, например, на значения интенсивности аномалии μ .

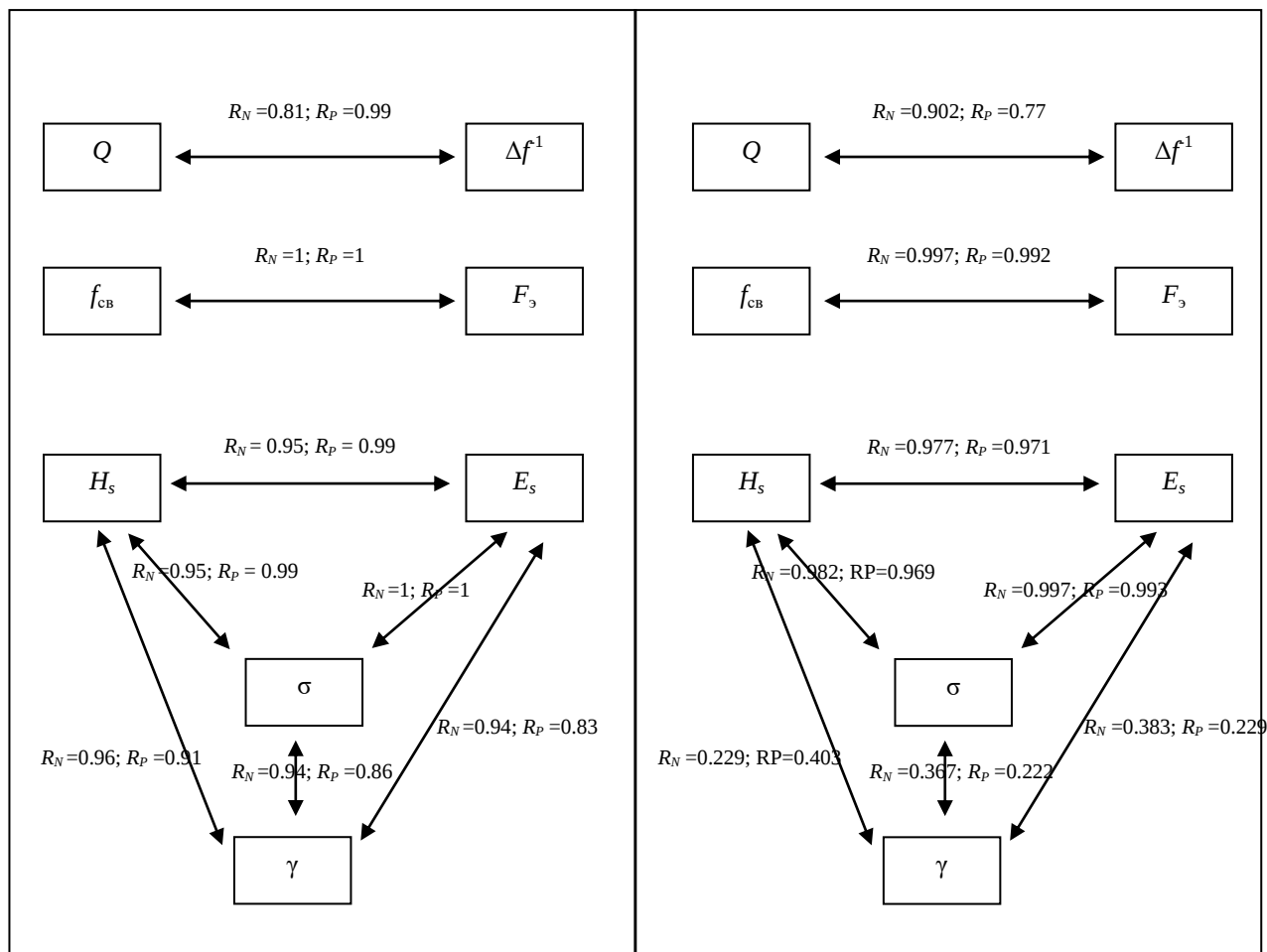


Рис. 4.12. Особенности корреляции между информативными параметрами для двух различных участков a и b

Несмотря на то, что положение кластеров и дискриминантной линии довольно стабильное, не всегда в эти кластеры попадали одни и те же признаки. Так, например, в случае рис. 4.12 a заметна сильная корреляция γ с σ , H_s , и E_s , в то время как в случае рис. 4.12 b корреляция с ними довольно слабая. Это можно объяснить и тем, что эксцесс перестаёт реагировать на аномалию, и тем, что он перестаёт реагировать на помехи.

Поведение самих признаков также имеет некоторые особенности. По результатам обработки полученных в тоннелях данных стало ясно, что в рамках

одного объекта информативность признака обычно сохраняется, слабо варьируя от полости к полости. Однако при переходе на другой объект можно наблюдать существенное изменение информативности признака.

Это вывод иллюстрирует таблица 4.2, в которой представлены значения оценок G и μ для различных объектов и участков обследования. Участки обозначены кодом – например, «O1 Y1» означает объект № 1, участок №1.

Таблица 4.2. Оценки надёжности разделения G и интенсивности аномалии μ по ряду признаков для различных объектов и участков обследования

Признак	Коды объектов и участков			
	O1 Y1	O1 Y2	O2 Y1	O3 Y1
G				
Δf^{-1}	0.83	0.7	0.37	0.92
ΔA	0.96	0.71	0.47	0.025
H_s	0.98	0.8	0.64	1
τ	0.32	0.29	0.64	0.071
μ				
Δf^{-1}	3.9	3.4	0.58	6.1
ΔA	7.5	6	1.63	0.07
H_s	6.7	5.3	2.3	10.7
τ	0.5	0.25	2.8	0.056

Можно заметить, что если для объекта №1 высокой надёжностью разделения G обладают признаки ΔA , H_s и Δf^{-1} , то для объекта №2 предпочтительными оказываются H_s и τ . При этом Δf^{-1} теряет надёжность. Для объекта №3 надёжные признаки это Δf^{-1} и H_s , а ненадёжные ΔA и τ . Стоит отметить, что одни и те же признаки остаются наиболее надёжными для различных участков одного и того же объекта (см. столбцы «O1 Y1» и «O1 Y2»), но смена объекта сильно меняет значения G .

Для «O1 Y1» ΔA и H_s являются идеальными классификаторами ($G \approx 1$), и распознавание можно было бы производить по одному из этих признаков. А на участке «O1 Y2» надёжность разделения этих признаков снижается, что требует применения комплекса признаков.

Анализируя значения μ , можно отметить, что ситуация здесь аналогична – на объекте №1 одни и те же признаки сохраняют высокую интенсивность, но ситуация смены объекта меняет и список информативных признаков.

Среди всех признаков можно отметить, что наибольшую стабильность от объекта к объекту имеют такие информативные параметры как H_s и Δf^1 . Однако присутствующее в ряде случаев резкое снижение эффективности говорит о желательности комплексирования параметров. Причинами высоких уровней ошибок типа «пропуск цели» или «ложное срабатывание» можно назвать специфику объекта. Типичные толщины обделок (25-30 см) таковы, что на полезный сигнал оказывает сильное воздействие прямая волна, радиообразы прутков армирования, затухание сигнала, а потому влияние полости на определяемые признаки становится не столь выраженным.

4.2.5. Комплексирование информативных параметров при георадиолокационных измерениях

Для георадиолокации была опробовано комплексирование информативных параметров. В качестве основного метода для этого комплексирования был выбран кластерный анализ. Достоинством георадиолокации в контексте этого решения является то что для одного участка тоннеля, где наблюдается полость, можно снять большое количество трасс, что позволяет легко набрать статистику. В случае IR такой ситуации не наблюдается – здесь обычно подразумевается съёмка одно кольцо одна точка.

Первичный этап работы с кластерным анализом подразумевал формирование двух кластеров (Positive и Negative): в том месте где наличие полости известно производилось съёмка, получались наборы трасс, для каждой из них вычислялось несколько информативных параметров. Полученные два кластера описывались центроидами C_P и C_N . Центроид это точка в признаковом пространстве, координаты которой соответствуют средним значениям признака для каждого кластера. На рис. 4.13 показан пример кластеров Positive и

Negative, центроиды на них выделены перекрещивающимися точечными линиями. Статус Positive либо Negative для этих кластеров должен подтверждён (прямыми измерениями, либо визуальными наблюдениями).

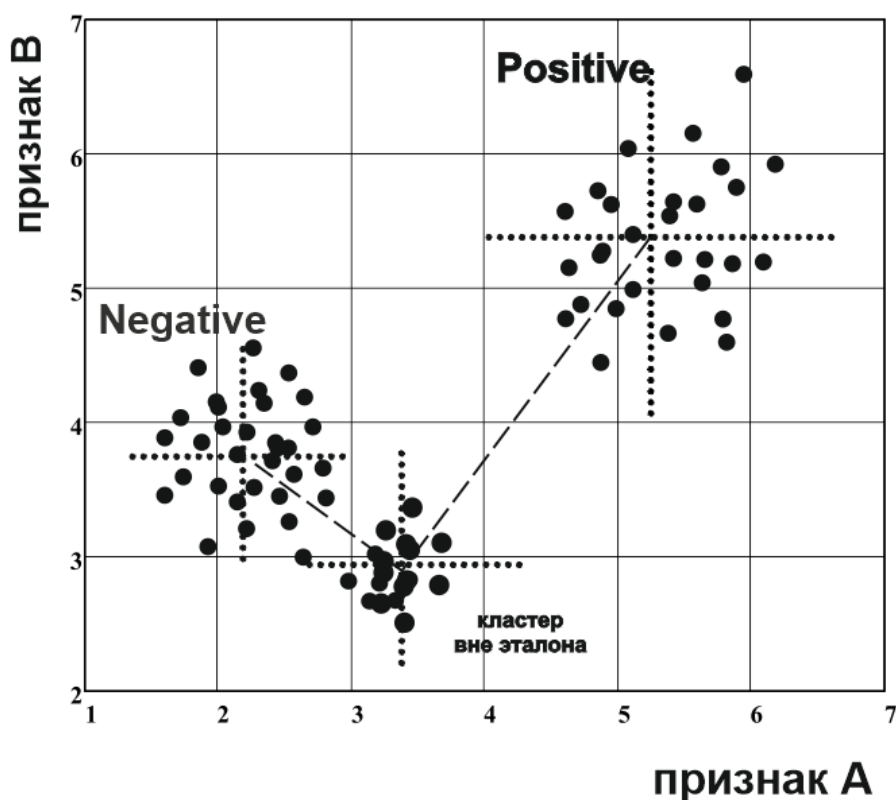


Рис. 4.13. Схема работы кластерной классификации

Далее для участка, для которого неизвестен факт наличия либо отсутствия полости производится вычисление центроида классифицируемого кластера C_K . В случае N -мерного признакового пространства берутся N функций значений информативных параметров, изменяющихся вдоль по профилю. Далее с помощью скользящего окна получается набор значений, формирующих кластер. Вычисляется его центроид C_K .

На следующем шаге определяются меры сходства классифицируемого кластера и кластера Positive и Negative. Простейший вариант – взять расстояния (так называемые метрики) от центроида C_K до центроидов C_P и C_N . Если классифицируемый кластер ближе к Negative принимается решение об отсутствии

полости, если ближе к Positive принимается решение о б отсутствии полости. На рис. 4.13 эти расстояния обозначены как ε_1 и ε_2 .

Здесь в качестве расстояния показано так называемое евклидова метрика. Поскольку его использование работало плохо, это привело к необходимости искать другие меры сходства.

Поиск оптимальной меры сходства производился с помощью построения и анализа кластерных деревьев (подход «обучение без учителя»), объединение случаев в которых производилось с помощью различных мер сходства. Использовались как метрики, так и подходы, не связанные с определением расстояний между кластерами (метод Уорда, энтропия). Наилучшая разделимость, с формированием двух хорошо отделяемых друг от друга кластеров возникала при использовании степенного расстояния M_c :

$$M_c = \left(\sum_{i=1}^k |A_{K,i} - A_{N,i}|^{n_1} \right)^{1/n_2}, \quad (4.4)$$

где $A_{K,i}$ – значение i -го признака для центроида классифицируемого кластера; $A_{N,i}$ – значение i -го признака для центроида кластера эталона (использовался кластер эталона Negative); n_1 и n_2 – степени определяемые пользователем; k – количество признаков в комплексе. Степенное расстояние искажает признаковое пространство таким образом, что удаление от кластера может нарастать быстрее или медленнее в зависимости от соотношения степеней.

Полученная таким образом функция значений степенного расстояния, взятая в последовательном ряде точек профиля, использовалась в качестве классифицирующей функции $M_c(x)$. Наилучшие результаты показало степенное расстояние между кластером Negative и классифицируемым кластером. Т.е. на полость указывают удаление от кластера Negative, а не приближение к кластеру Positive. Высокие значения $M_c(x)$ указывали на наличие полости, низкие на отсутствие. При этом эти случаи довольно хорошо разделялись по пороговому правилу и ошибки «пропуск цели» и «ложное срабатывание» были редки.

Помимо выбора оптимальной меры сходства для кластерной классификации важным оказалось соотношение степеней n_1 / n_2 , оптимальное значение которого находилось в диапазоне от 2 до 6. При значениях отношения $n_1 / n_2 < 2$ в классифицирующей функции возникали множественные ошибки типа «ложное срабатывание», при $n_1 / n_2 > 6$ в возникали множественные ошибки «пропуск цели».

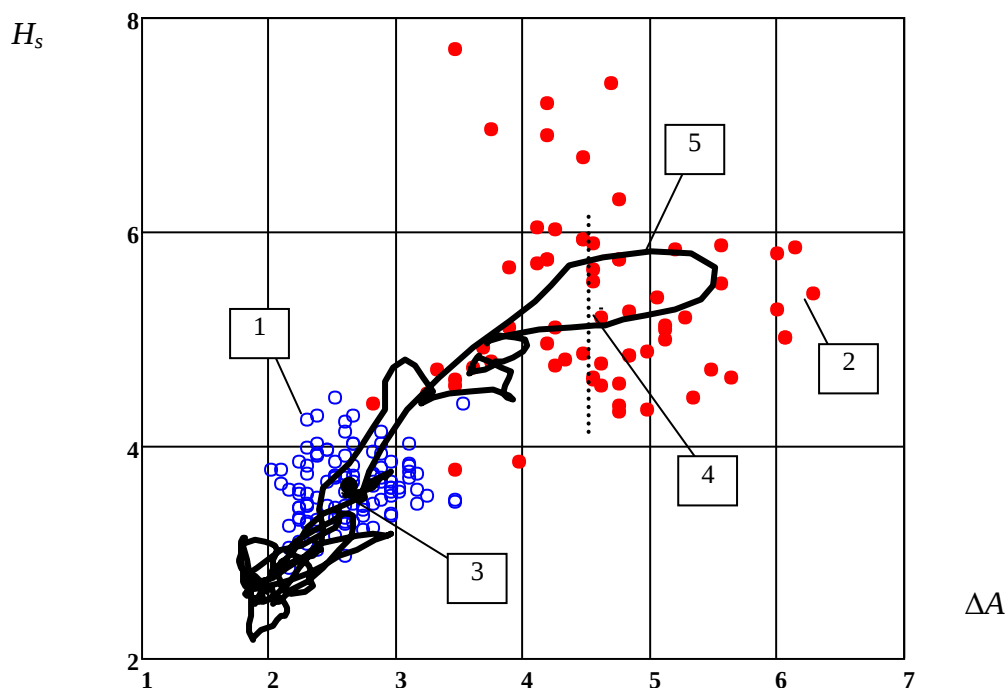


Рисунок 4.14. Поведение центроида C_K классифицируемого кластера: 1 – точки кластера Negative; 2 – точки кластера Positive; 3 – центроид C_N ; 4 – центроид C_P ; 5 – траектория центроида кластера C_K

То как происходит процесс классификации можно хорошо проиллюстрировать с помощью рис. 4.14. Здесь представлены кластеры Positive и Negative полученные по натурным данным. Точечными линиями показаны их центроиды. Признаковое пространство двухмерное, образовано двумя информативными параметрами H_s и ΔA . Оба признака нормированы на их С.К.О. При реальной классификации использовалось и большее количество параметров, но два параметра удобнее визуализировать.

Классифицируемый кластер не показан. Показано только как смещается его центроид C_k в процессе движения скользящего окна.

Хорошо видно, как в первоначально центроид классифицируемого кластера движется внутри кластера Negative. В какой-то момент он удаляется от него и приближается к кластеру Positive, а потом возвращается снова к кластеру Negative. Таким образом идентифицируются ситуации, когда георадар первоначально снимает кольцо где в заобделочном пространстве отсутствует полость, далее снимает кольцо, за которым полость присутствует. Третье снова оказывается кольцом с хорошим контактом.

Рисунок 4.15 показывает результаты применения кластерного анализа – представлена функция степенного расстояния $M_c(N_t)$, где N_t – номер трассы. Область, соответствующая наличию полости выделена пунктирным прямоугольником. Хорошо заметно что области наличия и отсутствия полости очень легко различаются по пороговому правилу. В области где нет полости функция практически прижата к нулю.

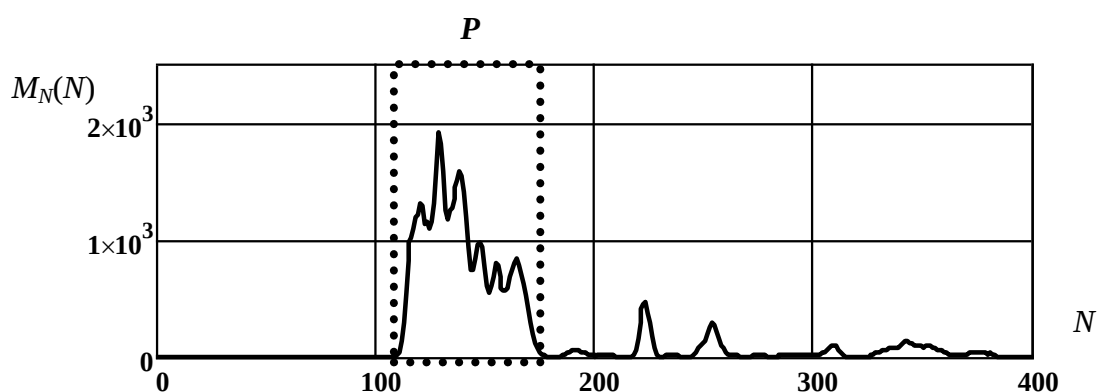


Рисунок 4.15. Пример функции кластерной классификации для неэталонного участка

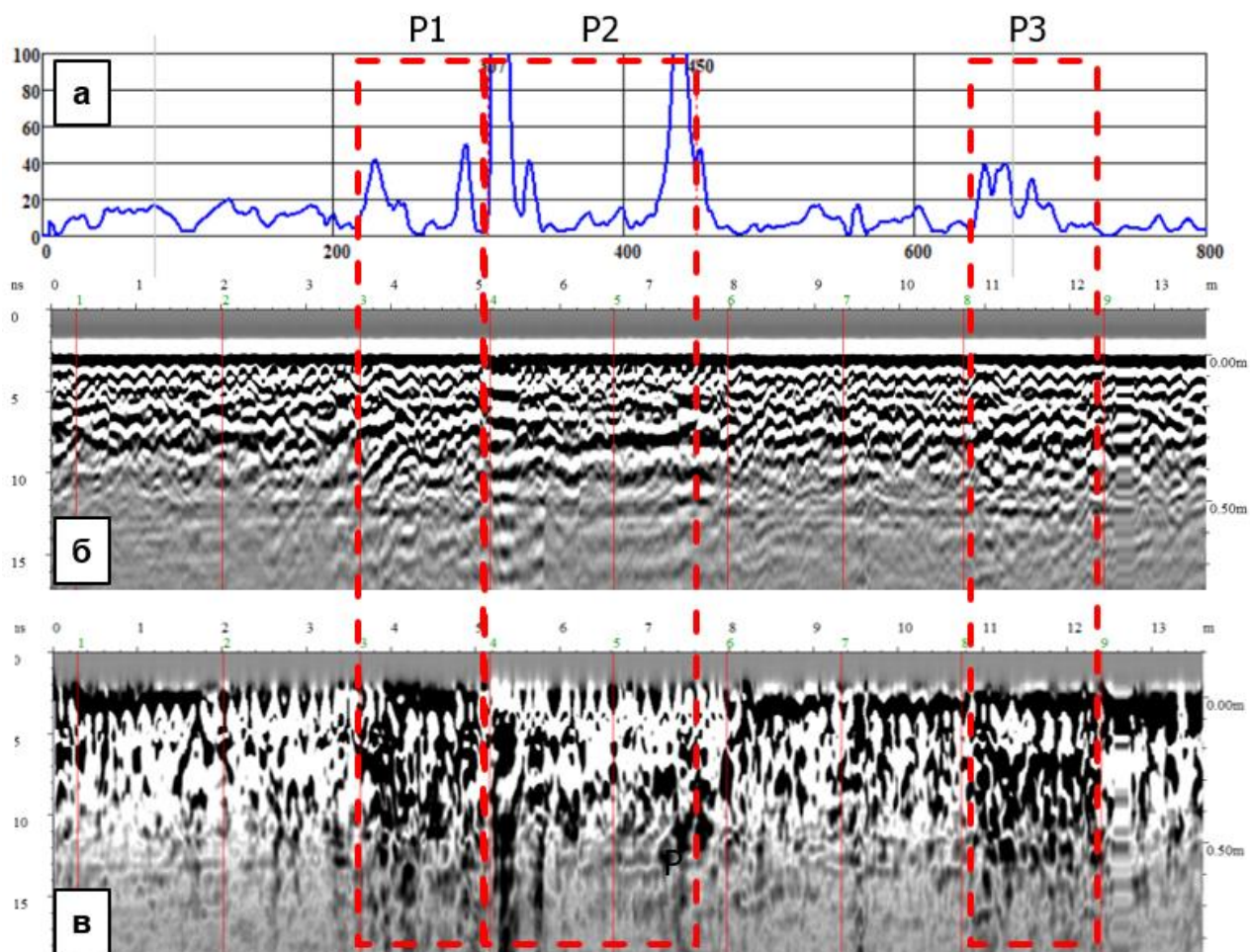


Рис. 4.16. Проблемный пример применения кластерной классификации: *а* – функция меры сходства с кластером $Negative M_c(x)$, *б* – исходная радарограмма, *в* – исходная радарограмма после применения преобразования Гильберта

Опробование этого метода классификации на различных объектах Московского Метрополитена показало, что в ряде случаев возникают ситуации пропуска цели. На рис. 4.16 представлен пример результатов, который позволяет показать причину, по которой это происходит. Рис. 4.16 *б* представляет собой исходную радарограмму, а рис. 4.16 *в* – та же радарограмма после применения преобразования Гильберта. Вертикальные пунктирными прямоугольниками и подписями P1, P2, P3 показаны зоны присутствия полостей.

Зона P3 достаточно хорошо видна после преобразования Гильберта. Также она хорошо просматривается на функции меры сходства $M_c(x)$. При опреде-

лённых соотношении степеней можно добиться ещё большей контрастности. Хуже видна зона Р1 – «звон» существенно слабее в ней выражен – при этом она всё-таки индицируется $M_c(x)$. По краям зоны Р2 присутствует два выброса $M_c(x)$, которые связаны с влиянием стыков между кольцами обделки. Однако между ними мера сходства не показывает присутствие аномалии, хотя в этом месте полость присутствует. Анализируя исходную радарограмму рис. 4.16 б можно понять в чём причина. Эта полость видна по изменению коэффициента отражения на границе «грунт-обделка», «звон» же здесь отсутствует.

Таким образом можно сделать вывод о том, что автоматизированное георадиолокационное выявление полостей за обделкой склонно к ситуации пропуска к цели. Это не закрывает возможности метода в целом – при интерпретации результатов съёмки оператором (человеком) такие ситуации вполне могут выявляться. Тем не менее в этом случае желательно всё-таки использование нескольких методов для выявления полости.

4.3. Отбор основных информативных параметров при сейсмоакустическом контроле заобделочного пространства

Для сейсмоакустического обследования также был произведён подбор наиболее эффективных информативных параметров. Они представлены в таблице 4.3.

Поскольку, как было указано выше, в случае наличия полости обделка ведёт себя как мембрана, это приводит к тому, что при наличии полости величина её колебаний увеличивается, а затухание снижается. Это позволяет использовать следующий ряд информативных параметров.

1. Группа динамических параметров. Одним из наиболее эффективных амплитудных критериев является энергетический параметр (энергия зарегистрированного отклика):

$$E_p = \sum_{i=0}^{n_{\max}} A_i^2 \cdot \Delta t, \quad (4.5)$$

где $n_{\max}$ – номер последнего отсчёта в записи отклика; A_i – i -ое значение сигнала; Δt – интервал дискретизации. Для большего удобства оперирования числами значение E_p нормировано на количество точек в сигнале и коэффициент 10^{14} . Проблемой энергетического параметра является его зависимость от силы и характера удара. Попытки использования оборудования с записью удара приводили либо к зашумлению результатов, либо к критическому усложнению методики измерения.

Таблица 4.3. Результаты опробования различных георадиолокационных информативных параметров

№	Группа	Информативный параметр	Комментарий	Рекомендации по включению в комплекс
1.1	Динамические	Энергия сигнала, E_p	Хорошая разделимость, возможны ошибки типа ложное срабатывание	Стоит включать в комплекс
1.2	Динамические	Максимальная амплитуда, $A_{\max}$	Сильная подверженность характеру удара	Не стоит включать в комплекс
2.1	Статистические	С.к.о., σ	Хорошая разделимость, но высокий коэффициент корреляции с E_p	Не стоит включать в комплекс
2.2	Статистические	Коэффициент асимметрии, Sk	Низкая разделимость	Не стоит включать в комплекс. Может быть индикатором искажённых откликов
2.3	Статистические	Коэффициент эксцесса, Ex	Хорошая разделимость, возможны ошибки типа ложное срабатывание	Стоит включать в комплекс
3.1	Спектральные	Q -фактор, Q	Нестабильность от участка к участку. Влияние изрезанности спектра.	Можно использовать в комплексе при положительных результатах опробования на ситуациях когда факт наличия либо отсутствие полости за обделкой известен
3.2	Спектральные	Частота спектрального максимума, $f_{\max}$	Нестабильность от участка к участку	Нестабильность от участка к участку. Можно использовать в комплексе при положительных результатах опробования на ситуациях когда факт наличия либо отсутствие полости за обделкой известен

Близкие к ней по смыслу параметры, оценивающие параметры амплитуды, либо подвержены существенным помеховым факторам (максимальная амплитуда), либо, по сути, близки по своему поведению к E_p (сумма абсолютных значений амплитуд сигнала, сумма амплитуд огибающих, дисперсия амплитуд), о чём говорит высокая корреляция между E_p и этими параметрами.

2. Отдельный интерес представляли статистические моменты законов распределения амплитуд. Если дисперсия характеризовалась высокой корреляцией с E_p , то коэффициент эксцесса E_x обладал промежуточными значениями корреляции (0.55 – 0.8), а также хорошей разделимостью ситуаций отсутствия и присутствия полостей.

Коэффициент асимметрии Sk фактически никак не указывал на наличие полостей. При этом в ряде случаев наблюдались ситуации, когда в сигнале появлялась выраженная высокоамплитудная низкочастотная компонента, существенно увеличивавшая энергию сигнала, но при этом являвшаяся результатом помеховых воздействий (соскальзывание датчика, удары по датчику в процессе неаккуратной съёмки). В этом случае асимметрия может указывать на некачественно снятые данные.

3. Группа спектральных параметров. В первую очередь исследовалась такая характеристика как Q -фактор:

$$Q = \frac{f_{\max}}{\Delta f}, \quad (4.6)$$

где $f_{\max}$ – частота максимума спектра, Δf – ширина резонансного пика взятого на уровне $A_f = 0.707$ от максимального значения амплитуд спектральных составляющих. В случае, если обделка совершает свободные колебания, в волновой форме проявляются гармонические компоненты, приводящие к формированию острого пика в спектре сигнала, что обуславливает рост параметра Q .

Главным достоинством параметра Q является слабая зависимость от силы удара, недостатком – подверженность помеховым факторам. Первичная практическая проверка параметра Q показала частые ситуации типа «ложное срабатывание». Причинами этих выбросов, в частности, являлись паразитные гармо-

нические компоненты сигнала, приводящие к возникновению в спектре сигнала пика, который оказывается выше по амплитуде, чем полезный пик. Фильтрация не решала эту проблему из-за близости спектра помехи к спектру полезного сигнала. Другой проблемой оказалось то, что сужение спектрального максимума (изменение Δf) в ряде случаев сочеталось с падением $f_{\max}$. При наличии полости не прижатая часть обделки становится мембраной, обладающей низкочастотными модами собственных колебаний, что снижает $f_{\max}$. Эти же колебания приводят к сужению максимума.

Наиболее существенной проблемой является высокая изрезанность спектра вблизи главного максимума. Рядом с основным максимумом могут наблюдаться несколько дополнительных. На некоторых из записей они могут оказаться выше основного максимума, что приводит к искажению оценки $f_{\max}$.

Корреляция этого параметра с другими обычно оказывается оптимальной, однако на результаты вычисления этого информативного признака может существенно влиять изрезанность спектра. Хорошим выходом здесь может быть использование для оценки Δf уровня A_f , отличного от уровня 0.707. В этих случаях хорошо работают более высокие значения. Появляющиеся на некоторых из записей дополнительные максимумы могут существенно изменять Δf и $f_{\max}$, что часто приводит к ошибкам при принятии решения. Снижение корреляции с уровня избыточных значений к оптимальным, может как раз вызываться влиянием помех.

Обобщая опыт работы с сейсмоакустическими информативными параметрами на натурных данных можно отметить наиболее существенную проблему, связанную с влиянием характера удара. Эту особенность можно показать на примерах, представленных на рисунке 4.17. Здесь даются значения ряда информативных параметров для ситуаций Positive и Negative.

Анализируя наиболее эффективные параметры такие как E_p и E_x (рис. 4.17 а и з) можно заметить, что ситуация Positive даёт более-менее стабильное значение, а при ситуации Negative параметр испытывает заметно большую дисперсию. При этом можно отметить точки, которые либо приближаются по сво-

им значениям к пороговым уровням Positive, либо переходят за этот порог. Ситуации с менее эффективными информативными параметрами f_{max} и A_{max} (рис. 4.17 б и в) ещё более ярко показывают это различие.

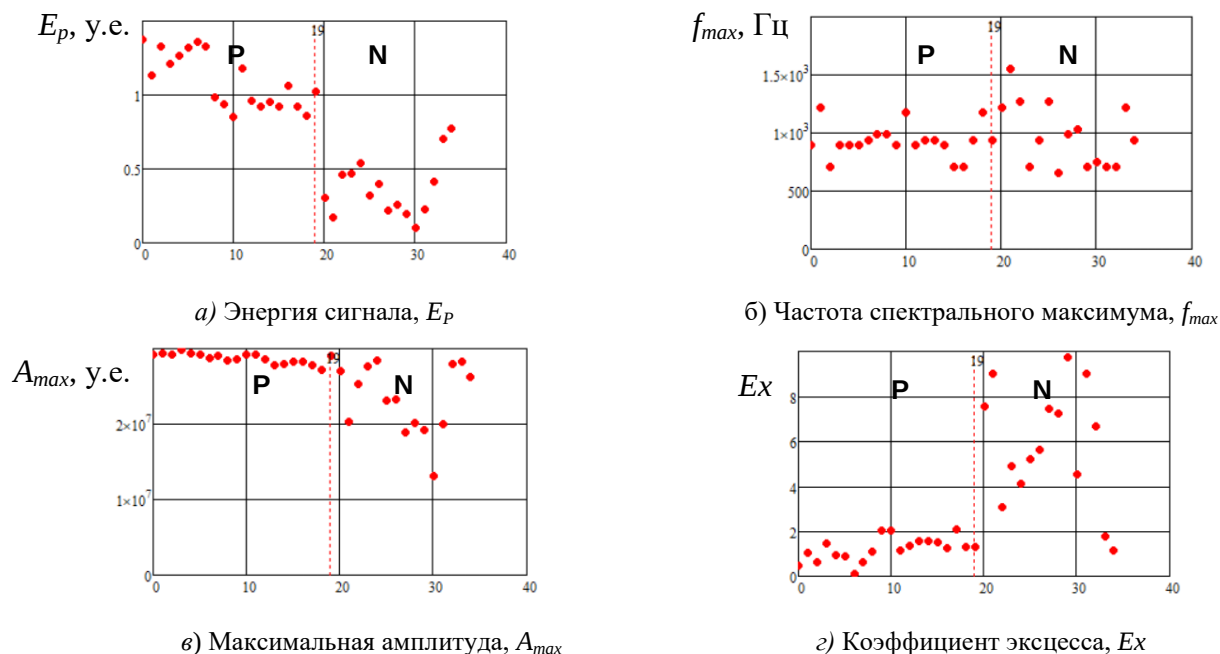


Рис. 4.17. Примеры поведения информативных параметров: а – энергия сигнала E_p ; б – частота спектрального максимума f_{max} ; в – максимальная амплитуда A_{max} , г – коэффициент эксцесса значений амплитуд сигнала γ . Ситуации наличия полости обозначены буквами Р, отсутствия буквами N

В случае наличия полости эти информативные параметры дают очень конкретное, слабо варьирующее значение – стабильное значение частоты и амплитуды не прижатого грунтом колеблющегося участка обделки. Зато в случае отсутствия полости информативный параметр фактически перестаёт работать из-за большого разброса. В этом случае на характер колебаний обделки очевидно существенным образом влияет особенности её возбуждения.

Непосредственно к рекомендациям по предобработке регистрируемых сигналов-откликов на ударное воздействие стоит отнести необходимость по возможности записывать отдельно реализации при возбуждении обделки (обычно подразумевается пять возбуждений с последующим усреднением). А при камеральной обработке просматривать эти реализации, отбраковывать не-

удачно записанные сигналы и производить усреднение только по корректно записанным откликам.

Если возможности для отдельной записи нет, допустимо в процессе съёмки контролировать как изменяется регистрируемая волна форма и переснимать точку в случае если результирующая волновая форма изменилась, поскольку наиболее существенно влияющие помеховые факторы довольно сильно на неё влияют. Характерными проблемными случаями являются сильно выраженные низкочастотные компоненты сигнала, часто возникающий при съёмке в нижних точках тоннеля. Возможно они связаны с соскальзыванием датчика при нанесении удара рядом с ним. Характерно также появление высокочастотного помехового сигнала.

При съёмке важно контролировать моменты задевания ударником и его штангой регистрирующей части комплекта (датчик и его досылочная штанга).

4.4. Подготовка образцовой и тестовой выборки

Для проведения исследования была составлена выборка значений признаков, соответствующих факту наличия либо отсутствия полости – Positive и Negative. Выборка составлена по результатам обработки съёмок, полученных на трех различных участках метрополитена. Ситуации наличия либо отсутствия полости подтверждались отзывами тампонажной команды (факт падения давления), ситуациями демонтажа обделки (разбор участков) и строительства (возведение конструкций станции).

Георадиолокационная съёмка позволяла получать множество трасс на одно, пересекаемое профилем на определённом уровне, кольцо обделки. На том же уровне сейсмоакустическое обследование давало только одну трассу. Это приводило к ситуации, когда множеству георадиолокационных признаков соответствовало только одно значение сейсмоакустического признака.

Это потребовало ввести следующую схему обработки георадарных данных. По полному объёму данных (несколько десятков трасс на кольцо) произ-

водился подбор параметров предварительной обработки трасс, позволяющий получить наибольшую интенсивность аномалии. Далее, в рамках трасс, соответствующих одному кольцу, вычислялось среднее значение признака.

Для распознавания случаев наличия либо отсутствия полости было отобрано 4 наиболее информативных признака: $H_{s,norm}$ (георадиолокация); Δf^1 (георадиолокация); E_p (сейсмоакустика); E_x (сейсмоакустика).

В процессе проведения работы, при объединении данных из нескольких участков в один набор, стало ясно что средний уровень информативного параметра H_s (георадиолокация) может существенно изменяться в зависимости от площадки на которой получены измерения. Это потребовало провести нормировку значения этого параметра следующим образом:

$$H_{s,norm} = \frac{H_s}{\sum_{i=1}^N H_{s,i}}, \quad (4.7)$$

где i – номер трассы в радарограмме, N – количество трасс в радарограмме.

Остальные параметры подобной корректировки не потребовали. Для удобства каждый из этих параметров в последующем описании исследования будет обозначаться буквами:

A – $H_{s,norm}$ (георадиолокация);

B – Δf^1 (георадиолокация);

C – E (сейсмоакустика);

D – E_x (сейсмоакустика).

При составлении образцовой выборки были подобраны оптимальные значения предварительной обработки исходных данных, позволившие получить наиболее высокие (из возможных) значения интенсивности аномалии и надёжности разделения.

Также по ряду площадок была составлена тестовая выборка, представленная тем же набором информативных параметров. Для тестовой выборки также был известен факт наличия либо отсутствия полости за обделкой. С помощью этой выборки предполагалась реализация оценки того как комплекс

информативных параметров, а также метод распознавания, справляются с задачей выявления ситуации наличия либо отсутствие полости.

Выводы, сделанные в четвёртой главе, также проверялись при обследованиях, произведённых на физической модели (использовалось кольцо обделки, горизонтально вкопанное в грунт с организацией полостей за кольцом), с участием автора. В целом существенных расхождений с выводами физического моделирования не наблюдалось.

Выводы по четвёртой главе

Основой четвёртой главы стала работа с информативными параметрами, направленная на повышение их чувствительности и помехозащищённости при выявлении полостей в заобделочном пространстве. Это позволило:

- на основании эмпирического материала полученного в тоннелях Московского метрополитена опробовать различные варианты информативных параметров выбрать наиболее оптимальные из них;
- выявить особенности предварительной обработки данных, а также предложить критерии, на основании которых можно принимать решение о параметрах этой обработки;
- собрать по ряду участков для которых известно расположение полостей образцовые и тестовые выборки, необходимые для разработки и опробования системы принятия решений.

Материалы этой части исследования опубликованы в следующих статьях: [313, 314, 315, 316, 317, 318, 253, 254, 255, 256, 257].

Глава 5. Разработка и особенности применения комплексного геофизического метода обнаружения полостей в заобделочном пространстве

Завершающая глава исследования посвящена вопросам непосредственно самого комплексирования, под которым подразумевается объединение в комплекс различных информативных параметров, полученных при обработке данных, полученных с помощью геофизических методов.

Первоначально ставится проблема обоснованности тех или иных комплексов информативных параметров с точки зрения теории информации. Подразумевается, что используемые методы и комплексы параметров должны обеспечивать достаточную и необходимую определённую вывод о наличии полости в заобделочном пространстве. Предлагаются способы оценки определённости вывода, в основе которых лежит понятие информационной эффективности.

Непосредственно само принятие решения о наличии полости предполагается реализовывать с помощью Байесовской классификации. В процессе ведения исследования предлагаются методически решения по получению оценок априорных и апостериорных вероятностей и их функций, необходимых для классификации, предлагаются оптимальные параметры классификации.

5.1. Особенности воздействия помеховых факторов на комплексы признаков

Одним из первых решений, которое нужно принять при разработке комплексного метода является решение о том какие информативные параметры будут входить в этот комплекс. В качестве характеристики, которая могла бы позволить принимать это решение, мог бы выступить коэффициент корреляции Пирсона R . Так, например, слишком высокие значения R указывали бы на то что в комплекс включается одинаково действующие информативные парамет-

ры. По сути дела, это означало бы, что в комплекс включаются величины одинаково подвержены одним и тем же помеховым факторам. Это усиливало бы зависимость комплекса от погрешностей. А также в меньшей степени реализовывало бы принцип, когда ошибки одних информативных параметров компенсируют ошибки других. Слишком низкие значения корреляции указывали бы на то что информативные параметры по-разному реагируют на аномалию, а значит не смогут совместно её подчёркивать.

В этой ситуации стоило бы задаться некими пороговыми значениями R и на основании этого принимать решение о включении информативных параметров комплекс. Однако у особенностей поведения R есть негативные особенности о которых стоит поговорить отдельно.

Для этого зададим два класса P (Positive – полость присутствует) и N (Negative – полость отсутствует). Выберем два признака x и y , и посмотрим, как на корреляцию между ними будут влиять погрешности, возникающие при измерениях.

Предположим, что признаки распределены нормально, а их дисперсии σ_x^2 и σ_y^2 состоят из двух компонент – дисперсии самого признака σ_{x1}^2 , σ_{y1}^2 и дисперсии, вызванной помеховыми факторами σ_{xe}^2 , σ_{ye}^2 . Тогда:

$$\sigma_x^2 = \sigma_{x1}^2 + \sigma_{xe}^2 \text{ и } \sigma_y^2 = \sigma_{y1}^2 + \sigma_{ye}^2. \quad (5.1)$$

Тогда корреляция между признаками будет определяться следующим выражением [319]:

$$R_{xy} = \frac{R_{x1y1} \cdot \sigma_{x1}^2 \cdot \sigma_{y1}^2 + R_{xe ye} \cdot \sigma_{xe}^2 \cdot \sigma_{ye}^2}{\sqrt{(\sigma_{x1}^2 + \sigma_{xe}^2) \cdot (\sigma_{y1}^2 + \sigma_{ye}^2)}}, \quad (5.2)$$

где R_{xy} – коэффициент корреляции между признаками с учётом погрешностей, R_{x1y1} – коэффициент корреляции между признаками без учёта погрешностей, $R_{xe ye}$ – коэффициент корреляции между помеховыми факторами.

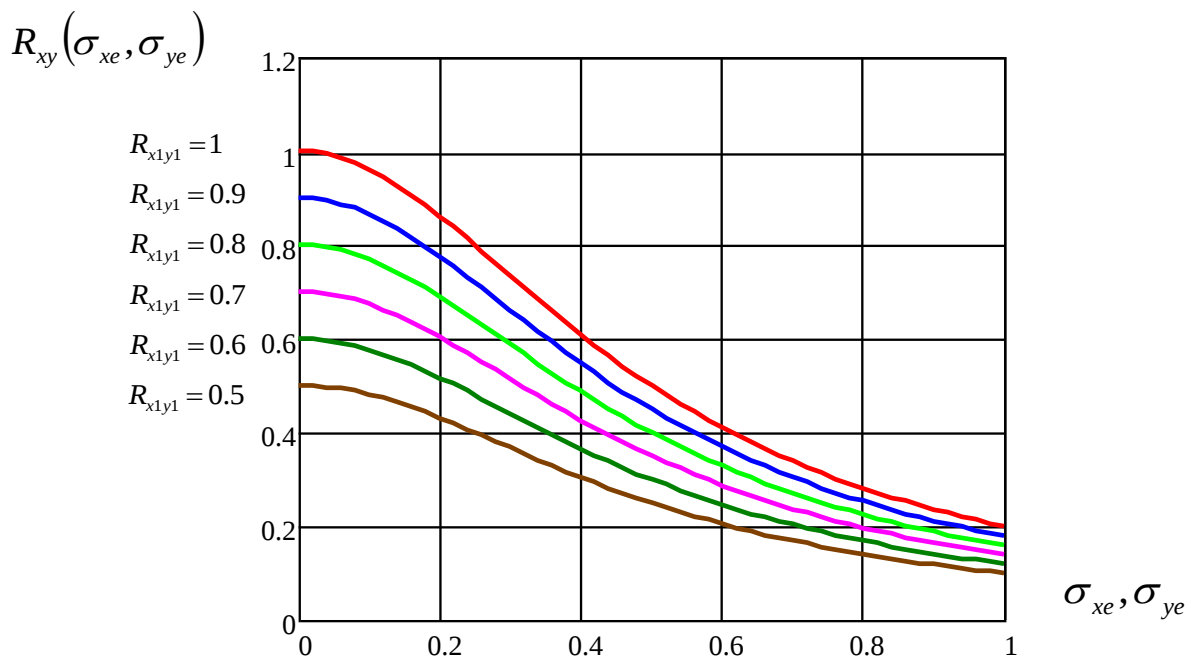


Рисунок 5.1. Семейство графиков, соответствующих $R_{xeye} = 0$.

Введём допущения что параметры и их ошибки не коррелированы, а дисперсии, вызванные помеховыми факторами, равны для первого и второго признаков $\sigma_{xe}^2 = \sigma_{ye}^2$.

Проанализируем то, как величина помех влияет на корреляцию между признаками. При этом разберём два случая – когда помеховые факторы не коррелируют ($R_{xeye} = 0$), и когда они обладают высокой корреляцией ($R_{xeye} = 1$). Графики $R_{xy}(\sigma_{xe}, \sigma_{ye})$ для случая $R_{xeye} = 0$ представлены на рисунке 5.1, для случая $R_{xeye} = 1$ на рисунке 5.2. Изменение корреляции между самими признаками (без учёта помех) R_{x1y1} дано как семейство графиков.

Анализируя графики рисунка 5.1 можно отметить, что увеличение погрешностей измеряемых признаков разрывает связь R_{xy} между ними, в случае если помеховые факторы не коррелируют. Этот эффект уменьшения корреляции особенно хорошо заметен при высокой корреляции между признаками $R_{x1y1} = 1$.

$$R_{xy}(\sigma_{xe}, \sigma_{ye})$$

$$R_{x1y1} = 1$$

$$R_{x1y1} = 0.9$$

$$R_{x1y1} = 0.8$$

$$R_{x1y1} = 0.7$$

$$R_{x1y1} = 0.6$$

$$R_{x1y1} = 0.5$$

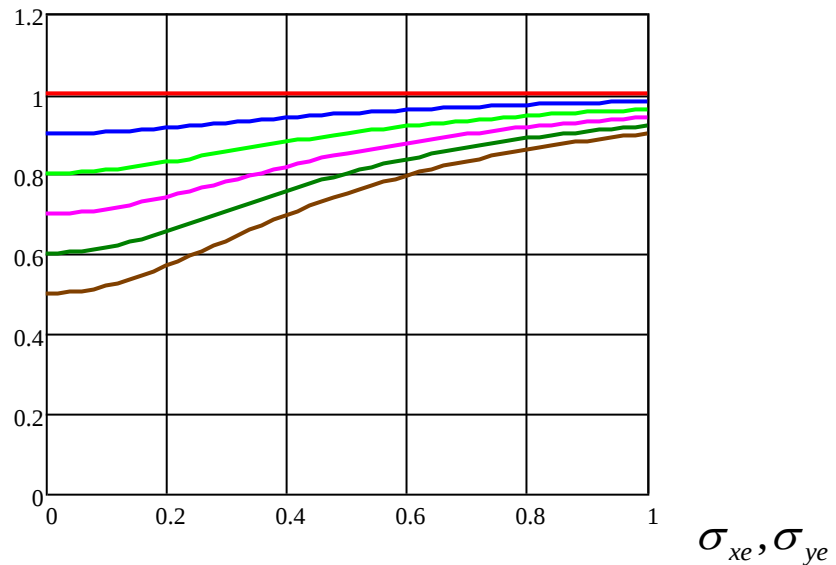


Рисунок 5.2. Семейство графиков, соответствующих $R_{xeye} = 1$.

Анализ графика рисунка 5.2 показывает другое поведение. В случае если помеховые факторы коррелируют хорошо, $R_{xeye} = 1$, увеличение помех увеличивает связь R_{xy} между признаками. Очевидно, что таким образом у обоих признаков соизменчивость возрастает, а значит с большей вероятностью будет принято решение о, например, наличии полости. Однако это решение трудно назвать достоверным, поскольку соизменчивое поведение признаков возникает, в том числе, и за счёт соизменчивости помех. Фактически речь в этом случае идёт о влиянии ложной корреляции.

Очевидно, что ситуации, когда погрешности двух различных признаков будут обладать высокой корреляцией с большей вероятностью будут наблюдаться, в случае если признаки будут результатом обработки результатов съёмки одного и того же метода. Поэтому предпочтительным решением является использование признаков различных методов.

При этом нельзя полностью отрицать эффективность использования различных признаков, полученных при съёмке одним методом, поскольку в этом

случае признаки могут выделять различные особенности зарегистрированных сигналов и таким образом увеличивать информативность комплекса.

Таким образом, поскольку корреляция не всегда даёт возможность оценить какие признаки могут создавать наиболее информативные комплексы, рассмотрим так же такой критерий как информационная эффективность признаков и комплексов признаков.

5.2. Использование коэффициента информационной эффективности при составлении комплексов

Одной из неразработанных проблем контроля полостей в заобделочном пространстве является оценка информационной эффективности и необходимости производимого контроля. Очевидно, что в случае если ситуация с наличием полостей является высоко определённой (например, на участке недавно построенной линии вероятность наличия протяжённых опасных полостей может быть достаточно низкой), в этом случае сложный контроль, подразумевающий использование нескольких методов и извлечение большого объёма информативных параметров из результатов съёмки, в меньшей степени необходим, чем в случае если ситуация имеет меньшую определённость.

Этот вопрос имеет как экономическую, так и технологическую специфику. Большой объём методов требует более существенных временных, людских, финансовых затрат при работе в тоннелях. Большой объём вычислений, который потребуется при работе с комплексом информативных параметров, а также большая нагрузка на специалиста, которому необходимо принимать решение о тех или иных настройках при оптимальной предварительной обработке данных, также увеличивают объём затрат, связанный с камеральной обработкой.

В связи с этим желательно разработать определённый подход, который позволит оценивать:

- исходную неопределённость вывода о наличии полости;

– информационный вклад, который вносит применение геофизического контроля;

– остаточную, т.е. реализующуюся после применения контроля, неопределённость вывода о наличии полости.

И на основании этих оценок принимать решение о количестве используемых методов, а также о количестве признаков, используемых в комплексе.

В основу подобного подхода можно положить основные понятия теории информации. Первоначально определим два основных значения неопределённости (энтропии), возникающей при решении задачи контроля.

1. Под априорной энтропией $H(w)$ будем понимать характеристику неопределённости, которая возникает за счёт собственно самого наличия полостей. Другими словами, если бы технолог вскрывал все тубинги тоннеля, он каждый раз обнаруживал бы полость с вероятностью $P(w_p)$. В соответствии с определением энтропии в рамках теории информации априорная энтропия будет:

$$\begin{aligned} H(w) &= - \sum_{i=1}^N P(w_i) \log_2 P(w_i) = \\ &= -P(w_p) \log_2 P(w_p) - (1 - P(w_p)) \log_2 (1 - P(w_p)) \end{aligned} \quad (5.3)$$

где N – количество состояний ($N = 2$ – наличие полости и отсутствие полости), $P(w_p)$ – априорная вероятность присутствия полости в заобделочном пространстве.

Вероятность $P(w_p)$ неизвестна обследователю, однако допустимо задаться её оценочным уровнем, оперевшись на типичную распространённость полостей, оцененную за длительный период измерений в тоннелях Московского метрополитена. Этому вопросу посвящена глава 5.3.

Таким образом, на локальном участке тоннеля принимается неопределённость $H(w)$ характерная для множества тоннелей по всему метрополитену. Эту неопределённость можно снизить, используя результаты съёмки различными методами контроля.

2. Отдельный вопрос состоит в том, до какого уровня необходимо снижать $H(w)$. Эту границу задаёт так называемая допустимая энтропия H_D , которую можно определить через допустимую ошибку P_e (выявления полости):

$$H_D(w) = -P_D(\text{Log}_2 P_D) - (1 - P_D)P_i(\text{Log}_2(1 - P_D)). \quad (5.4)$$

Поскольку задача процедур контроля состоит в том, чтобы априорную энтропию снизить до уровня допустимой, процедуры контроля имеют смысл, если выполняется неравенство:

$$H_D(w) < H(w). \quad (5.5)$$

Введём ещё два понятия. Необходимость контроля N и эффективность контроля $\mathcal{E}$. Необходимость контроля будем оценивать с помощью коэффициента необходимости контроля N :

$$N = \frac{H(w) - H_D}{H(w)}. \quad (5.6)$$

А эффективность с помощью коэффициента эффективности контроля $\mathcal{E}$:

$$\mathcal{E} = \frac{H(w) - \bar{H}(w|x)}{H(w)}, \quad (5.7)$$

где $\bar{H}(w|x)$ – апостериорная энтропия, соответствующая также понятию полной условной энтропии [320, 321].

Фактически $\bar{H}(w|x)$ это уровень неопределённости, наблюдающийся применения процедур контроля. Если $H(w)$ это исходная неопределённость до процедур контроля, а $\bar{H}(w|x)$ это неопределённость после применения процедур контроля, выражение $H(w) - \bar{H}(w|x) = I$ фактически описывает количество информации, полученной при измерениях.

Тогда эффективность – это количество полученной информации, нормированное на априорную энтропию. Необходимость контроля N , очевидно, показывает какое количество информации (нормированной на априорную энтропию) нужно для того, чтобы в результате процедур контроля уменьшить уро-

вень неопределённости до допустимого. N существует в пределах от $-\infty$ до 1. Значение $N < 0$ говорит о том, что контроль можно не проводить.

В обоих случаях расчёта $\mathcal{E}$ и N (выражения (5.6) и (5.7)) реализуется нормировка на априорную энтропию, что сделано для того, чтобы не зависеть от уровня исходной неопределённости (энтропии). Для различных объектов контроля будет различен уровень исходной неопределённости, измеряемый, например, в битах. Этот уровень может быть выше либо ниже, вместе с ним может меняться и уровень допустимой энтропии.

Стоит также отметить, что в числителе обеих дробей в выражениях (5.6) и (5.7) присутствует количество информации. В случае необходимости контроля N это то количество информации, которое недостает для принятия надёжного решения. В случае оценки эффективности контроля $\mathcal{E}$ – это то количество информации, которое способны принести процедуры контроля (то есть проведение измерений с помощью геофизических методов). Эти значения должны быть соразмерны исходной априорной энтропии.

Эффективность контроля $\mathcal{E}$ показывает, какое количество нормированной информации может дать применение метода или комплекса методов. Эффективность контроля должна быть не меньше необходимости контроля $\mathcal{E} \geq N$, что приводит к неравенствам:

$$\frac{H(w) - \bar{H}(w|x)}{H(w)} \geq \frac{H(w) - H_d}{H(w)}, \quad (5.8)$$

$$\bar{H}(w|x) \leq H_d. \quad (5.9)$$

Другими словами, уровень неопределённости относительно вывода о наличии либо отсутствии полости за обделкой после процедур контроля должен быть равен допустимому, либо ниже него.

Эти особенности можно проиллюстрировать с помощью схемы, представленной на рисунке 5.3. Рисунок 5.3 а показывает ситуацию до процедуры контроля. Существует предварительная (априорная) оценка неопределённости при принятии решения о наличии полости. Например, это может быть неопределённость, вычисленная через среднюю по всему метрополитену вероятность

встретить полость (выражение 5.3). Подобная средняя неопределённость не способна указывать в каком состоянии находится конкретное кольцо выработки. Т.е. этот уровень неопределённости является слишком высоким.

Также существует некий допустимый уровень неопределённости, который нужно достичь в процессе применения процедур контроля на локальном участке метрополитена, применяя геофизические методы.

Ситуация после применения контроля представлена на рисунке 5.1 б. После применения контроля неопределённость уменьшилась до уровня апостериорной энтропии $\bar{H}(w|x)$.

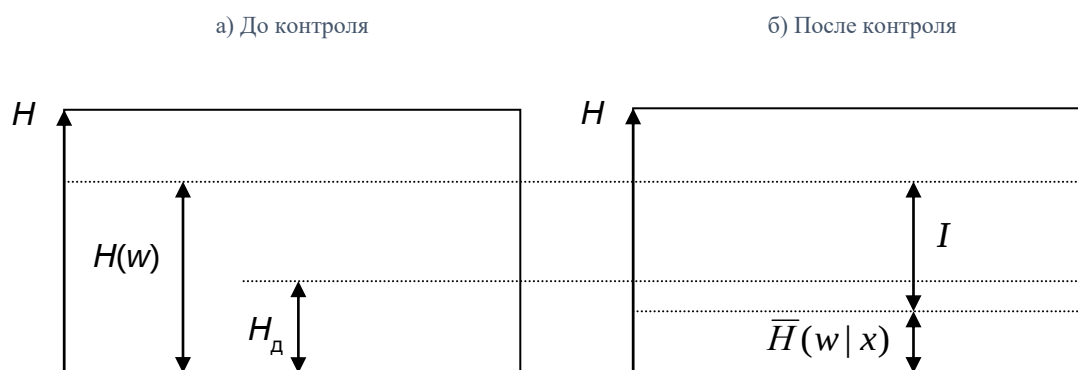


Рисунок 5.3. Изменения уровня неопределённости в процессе проведения контроля

Это снижение уровня неопределённости произошло из-за применения геофизического метода. На рисунке показано что апостериорная (связанная с опытом, то есть с процессом контроля) энтропия ниже уровня допустимой энтропии, в противном случае контроль нужно признать неэффективным. Очевидно, что разница между априорной апостериорной энтропией это есть количество информации $H(w) - \bar{H}(w|x) = I$, полученной в результате контроля.

Стоит отметить, что при вычислении Э для различных вариантов комплексов информативных признаков выражение (5.9) позволит выбирать комплексы, соответствующие решаемой задаче. Очевидными способами повыше-

ния Э являются подбор оптимального количества параметров и выбор, какие параметры, каких методов будут составлять комплекс.

В соответствии с (5.7) для расчёта Э комплекса нужно задаться априорной энтропией $H(w)$ и рассчитать полную условную энтропию $\bar{H}(w|x)$.

$$\bar{H}(w|x) = \int p(x) \cdot H(w|x) dx \quad (5.10)$$

где $H(w|x)$ – частная условная энтропия. Частная условная энтропия может быть вычислена с помощью апостериорных условных плотностей вероятностей $P(w_p|x)$ и $P(w_N|x)$ полученных для случаев наличия (Р) либо отсутствия (N) полостей. Эти плотности вероятности можно получить по эмпирическим данным, снятым на участках, где состояние заобделочного пространство известно. Эти особенности изложены в главе 5.4. Непосредственно сама частная условная энтропия может быть вычислена следующим образом:

$$H(w|x) = -P(w_N|x) \log_2 P(w_N|x) - P(w_p|x) \log_2 P(w_p|x). \quad (5.11)$$

Апостериорные вероятности $P(w_p|x)$ и $P(w_N|x)$ для случаев наличия либо отсутствия полости [322] могут быть вычислены следующим образом:

$$P(w_N|x) = \frac{P(w_N) \cdot p(x|w_N)}{p(x)}, \quad P(w_p|x) = \frac{P(w_p) \cdot p(x|w_p)}{p(x)}, \quad (5.12)$$

$$p(x) = P(w_N) \cdot p(x|w_N) + P(w_p) \cdot p(x|w_p). \quad (5.13)$$

где $p(x)$ – плотность вероятностей значений информативного параметра, $p(x|w_p)$, $p(x|w_N)$ – условные плотности вероятностей значений информативного параметра при наличии и отсутствии полости соответственно.

Тогда, подставляя (5.12) в (5.11) и (5.11) в (5.10) можно получить следующее выражение:

$$\bar{H}(w|x) = - \int \left[\begin{aligned} &P(w_p) \cdot p(x|w_p) \cdot \log \frac{P(w_p) \cdot p(x|w_p)}{p(x)} + \\ &+ P(w_N) \cdot p(x|w_N) \cdot \log \frac{P(w_N) \cdot p(x|w_N)}{p(x)} \end{aligned} \right] dx. \quad (5.14)$$

Отдельным вопросом является оценка плотностей вероятности распределения признака по результатам измерений.

Таким образом, опираясь на (5.14) и (5.7) и оценив уровень априорной вероятности можно получить значения $\mathcal{E}$ для каждого сочетания информативных параметров. При этом необходимо будет установить уровень априорной энтропии на участке обследования, а также получить апостериорные вероятности для случаев наличия либо отсутствия полости на образцовой выборке, которая может быть получена при измерениях на площадках, где расположение полостей было известно.

Достоинство применения коэффициента информационной эффективности контроля $\mathcal{E}$ состоит в том, что он позволяет оценивать необходимый и достаточный объём информации, который должна принести в ситуацию процедура контроля.

Поскольку $\mathcal{E}$ определяется также уровнем априорной энтропии для тех или иных участков можно будет обосновывать применение различных комплексов. Так в случае участка с низкой априорной энтропией $H(w)$ достаточно будет применение одного геофизического метода с небольшим количеством информативных параметров, что позволит сэкономить финансы и время. В случае высокой априорной энтропией $H(w)$ количество геофизических методов и объём комплекса необходимо будет расширять.

Вопросам определения априорной энтропии на локальных участках метрополитена, а также оценки полной условной энтропии посвящены последующие главы.

5.3. Эмпирическая оценка величины априорной вероятности наличия полости от времени эксплуатации тоннеля

Для оценки информационной эффективности применяемого комплекса признаков и выбора какие признаки должны составлять комплекс необходимо опереться на оценку априорной энтропии, которую можно вычислить по ре-

зультатам измерений, производившихся в тоннелях Московского метрополитена. Для этого достаточно вычислить вероятности наблюдения полостей в заобделочном пространстве.

Поскольку прямая оценка в тоннелях метрополитена предоставляет довольно ограниченную эмпирическую базу, было принято решение использовать результаты массовых сейсмоакустических измерений. Для вычисления априорной энтропии использовалась частота встречаемости полостей K_{Π} :

$$K_{\Pi} = N_p / L, [1/\text{м}],$$

где N_p – количество точек, в которых принято решение о наличии полости, L – длина участка тоннеля, на котором производилось обследование, м.

При использовавшихся параметрах съёмки «5 точек на кольцо, расстояние между кольцами 5 м» одна точка приходится на один погонными метр тоннеля. Таким образом, значение $K_{\Pi} = 0.01 \text{ м}^{-1}$ означает, что на участке тоннеля в 100 м встретилась 1 точка с выявленной полостью.

Если ввести понятие плотности съёмки $d = N / L$, где N – количество всех точек съёмки, можно вычислить вероятность встретить полость, которую можно использовать как оценку априорной вероятности наблюдения полости $P(w_p)$. При этом: $P(w_p) = K_{\Pi} / d = N_p / N$.

Данные по десяткам участков были собраны в единую базу, в которой также была прописана дополнительная информация – тип обделки (чугун, бетон), год возведения, дата обследования, время эксплуатации. Геологическое строение участка не указывалось в связи с недоступностью этих данных. Основным требованием работодателя была возможность использовать данные в исследованиях без указания, на каких участках они были получены. Поэтому из вышеописанной базы информация о расположении участков исключена.

Объёмы выборок, используемых для вычисления каждой вероятности, составляли минимум 30 точек (30-метровые участки). При этом типичное значение объёма выборки порядка 100 точек.

Одним из самых сильных предикторов является время эксплуатации выработки t , лет. На рисунке 5.4 представлена диаграмма рассеяния для случая K

– зависимая переменная, t – независимая. Дана также линия линейной аппроксимации, описываемая уравнением:

$$K_{\Pi} = 0.0134 + 0.0008 t. \quad (5.15)$$

Или

$$P(w_P) = 1/d (0.0134 + 0.0008 t). \quad (5.16)$$

Коэффициент линейной корреляции для полученного облака составил $R = 0,63$. Объём выборки – 45 элементов. Корреляция является статистически значимой (проверка по критерию Фишера при уровне значимости $p = 0.001$).

Существенный разброс относительно линии регрессии реализуется в основном за счёт отклонения значений K_{Π} в область больших значений. Корреляция $R = 0,63$ говорит о том, что в модели учтены не все существенно влияющие факторы. Вполне возможно, что именно геологические особенности на локальном участке (наличие карстов, речных врезов), либо особенности эксплуатации, особенности строительства также влияют на образование полостей. Однако время эксплуатации выработки является одним из наиболее существенных факторов. Попытки построить трёхмерные модели по доступным данным (например, включающие тип обделки) очень слабо повышали коэффициент корреляции.

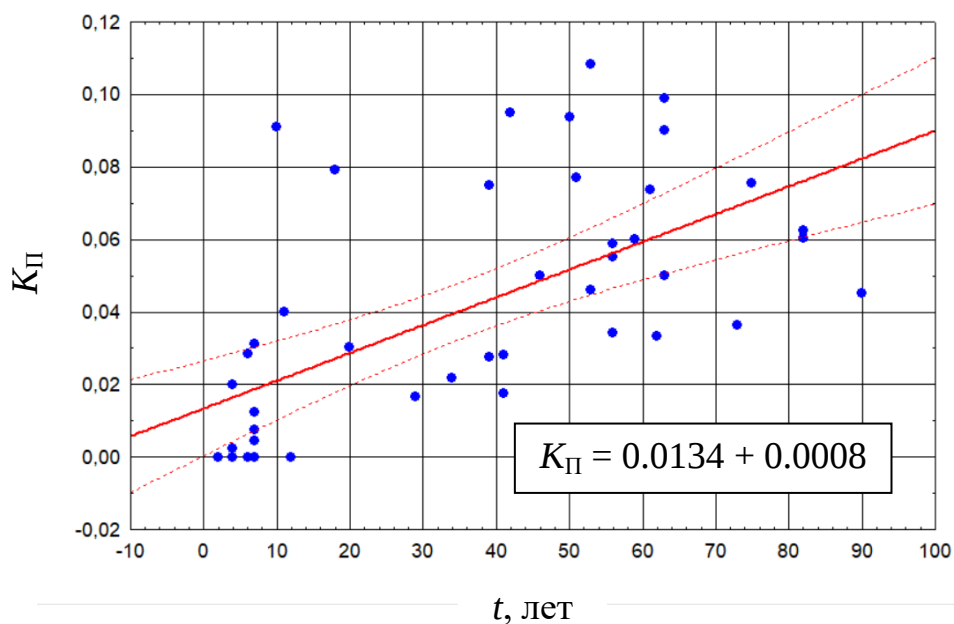


Рис. 5.4. Диаграмма рассеяния и линия аппроксимации $K(t)$

На рисунке 4.5 так же пунктирными линиями дан доверительный интервал (область, в рамках которой линия регрессии, при получении её по другим выборкам, должна располагаться с 95% вероятностью). Полученное уравнение позволяет задаться оценкой априорной вероятности наблюдения полости. Учитывая низкую корреляцию и большой разброс точек вокруг аппроксимирующей линии полученное уравнение нельзя использовать для принятия решения об аварийности выработок. Однако её можно использовать как основу для оценки априорной энтропии, что позволит оценить такие аспекты комплекса как его эффективность и необходимость.

Анализ полученного облака рассеяния позволяют выделить два кластера в полученных данных. Первый присутствует в диапазоне $t = 30 \dots 90$ лет и представляет собой время активного строительства метро в СССР. Среднее значение K_{Π} для этого диапазона составляет 0.057 м^{-1} ($P(w_P) = 0.057$). Второй диапазон времён характеризуется отрезком времени от настоящего времени до $t = 20$ лет и представляет собой время активного строительства метро, наблюдающегося в последнее время. Среднее значение K_{Π} для второго диапазона составляет 0.018 м^{-1} ($P(w_P) = 0.018$).

Таким образом, по большому объёму геофизических наблюдений была получена оценка априорной вероятности наблюдения полости $P(w_P)$, которые можно использовать для оценок информационной эффективности комплексов Э. Для более точной оценки $P(w_P)$ можно также использовать выражение 5.16. Эти результаты позволили сформулировать четвёртое научное положение.

5.4. Оценка плотностей вероятности по результатам геофизических измерений

Отдельным вопросом является оценка плотностей вероятности распределения признака $p(x|w_P)$, $p(x|w_N)$ и $p(x)$ по результатам измерений. Эти функции могут быть использованы как для оценки информационной эффективности, так и непосредственно самого принятия решения о наличии полости.

Если георадиолокационные измерения позволяют получать достаточно большой объём данных на участках с известным расположением полостей, то сейсмоакустическое обследование позволяет собирать только ограниченные выборки. Также стоит отметить, что плотности вероятности, вычисляемые по результатам обработки обычно имеют сложную форму, которую трудно описать моделью нормального распределения. В результате параметрические методы не подходят для оценок плотностей вероятностей признака и его условных вариантов. Хорошим решением здесь будет построение плотностей вероятности методом ядерной оценки плотности [323]. В иностранной литературе этот подход также известен как Kernel density estimation (KDE) или метод окна Парзена-Розенблатта.

Основной принцип этого подхода состоит в том, что каждое измерение представляется в виде ядерной функции, в качестве которой чаще всего используют гауссову кривую. Полученные таким образом нормальные ядра суммируют. Искомый закон распределения является результатом этой суммации.

Ключевым параметром ядра является сглаживающий параметр h , также называемый шириной полосы, либо шириной окна. При слишком малой ширине окна h получаемый закон распределения окажется недостаточно сглаженным, и функция будет испытывать резкие выбросы, подверженные влиянию случайных факторов. При слишком большой h , закон оказывается избыточно сглаженным, что приведёт к потере его особенностей.

Если в качестве ядра используется нормальная (Гауссова) функция оптимальным значением ширины окна будет:

$$h = \sigma_s \left(\frac{4}{3n} \right)^{1/5}, \quad (5.17)$$

где σ_s – с.к.о. исходной выборки, n – объём исходной выборки [324]. Ядро Епанечникова является наиболее оптимальным с точки зрения среднеквадратичной ошибки, однако нормальное и другие ядра относительно мало проигрывают по этому параметру. Поэтому используют нормальные ядра, как более удобные при вычислениях.

Таким образом, закон распределения с помощью ядерной оценки плотности можно получить с помощью следующего выражения:

$$p(x) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{h} k \left[\frac{x - x_i}{h} \right], \quad (5.18)$$

где k – ядерная функция, а выражение $\frac{1}{h} k \left[\frac{x - x_i}{h} \right]$ называют взвешенным ядром.

Нормальное взвешенное ядро выглядит следующим образом:

$$\frac{1}{h} k \left[\frac{x - x_i}{h} \right] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}h} \exp \left(-\frac{(x - x_i)^2}{2h^2} \right). \quad (5.19)$$

В этом выражении x_i (единичное измеренное значение) соответствует центру симметрии гауссовой функции, а ширина окна h соответствует масштабу нормального ядра. Каждое единичное измерение формирует своё собственное нормальное ядро. В соответствии с (5.18) сумма этих сформированных отдельными измерениями ядер даёт закон распределения случайной величины.

В случае если речь идёт о получении условных плотностей вероятности:

$$p(x | w_P) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{h} k \left[\frac{x - x_{iP}}{h} \right], \quad p(x | w_N) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{h} k \left[\frac{x - x_{iN}}{h} \right], \quad (5.20)$$

где x_{iP} и x_{iN} значения параметра x для выборок, соответствующих ситуациям наличия и отсутствия полости соответственно.

Представленные выражения описывают одномерные плотности вероятности, связанные с поведением одного единственного признака. Однако ядерная оценка плотности легко расширяется на получение многомерных плотностей вероятности, подразумевающих описание поведения комплексов признаков.

В процессе работы с эмпирическим материалом, была составлена образцовая выборка, которая являлась результатом обобщения данных с различных участков обследования московского метрополитена. Специфика подготовки этой выборки описана в главе 4.4.

К этой выборке была применена методика ядерной оценки плотности вероятности. Все расчёты сделаны для уровня априорной вероятности присутствия полости $P(w_P) = 0.05$.

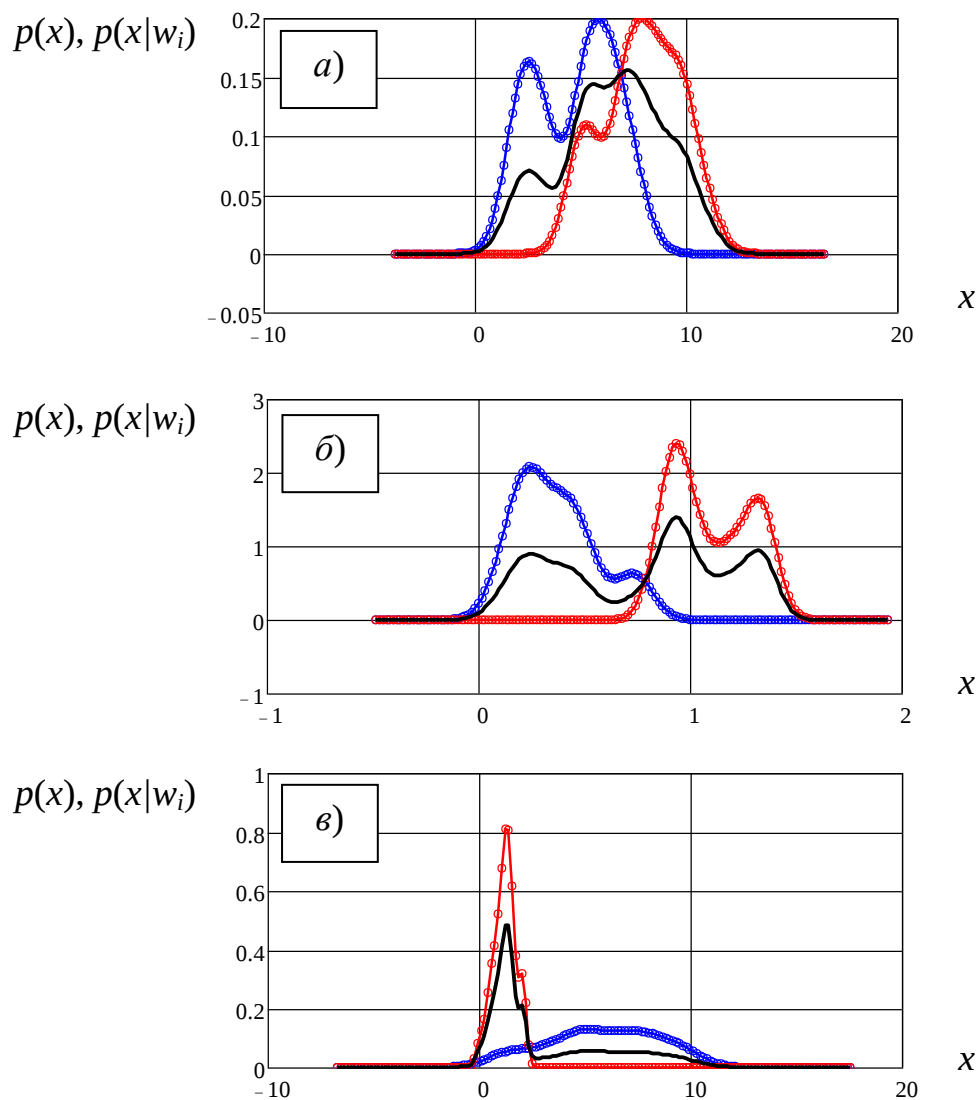


Рисунок 5.5 – Примеры одномерных законов распределения, полученных с помощью ядерной оценки плотности: *a* – признак В, *б* – признак С, *в* – признак D. Сплошной чёрный график – закон распределения признака, не зависимо от состояния Positive и Negative; синий точечный график – закон распределения признака для случая Negative, красный точечный график – закон распределения признака для случая Positive

На рис. 5.5 даны примеры плотностей вероятности для одномерного случая, полученные на участке где расположение полостей известно. На рисунке представлены признаки В, С, D.

График 5.5 а представляет собой пример признака обладающего как плохой специфичностью, так и плохой чувствительностью. Плотности условных вероятностей для случаев Positive и Negative существенно пересекаются. Информационная эффективность этого параметра $\Theta = 0.39$. Результаты вычисления коэффициента информационной эффективности всех параметров и их сочетаний даются в следующей главе. Низкое значение Θ не означает, что признак не стоит использовать в комплексе, поскольку в многомерных вариантах могут возникать ситуации, когда параметр в сочетании с другим окажется более эффективным.

График 5.5 б представляет собой обратный пример – плотности условных вероятностей пересекаются частично. Высокие уровни условной вероятности находятся в разных диапазонах значений признака. Это означает, что разделение по порогу будет давать низкий уровень ошибок. Информационная эффективность этого признака $\Theta = 0,88$. Стоит отметить, что это значение эффективности всё ещё достаточно далеко от единицы.

График 5.5 в представляет собой промежуточный вариант. Информационная эффективность этого признака составляет $\Theta = 0,63$. Здесь интересной особенностью является то, что условная плотность вероятности для случая Positive занимает очень узкий диапазон значений признака. В то время как случай Negative представлен на широком диапазоне. Компактность случая Positive может сыграть положительную роль при комплексировании. Относительно низкая информационная эффективность возникает из-за того, что Negative случаи практически полностью перекрывают диапазон Positive случаев.

На рис. 5.6 дан пример плотностей вероятности для двумерных случаев (варианты АВ, АС, АД, CD). Представлены только поверхности условных плотностей вероятности $p(x|w_N)$ и $p(x|w_P)$.

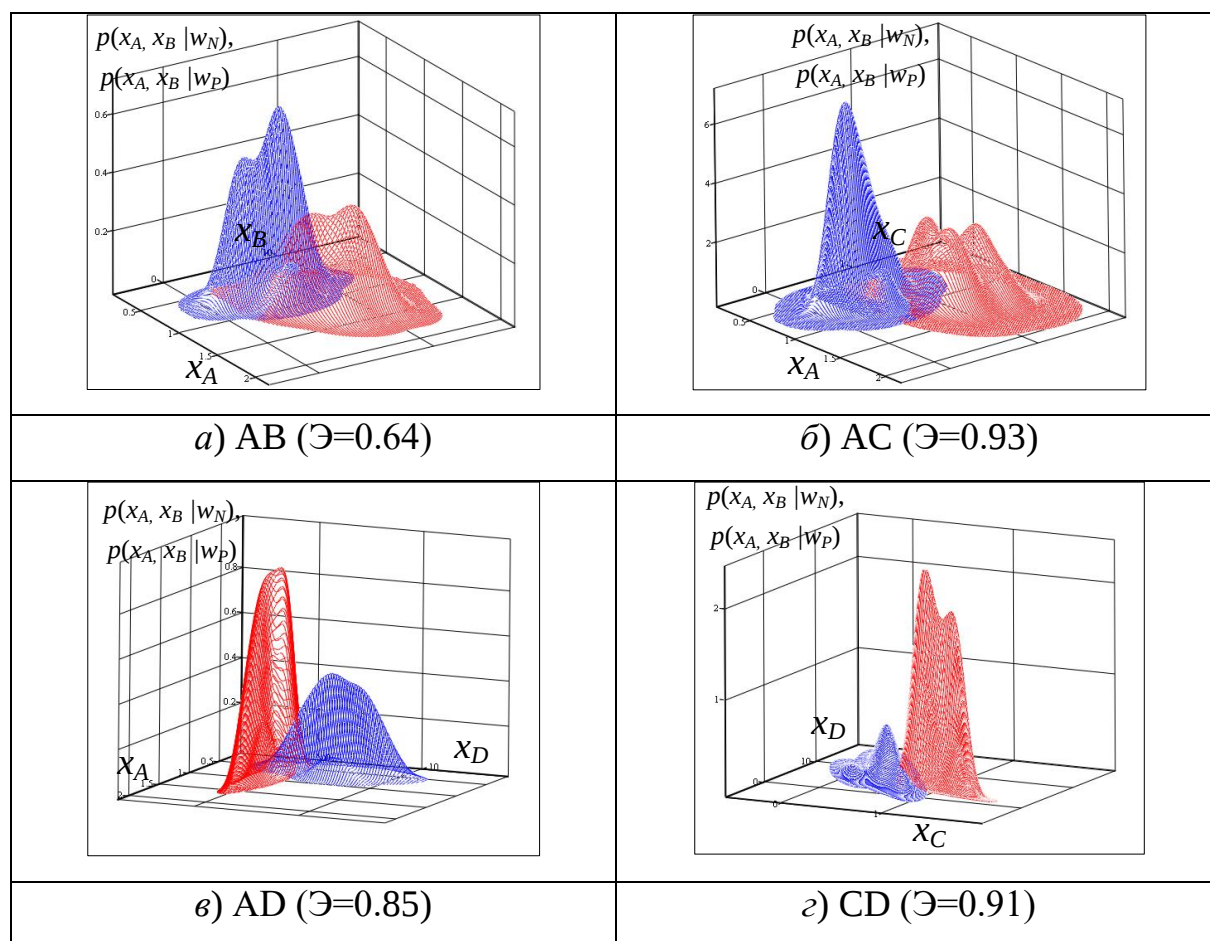


Рисунок 5.6 – Примеры двухмерных законов распределения, полученных с помощью ядерной оценки плотности: *a* – признаки А и В, *б* – признаки А и С, *в* – признак А и D, *г* – – признак С и D. Синяя поверхность – закон распределения признака для случая Negative, красная поверхность – закон распределения признака для случая Positive

Совместный анализ значений коэффициента информационной эффективности Θ и формы полученных распределения даётся в следующей главе.

На рис. 5.6 *a* представлен пример двухмерных законов распределения для пары признаков А и В (информационная эффективность $\Theta = 0.64$ – это выше чем эффективности А и В по отдельности). Видно, что поверхности всё еще существенно пересекаются, что приводит к появлению большого количества ошибок. Другая пара А и С, представленная на рис. 5.6 *б*, демонстрирует гораздо меньше перекрытие поверхностей ($\Theta = 0.93$). Это признаки различных методов (А - георадиолокационный, С – сейсмоакустический).

Ещё одна пара представляющая собой использование двух методов – это рис. 5.6 в. Для неё характерно также относительно высокое значение информационной эффективности ($\Theta = 0.85$). Компактное расположение случаев Positive повышает эффективность. Но, к сожалению, распределение Negative по-прежнему пересекает распределение Positive, создавая множество ошибок типа «ложное срабатывание».

Довольно высокое значение информационной эффективности ($\Theta = 0.91$, рис. 5.6 г) имеет пара CD (оба параметра сейсмоакустические). Тем не менее пара AC (оба параметра сейсмоакустические) даёт наибольший уровень информационной эффективности. Построенные поверхности – результат обработки данных, собранных на различных участках. Т.е. это результат обобщения. При конкретных работах разделимость случаев Positive и Negative может существенно изменяться, поэтому эти результаты можно использовать только как ориентировочные.

5.5. Эмпирическая оценка информационной эффективности комплексов признаков

Для эмпирической оценки информационной эффективности комплексов признаков Θ была использована обобщённая образцовая выборка, специфика составления которой описана в главе 4.4.

Для получения оценок Θ была задана априорная вероятность присутствия полости $P(w_p) = 0.05$, что соответствует априорной энтропии $H(w) = 0,29$ бит.

Также по составленной выборке с помощью ядерной оценки плотности были вычислены плотности вероятности $p(x)$, $p(x|w_p)$, $p(x|w_N)$, что позволило рассчитать апостериорную энтропию (выражение 5.14) и, в конечном счёте, коэффициент информационной эффективности Θ (выражение 5.7). Результаты этих вычислений представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Таблица значений коэффициента информационной эффективности $\mathcal{E}$ для различных сочетаний параметров

Сочетание признаков	N , кол-во параметров	$\mathcal{E}$	Средний $\mathcal{E}$
A	1	0,60	0,62
B	1	0,39	
C	1	0,88	
D	1	0,63	
AB	2	0,64	0,82
AC	2	0,93	
AD	2	0,85	
BC	2	0,83	
BD	2	0,75	
CD	2	0,91	
ABC	3	0,91	0,91
ABD	3	0,86	
ACD	3	0,96	
BCD	3	0,92	
ABCD	4	0,96	0,96

Проведём анализ полученных результатов. Можно отметить, что пары признаков почти всегда имеют более высокое значение $\mathcal{E}$, чем отдельные параметры (исключением является только пара BC). Другими словами, ситуация, когда объединение параметров в комплекс повышает информационную эффективность одного параметра и снижает другого редка. Поэтому комплексирование параметров предпочтительно и может ограничиваться в основном по экономическим причинам.

В приведённом примере комплексы из трёх признаков всегда эффективнее, чем отдельные параметры. В редких случаях пара параметров (например, $\mathcal{E}_{AC} = 0,93$) может быть эффективнее, чем комплекс из трёх признаков в который эта пара входит ($\mathcal{E}_{ABC} = 0,91$).

Можно отметить, что случаи, когда комплексы большего объёма оказываются менее эффективны, чем комплексы меньшего объёма связаны с ситуацией присутствия в комплексе параметра В, обладающего самой низкой информационной эффективностью.

Возможно, стоит следить за включением в комплексы параметров с заведомо низкой Э. Однако отметить, что пара ВD обладает высокой эффективностью – по-видимому, это случай оптимального взаимодействия двух параметров. Поэтому желательно ориентироваться на конкретные значения Э, вычисленные по результатам исследований, проведенных на участках, где известно расположение полостей.

Можно отметить, что сочетание признаков, получаемых при работе с различными методами, могут давать более высокие результаты. Информационная эффективность пары АВ (оба признака георадиолокационные) практически всегда ниже, чем информационная эффективность пар полученных при сочетании различных методов (пары АС, AD, ВС, ВD).

Для сейсмоакустических признаков коэффициент информационной эффективности в большинстве случаев преобладает над сочетаниями признаков, взятых из различных методов. Однако есть вариант АС (это признаки различных методов) который имеет наибольшую информационную эффективность ($\mathcal{E}_{AC} = 0.93$).

Стоит отметить, что коэффициенты информационной эффективности могут вести себя достаточно случайно, в зависимости от влияния помеховых факторов. Поэтому при выборе комплекса желательно ориентироваться на непосредственные величины Э. Стоит также отметить, что на информационную эффективность существенное влияние может оказывать предварительная обработка данных, производимая перед вычислением признака. При выборе признаков, которые будут составлять комплекс, это также стоит учитывать.

Отдельный вопрос каким образом оценивать информационную эффективность на конкретных участках. Первой рекомендацией в этом случае будет использовать прямое опробование, если оно доступно. В случае если такой

подход недоступен, можно опираться на методы распознавания состояний «без учителя» (например, кластеризация).

Для набора таблицы 5.1 была построена экспоненциальная регрессионная модель $\Theta = 1 - e^{-0.9N}$. График полученной функции и диаграмма рассеяния данных таблицы 5.1. представлены на рисунке 5.7.

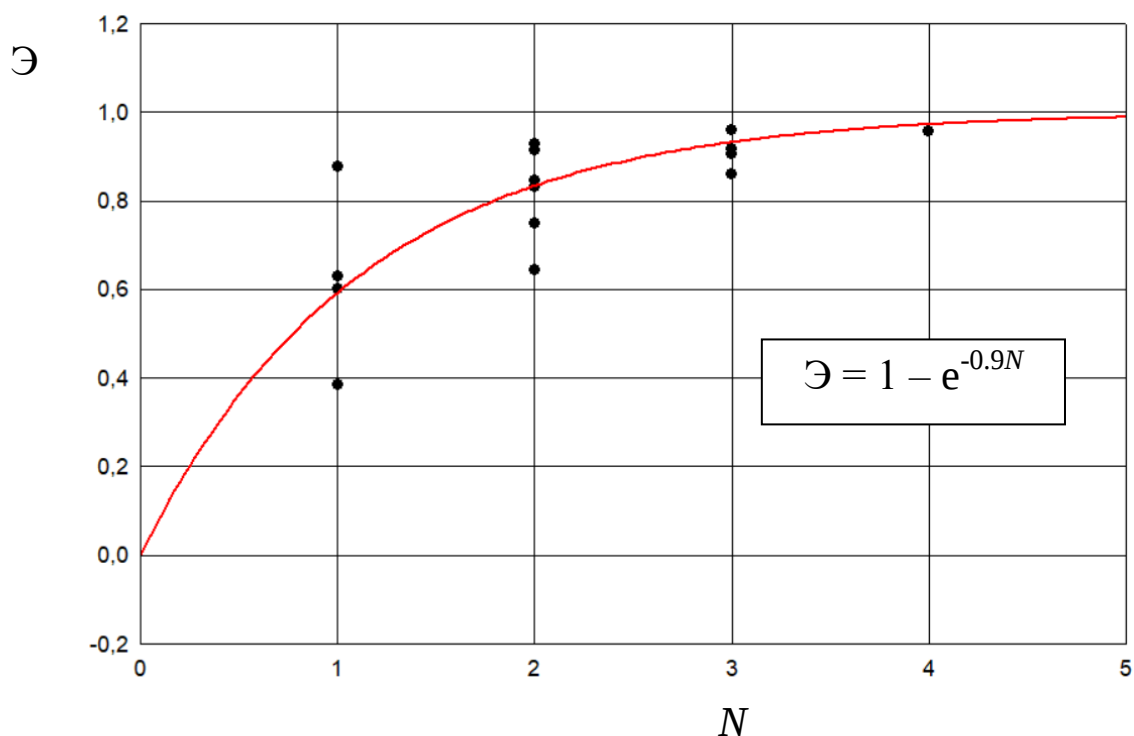


Рисунок 5.7. Диаграмма рассеяния и экспоненциальная регрессионная модель, описывающая зависимость коэффициента информационной эффективности Θ от количества информативных параметров N

Полученную функцию можно использовать для ориентировочной оценки значения Θ для различных объёмов комплекса (различного количества информативных параметров входящих в комплекс). Это может иметь важное значение, для предварительного планирования объёма работ. Этим вопросам посвящена следующая глава.

5.6. Оценки допустимой вероятности пропуска полости в заобделочном пространстве

Вернёмся к теоретическому материалу главы 5.2. Если задаться уровнем допустимой энтропии H_d , приравнять $H_d = \bar{H}(w|x)$ (очевидно, что апостериорная энтропия после процедур контроля должна быть не выше допустимой, приравнивание подразумевает рассматривание предельного случая) и оценить значение эффективности контроля $\mathcal{E}$, тогда можно, получить оценку априорной вероятности, удовлетворяющей условию (5.7):

$$H(w) = \frac{H_d}{1 - \mathcal{E}}. \quad (5.21)$$

Это выражение связывает априорную $H(w)$ и допустимую H_d энтропию при условии, что эффективность применяемого комплекса геофизических методов $\mathcal{E}$ известна.

Можно использовать его иным образом. Если оценить $H(w)$ по выражениям (5.3) и (5.16), возникает возможность подбирать нужный комплекс методов (оценивая его эффективность) ориентируясь на заданную допустимую энтропию.

Дополнительно раскроем содержание понятия допустимой энтропии. Понятие допустимой энтропии подразумевает ту степень неопределённости вывода о наличии либо отсутствии полости в заобделочном пространстве, которое остаётся после проведения процедур контроля. Поскольку в основе понятия энтропии лежит вероятность – фактически в этом случае речь идёт о величине вероятности ошибки пропуска цели, которая может реализоваться после процедуры контроля.

Например, после проведения измерений и обработки данных остаётся вероятность принять ошибочное решение $P_e = 0.01$ – это означает, что по каждой сотой обследованной точке будет приниматься ошибочное решение (например, пропуск цели). Обозначим связанную с этой вероятностью энтропию как H_e , при этом $H_e = H_d$.

$$H(w) = \frac{H_e}{1 - \mathcal{E}}. \quad (5.22)$$

Таким образом, возникает возможность при оценённой априорной вероятности $H(w)$ подбирать по информационной эффективности $\mathcal{E}$ геофизический метод или комплекс методов, соответствующий вероятности ошибочного решения P_e .

Это может иметь важную практическую ценность. Возможность использовать ограниченный комплекс имеет существенное экономическое содержание. Очевидной предпосылкой здесь является возможность приобретения ограниченного комплекта оборудования. Например, при обследованиях тоннелей небольшого возраста достаточно обойтись комплексом признаков только одного метода.

Помимо приобретения оборудования важное значение имеет планирование работ. Включение второго метода в процесс измерения подразумевает гораздо большее количество производителей работ, увеличивая трудоёмкость и стоимость процедур измерений. Эта трудоёмкость имеет важное значение и при проведении работ в рамках ограниченного ночного окна, и при работах на строящихся участках метрополитена – часто в этом случае необходимы работы короткими участками (по несколько десятков метров), что подразумевает многочисленные выезды на объект с возникающими при этом сложностями транспортирования оборудования по строящимся тоннелю. Также увеличивается и трудоёмкость камеральной обработки.

Очевидно, что в случае обследования недавно возведенных выработок комплекс из двух методов может быть избыточным.

Для практического применения на основании (5.22) были построены графики зависимости априорной вероятности $P(w_p)$ от вероятности ошибки P_e с учётом конкретного значения $\mathcal{E}$. Для этого была написана программа в среде MathCad.

Коэффициент информационной эффективности Θ в такой программе задаётся как константа и может существенно меняться от того сколько признаков используется в комплексе. Так для образцовой выборки, на основании проведённого в главе 5.4 регрессионного моделирования можно принять следующие значения коэффициентов информационной эффективности: $\Theta_1 = 0.59$, $\Theta_2 = 0.83$, $\Theta_3 = 0.93$, $\Theta_4 = 0.97$, где нижний индекс означает количество признаков в комплексе. P_e задавалось как диапазон значений, которые пересчитывались в H_e . По полученным значениями H_e через выражение (5.22) рассчитывались соответствующие им значения $H(w)$. Далее с помощью численного метода получались значения вероятностей ошибки.

Поскольку $H_e = -P(w_p) \log_2(P(w_p)) - (1 - P(w_p)) \log_2(1 - P(w_p))$ фактически речь шла об одном значении вероятности, соответствующем, например, ошибке «пропуск цели» $H_e = -P_e \log_2(P_e) - (1 - P_e) \log_2(1 - P_e)$. Результат построения графиков представлен на рис. 5.8.

Смысл этих графиков состоит в следующем. Линии 2, 3, 4 соответствуют зависимости между априорной вероятностью $P(w_p)$ и вероятностью ошибки P_e для конкретных случаев эффективности комплексов, состоящих из 2-х, 3-х, и 4-х признаков. На графике так же дана линия $P(w_p) = 0.05$. Можно отметить, что комплекс состоящий из одного признака в среднем в состоянии обеспечить ошибку определения полости $P_{e,1} = 1.6\%$. Из двух признаков $P_{e,2} = 0.54\%$, из трёх $P_{e,3} = 0.19\%$, из четырёх $P_{e,4} = 0.06\%$. Уточнение «в среднем» дано, поскольку в описанную выше программу вносились значения Θ , полученные по результатам регрессионного моделирования.

Таким образом увеличение эффективности комплекса за счёт увеличения количества параметров даёт более круто идущую линию, соответствующую более низкому уровню ошибки. На графике также дана линия $P_e = P(w_p)$, что соответствует ситуации отсутствия контроля.

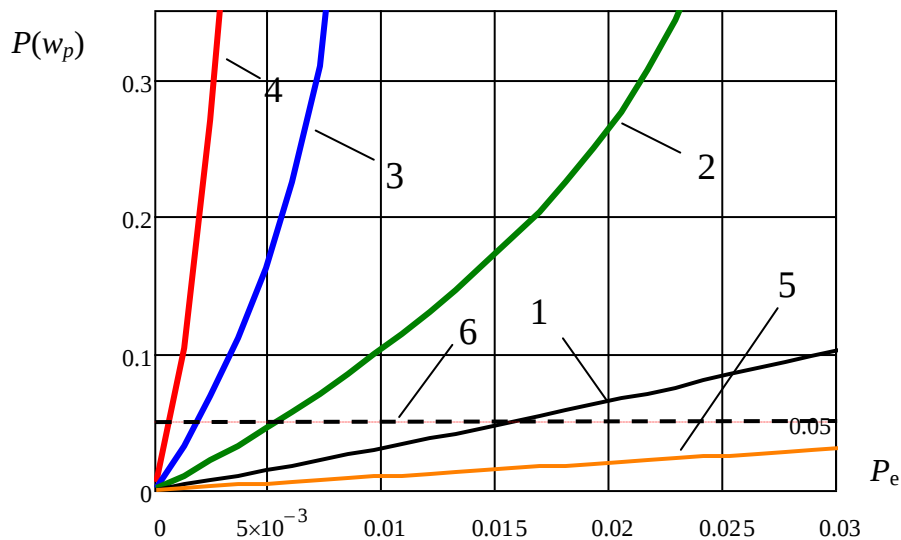


Рис. 5.8. Зависимости $P(w_p)$ от P_e : 1 – зависимость при $\Theta_1 = 0.59$; 2 – зависимость при $\Theta_2 = 0.83$; 3 – зависимость при $\Theta_3 = 0.93$; 4 – зависимость при $\Theta_4 = 0.97$; 5 – $\Theta = 0$ (контроль не производился); 6 – уровень $P(w_p) = 0.05$

Анализируя отмеченные графики можно заметить, что применение контроля существенно уменьшает ошибку принятого решения. Это происходит за счёт привнесения в систему информации, возникающей за счёт применения геофизического метода, что, в конечном счёте, приводит к снижению уровня информационной энтропии.

Вероятность в отношении вывода о наличии полости до контроля составляет 5% (априорный уровень вероятности). Это означает, что, если оператор будет принимать решение об отсутствии полости для каждой точки обследования, он будет ошибаться в 5 случаев из 100. Это соответствует уровню неопределённости (энтропии) в 0.286 бит. Если же оператор будет использовать контроль по принципу 1 метод 1 параметр, то в соответствии с регрессионным моделированием (см. рис. 5.7) в среднем это позволит снизить вероятность ошибки до 1.6 случаев из 100, то есть в 3.13 раза. Это соответствует энтропии 0.118 бит.

Использование комплексов из 2, 3, 4 информативных параметров снижает вероятность ошибки до 0.54%, 0,19% и 0.06% соответственно. Стоит отметить, что комплексы из двух параметров снижают уровень ошибки почти на порядок (в 9,26 раза). Комплексы из трёх параметров (используется два метода) снижают ошибку 26,3 раза, а из четырёх в 83,3 раза. Это происходит за счёт информации, приносимой результатами измерений.

Этот подход позволяет подбирать объём комплексов при отсутствии участка на котором известно расположение полостей за обделкой. В этом случае необходимо будет задаться допустимым уровнем ошибки пропуска полости (т.е. допустимым уровнем энтропии H_d) и опираясь на значения информационной эффективности подобрать количество информативных параметров.

При наличии опорного участка, можно также спрогнозировать эффективность конкретных сочетаний информативных параметров и подобрать наиболее эффективные из них. А также решить какое количество методов (а также специалистов и оборудования) необходимо привлекать для решения задачи. Различную эффективность будут давать различные сочетания признаков, а также различные сочетания геофизических методов. Опираясь на эту эффективность, можно будет рассчитывать величину возможной ошибки и таким образом подбирать составы комплексов для решения задач контроля на различных участках метрополитена. Также возникает возможность принимать решение о необходимости включения того или иного геофизического метода в комплекс.

Эти результаты позволили сформулировать пятое научное положение.

5.7. Комплексование информационных признаков вычисленных по результатам натурных измерений методами различной физической природы

Эта глава посвящена разработке эффективного, то есть способного выявлять ситуацию «область разуплотнённых грунтов за обделкой», комплекса признаков.

Поскольку информативность признака может существенно варьировать от объекта к объекту, подобный комплекс должен настраиваться на эталонном образце, после чего он может работать в качестве распознающего (заменяющего оператора), либо рекомендательного (помогающего оператору) метода принятия решения о наличии, либо отсутствии полости.

Исходные данные используемых методов имеют различную структуру. Георадиолокационная съёмка для одного кольца обделки на определённой высоте может дать десятки трасс. Поведение этих трасс удобно исследовать с помощью, например, кластерного анализа. Сейсмоакустика даёт одну точку на локальном участке кольца. Это приводит к необходимости использовать методы способные работать с малыми выборками, в частности можно использовать байесовскую классификацию, опирающуюся при вычислении плотностей вероятности на ядерную оценку плотности.

При этом стоит отметить, что результаты сейсмоакустического обследования обладают довольно высокой информационной эффективностью, поэтому выбор метода классификации, устойчивого при работе с малыми выборками является хорошим решением, поскольку хорошо сочетается с эффективным методом.

Различия в структуре данных снимались следующим образом. Байесовская классификация использовала сейсмоакустические признаки, собранные по отдельным кольцам. Для этих же участков колец были вычислены средние значения георадиолокационных признаков. Это позволило иметь по одному значению каждого признака для каждого участка кольца. Статистика набиралась по ряду участков обследования таким образом, чтобы в данных хорошо были представлены как Positive так и Negative варианты. После этого была сформирована образцовая выборка, описанная выше.

По ряду причин для разработки метода принятия решения не использовался такой активно развивающийся инструмент как искусственные нейронные сети (ИНС).

Первой причиной такого решения является тот факт, что современные ИНС, использующие принцип глубокого обучения требуют большие объёмы выборок. Такие объёмы данных трудно набрать в тоннелях метрополитена, особенно если речь идёт о сейсмоакустическом обследовании. Второй причиной является невозможность понять, как именно принимается решение. ИНС представляет собой систему весовых коэффициентов большинство из которых в малой степени влияют на принятие решения. Другими словами, теоретического объяснения полученного результата часто невозможно добиться, что имеет важное значение при принятии решения в сфере транспортной безопасности.

5.7.1. Общие принципы Байесовской классификации

Байесовская классификация требует знания априорной вероятности присутствия $P(w_p)$ и отсутствия $P(w_N)$ полости. Эти вероятности могут быть оценены по материалу главы 5.3. В случае если присутствуют результаты измерений значений признака x на участке где известно расположение либо отсутствие полостей, возникает возможность получить оценку функции плотности вероятности признака $p(x)$. А также распределение этого признака в случае наличия $p(x|w_p)$ либо отсутствия $p(x|w_N)$ полости – так называемые условные плотности вероятности. Вопросы получения этих функций описаны в главе 5.4.

На этом этапе уже возникает возможность принимать решение, исходя из правила:

$P(w_N | x) > P(w_p | x)$, принимаем решении w_N – полость отсутствует,

$P(w_N | x) < P(w_p | x)$, принимаем решении w_p – полость присутствует.

Однако при байесовской классификации принято также использовать функцию потерь, расширяющую возможности метода. При принятии решения о наличии полости возникает две ситуации: это верно принятое решение о наличии – λ_{TP} и это ложно принятое решение о наличии λ_{FP} (ложноположительный результат, ложное срабатывание). При принятии решения об отсутствии поло-

сти также возможны две ситуации: верно принятое решение об отсутствии – λ_{TN} и ложно принятое решение об отсутствии – λ_{FN} (ложноотрицательный результат, пропуск цели). Весовые коэффициенты потерь λ_{TP} , λ_{FP} , λ_{TN} , λ_{FN} можно записать в виде так называемой матрицы потерь:

$$\lambda_{ij} = \begin{pmatrix} \lambda_{TP} & \lambda_{FP} \\ \lambda_{FN} & \lambda_{TN} \end{pmatrix}. \quad (5.23)$$

В качестве примера такой матрицы можно взять следующий случай:

$$\lambda_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (5.24)$$

Подобная матрица подразумевает, что за правильные решения расплата будет нулевой, а за ошибки максимальной. В реальной практике очевидно, что пропуск цели может стоить существенно дороже чем ложное срабатывание. Это означает что весовые коэффициенты могут быть, например $\lambda_{FP} = 1$, $\lambda_{FN} = 3$.

Обратная ситуация тоже возможна – ложные срабатывания могут требовать более высоких весовых коэффициентов. Причинами такой ситуации могут быть финансовые затраты и усложнение организационной работы – временные затраты (частая организация выходов тампонажной команды требует расширения персонала), сложности доставки оборудования к месту проведения работ в рамках короткого ночного окна и т.п. Причиной может быть и снижение безопасности эксплуатации сооружений – например, тампонирующее требует вскрытия заобделочного пространства, что может привести к активному поступлению воды выработанное пространство. На этом фоне небольшое количество полостей, слабо влияющих на деформации конструкций тоннеля, может иметь небольшой коэффициент λ_{FN} .

Стоит также отметить что и коэффициенты λ_{TP} , λ_{TN} не обязательно равны нулю. В соответствии с изложенным выше процесс тампонирувания может обладать определённой стоимостью, что может перекрывать пользу от тампонажа.

В описываемой исследовательской работе подобные, опирающиеся на реальную практику и экономику обоснования коэффициентов не производились.

В пробных расчётах использовалась матрица функции потерь, аналогичная описанной выражением (5.24). Однако возможность учёта затрат – ценная особенность байесовской классификации.

Далее функцию потерь используют для вычисления значений рисков для случая принятия решения о наличии либо отсутствии полости в заобделочном пространстве. Понятие риска подразумевает оценку потерь с точки зрения вероятности реализации того или иного события.

Например, принято решение о том, что в заобделочном пространстве есть полость. Поскольку на момент контроля реальная ситуация неизвестна, возникает сразу два возможных события: "принято решение о наличии полости, и оно верно" и "принято решение о наличии полости, и оно не верно"; вероятность которых можно оценить с помощью апостериорных вероятностей. Риск от принятия этого решения будет следующим:

$$R_P(x) = \lambda_{TP} \cdot P(w_P | x) + \lambda_{FP} P(w_N | x). \quad (5.25)$$

Если будет принято решение об отсутствии полости риск будет вычисляться следующим образом:

$$R_N(x) = \lambda_{FN} \cdot P(w_P | x) + \lambda_{TN} P(w_N | x). \quad (5.26)$$

Вычисление рисков позволяет применить так называемое байесовское решающее правило [325]:

если $R_P(x) < R_N(x)$ – считается, что полость присутствует,

если $R_P(x) > R_N(x)$ – считается, что полость отсутствует.

Выбирается то решение, где риск меньше.

Можно отметить, что по сути важны не сами коэффициенты функции потерь, а их отношение (насколько штраф за ложное срабатывание больше штрафа за пропуск цели).

Очевидно, что эти выводы, а также байесовское решающее правило, легко расширяются на многомерные случаи с использованием нескольких признаков, объединённых в один комплекс. Подобное описание потребует получения многомерных законов распределения нескольких признаков.

5.7.2. Результаты распознавания. Оценка влияния матрицы потерь

Одним из существенных достоинств байесовской классификации является возможность использования функции потерь, позволяющей управлять вероятностью ошибок типа ложное срабатывание и пропуск цели.

Исследование того как ведёт себя байесовский классификатор при работе с данными, полученными при обследовании тоннелей, при различных соотношениях коэффициентов функции потерь является интересной практической задачей.

Для этого исследования помимо образцовой выборки, была также выделена тестовая выборка объёмом $N = 24$ элемента (10 Positive, 14 Negative). Как и для образцовой выборки для тестовой выборки было известно в каких точках обследования присутствовала полость, а в каких отсутствовала. Тестовая выборка являлась результатом сбора данных на нескольких объектах для которых удалось получить данные о наличии либо отсутствие полости. Для исследования были зафиксированы уровни априорной вероятности $P(w_P) = 0.05$ и $P(w_N) = 0.95$.

Вероятность ошибки от принятия каждого решения $P_{e,P}$ (ошибка пропуска цели) и $P_{e,N}$ (ошибка ложного срабатывания) вычислялось по формуле полной вероятности:

$$P_{e,P} = P(w_P)P(\alpha_N | w_P), \quad P_{e,N} = P(w_N)P(\alpha_P | w_N), \quad (5.27)$$

где $P(\alpha_N | w_P)$ – вероятность ошибочно принять событие w_P за событие α_N (ситуация ложного срабатывания), $P(\alpha_P | w_N)$ – вероятность ошибочно принять событие w_N за событие α_P (ситуация пропуска цели).

Эти вероятности получены следующим образом. Для конкретного комплекса информативных параметров по образцовой выборке с помощью ядерной оценки плотности рассчитаны функции апостериорных вероятностей $p(x)$, $p(x|w_P)$ и $p(x|w_N)$ – формулы даются для одномерного случая (для одного информативного параметра) – подразумевается что они могут изменяться очевид-

ным образом в зависимости от того сколько параметров входит в комплекс. Заданы уровни априорной вероятности $P(w_P)=0.05$ и $P(w_N)=0.95$. Заданы коэффициенты функции потерь.

Далее по тестовой выборке, по формулам (5.25) и (5.26) рассчитываются значения рисков $R_P(x)$ и $R_N(x)$. Решение принимается исходя из байесовского решающего правила. Поскольку для тестовой выборки известны верные ответы возникает возможность посчитать количество ошибочных ответов и вычислить вероятность ошибки при работе комплекса. Например, вероятность пропуска цели $P(\alpha_N | w_P) = N(\alpha_N | w_P) / N(w_P)$, где $N(\alpha_N | w_P)$ – количество ситуаций пропуска цели, $N(w_P)$ – количество ситуаций соответствующих реальному наличию полости.

Таблица 5.2. Используемые при исследовании влияния функции потерь соотношения штрафов

λ_{FN}	λ_{FP}	$\lambda_{FN} \backslash \lambda_{FP}$
1	8	0,125
1	6	0,167
1	5	0,200
1	4	0,250
1	3	0,333
1	2	0,500
1	1	1,000
2	1	2,000
3	1	3,000
4	1	4,000
6	1	6,000

Изначально предполагалось, что наибольшую важность имеют $P_{e,P}$, связанная с вероятностью пропуска полости, поскольку это имеет более существенное значение для реальной практики. Вероятность ошибки $P_{e,N}$ представляет меньший интерес, поскольку спорные участки можно контролировать повторно.

Исследование влияния функции потерь велось только с варьированием штрафов за ошибки λ_{FN} и λ_{FP} . В таблице 5.2 даны значения ячеек матрицы потерь λ_{FN} и λ_{FP} и их соотношение. В процессе исследования фиксировались коэффициенты матрицы потерь, запускалась программа расчёта рисков, которой на вход подавалась образцовая и тестовая выборки, производился подсчёт ошибок, вычислялись $P(\alpha_N | w_P)$ и $P_{e,P}$, строились графики $P_{e,P}(\lambda_{FN} / \lambda_{FP})$.

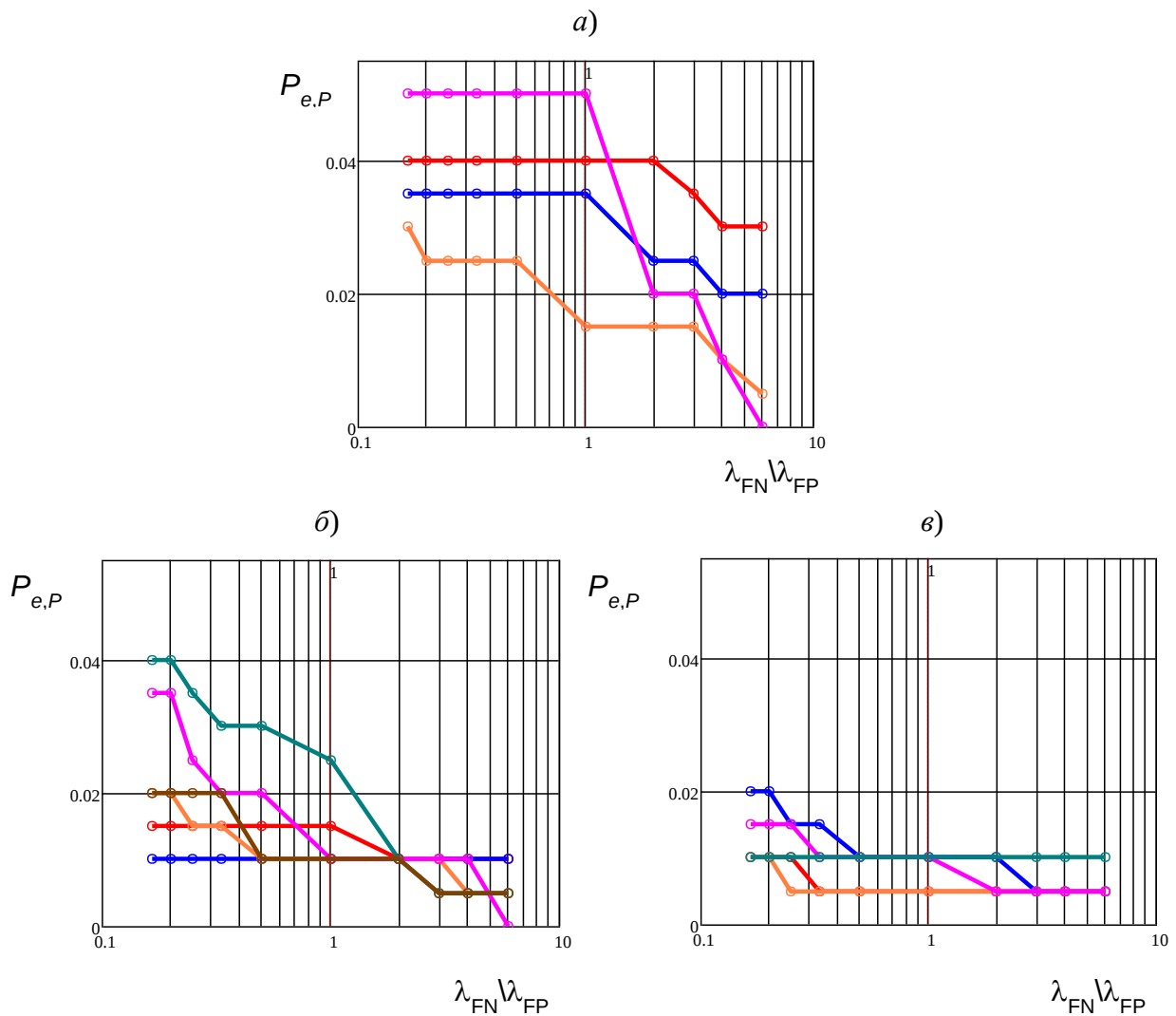


Рис. 5.9 Ошибки классификации $P_{e,P}$ при различных соотношениях коэффициентов матрицы потерь $\lambda_{FN} / \lambda_{FP}$: а – объём комплекса 1 информативный параметр, б – объём комплекса 2 информативных параметра, в – объём комплекса 3-4 информативных параметра

На рисунке 5.9 представлены примеры подобных графиков. Они разбиты по группам: комплексы из двух информативных параметров, комплексы из трех и четырех параметров. Вертикальные и горизонтальные масштабы у графиков одинаковые. При увеличении отношения $\lambda_{FN} \backslash \lambda_{FP}$ штрафы за ситуацию «пропуск цели» увеличиваются, поэтому графики вероятности ошибок $P_{e,P}$ на рисунках 5.9 спадают.

При сравнении того как работают комплексы из двух (рис. 5.9 б) и трех-четырех параметров (рис. 5.9 в) можно отметить, что при увеличении количества признаков средний уровень ошибок существенно падает. Также видно, что графики ведут себя более хаотично – другими словами комплексы, состоящие из двух параметров, дают больший разброс ошибок при одних и тех же отношениях коэффициентов матрицы потерь, но различных составах комплексов. Ситуация с комплексами, состоящими из одного параметра показала подобную же картину, но более выраженную (рис. 5.9 а).

Для того, чтобы увидеть закономерности связанные с влиянием матрицы потерь на результаты распознавания были рассчитаны и построены графики средних значений ошибок по всем комплексам. Они представлены на рис. 5.10. Количество параметров, входящих в комплексы подписаны на графиках. Графики являются результатом осреднения функций $P_{e,P}(\lambda_{FN} / \lambda_{FP})$ и $P_{e,N}(\lambda_{FN} / \lambda_{FP})$, полученных при всех возможных сочетаниях информативных признаков конкретного объема.

Анализируя эти графики можно отметить следующее. С увеличением объема комплекса средний уровень ошибок пропуска цели существенно снижается. График с меньшим объемом комплекса по всем соотношениям $\lambda_{FN} \backslash \lambda_{FP}$ имеет более высокую ошибку – графики почти не пересекаются.

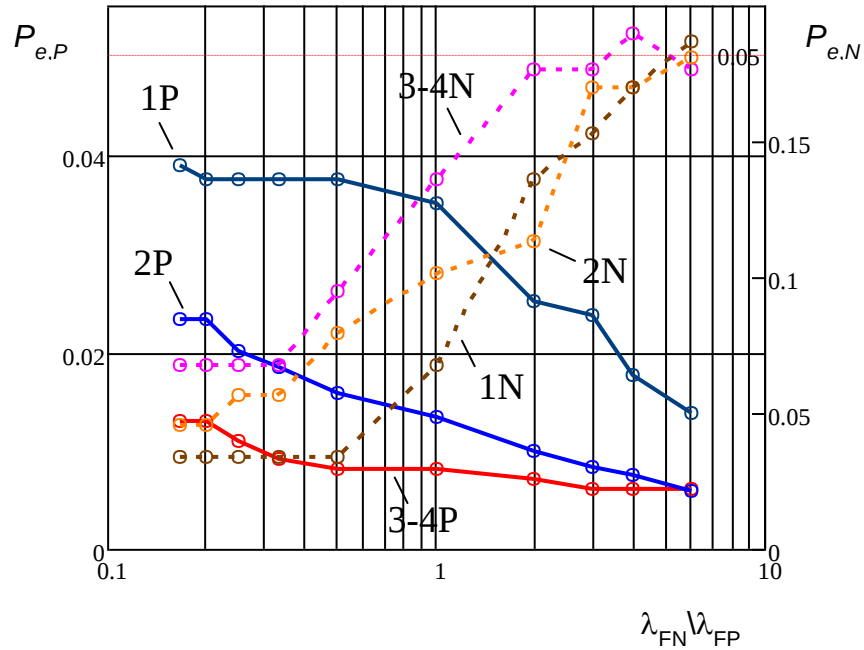


Рис. 5.10. Средние значения ошибок классификации $P_{e,P}$ и $P_{e,N}$ при различных соотношениях коэффициентов матрицы потерь $\lambda_{FP}/\lambda_{FN}$: 1P, 2P, 3-4P – графики $P_{e,P}$ при объёмах комплексов 1, 2, 3-4 информативных параметра; 1N, 2N, 3-4N – графики $P_{e,N}$ при объёмах комплексов 1, 2, 3-4 информативных параметра

При этом стоит отметить, что увеличение объёма комплекса увеличивает вероятность ошибок ложного срабатывания. Однако тот факт, что ошибки пропуска цели дают наиболее пологий график $P_{e,P}(\lambda_{FN}/\lambda_{FP})$ это приводит к тому, что при большом объёме комплекса можно получить не только самый низкий уровень ошибок пропуска цели, но и выбрать оптимальное соотношение $\lambda_{FN}/\lambda_{FP}$, позволяющее достичь минимальных возможных уровней ошибки ложного срабатывания.

Этот вывод также можно показать на графиках отношений ошибок ложного срабатывания к ошибкам пропуска цели $P_{e,P}(\lambda_{FN}/\lambda_{FP})/P_{e,N}(\lambda_{FN}/\lambda_{FP})$ – см. рис. 5.11. Хорошо видно, что для комплексов объёмом 3-4 элемента это соотношение наилучшее.

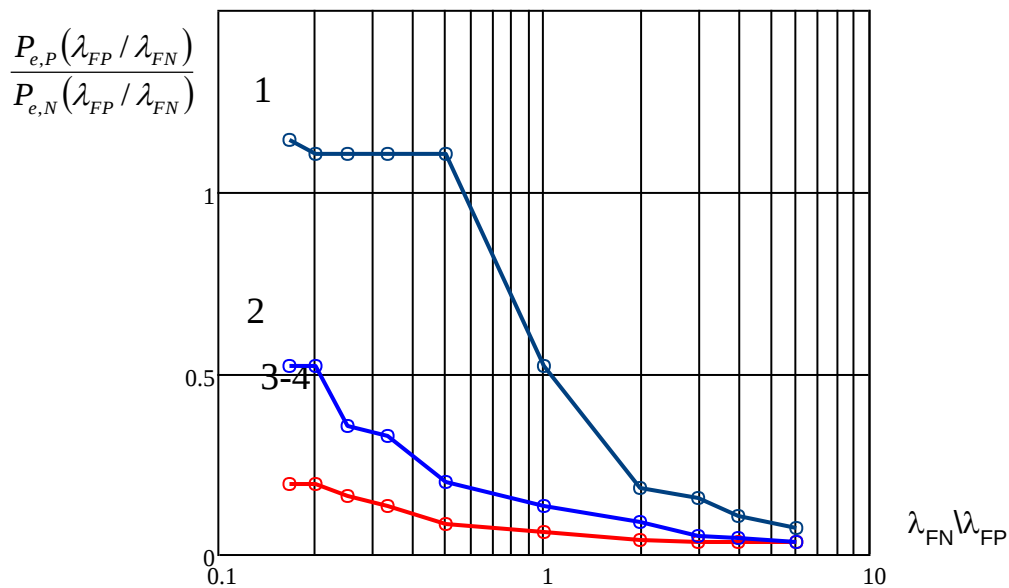


Рис. 5.11. График отношений ошибок ложного срабатывания к ошибкам пропуска цели $P_{e,P} / P_{e,N}$ при различных значениях при различных соотношениях коэффициентов матрицы потерь $\lambda_{FN} / \lambda_{FP}$. Цифрами обозначены объёмы комплексов

В этой ситуации стоит отметить, что ориентироваться на среднюю ошибку, когда совместно учитываются и ложные срабатывания и «пропуски цели», достаточно плохое решение. Это связано с тем, что важность ошибки пропуска цели значительно выше, чем ошибки ложного срабатывания, поскольку спорные участки можно проверить через некоторое время повторно. Пропуск же цели может привести к аварийной ситуации. Эти результаты позволили сформулировать шестое научное положение.

Выводы по пятой главе

Основой пятой главы стали вопросы отбора и обоснования, на основе понятия информационный эффективности, наиболее эффективных информативных параметров; вопросы объединения параметров в комплексы; разработка

классифицирующей системы; оценка воздействия на результат классификации её параметров.

1. Предложена система распознавания ситуаций присутствия либо отсутствия полости в заобделочном пространстве. В основу предложенной системы легла байесовская классификация, использующая комплексы информативных параметров. Состав комплексов предполагается формировать на основании принципа информационной эффективности, в основе которого лежат понятия об априорной и необходимой информационной энтропии, а также количестве информации, которую может обеспечить использование того или иного геофизического метода. Оценки условных плотностей вероятностей информативных параметров, необходимые как для расчёта оценок информационной эффективности, так и для применения байесовской классификации, предполагается получать с помощью непараметрического метода.

2. По собранному объёму данных определена информационная эффективность ряда информативных параметров, а также их сочетаний. Получена регрессионная модель, описывающая взаимосвязь между информационной эффективностью и объёмом комплекса. Модель впоследствии использована для оценки необходимого объёма комплекса в соответствии с уровнем априорной и необходимой энтропии, описывающей неопределённость ситуации наличия и отсутствия полости в заобделочном пространстве.

3. На основании собранного материал, включающего массовые сейсмоакустические измерения на десятках участков метрополитена, было установлено, что при увеличении времени эксплуатации выработки вероятность возникновения полости возрастает. На основании собранных данных даны оценки средней вероятности наблюдения полости, также построена регрессионная модель. Использование этих результатов позволит давать оценки априорной вероятности наблюдения полости, важной для принятия решения о её наличии либо отсутствии.

4. Предложен подход, при котором по оценке допустимой вероятности пропуска полости в заобделочном пространстве можно подбирать объём ком-

плекса, а также количество методов, которые будут необходимы для достижения необходимой величины вероятности пропуска. Этот вопрос может иметь как экономический смысл, так и влиять на вопросы организации работ, логистики, временных затрат.

5. Выявлено что с увеличением объема комплекса средний уровень ошибок пропуска цели существенно снижается, при этом с ростом объёма комплекса тип ошибок «пропуск цели» в меньшей степени зависит от значений коэффициентов функции потерь, что позволяет выбирать оптимальный уровень ошибок типа «ложное срабатывание».

Материалы этой части исследования опубликованы в следующих статьях: [326, 327, 328, 329, 253, 254, 255].

Заключение

В диссертации, представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, на основании выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований разработан новый комплексный геофизический метод обнаружения полостей в заобделочном пространстве при строительстве и эксплуатации подземных сооружений, что имеет важное значение для обеспечения надёжности эксплуатации подземной инфраструктуры городов.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации, полученные лично автором:

1. Проведён анализ современного состояния основных проблем и методов выявления полостей в заобделочном пространстве подземных сооружений. Выявлен ряд проблем, возникающих при обнаружении полостей в заобделочном пространстве.

2. Проведена серия натурных экспериментов в тоннелях Московского метрополитена участках, для которых известно наличие либо отсутствие полостей в заобделочном пространстве. Сформирована эмпирическая база исследований, позволяющая составлять образцовую и тестовую выборки, используемые для оценки работоспособности предложенного комплексного метода.

3. Для сейсмоакустических обследований выявлены особенности возникновения полостей в заобделочном пространстве, связанные с влиянием напряжённого-деформированного состояния и его изменения. Выявлены закономерности изменения спектра отклика обделки на ударное воздействие для случаев различного типа заполнителя полости (вода, воздух, смесь воды с грунтом) при сейсмоакустическом обследовании, что позволило разработать метод определения типа заполнителя полости по максимуму коэффициента корреляции между спектральными составляющими модельного и натурального сигналов.

4. Выявлены закономерности изменения энтропии значений амплитуд низкочастотного георадиолокационного сигнала при наличии разуплотнённых зон в грунтовом массиве.

5. Предложен новый метод подавления горизонтальных осей синфазности, позволяющий получать более детальную картину строения объекта контроля и оптимальный граф обработки георадиолокационных данных, позволяющий выявлять полости в заобделочном пространстве.

6. Разработаны рекомендации по выбору оптимальных методов предварительной и последующей обработки данных, позволяющие вычислять значения эффективных для обнаружения полостей информативных параметров.

7. Разработаны подходы по обоснованному объединению значений информативных параметров в комплексы, позволяющие принимать решения о наличии либо отсутствии полостей, основанные на принципе информационной эффективности, учитывающем априорную вероятность наличия полости, а также плотности вероятностей информативных параметров при наличии и отсутствии полости.

8. Предложены подходы и эмпирические данные, обеспечивающие получение необходимых для байесовской классификации значений априорных и апостериорных вероятностей; выявлены закономерности, позволяющие подбирать оптимальных параметры байесовской классификации, и на этой основе разработан комплексный геофизический метод обнаружения полостей в заобделочном пространстве при строительстве и эксплуатации подземных сооружений, в основу которого положена байесовская классификация состояния заобделочного пространства.

9. Результаты диссертационной работы использованы при создании геофизических разделов разработанных нормативных документов «Руководство по проектированию и технологии выполнения работ по компенсационному нагнетанию в грунты основания для обеспечения сохранности зданий и сооружений при освоении подземного пространства в городе Москве», «Руководство по строительству подземных сооружений транспортного назначения в условиях

карстово-суффозионной и оползневой опасности в городе Москве», «Руководство по контролю качества скрытых работ геофизическими методами при строительстве подземных объектов, включая объекты метрополитена, на территории Москвы».

Список использованных источников

1. Королевский К. Ю., Егорычев О. О., Зерцалов М. Г., Конюхов Д. С. Основные принципы формирования программы комплексного освоения подземного пространства Москвы // Метро и тоннели. – 2007. – № 6. – С. 34-35.
2. Конюхов Д.С. Использование подземного пространства. Учеб. пособие для вузов. – М.: Архитектура-С, 2004. – 296 с.
3. Шахтное и подземное строительство: Учеб. для вузов – 2-е изд., перераб. и доп.: в 2 т. / Б.А. Картозия, Б.И. Федунец, М.Н. Шуплик и др. – М.: Изд-во Академии горных наук, 2001. – Т.1. – 607 с.
4. Иофис М. А. Проблемы комплексного освоения территорий и подземного пространства крупных городов и пути их решения // Маркшейдерский вестник. – 2006. – № 4. – С. 20-21.
5. Поморски К., Дидевич А. Мегаполисы уходят под землю // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI в. – 2010. – № 12. – С. 22-26.
6. Голицынский Д. М. Комплексное освоение подземного пространства больших городов // Транспорт Российской Федерации. – 2006. – № 5. – С. 92-94.
7. Пашкин Е. М. Модернизация подземного пространства в пределах исторических территорий мегаполисов // Метро и тоннели. – 2012. – № 3. – С. 38-40.
8. Шешеня Н.Л., Козловский С.В. Основные высокоущербные природные и техноприродные процессы на территории Московской области // Промышленное и гражданское строительство. – 2010. – №11. – С. 13-15.
9. Шешеня Н.Л. Основные требования к инженерным изысканиям для подземного строительства в москве. Промышленное и гражданское строительство. 2011. № 11. С. 9-10.
10. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения : СНиП 22-02-2003. – Взамен СНиП2.01.15-90; введ. 30-06-2003.
11. Грунтоведение / Трофимов В.Т., Королев В.А., Вознесенский Е.А., Голодковская Г.А., Васильчук Ю.К., Зиангиров Р.С. Под ред. В.Т.Трофимова. – 6-е изд., переработ. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 1024 с.

12. Шешеня Н.Л., Аствацатурова К.А. Палеогеоморфологический анализ развития рельефа и экзогенных геологических процессов // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – №11. – С. 15-18.

13 Николаев Л.А. Влияние неликвидированных инженерно-геологических скважин на инженерно-геологические условия строительной площадки, сложенной в верхней части разреза водонасыщенными песчаными отложениями // Инженерные изыскания. – 2010, – №8. – С. 26-29.

14. Jiawei Xu, Jinxing Lai, Junling Qiu, Haidong Jiang, Hao Sun, Jinzhao Tang, Guanhua Cui. Disasters caused by underground water pipe leakage in Chinese cities: Failure modes, influencing factors and prevention countermeasures // Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 167, 2026, 107008. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.107008>.

15. Бутаев Р.Т. К вопросу о долгосрочном прогнозировании техногенного подтопления мегаполисов // 4-е Денисовские чтения "Проблемы обеспечения экологической безопасности строительства", Москва, 23 окт., 2008. М.: МГСУ. 2008. – С. 134-140.

16. Дергачев М.С., Хацкевич А.Н., Хоменко В.П. Геологические причины и экологические последствия разрушения участка ливневой канализации в поселке Путилково // Промышленное и гражданское строительство. – 2008. – №11. – С. 16-17.

17. Nejat Zeydalinejad, Akbar A. Javadi, James L. Webber. Global perspectives on groundwater infiltration to sewer networks: A threat to urban sustainability // Water Research, Volume 262, 2024, 122098. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122098>.

18. Junling Qiu, Guanhua Cui, Jinxing Lai, Kai Zhao, Kunjie Tang, Lei Qiang, Ding Jia. Influence of fissure-induced linear infiltration on the evolution characteristics of the loess tunnel seepage field // Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 162, 2025, 106640. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106640>.

19. Zhihao Lin, Hai Liu, Xin Deng, Xu Meng, Jie Cui, Erol Tutumluer. A combined approach for detection and localization of subsurface pipe leaks using ground microphone and GPR // Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience, Volume 4, Issue 4, 2025, 100169. <https://doi.org/10.1016/j.iintel.2025.100169>.

20. Huang Z., Lin J., Meng X. and Liu H. Characteristics analysis of ground penetrating radar signals for groundwater pipe leakage detection // IET International

Radar Conference (IET IRC 2020), Online Conference, 2020, pp. 848-851. DOI: 10.1049/icp.2021.0802.

21. Sevket Demirci, Enes Yigit, Ismail H. Eskidemir, Caner Ozdemir. Ground penetrating radar imaging of water leaks from buried pipes based on back-projection method // NDT & E International, Volume 47, 2012, Pages 35-42. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.12.008>.

22. Harris Fan, Salman Tariq, Tarek Zayed. Acoustic leak detection approaches for water pipelines // Automation in Construction, Volume 138, 2022, 104226. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104226>.

23. Толмачев В.В., Троицкий Г.М., Хоменко В.П. Инженерно-строительное освоение закарстованных территорий. – М.: Стройиздат. – 1986 г. – 176.

24. Нещеткин О.Б. Проблемы инженерно-геологических изысканий на закарстованных территориях // Инженерные изыскания. – 2010, – №6. – С. 12-16.

25. Осипов В. И., Кутепов В. М., Макаров В. И. Геологические условия градостроительного развития Москвы // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2006, – №2. – С. 99-114.

26. Xulin Su, Jinxing Lai, Enlin Ma, Jiawei Xu, Junling Qiu, Wanfeng Wang. Failure mechanism analysis and treatment of tunnels built in karst fissure strata: A case study // Engineering Failure Analysis, Volume 167, Part B, 2025, 109048, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.109048>.

27. Cheng Lyu, Li Yu, Mingnian Wang, Pengxi Xia, Yuan Sun. Upper bound analysis of collapse failure of deep tunnel under karst cave considering seismic force // Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 132, 2020, 106003. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.106003>.

28. Zhang H.F., Zhan J., Wan W., Wang J. Hydrogeochemical characteristics of karst areas: A case study of dongzhuang reservoir area in jinghe river // Water, 14 (24), 2023, p. 4111. <https://doi.org/10.3390/w14244111>.

29. Qingyan Tian, Jiantong Zhang, Yanlong Zhang. Similar simulation experiment of expressway tunnel in karst area // Construction and Building Materials, Volume 176, 2018, Pages 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.209>.

30. Голосов В., Захаров В., Костюченко С.Л., Липовецкий И.А. Малоглубинная сейсморазведка – эффективный инструмент московских градостроителей // Инженерные изыскания. – 2008. – № 4. – С. 76-80.

31. Едемский Д.Е., Петров Н.Ф., Прокопович И.В. Применение низкочастотных георадаров для изучения и контроля экзогенных геологических процессов // Разведка и охрана недр, 2021, № 9, С. 14 – 23.

32. Сергеев К.С., Рыжков В.И., Белоусов А.В., Бобачев А.А. Из опыта изучения развития обвальных и карстовых процессов методами инженерной геофизики // Инженерные изыскания, 2016, №12, С: 26-33.

33. Zhao J., Gong Q.M., Eisensten Z. Tunnelling through a frequently changing and mixed ground: A case history in Singapore // Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 22, Issue 4, 2007, Pages 388-400. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2006.10.002>.

34. Dong-Mei Zhang, Xiao-Chuang Xie, Ming-Liang Zhou, Zhong-Kai Huang, Dong-Ming Zhang. An incident of water and soil gushing in a metro tunnel due to high water pressure in sandy silt // Engineering Failure Analysis, Volume 121, 2021, 105196. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105196>.

35. Набатов В.В., Гайсин Р.М., Гораньков И.И. Опыт георадиолокационного обследования массива для прогнозирования условий щитовой проходки коллекторов в условиях мегаполиса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – №8. – С. 202–211.

36. Fu Z., Ren Z., Hua X., Shi Y., Chen H., Chen C., Li Y., Tang J. Identification of underground water-bearing caves in noisy urban environment (Wuhan, China) using 3D electrical resistivity tomography techniques. Journal of Applied Geophysics. 2020, 174, p. 103966. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2020.103966.

37. Крохалев Б.Г., Мазеин С.В. Оценка технологических параметров щитовой проходки при сложной геологии грунтов // Безопасность труда в промышленности. – 2010. – № 6. – С. 17-20.

38. Мазеин С.В., Потапов М.А. Мониторинг грунтового давления и объема выемки обводненного массива для безопасной проходки щитом // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – № 11. – С. 58-62.

39. Zarei H.R., Uromeihy A., Sharifzadeh M. Evaluation of high local groundwater inflow to a rock tunnel by characterization of geological features // Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 26, Issue 2, 2011, Pages 364-373. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2010.11.007>.

40. Мазеин С. В., Павленко А. М. Зависимость осадок дневной поверхности от свойств породного массива и технологических параметров тоннелепро-

ходческих механизированных комплексов (ТПМК) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 6. – С. 171-176.

41. Марчук В.И., Секистов В.Н., Смирнов В.М., Юшкова О.В. Моделирование работы георадара численными методами // Научные технологии. – 2006. – Т.7. – №10. – С.39-52.

42. Владов М.Л., Золотарев В.П., Старовойтов А.В. Методическое руководство по проведению георадиолокационных исследований. – 1997. – 66 с.

43. Изюмов СВ., Дручинин СВ., Вознесенский А.С. Теория и методы георадиолокации: Учеб. пособие. – М.: Издательство "Горная книга", Издательство МГГУ, 2008. – 196 с

44. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных : Учебное пособие – М.: Издательство МГУ, 2008. – 192 с.

45. Федотов С.А. Технология малоглубинных геофизических исследований методами многоволновой сейсморазведки и электроразведки // Разведка и охрана недр. – 2006. – №3. – С. 51-54.

46. Гришин А.В. Геомеханические особенности освоения подземного пространства при реконструкции большого театра // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 5 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. 11-14 ноября 2008 г. – М: УРАН ИПКОН РАН, 2008, С. 120-125.

47. Рощинский Ю.П. Геофизические исследования для оценки безопасности и разработки мероприятий по стабилизации оснований аварийных зданий и сооружений в норильском промышленном районе // Разведка и охрана недр. – 2006. – № 12. – С. 17-20.

48. Shi-Jin Feng, Yong Zhao, Xiao-Lei Zhang, Zhen-Bai Bai. Leachate leakage investigation, assessment and engineering countermeasures for tunneling underneath a MSW landfill // Engineering Geology, Volume 265, 2020, 105447. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105447>.

49. Kwong A.K.L., Ng C.C.W., Schwob A. Control of settlement and volume loss induced by tunneling under recently reclaimed land, Underground Space, Volume 4, Issue 4, 2019, Pages 289-301. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2019.03.005>.

50. Zhiquan Huang, Chuang Wang, Jinyu Dong, Jianjun Zhou, Jihong Yang, Yanwei Li. Conditioning experiment on sand and cobble soil for shield tunneling //

Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 87, 2019, Pages 187-194.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.02.011>.

51. Мазеин С.В., Вознесенский А.С. Акустическая разведка валунных включений на тоннелепроходческом механизированном комплексе. Необходимость и возможности прогноза // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – №5. – С. 78-87.

52. Enhedelihai Alex Nilot, Yunyue Elita Li, Gang Fang, Yun Zhou Tan, Arthur Cheng. Inverting continuous in-tunnel passive seismic data for velocity structure mapping ahead of the TBM cutterhead // Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 151, 2024, 105855. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105855>.

53. Мазеин С.В. Непрерывное геоакустическое зондирование (прогноз) включений и нарушенных зон в грунтах при щитовой проходке тоннелей // Горный журнал. – 2010. – № 5. – С. 81-84.

54. Дашко Р. Э., Александрова О. Ю. Микробная контаминация подземного пространства Санкт-Петербурга как фактор формирования геотехнических условий // "Геотехнические проблемы мегаполисов – труды международной конференции по геотехнике, Москва, 7-10 июня, 2010. Т. 5. – СПб: Георекострукция. 2010. – С. 1945-1952.

55. Волкомирская Л.Б., Варенков В.В., Лобзина А.Н., Лобзин В.В., Резников А.Е., Руденчик Е.А. Основные особенности конструкции георадаров "ГРОТ-10" и "ГРОТ-11", опыт эксплуатации и обработки данных // Коллективная монография "Вопросы подповерхностной радиолокации" / Под ред. А. Ю. Гринёва. – М.: Радиотехника, 2005. – с. 246-259.

56. Abdelmoneim El Naggar, Maged Youssef, Hany El Naggar. Predicting Tunnel-Induced Settlement in Cohesionless soils in Greenfield Condition // Transportation Geotechnics, Volume 43, 2023, 101145. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101145>.

57. Wu Z.S., Zhao H.H., Xie H.Q., Dong Y.C., Fang L., Wang M.N., Liu Y. Distribution characteristics of pea gravel behind segment in shield tunnel boring machine tunnels // Advanced Engineering Sciences. 2023, 10 (1), 1–12, DOI: 10.15961/j.jsuese.202201182.

58. Danial Mohammadzamani, Arash Alimardani Lavasan, Torsten Wichtmann. Tail void grouting material: A parametric study on the role of hydro-mechanical characteristics in mechanized tunneling // Tunnelling and Underground

Space Technology, Volume 135, 2023, 105053.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105053>.

59. Qiuyang Hong, Hongpeng Lai, Yuyang Liu, Rui Chen, Cheng Liu, Juntai Xie. A case study on deformation characteristics of a large cross-section tunnel passing through a soft-plastic layer with different spatial locations // *Arabian Journal of Geosciences* 14(4), 2021, February. DOI:10.1007/s12517-021-06544-2

60. Ju-Young Oh, Martin Ziegler. Investigation on influence of tail void grouting on the surface settlements during shield tunneling using a stress-pore pressure coupled analysis // *KSCE Journal of Civil Engineering*, April 2014, 18(3):803-811. DOI:10.1007/s12205-014-1383-8

61. Pierpaolo Oreste, Diego Sebastiani, Giovanni Spagnoli, Armando de Lillis. Analysis of the behavior of the two-component grout around a tunnel segmental lining on the basis of experimental results and analytical approaches // *Transportation Geotechnics*, Volume 29, 2021, 100570. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100570>.

62. Claudio Oggeri, Pierpaolo Oreste, Giovanni Spagnoli. The influence of the two-component grout on the behaviour of a segmental lining in tunneling // *Tunneling and Underground Space Technology*, Volume 109, 2021, 103750. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103750>.

63. Jiaxin Liang, Wei Liu, Xinsheng Yin, Wentao Li, Zhe Yang, Jichen Yang. Experimental study on the performance of shield tunnel tail grout in ground // *Underground Space*, Volume 20, 2025, Pages 277-292. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2024.07.001>.

64. Chao Liu, Jie Cui, Zixin Zhang, Hai Liu, Xin Huang, Changqiang Zhang. The role of TBM asymmetric tail-grouting on surface settlement in coarse-grained soils of urban area: Field tests and FEA modelling // *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 111, 2021, 103857. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103857>.

65. Мазеин С.В., Павленко А.М. Влияние текущих параметров щитовой проходки на осадку поверхности // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2007. – № 5. – С. 133-138.

66. Wenyu Yang, Junjie Zheng, Rongjun Zhang, Sijie Liu, Wengang Zhang. Dynamic prediction of over-excavation gap due to posture adjustment of shield machine in soft soil // *Underground Space*, Volume 16, 2024, Pages 44-58. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2023.09.004>.

-
67. Michael Kavvadas, Dimitris Litsas, Ioannis Vazaios, Petros Fortsakis. Development of a 3D finite element model for shield EPB tunneling // *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 65, 2017, Pages 22-34. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.02.001>.
68. Zhechao Wang, Liping Bi, Sangki Kwon, Liping Qiao, Wei Li. The effects of hydro-mechanical coupling in fractured rock mass on groundwater inflow into underground openings // *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 103, 2020, 103489. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103489>.
69. Wong K.S., Ng C.W.W., Chen Y.M., Bian X.C. Centrifuge and numerical investigation of passive failure of tunnel face in sand // *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 28, 2012, Pages 297-303. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.12.004>.
70. Meguid M.A., Dang H.K. The effect of erosion voids on existing tunnel linings // *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 24, Issue 3, 2009, Pages 278-286. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2008.09.002>.
71. Qihao Sun, Xian Liu, Wouter De Corte, Luc Taerwe. Numerical Simulation on the Leakage-Induced Collapse of Segmental Tunnels // *Applied Sciences*. 2024, 14(9), 3796. <https://doi.org/10.3390/app14093796>.
72. Dong-Mei Zhang, Cheng-Peng Gao, Zhen-Yu Yin. CFD-DEM modeling of seepage erosion around shield tunnels // *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 83, 2019, Pages 60-72. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.09.017>.
73. Chenjie Gong, Mingjin Cheng, Yangyang Ge, Jianrong Song, Zhong Zhou. Leakage mechanisms of an operational underwater shield tunnel and countermeasures: A case study // *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 152, 2024, 105892. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105892>.
74. Linchong Huang, Jianjun Ma, Mingfeng Lei, Linghui Liu, Yuexiang Lin, Ziyang Zhang. Soil-water inrush induced shield tunnel lining damage and its stabilization: A case study // *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 97, 2020, 103290. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103290>.
75. Ki-Il Song, Gye-Chun Cho, Seok-Bue Chang. Identification, remediation, and analysis of karst sinkholes in the longest railroad tunnel in South Korea // *Engineering Geology*, Volumes 135–136, 2012, Pages 92-105. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.02.018>.

76. Qingyan Tian, Jiantong Zhang, Yanlong Zhang. Similar simulation experiment of expressway tunnel in karst area // *Construction and Building Materials*, Volume 176, 2018, Pages 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.209>.

77. Jinchun Chai, Jack Shuiling Shen, Da-Jun Yuan. Mechanism of tunneling-induced cave-in of a busy road in Fukuoka city, Japan // *Underground Space*, Volume 3, Issue 2, 2018, Pages 140-149. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.01.003>.

78. Rujia Li, Huayang Lei, Changyuan Ma, Yingnan Liu, Ningmin Liu. The development of sand erosion induced by shield-tunnel joint leakage // *Engineering Failure Analysis*, Volume 148, 2023, 107068. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107068>.

79. Robert Mair, Kenichi Soga, Jarungwit Wongsaroj. Tunnelling-induced consolidation settlements in London Clay // *Geotechnique*. October 2013. 63(13):1103-1115. DOI: 10.1680/geot.12.P.126

80. Shui-Long Shen, Huai-Na Wu, Yu-Jun Cui, Zhen-Yu Yin. Long-term settlement behaviour of metro tunnels in the soft deposits of Shanghai // *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 40, 2014, Pages 309-323.

81. Huai-Na Wu, Shui-Long Shen, Shao-Ming Liao, Zhen-Yu Yin. Longitudinal structural modelling of shield tunnels considering shearing dislocation between segmental rings // *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 50, 2015, Pages 317-323. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.08.001>.

82. Toshihiro Asakura, Yoshiyuki Kojima. Tunnel maintenance in Japan // *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 18, Issues 2–3, 2003, Pages 161-169. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(03\)00024-5](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(03)00024-5).

83. Jian-Gu Qian, Chuang Zhou, Zhen-Yu Yin, Wei-Yi Li. Investigating the effect of particle angularity on suffusion of gap-graded soil using coupled CFD-DEM // *Computers and Geotechnics*, Volume 139, 2021, 104383. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104383>.

84. Xi Jiang, Hehua Zhu, Zhiguo Yan, Fengshou Zhang, Fei Ye, Peinan Li, Xuehui Zhang, Zhiren Dai, Yun Bai, Baoshan Huang. A state-of-art review on development and progress of backfill grouting materials for shield tunneling // *Developments in the Built Environment*, Volume 16, 2023, 100250, <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100250>.

85. Mari Sato, Reiko Kuwano. Influence of location of subsurface structures on development of underground cavities induced by internal erosion // *Soils and Founda-*

tions, Volume 55, Issue 4, 2015, Pages 829-840.
<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.06.014>.

86. Wenbo Yang, Gaoyu Ma, Jiulin Tu, Hao Kou, Yanyang Zhang, Yong Fang, Chuan He. Effects of voids on the dynamic response of tunnels under train-induced vibration loads // *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, Volume 23, Issue 2, 2022, Pages 77-91. <https://doi.org/10.1680/jphmg.21.00023>.

87. Wenbo Yang, Chengping Zhang, Dexiong Liu, Jiulin Tu, Qixiang Yan, Yong Fang, Chuan He. The effect of cross-sectional shape on the dynamic response of tunnels under train induced vibration loads // *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 90, 2019, Pages 231-238. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.05.006>.

88. Miao, Fengyang & Liang, Chunyu & Li, Weiguo & Huang, Zhengxuan & Xu, Jianguo & Cai, Yingchun & Feng, Xiaoyu & Xu, Yiming. Seismic Response Analysis of Secondary Lining Polymer Grouting Debonding Repair for Tunnel Construction Based on Parameter Inversion // *Advances in Civil Engineering*. Volume 2023, Article ID 4284025.

89. Kamel T., Pellet P., Silvani C., Goirand P., 2012. Numerical modeling of the time dependent degradation of the mechanical properties of a metro underground gallery // 1st Eastern European Tunneling Conference (1EECT). Budapest. 2012

90. Shi P., Li P., 2015. Mechanism of soft ground tunnel defect generation and functional degradation // *Tunnelling and Underground Space Technology*. Vol. 50, August 2015, pp. 334–344. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.08.002>.

91. Jifei W., Hongwei H., Xiongyao X., Bobet A. Void-induced liner deformation and stress redistribution // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2014. – Vol. 40. – Pp. 263-276. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.10.008>.

92. Xu Zhang, Zijian Ye, Bo Min, Youjun Xu. Effect of Voids Behind Lining on the Failure Behavior of Symmetrical Double-Arch Tunnels // *Symmetry* 2019, 11(10), 1321; <https://doi.org/10.3390/sym11101321>

93. Куликова Е.Ю. Анализ возможных дефектов несущих конструкций городских подземных сооружений // ГИАБ. – 2007. – № 3. – С. 5-12.

94. Qihao Sun, Wouter De Corte, Xian Liu and Luc Taerwe. Model Test and Numerical Simulation for Tunnel Leakage-Induced Seepage Erosion in Different Strata // *Applied Science*. 2024, 14(9), 3908. <https://doi.org/10.3390/app14093908>

-
95. Yunpeng Yue, Shangyang Zhang, Hai Liu, Fan Hong, Chao Liu, Jie Cui, Yanliang Du. Damage mechanism of a shield tunnel with cavities behind the concrete lining: An insight from a scaled model test // *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 153, 2024, 105998. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105998>.
96. Елгаев В.С. Оценка оценки возможных повреждений зданий в результате осадок поверхности грунта при проходке тоннелей неглубокого заложения щитовым способом // *Инженерная геология*. – 2012. – №4. – С. 56-67.
97. Jones S., Hunt H. Voids at the tunnel-soil interface for calculation of ground vibration from underground railways // *Journal of Sound and Vibration*. – 2011. – Vol.330. – Iss.2. – Pp. 245-27. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2010.08.015>.
98. Дашевский М.А. Вибросейсμοзащита // *Транспортное строительство*. – 2012. – №2. – С. 30-32.
99. Vu M.N., Broere W., Bosch J., 2016. Volume loss in shallow tunneling // *Tunnelling and Underground Space Technology*. Vol. 59, October 2016, pp. 77–90. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.06.011>.
100. Camos C., Spackova O., Straub D., Molins C., 2016. Probabilistic approach to assessing and monitoring settlements caused by tunneling // *Tunnelling and Underground Space Technology*. Vol. 51, January 2016, pp. 313–325.
101. Guo J., Ding L., Luo H., Zhou Ch., Ma L., 2014. Wavelet prediction method for ground deformation induced by tunneling // *Tunnelling and Underground Space Technology*. Vol. 41, March 2014, pp. 137–151. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.12.009>.
102. Azari H., Nazarian S., Yuan D., 2014. Assessing sensitivity of impact echo and ultrasonic surface waves methods for nondestructive evaluation of concrete structures // *Construction and Building Materials*. Vol. 71, pp. 384–391.
103. Davis A.G., Lim M.K., Petersen C.G., 2005. Rapid and economical evaluation of concrete tunnel linings // *NDT&E International*. Vol. 38, pp. 181–186.
104. Leung C., Meguid M.A. An experimental study of the effect of local contact loss on the earth pressure distribution on existing tunnel linings // *Tunnelling and Underground Space Technology*. Vol. 26, pp. 139–145.
105. Sedarat H., Kozak A., Hashash Y., Shamsabadi A., Krimotat A., 2009. Contact interface in seismic analysis of circular tunnels // *Tunnelling and Underground Space Technology*. Vol. 24, pp. 482–490.

106. Abul Aas, Satish Kumar Sinha. Seismic site characterization using MASW and correlation study between shear wave velocity and SPTN // Journal of Applied Geophysics, Volume 215, 2023, 105131. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.105131>.

107. Санфиров И.А., Мухамедшин А.М., Ярославцев А.Г. Сейсморазведочные исследования глубинного строения габбрового массива в центре мегаполиса // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 12. С. 124-130.

108. Гинодман А.Г., Гранит Б.А. Инженерно-геофизические исследования карста на территории Москвы и московского региона методом многоволновой сейсморазведки // Вестник МГСУ. 2010. № 4-2. С. 120-127. – 2006. – № 2. – С. 51-54.

109. Рамах С.Ш. Опыт применения геофизических методов при изучении карбонатного карста на участке Рас Аль Аин, Сирия // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2010. № 3. С. 58-64.

110. Санфиров И.А., Ярославцев Ф.Г., Юдина Л.И. Сейсморазведочная оценка причин деформации конструкций повышенной ответственности // Разведка и охрана недр, 2005, №12. С. 38-40.

111. Ben Dashwood, David Gunn, Giulio Curioni, Cornelia Inauen, Russell Swift, David Chapman, Alexander Royal, Peter Hobbs, Helen Reeves, Julien Taxil. Surface wave surveys for imaging ground property changes due to a leaking water pipe // Journal of Applied Geophysics, Volume 174, 2020, 103923, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103923>.

112. Ling Ning, Tianyu Dai, Ya Liu, Chaoqiang Xi, Hao Zhang, Changwei Zhou. Application of multichannel analysis of passive surface waves method for fault investigation // Journal of Applied Geophysics, Volume 192, 2021, 104382. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104382>.

113. Shuang Wang, Xinlei Sun, Lanbo Liu, Jianye Zong. Sub-surface structures and site effects extracted from ambient noise in metropolitan Guangzhou, China // Engineering Geology, Volume 268, 2020, 105526. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105526>.

114. Eftychia Amanatidou, George Vargemezis, Panagiotis Tsourlos. Combined application of seismic and electrical geophysical methods for karst cavities detection: A case study at the campus of the new University of Western Macedonia,

Kozani, Greece // Journal of Applied Geophysics, Volume 196, 2022, 104499. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104499>.

115. Kerim Martínez, José Alfredo Mendoza. Urban seismic site investigations for a new metro in central Copenhagen: Near surface imaging using reflection, refraction and VSP methods // Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Volume 36, Issue 16, 2011, Pages 1228-1236. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.01.003>.

116. I Belfer, I Bruner, S Keydar, A Kravtsov, E Landa. Detection of shallow objects using refracted and diffracted seismic waves // Journal of Applied Geophysics, Volume 38, Issue 3, 1998, Pages 155-168. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(97\)00025-6](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(97)00025-6).

117. Монахов В.В., Овчинников В.И., Науменко Д.А., Широбоков М.П. Применение многоволновой сейсморазведки для изучения четвертичных отложений Имеретинской низменности // Инженерные изыскания. – 2008. – № 01. – С. 40-43.

118. Федотов С.А., Федотов А.С., Федорова М.П. Повышение помехоустойчивости, разрешающей способности и производительности многоволновой сейсморазведки при инженерно-геофизических исследованиях // Инженерные изыскания. – 2011. – № 11. – С. 60-65.

119. Дмитриев Ю.Ю. Применение электроразведки при инженерных изысканиях в криолитозоне // Разведка и охрана недр. – 2008. – №1. – С.56-60.

120. Тригубович Г.М., Дмитриев Ю.Ю. Современные методы электрометрии для исследования верхней части разреза при решении инженерных задач в топливно-энергетическом комплексе // Разведка и охрана недр. – 2010. – №7. – С.16-30.

121. Дмитриев Ю.Ю., Афанасьев В.Н., Маренко А.М., Костин М.А., Титов К.В. Геофизические исследования при инженерных изысканиях для строительства Орловского автомобильного тоннеля в г. Санкт-Петербурге // Разведка и охрана недр. – 2008. – №12. – С.64-74.

122. Li M., Anderson N., Sneed L., Maerz N., 2016. Application of ultrasonic surface wave techniques for concrete bridge deck condition assessment // Journal of Applied Geophysics. Vol. 126, pp. 148–157.

123. Bin Wang, Xiangxiang Zhou, Liu Liu, Tiehua Liu. Detection of grouting defects behind shield segments via shear wave ultrasound arrays: Numerical and full-

scale model experiments // Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 157, 2025, 106287. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.106287>.

124. Шилин А.А., Кириленко А.М., Знайченко П.А. Комплексные обследования бетонных и железобетонных обделок транспортных тоннелей ультразвуковым и ударно-акустическим методом // Транспортное строительство. 2014. № 5. С. 12–14.

125. Чуркин А.А., Смирнов И.Д., Широбоков М.П. Геофизический комплекс экспресс-диагностики состояния фундаментных плит // Фундаменты. 2023. № 3 (13). С. 43-47.

126. Chaudhary M., 2013. Effectiveness of Impact Echo testing in detecting flaws in prestressed concrete slabs // Construction and Building Materials. Vol. 47, pp. 753–759.

127. Meng Hu, Yude Xu, Shaozheng Li, Hongyao Lu. Detection of defect in ballastless track based on impact echo method combined with improved SAFT algorithm // Engineering Structures, Volume 269, 2022, 114779, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114779>.

128. Aggelis D.G., Shiotani T., Kasai K., 2008. Evaluation of grouting in tunnel lining using impact-echo // Tunnelling and Underground Space Technology. Vol. 23, pp. 629–637.

129. Sadri A., 2003. Application of impact-echo technique in diagnoses and repair of stone masonry structures // NDT&E International. Vol. 36, pp. 195–202.

130. Капустин В.В. Применение сейсмических и акустических технологий при исследовании состояния подземных строительных конструкций // Технологии сейсморазведки. 2008. №1. С. 91-98.

131. Бауков, А. Ю. Разработка технологии ремонта многослойных конструкций подземных сооружений на основе виброакустической диагностики их дефектности : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.22 / Бауков Арсений Юрьевич. – Москва : Московский государственный горный университет, 2010. – 207 с.

132. Wonsuh Sung, Ki-Il Song, Kyoung-Yul Kim, Hee-Hwan Ryu. Development of Grouting Quality Evaluation System for a Shield TBM Tunnel Using the Impact-Echo Method, KSCE Journal of Civil Engineering, Volume 28, Issue 11, 2024, Pages 5335-5345. <https://doi.org/10.1007/s12205-024-0128-2>.

133. Song K, Cho G., 2009. Bonding state evaluation of tunnel shotcrete applied on to hard rocks using the impact-echo method // *NDT&E International*. Vol. 42, pp. 487–500.

134. Feng L., Yi X., Zhu D., Xie X., Wang Ya., 2015. Damage detection of metro tunnel structure through transmissibility function and cross correlation analysis using local excitation and measurement // *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 60–61, August 2015, pp. 59–74.

135. Wimsatt A., White J., Leung C., Scullion T., Hurlebaus S., Zollinger D., Grasley Z., Nazarian S., Azari H., Yuan D., Shokouhi P., Saarenketo T., Tonon F. Mapping Voids, Debonding, Delaminations, Moisture, and Other Defects Behind or Within Tunnel Linings. SHRP2 Final Report S2-R06(G)-RW. Strategic Highway Research Program 2, Washington, DC, 2013.

136. Sikandar Sajid, Luc Chouinard, Nicholas Carino. Condition assessment of concrete plates using impulse-response test with affinity propagation and homoscedasticity // *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 178, 2022, 109289, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109289>.

137. Бауков Ю.Н., Бауков А.Ю. Виброакустический контроль в горном деле и строительстве. – М.: МГГУ, 2006. – 118 с.

138. Бауков А.Ю. Повышение устойчивости подземных сооружений и совершенствование технологии их ремонта на основе виброакустической диагностики // *ГИАБ*. 2007. №12. С. 93-99.

139. Sikandar Sajid, Luc Chouinard. Impulse response test for condition assessment of concrete: A review // *Construction and Building Materials*, Volume 211, 2019, Pages 317-328. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.174>.

140. Mazzeo B.A., Patil A.N., Guthrie W.S. Acoustic impact-echo investigation of concrete delaminations using liquid droplet excitation // *NDT&E International*. 2012. Vol. 51, pp. 41–44.

141. Suda T., Tabata A., Kawakami J., Suzuki T. Development of an impact sound diagnosis system for tunnel concrete lining // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2004. Vol. 19, pp. 328–329. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2004.01.026>

142. Gao Y., Jiang Y., Li B. Estimation of effect of voids on frequency response of mountain tunnel // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2014. Vol.42, pp. 184–194. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106833>.

143. Pangil Choi, Dong-Ho Kim, Bong-Hak Lee, Moon C. Won. Application of ultrasonic shear-wave tomography to identify horizontal crack or delamination in concrete pavement and bridge // *Construction and Building Materials*, Volume 121, 2016, Pages 81-91. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.126>.

144. De La Haza A.O., Samokrutov A.A., Samokrutov P.A., 2013. Assessment of concrete structures using the Mira and Eyecon ultrasonic shear wave devices and the SAFT-C image reconstruction technique // *Construction and Building Materials*. Vol. 38, pp. 1276–1291.

145. Brett Kravitz, Michael Mooney, Jurij Karlovsek, Ian Danielson, Ahmadreza Hedayat. Void detection in two-component annulus grout behind a pre-cast segmental tunnel liner using Ground Penetrating Radar // *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 83, 2019, Pages 381-392. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.09.032>.

146. Guangyan Cui, Yanhui Wang, Yujie Li, Feifei Hou, Jie Xu. Intelligent identification of defective regions of voids in tunnels based on GPR data // *NDT & E International*, Volume 149, 2025, 103244. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2024.103244>

147. Рудианов Г.В., Крапивский Е.И., Данильев С.М. Оценка характеристик сигналов при поиске пустот в грунте под бетонными плитами радиолокационными станциями подповерхностного зондирования // *Записки Горного института*. 2018. Т. 231. С. 245-253. DOI: 10.25515/PMI.2018.3.245

148. Hai Liu, Yunpeng Yue, Yunlong Lian, Xu Meng, Yanliang Du, Jie Cui. Reverse-time migration of GPR data for imaging cavities behind a reinforced shield tunnel // *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 146, 2024, 105649. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105649>.

149. Морозов П.А., Волков В.А., Копейкин В.В. Перспективы применения сверхмощных георадаров для исследования процессов карстообразования и оползней // *Разведка и охрана недр*. 2012. № 7. С. 47-50.

150. Lei, Y.; Jiang, B.; Su, G.; Zou, Y.; Qi, F.; Li, B.; Jia, F.; Tian, T.; Qu, Q. Application of Air-Coupled Ground Penetrating Radar Based on F-K Filtering and BP Migration in High-Speed Railway Tunnel Detection // *Sensors*. 2023, 23, 4343. <https://doi.org/10.3390/s23094343>.

151. Yuewen Zan, Zhilin Li, Guofeng Su, Xiyuan Zhang. An innovative vehicle-mounted GPR technique for fast and efficient monitoring of tunnel lining

structural conditions // Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation, Volume 6, Part A, 2016, Pages 63-69. <https://doi.org/10.1016/j.csndt.2016.10.001>.

152. Еременко А.В., Зверев Е.О., Клепикова С.М., Монахов В.В. Георадиолокация в присутствии железобетонных конструкций // Разведка и охрана недр. – 2004, №12. С. 26-28.

153. Семенова А.А., Супилин М.А., Родионова А.Е., Родионова М.Е. Опыт комплексного применения виброакустического, термометрического и георадиолокационного методов контроля при изучении состояния перегонных тоннелей нижегородского метрополитена // Горный информационно-аналитический бюллетень. Москва, 2011, №8. С. 219-223.

154. Денисов Р.Р., Капустин В.В. Обработка георадарных данных в автоматическом режиме // Геофизика. 2010, №4. С. 76-80.

155. Простов С.М., Никулин Н.Ю. Георадиолокационный мониторинг при укреплении грунтовых оснований горнотехнических сооружений в кузбассе // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015, № 5. С. 11-18.

156. Fengshou Zhang, Xiongyao Xie, Hongwei Huang. Application of ground penetrating radar in grouting evaluation for shield tunnel construction // Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 25, Issue 2, 2010, Pages 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2009.09.006>.

157. Huike Zeng, Jing Wang, Jun-fang Wang, Yanliang Du, Feng Li. Evaluation of steel mesh impact on GPR detection of voids behind lining in railway tunnels // Construction and Building Materials, Volume 466, 2025, 140316. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140316>.

158. Wu, X.; Bao, X.; Shen, J.; Chen, X.; Cui, H. Evaluation of Void Defects behind Tunnel Lining through GPR forward Simulation. Sensors 2022, 22, 9702. <https://doi.org/10.3390/s22249702>.

159. Liang Zhang, Hao Jiang, Sheng Zhang, Zhenghao Bei, Ning Huang. Recognition of multi-parameter characteristics of tunnel cavity fillings based on spectral analysis and wavelet packet entropy techniques // Measurement, Volume 253, Part B, 2025, 117561. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117561>.

160. Копейкин В.В. Распространение электромагнитных импульсов в подземной среде: [Электронный документ]. (<http://www.georadar.ru/articles/article5.php>). Проверено 11-05-2025.

-
161. Tess Xianghuan Luo, Yanfeng Zhou, Qingzhou Zheng, Feifei Hou, Cungang Lin. Lightweight deep learning model for identifying tunnel lining defects based on GPR data // *Automation in Construction*, Volume 165, 2024, 105506. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105506>.
162. Guangyan Cui, Yanhui Wang, Yujie Li, Feifei Hou, Jie Xu. Intelligent identification of defective regions of voids in tunnels based on GPR data // *NDT & E International*, Volume 149, 2025, 103244. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2024.103244>.
163. Yunpeng Yue, Hai Liu, Caide Lin, Xu Meng, Chao Liu, Xiaoyu Zhang, Jie Cui, Yanliang Du. Automatic recognition of defects behind railway tunnel linings in GPR images using transfer learning // *Measurement*, Volume 224, 2024, 113903. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113903>.
164. GPRInvNet: Deep Learning-Based Ground-Penetrating Radar Data Inversion for Tunnel Linings // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Volume: 59, Issue: 10, Pages: 8305 – 8325. DOI: 10.1109/TGRS.2020.3046454
165. Porsani J.L., Ruy Y.B., Ramos F.P., Yamanouth G. R. B. GPR applied to mapping utilities along the route of the Line 4 (yellow) subway tunnel construction in Sao Paulo City, Brazil // *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 80, May 2012, Pp. – 25–31.
166. Ayala-Cabrera D., Campbell E., Carreno-Alvarado E.P., Izquierdo J., Perez-Garcia R. Water Leakage Evolution Based on GPR Interpretations // *16th Water Distribution System Analysis Conference, WDSA2014*. Vol. 89. 2014. Pp. – 304–310.
167. Набатов В.В., Морозов П.А., Семенихин А.Н. Выявление подземных коммуникаций на площадке строительства с помощью георадаров с резистивно-нагруженными антеннами // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012. №10. С. 120-134.
168. Шилин А.А., Кириленко А.М., Знайченко П.А. Современные методы исследования процессов влагопереноса в ограждающих конструкциях метрополитенов // *Транспортное строительство*. 2014. № 10. С. 3–6.
169. Lei Xiang, Hui-lin Zhou, Zhen Shu, Si-hao Tan, Guo-qing Liang, Jian Zhu. GPR evaluation of the Damaoshan highway tunnel: A case study // *NDT & E*

International, Volume 59, 2013, Pages 68-76.
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.05.004>.

170. Shaw M.R., Millard S.G., Molyneaux T.C.K., Taylor M.J., Bungey J.H. Location of steel reinforcement in concrete using ground penetrating radar and neural networks // NDT & E International, Volume 38, Issue 3, 2005, Pages 203-212.
<https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2004.06.011>.

171. Che Way Chang, Chen Hua Lin, Hung Sheng Lien. Measurement radius of reinforcing steel bar in concrete using digital image GPR // Construction and Building Materials. Vol. 23 (2009), pp. 1057–1063.

172. Shuxian Hong, Wallace Wai-Lok Lai, Gerd Wilsch, Rosemarie Helmerich, Robert Helmerich, Tobias Gunther, Herbert Wiggenhauser. Periodic mapping of reinforcement corrosion in intrusive chloride contaminated concrete with GPR // Construction and Building Materials 66 (2014), pp. 671-684.

173. Kien Dinh, Nenad Gucunski, Jinyoung Kim, Trung H. Duong, Hung M. La. Attenuation-based Methodology for Condition Assessment of Concrete Bridge Decks using GPR // Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC. Vol.32.

174. Edward (Ned) D. Billington. GPR surveys to help determine condition of a concrete bridge deck / Presented at the 3rd International Conference on Applied Geophysics, Hotel Royal Plaza, Orlando, Dec. 8-12, 2003.

175. Hai Liu, Yunpeng Yue, Yunlong Lian, Xu Meng, Yanliang Du, Jie Cui. Reverse-time migration of GPR data for imaging cavities behind a reinforced shield tunnel // Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 146, 2024, 105649. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105649>.

176. Bernardo Lopes Poncetti, Dianelys Vega Ruiz, Marcos Massao Futai. GPR time-energy density analysis with complex wavelets for concrete data analysis // Construction and Building Materials, Volume 458, 2025, 139694. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139694>.

177. Chih-Sung Chen, Yih Jeng. A data-driven multidimensional signal-noise decomposition approach for GPR data processing // Computers & Geosciences. Vol.85, Part A, December 2015, pp. 164–174.

178. Khakiev Z., Shapovalov V., Kruglikov A., Yavna V. GPR determination of physical parameters of railway structural layers // Journal of Applied Geophysics. 2014. Vol. 106, Pp. 139–145.

179. Jung-Ho Kim, Seong-Jun Cho, Myeong-Jong Yi. Removal of ringing noise in GPR data by signal processing // *Geosciences Journal*. Vol. 11, No. 1, March 2007, pp. 75 – 81.

180. Tzanis A. Detection and extraction of orientation-and-scale-dependent information from two-dimensional GPR data with tuneable directional wavelet filters // *Journal of Applied Geophysics*. Vol. 89, February 2013, pp. 48–67.

181. Rasheda M., Harbia H. Background matrix subtraction (BMS): A novel background removal algorithm for GPR data // *Journal of Applied Geophysics*. July 2014. Vol. 106. Pp. 154–163.

182. Stephen Moysey, Rosemary J. Knight, Harry M. Jol. Texture-based classification of ground-penetrating radar images // *Geophysics*. Vol. 71, №6. November-December 2006. Pp. K111–K118.

183. Forte E., Pipan M., Casabianca D., Cuia R. Di., Riva A. Imaging and characterization of a carbonate hydrocarbon reservoir analogue using GPR attributes // *Journal of Applied Geophysics*. 2012, Vol. 81. Pp. 76–87.

184. Yu Zhang, Panglijen Candra, Guoan Wang, Tian Xia. 2-D Entropy and Short-Time Fourier Transform to Leverage GPR Data Analysis Efficiency // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2014, vol. 64 №1, Pp. 103-111.

185. Замотайлов О.В. Задачи распознавания изображений прибора подповерхностной радиолокации на базе мобильной дорожной лаборатории // *Т-Comm - Телекоммуникации и транспорт*. 2010, №6. С.38–42.

186. Forte E., Pipan M., Casabianca D., Cuia R. Di., Riva A. Imaging and characterization of a carbonate hydrocarbon reservoir analogue using GPR attributes // *Journal of Applied Geophysics*. 2012, Vol. 81. Pp. 76–87.

187. Stephen Moysey, Rosemary J. Knight, Harry M. Jol. Texture-based classification of ground-penetrating radar images // *Geophysics*, VOL.71, №6. November-December 2006. Pp. K111–K118.

188. Shuxian Hong, Wallace Wai-Lok Lai, Gerd Wilsch, Rosemarie Helmerich, Robert Helmerich, Tobias Gunther, Herbert Wiggensauser. Periodic mapping of reinforcement corrosion in intrusive chloride contaminated concrete with GPR // *Construction and Building Materials*. Vol. 66 (2014). Pp. 671–684.

189. Jullian Dominic Ducut, Melchizedek Alipio, Phoebe Joanne Go, Ronnie Concepcion II, Ryan Rhay Vicerra, Argel Bandala, Elmer Dadios. A Review of Electrical Resistivity Tomography Applications in Underground Imaging and Object De-

tection // Displays, Volume 73, 2022, 102208.
<https://doi.org/10.1016/j.displa.2022.102208>.

190. Constantin Ungureanu, Adrian Priceputu, Adrian Liviu Bugea, Anton Chirica. Use of electric resistivity tomography (ERT) for detecting underground voids on highly anthropized urban construction sites // *Procedia Engineering*, Volume 209, 2017, Pages 202-209. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.148>.

191. Ефремов И.Д., Большаков Д.К., Модин И.Н. Извлечение информации о естественном поле из данных электротомографии для решения инженерно-геологических задач // *Вестник Филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе*. 2022. Т. 1. № 2 (23). С. 103-112.

192. Dogukan Durdag, Mahmut Goktug Drahor, Mustafa Sadık Yaglidere. Combined application of electrical resistivity tomography and multi-channel analysis of surface waves methods in the tunnel detection: A case study from Kocaeli // *University Campus Site, Turkey, Journal of Applied Geophysics*, Volume 208, 2023, 104895. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2022.104895>.

193. Dao-han Liu, Lei Wang, Lei Liu, Jun-jie Xu, Jian-qiang Wu, Pan Liu. Application of geophysical methods in fine detection of urban concealed karst: A case study of Wuhan City, China // *China Geology*. Volume 7, Issue 3, 2024, Pages 517-532. <https://doi.org/10.31035/cg2023046>.

194. Simon D. Carriere, Konstantinos Chalikakis, Guy Sénéchal, Charles Danquigny, Christophe Emblanch. Combining Electrical Resistivity Tomography and Ground Penetrating Radar to study geological structuring of karst Unsaturated Zone // *Journal of Applied Geophysics*, Volume 94, 2013, Pages 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.03.014>.

195. Гайсин Р.М., Набатов В.В., Дудченко Т.О. опыт электротомографического исследования геомассива в зоне расположения коллекторов // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2011. № 10. С. 118-121.

196. Bellmunt F., Marcuello A., Ledo J., Queralt P., Falgàs E., Benjumea B., Velasco V., Vazquez-Sune E. Time-lapse cross-hole electrical resistivity tomography monitoring effects of an urban tunnel // *Journal of Applied Geophysics*, Volume 87, 2012, Pages 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2012.09.003>.

-
197. Lesparre N., Boyle A., Grychtol B., Cabrera J., Marteau J., Adler A. Electrical resistivity imaging in transmission between surface and underground tunnel for fault characterization // *Journal of Applied Geophysics*, Volume 128, 2016, Pages 163-178. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.03.004>.
198. Li He, Xue Junjie, Fan Kerui, Li Wenhan, Li Xiu. Development of tunnel detection technology using the transient electromagnetic method in China // *Journal of Applied Geophysics*, Volume 233, 2025, 105623. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2025.105623>.
199. Shucaï Li, Shuchen Li, Qingsong Zhang, Yiguo Xue, Bin Liu, Maoxin Su, Zhechao Wang, Shugang Wang. Predicting geological hazards during tunnel construction // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, Volume 2, Issue 3, 2010, Pages 232-242. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1235.2010.00232>.
200. Xulin Su, Jinxing Lai, Enlin Ma, Jiawei Xu, Junling Qiu, Wanfeng Wang. Failure mechanism analysis and treatment of tunnels built in karst fissure strata: A case study // *Engineering Failure Analysis*, Volume 167, Part B, 2025, 109048. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.109048>.
201. Wenhan Li, Jiaying Wang, Xu Guo, He Li, Shucaï Li, Xiu Li. A new transient electromagnetic prospecting method in TBM tunnel environment // *Journal of Applied Geophysics*, Volume 196, 2022, 104492. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104492>.
202. Zijian Ye, Chengping Zhang, Ying Ye, Wenjun Zhu. Application of transient electromagnetic radar in quality evaluation of tunnel composite lining // *Construction and Building Materials*, Volume 240, 2020, 117958. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117958>.
203. Jardani A., Revil A., Santos F., Fauchard C., Dupont J.P. Detection of preferential infiltration pathways in sinkholes using joint inversion of self-potential and EM-34 conductivity data // *Geophysical Prospecting*, Vol. 55, Pp. 749-760. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2007.00638.x>
204. Tanguy Robert, Alain Dassargues, Serge Brouyere, Olivier Kaufmann, Vincent Hallet, Frederic Nguyen. Assessing the contribution of electrical resistivity tomography (ERT) and self-potential (SP) methods for a water well drilling program in fractured/karstified limestones // *Journal of Applied Geophysics*, Volume 75, Issue 1, 2011, Pages 42-53. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.06.008>.

205. Lichao Nie, Zhicheng Song, Wei Zhou, Zhiqiang Li, Xuecai Du, Liang Ma. Full-decay induced polarization multi-parameter tomography method for tunnel water inrush ahead prospecting: A case study // *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 145, 2024, 105589. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105589>.

206. Lichao Nie, Shixun Jia, Wei Zhou, Zhiqiang Li, Pengyu Jing, Shuo Zhang. Assessment of water inrush hazards in tunnels using the inversion method of full-decay induced polarization with physical law constraints // *Engineering Geology*, Volume 354, 2025, 108115. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108115>.

207. Слепак З.М. Геофизика для города. На примере территории г. Казани. Тверь: Герс. 2007, 240 с.

208. Лоджевский М.И., Михайлов И.Н., Чертовских К.А. Возможности гравиразведки при поиске и изучении подземных сооружений // *Разведка и охрана недр*. – 2002. – № 2. – С. 38-41.

209. Karel Spacek. Geophysical investigation performed above the underground objects in Prague after the floods in 2002, followed by research of methodology // *Передовые технологии, оборудование и методы инженерно-геологических и геофизических изысканий и исследований при строительстве подземных сооружений : тезисы докладов и сообщений круглого стола, Москва 14-03-2007*. – М.: Рекламно-издательский центр Тоннельной ассоциации России, 2007. – с.161-164.

210. Бычков С.Г., Долгаль А.С., Симанов А.А. Синтез качественных и количественных методов извлечения геологической информации из гравиметрических данных // *Горный журнал*. – 2013. – № 6. – С. 26-29.

211. Ляндрес А.Ю. Разработка способов интерпретации аномалий гравитационного поля с применением значений его вертикального градиента [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.10 : Защищена – Российский Государственный Университет нефти и газа имени И.М. Губкина, 10.03.2009.

212. Jacob T., Pannet P., Beaubois F., Baltassat J.M., Hannion Y. Cavity detection using microgravity in a highly urbanized setting: A case study from Reims, France // *Journal of Applied Geophysics*, Volume 179, 2020, 104113. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104113>.

213. Dilalos S., Alexopoulos J.D., Tsatsaris A. Calculation of Building Correction for urban gravity surveys. A case study of Athens metropolis (Greece),

Journal of Applied Geophysics, Volume 159, 2018, Pages 540-552.
<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.09.036>.

214. Pueyo Anchuela O., Casas Sainz A.M., Pocovi Juan A., H. Gil Garbi. Assessing karst hazards in urbanized areas. Case study and methodological considerations in the mantle karst from Zaragoza city (NE Spain) // Engineering Geology, Volume 184, 2015, Pages 29-42. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.10.025>.

215. Martinez-Moreno F.J., Galindo-Zaldivar J., Pedrera A., Teixido T., Ruano P., Pena J.A., Gonzalez-Castillo L., Ruiz-Constan A., Lopez-Chicano M., Martin-Rosales W. Integrated geophysical methods for studying the karst system of Gruta de las Maravillas (Aracena, Southwest Spain) // Journal of Applied Geophysics, Volume 107, 2014, Pages 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.05.021>.

216. Pitambar Gautam, Surendra Raj Pant, Hisao Ando. Mapping of subsurface karst structure with gamma ray and electrical resistivity profiles: a case study from Pokhara valley, central Nepal // Journal of Applied Geophysics, Volume 45, Issue 2, 2000, Pages 97-110. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(00\)00022-7](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(00)00022-7).

217. Laskow M., Gendler M., Goldberg I., Gvirtzman H., Frumkin A. Deep confined karst detection, analysis and paleo-hydrology reconstruction at a basin-wide scale using new geophysical interpretation of borehole logs // Journal of Hydrology // Volume 406, Issues 3TAY4, 2011, Pages 158-169. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.06.011>.

218. Li S.C., Zhou Z.Q., Ye Z.H., Li L.P., Zhang Q.Q., Xu Z.H. Comprehensive geophysical prediction and treatment measures of karst caves in deep buried tunnel // Journal of Applied Geophysics, Volume 116, 2015, Pages 247-257, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.03.019>.

219. Shinji Konishi, Koichi Kawakami, Masumi Taguchi. Inspection Method with Infrared Thermometry for Detect Void in Subway Tunnel Lining // Procedia Engineering, Volume 165, 2016, Pages 474-483. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.723>.

220. Qingqiao Geng, Ying Ye, Xiaoliang Wang. Identifying void defects behind Tunnel composite lining based on transient electromagnetic radar method // NDT & E International, Volume 125, 2022, 102562. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2021.102562>.

221. Методика комплексного обследования состояния строительных конструкций сооружений метрополитена, попадающих в зону влияния строитель-

ства городских объектов // Разработана филиалом ОАО ЦНИИС «НИЦ «Тоннели и метрополитены», директор филиала Меркин В.Е; утверждена зам. ген. директора ОАО ЦНИИС Церценат А.А. – Москва, 2006.

222. Meng Hu, Yude Xu, Shaozheng Li, Hongyao Lu. Detection of defect in ballastless track based on impact echo method combined with improved SAFT algorithm // Engineering Structures, Volume 269, 2022, 114779. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114779>.

223. Sikandar Sajid, Luc Chouinard. Impulse response test for condition assessment of concrete: A review // Construction and Building Materials, Volume 211, 2019, Pages 317-328. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.174>.

224. Hai-xiang Tang, Shi-guo Long, Ting Li. Quantitative evaluation of tunnel lining voids by acoustic spectrum analysis // Construction and Building Materials, Volume 228, 2019, 116762. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116762>.

225. Liang Zhang, Tonghua Ling, Bin Yu, Fu Huang, Sheng Zhang. Intensive interferences processing for GPR signal based on the wavelet transform and F-K filtering // Journal of Applied Geophysics, Volume 186, 2021, 104273. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104273>.

226. Liang Zhang, Sheng Zhang, Tonghua Ling, Fu Huang. Biorthogonal wavelet energy entropy method with different time windows for strong interference processing of GPR signals // Journal of Applied Geophysics, Volume 216, 2023, 105158. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.105158>.

227. Zhong Zhou, Shirong Zhou, Shishuai Li, Hongchang Li, Hao Yang. Tunnel lining quality detection based on the YOLO-LD algorithm // Construction and Building Materials, Volume 449, 2024, 138240. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138240>.

228. Fei Xu, He Li, Hongge Yao, MingShou An. Detection method of tunnel lining voids based on guided anchoring mechanism // Computers and Electrical Engineering, Volume 95, 2021, 107462. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2021.107462>.

229. Yishuang Zhang, Cheuk Lun Chow, Denvind Lau. Artificial intelligence-enhanced non-destructive defect detection for civil infrastructure // Automation in Construction, Volume 171, 2025, 105996. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.105996>.

230. Wu Y., Xu F., Zhou L., Zheng H., He Y., Lian Y. A GPR Imagery-Based Real-Time Algorithm for Tunnel Lining Void Identification Using Improved YOLOv8 // *Buildings*. 2025, 15, 3323. <https://doi.org/10.3390/buildings15183323>

231. Hongqiang Xiong, Jing Li, Guofeng Su, Zhilian Li, Zhiyu Zhang. Automatic defect detection in operational high-speed railway tunnels guided by train-mounted ground penetrating radar data // *Journal of Applied Geophysics*, Volume 219, 2023, 105219. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.105219>.

232 Zhong Zhou, Shirong Zhou, Shishuai Li, Hongchang Li, Hao Yang. Tunnel lining quality detection based on the YOLO-LD algorithm // *Construction and Building Materials*, Volume 449, 2024, 138240. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138240>.

233. Rudin C. Stop Explaining Black Box Machine Learning Models for High Stakes Decisions and Use Interpretable Models Instead // *Nature Machine Intelligence*. 2019 May;1(5), Pp. 206-215. doi: 10.1038/s42256-019-0048-x.

234. Измеритель длины свай «ИДС-1» [Internet]. Россия : ООО «Логические системы» [cited 2015 March 10]. Available from: <http://www.logsys.ru/index.php?page=26>.

235. COMSOL Multiphysics : Structural Mechanics Module User's Guide – Version: 2016, COMSOL 5.2a.

236. Добрынина А.А., Чечельницкий В.В., Саньков В.А. Сейсмическая добротность литосферы юго-западного фланга байкальской рифтовой системы // *Геология и геофизика*, 2011, т. 52, № 5.- с. 712-724.

237. Aki, K. Analysis of the seismic coda of local earthquakes as scattered waves // *J. Geophys. Res.* 1969, 74.- P. 615–631.

238. Aki K., Chouet B. Origin of coda waves: source, attenuation and scattering effects // *J. Geophys. Res.* 1975.- 80.- P. 3322–3342.

239. Физические величины: Справочник / Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др.; Под. ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е. З. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

240. James M. Gere and Barry J. Goodno. *Mechanics of Materials*, Seventh Edition. – : Cengage Learning, 2009. – 1022 pp.

241. Терминологический словарь-справочник по инженерной геологии / Сост. Е.М. Пашкин, А.А. Каган, Н.Ф. Кривоногова; Под. ред. Е.М. Пашкина. – М.: КДУ, 2011. – 952 с.

-
242. Енохович А.С. Краткий справочник по физике. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М., «Высшая школа». - 1976. - 288 с.
243. Chen S.G., Zhao J., Makurat A., Madshus C.,. Mesh size influence on dynamic modelling. *Fragblast // International Journal for Blasting and Fragmentation*, 2000, Vol. 4, pp.164-174.
244. Courant R., Friedrichs K. O., Lewy H. On the partial difference equations of mathematical physics // *IBM Journal*. 1967. Vol. 11.-Pp.215-234.
245. Stresses in the soil surrounding a traffic tunnel // *COMSOLRelease Notes. VERSION 3.2b*. Pp. 94-110.
246. Назарова Л.А. Использование сейсмотектонических данных для оценки полей напряжений и деформаций земной коры // *ФТПРПИ*, №1, 1999, С. 28–36.
247. Aleksandr S. Voznesenskii, Vladimir V. Nabatov. Identification of filler type in cavities behind tunnel linings during a subway tunnel surveys using the impulse-response method // *Tunnelling and Underground Space Technology*. Volume 70, November 2017, Pages 254–261. DOI: 10.1016/J.TUST.2017.07.010.
248. Набатов В.В. О свойствах акустической границы между твердым телом и жидкостью при моделировании упругих волн в геосредах в Comsol Multiphysics // *Ученые записки физического факультета московского университета*. 2017, №5.
249. Nabatov V.V., Voznesenskii A. S. Influence of soil–tunnel lining interface on its control by acoustic response to impulse impact // *Eurasian mining*. 2022, №1. Pp. 8-12. DOI: 10.17580/em.2022.01.02.
250. Набатов В.В., Вознесенский А.С. Геомеханический анализ влияния строительства новых тоннелей в окрестности действующих подземных сооружений метрополитена на состояние грунтового массива // *Записки Горного института*. 2023. Т. 264. С. 926-936. EDN JNNOAW.
251. Набатов В.В. О свойствах акустической границы между твердым телом и жидкостью при моделировании упругих волн в геосредах в Comsol Multiphysics // *Ученые записки физического факультета московского университета*. 2017, №5, №1750808.
252. Nabatov V.V., Voznesenskii A.S. Geomechanical analysis of the impact of the new tunnels construction in the vicinity of existing underground subway struc-

tures on the state of the soil massif // Journal of Mining Institute. 2023. Vol. 264. p. 926-936.

253. Меркин В.Е., Харченко И.Я., Панченко А.И., Зерцалов М.Г., Вознесенский А.С., Хохлов И.Н., Симутин А.Н., Петрова Е.Н., Набатов В.В., Алексеев В.А., Медведев Г.М., Елифанов С.В., Мильчевский П.С., Минин К.Е., Волынчикова Е.С. Руководство по проектированию и технологии выполнения работ по компенсационному нагнетанию в грунты основания для обеспечения сохранности зданий и сооружений при освоении подземного пространства в городе Москве (Нормативно-методическое издание) // Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. – 69 с.

254. Меркин В.Е., Зерцалов М.Г., Петрова Е.Н., Хохлов И.Н., Ляпидевский Б.В., Пархоменко В.Н., Аникеева А.А, Постоева Г.П., Казеева А.И., Кучукова М.М., Беляева В.Л., Чунюка Д.Ю., Уткина М.М., Вознесенский А.С., Набатов В.В. Руководство по строительству подземных сооружений транспортного назначения в условиях карстово-суффозионной и оползневой опасности в городе Москве // Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 176 с.

255. Капустин В.В, Чуркин А.А, Ломоносов М.В., Владов М.Л., Набатов В.В., Гайсин Р.М., Николенко П.В. Руководство по контролю качества скрытых работ геофизическими методами при строительстве подземных объектов, включая объекты метрополитена, на территории Москвы // Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы, 114 с: [Электронный документ]. (URL - <https://mtsk.mos.ru/documents/33218/>). Проверено 01-10-2025.

256. Набатов В.В. Оценка состояния заобделочного пространства тоннелей метрополитенов по спектральным атрибутам добротности колебаний системы «обделка – грунт» // Горный журнал. 2019, №7. С. 67-70. DOI: 10.17580/gzh.2019.07.03.

257. Вознесенский А. И., Набатов В.В., Симонов Н.Н., Ромащенко В.А. Опыт акустического контроля границы «обделка-грунт» тоннелей метрополитена // Горный информационно-аналитический бюллетень. Москва, 2011, №9. С. 201-207.

258. Набатов В.В., Гайсин Р.М. Георадиолокационное обследование массивов горных пород вблизи эксплуатирующихся коллекторов с целью выявления областей разуплотнения // Горный информационно-аналитический бюллетень. Москва, 2012, №11. С. 60-68.

-
259. Набатов В.В., Гайсин Р.М., Вознесенский А.С. Георадиолокационная оценка качества контакта "грунт-обделка" в условиях тоннелей метрополитенов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013, №9. С. 157-163
260. Набатов В.В. Повышение эффективности георадиолокационного обследования конструкций тоннелей метрополитенов за счёт уменьшения помехового влияния прямой волны // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. Отдельный выпуск №1. С. 43-55.
261. Набатов В.В. Уменьшение помехового влияния прямой волны при георадиолокационном обследовании тоннелей метрополитенов за счет подавления артефактов обработки экспериментальных данных // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. №9. С. 77-84.
262. Набатов В.В., Вознесенский А.С. Георадиолокационное обнаружение полостей в заобделочном пространстве тоннелей метрополитенов в условиях влияния помеховых факторов // Горный журнал. 2015, №2. С. 15-20.
263. Harry M. Jol. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Elsevier Science, 2009. – 544 pp.
264. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию : Учебное пособие – М.: Издательство МГГУ, 2004. – 153 с.
265. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М: Техносфера, 2005. – 1072 с.
266. Еременко А.В., Зверев Е.О., Клепикова С.М., Монахов В.В. Георадиолокация в присутствии железобетонных конструкций // Разведка и охрана недр. – 2004, №12. С. 26-28.
267. Рекомендации по проведению георадиолокационного обследования объектов промышленного и гражданского строительства [текст] / ООО "Логические системы" г. Раменское. – 2008. – 24 с.
268. Программа управления георадаром "ОКО-2" и визуализации получаемых данных GeoScan32. Руководство пользователя. Версия 2.5 / ООО "Логические Системы". 2009. – 132 с.
269. Набатов В.В. Повышение эффективности георадиолокационного обследования конструкций тоннелей метрополитенов за счёт уменьшения помехового влияния прямой волны // ГИАБ. – 2014, Отдельный выпуск №1. – С. 43-55.

270. T.T. Wu, R.W.P. King. The Cylindrical Antenna with Nonreflecting Resistive Loading. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. May 1965. V. AP-13, N.3.

271. Георадары серии "Лоза" – раздел сайта производителя георадара, ООО "Компания ВНИИСМИ": [Электронный документ]. (<http://www.geo-radar.ru/articles/article2.php>). Проверено 01-10-2025.

272. Набатов В.В., Морозов П.А., Семенихин А.Н. Выявление подземных коммуникаций на площадке строительства с помощью георадаров с резистивно-нагруженными антеннами // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012, №10. С. 120–134.

273. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. Учебное пособие. – М: Издательство МГУ, 2004. – 153 с. ISBN 5-211-04938-1.

274. D. De Domenico, A. Teramo, D. Campo. GPR surveys for the characterization of foundation plinths within a seismic vulnerability analysis // Journal of Geophysics and Engineering. 2013. Volume 10. Number 3. DOI:10.1088/1742-2132/10/3/034007.

275. Daniels, David. Ground-penetrating radar. – 2nd ed. –The Institution of Electrical Engineers, London, 2004. – 734 pp.

276. Копейкин В.В. Обратная задача георадиолокации: [Электронный документ]. (<http://www.geo-radar.ru/articles/article4.php>). Проверено 01-11-2024.

277. Голосов В., Захаров В., Костюченко С., Липовецкий И. Малоглубинная сейсморазведка – эффективный инструмент московских градостроителей // Инженерные изыскания. 2008, №2. С. 76-85

278. Yamshchikov V.S., Voznesenskii A.S. Informational bases for the monitoring of geomechanical processes // Journal of Mining Science. 1994, Vol. 30, Iss. 3. Pp. 229-237.

279. Yamshchikov V.S., Voznesenskii A.S. Information theory principles of technological control of the stability of mine workings // Soviet Mining Science. 1980, Vol. 16, Iss. 6. Pp. 595-600.

280. Yu Zhang, Panglijen Candra, Guoan Wang, Tian Xia. 2-D Entropy and Short-Time Fourier Transform to Leverage GPR Data Analysis Efficiency // IEEE transactions on instrumentation and measurement. Vol. 64, №.1, Jan. 2015. Pp. – 103-111.

281. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 1998 – 576 с.

282. Пчелка В.Я., Фрейман Г.Г., Михно А.Н., Мальченко Е.Г., Мальченко Т.Д. Опыт применения георадаров серии "Лоза" при поисках перекрытых медно-золоторудных зон // Геология и охрана недр. 2012, №2(43). С. 82-88.

283. Беркут А.И., Едемский Д.Е., Копейкин В.В., Морозов П.А., Прокопович И.В., Попов А.В. Глубинный георадар: аппаратура, результаты, интерпретация : [Электронный документ]. (<https://georadar-loza.ru/source/dokladi/Gлубинный-георадар-аппаратура-результаты-интерпретация.pdf>). Проверено 01-08-2025.

284. Калашик А.И., Казачков С.В., Сохарев В.А., Запорожец Д.В., Дьяков А.Ю., Демахин А.Ю. Георадарные определения состояния и структуры уступов карьера "Железный" Ковдорского ГОКа // Глубокие карьеры: сб. докл. Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием 18-22 июня 2012 г. – Апатиты / глав. ред. – Мельников Н.Н. – СПб., 2012. – 488 с.

285. Дж. С. Дэвис. Статистический анализ данных в геологии. Кн.1. – М.: Недра, 1990. – 319 с.

286. Шеффе Г. Дисперсионный анализ. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 512 с.

287. Набатов В.В., Вознесенский А.С. Георадиолокационное обнаружение полостей в заобделочном пространстве тоннелей метрополитенов // Горный журнал. 2015, №2. С. 15-20. <http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2015.02.03>.

288. Набатов В.В., Гайсин Р.М., Николенко П.В. Локация течей с помощью георадаров при строительстве и эксплуатации подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017, №7. С. 161-167.

289. Набатов В.В. Повышение эффективности георадиолокационного обследования конструкций тоннелей метрополитенов за счёт уменьшения помехового влияния прямой волны // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014, Отдельный выпуск №1. С. 43-55.

290. Набатов В.В. Уменьшение помехового влияния прямой волны при георадиолокационном обследовании тоннелей метрополитенов за счет подавления артефактов обработки экспериментальных данных // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014, №9. С. 77-84.

291. Набатов В.В., Гайсин Р.М. Георадиолокационное выявление параметров армирования строительных конструкций и тоннелей метрополитенов. Спектр задач и помеховых факторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014, №12. С. 168-175.

292. Набатов В.В. Георадиолокационные обследования массивов пород вблизи аварийных коллекторов с привлечением данных СМР-измерений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015, №3. С. 197-206.

293. Набатов В.В. Использование информационной энтропии в качестве идентификатора выявления строения массива горных пород с помощью низкочастотных георадаров // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 2. С. 190-200. <https://doi.org/10.1134/S1062739117022295>.

294. Набатов В.В., Морозов П.А. Оценка карстово-суффозионной опасности с помощью георадаров с резистивно-нагруженными антеннами // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013, №8. С. 83-89.

295. Набатов В.В., Гайсин Р.М. Георадиолокационное обследование массивов горных пород вблизи эксплуатирующихся коллекторов с целью выявления областей разуплотнения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012, №11. С. 60-68.

296. Набатов В.В., Гайсин Р.М., Гораньков И.И. Опыт георадиолокационного обследования массива для прогнозирования условий щитовой проходки коллекторов в условиях мегаполиса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011, №8. С. 202–211.

297. Набатов В.В., Гайсин Р.М. Обработка данных георадиолокационной съемки при выявлении полостей в заобделочном пространстве // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018, №1. С. 19-25. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-0-19-25.

298. Набатов В.В. Георадиолокационное обследование геомассивов до щитовой проходки коллекторов в условиях мегаполиса // Труды международной научно-технической конференции "Основные направления развития инновационных технологий при строительстве тоннелей и освоении подземного пространства крупных мегаполисов" М.: Метро и тоннели, 2011, с. 135-138.

299. Набатов В.В. Выявление аварийно-опасных областей под дорожным покрытием с помощью георадиолокации // Труды международной научно-

технической конференции "Основные направления развития инновационных технологий при строительстве подземных сооружений на современном этапе. Тенденции. Проблемы. Перспективы" М.: Метро и тоннели, 2012, с. 162-165.

300. Набатов В.В. Выявление карстов в условиях мегаполисов с помощью сверхмощных георадаров // Труды международной научно-технической конференции "Основные направления развития инновационных технологий при строительстве подземных сооружений на современном этапе. Тенденции. Проблемы. Перспективы" М.: Метро и тоннели, 2013, с. 137-140.

301. Набатов В.В., Изюмов С.В., Миронов С.И. Использование сейсморазведки с целью уточнения инженерно-геологических условий строительства тоннелей метрополитенов // XII Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле» (Москва : Российский государственный геологоразведочный университет, 8–10 апреля, 2015 г.) : в 2 т. : доклады / ред. коллегия: В.И. Лисов, В.А. Косьянов, О.С. Брюховецкий. – Т.2. – М. : МГРИ-РГГРУ, 2015. С. – 100-102.

302. Набатов В.В. Георадиолокационное обследование массива пород в заобделочном пространстве: особенности обработки и интерпретации результатов // Транспортное строительство. 2017, №11. С. 12-15.

303. Геофизика / Под ред. В.К. Хмелевского. – 4-е изд. – М.: КДУ, 2015. – 320 с.

304. Mapping Voids, Debonding, Delaminations, Moisture, and Other Defects Behind or Within Tunnel Linings // TRB's second Strategic Highway Research Program (SHRP 2) Report S2-R06G-RR-1. 2013, 555 pp. DOI: 10.17226/22609.

305. Вартанов А.З., Ковпак И.В., Титов Н.Е. Геоконтроль при щитовой проходке коллекторов неглубокого заложения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005, №7. С. 87-92.

306. Еременко А.В., Зверев Е.О., Клепикова С.М., Монахов В.В. Георадиолокация в присутствии железобетонных конструкций // Разведка и охрана недр. – 2004, №12. С. 26-28.

307. Омеляненко А.В., Федорова Л.Л. Георадиолокационная технология в горно-геофизических исследованиях криолитозоны // Горный журнал. 2005. № 12. С. 128-131.

308. Андрианов С. В. Мониторинг состояния заобделочного пространства горных выработок методом георадиолокации // Горный информационно-

аналитический бюллетень. – 2019. – № 5. – С. 124-132. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-124-132.

309. Капустин В.В., Чуркин А.А., Ширококов М.П. Опыт применения георадиолокации для контроля качества фундаментных плит // Геотехника, Том XIII, № 1, с. 68–79, <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2021-13-1-68-79>.

310. Капустин В.В., Синицин А.В., 2018. Применение атрибутивного анализа для решения прикладных задач георадарного профилирования // Геофизика. – 2018. – № 2. – С. 17–23.

311. Пудова Н.Г., Капустин В.В., Кувалдин А.В. Применение атрибутивного анализа для интерпретации георадиолокационных данных: препринт. URL: <https://geoinfo.ru/product/pudova-natalya-gennadevna/primenenie-atributnogo-analiza-dlya-interpretacii-georadiolokacionnyh-dannyh-36819.shtml> (дата обращения: 16.01.2022).

312. Moore J.C., Grinsted A. Singular spectrum analysis and envelope detection: methods of enhancing the utility of ground-penetrating radar data // Journal of Glaciology. 2006;52(176):159-163. doi:10.3189/172756506781828863.

313. Набатов В.В., Уткина А.В. Анализ поведения добротности и ее составляющих при георадиолокационном выявлении полостей в массиве пород на границе "обделка-грунт" // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022, №6. С. 142-155. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_142.

314. Набатов В.В., Уткина А.В. Специфика изменчивости признаков зарегистрированных сигналов при георадиолокационном выявлении полостей в массиве пород на границе "обделка-грунт" // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023, №7. С. 52-63. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_7_0_52.

315. Николенко П.В., Набатов В.В. Об обеспечении помехозащищенности геоакустического контроля критических напряжений в породном массиве // Горный журнал. 2015, №9. С. 33 - 35. <http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2015.09.06>.

316. Уткина А.В., Набатов В.В. Особенности сигналов-идентификаторов при георадиолокационном выявлении разуплотнений в заобделочном пространстве // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 15 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. 25-28 октября 2021 г. – М: ИПКОН РАН, 2021 С. 137-140.

317. Уткина А.В., Набатов В.В. Выявление полостей на границе грунт-обделка по результатам анализа поведения комплекса признаков при георадиолокационном обследовании тоннелей метрополитенов // В сборнике: Российский форум изыскателей. сборник докладов V Международной научно-практической конференции. Москва, 2023. С. 231-235.

318. Уткина А.В., Набатов В.В. Выявление областей разуплотнённых грунтов в заобделочном пространстве тоннелей метрополитенов с помощью комплексирования признаков, вычисляемых по результатам обработки георадиолокационных трасс // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 16 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. 23-27 октября 2023 г. – М: ИПКОН РАН, 2023 С. 45-47.

319. Yamshchikov V.S., Voznesenskii A.S. Informational bases for the monitoring of geomechanical processes // Journal of Mining Science, Vol. 30, No. 3. 1994.

320. Yamshchikov V.S., Voznesenskii A.S. Information theory principles of technological control of the stability of mine workings // Soviet Mining Science 16, 595–600 (1980). <https://doi.org/10.1007/BF02499438>

321. Voznesenskii, A.S., Zakharchenko, G.V. Substantiation of Roof and Pillar Stability Monitoring in Mines with the Help of Information Criterion / Journal of Mining Science 37, 140–148 (2001). <https://doi.org/10.1023/A:1012375510439>

322. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. Пер. с англ. М.: Мир, 1976.-512 с.

323. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов.: Пер. с англ.-М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1979. – 368 с.

324. Silverman B.W. Density estimation for statistics and data analysis: Chapman & Hall. CRC, 1986. – 200 pp.

325. Р. Дуда, П. Харт. Распознавание образов и анализ сцен / пер. с англ. ред. В. Л. Стефанюк. – М. : Мир, 1976. – 511 с.

326. Набатов В.В. Комплексирование признаков, вычисляемых по результатам измерений с помощью геофизических методов при выявлении полостей в заобделочном пространстве тоннелей метрополитенов // Двадцать шестая уральская молодежная научная школа по геофизике: Сборник науч. материалов. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2025. 210 с.

327. Набатов В.В. Разработка комплексного геофизического метода обнаружения полостей в заобделочном пространстве при строительстве и эксплуатации подземных сооружений // Академический исследовательский журнал. Том 4 (2025). № 9. С. 54-67.

328. Набатов В.В. Комплексирование признаков при сейсмоакустическом выявлении полостей в за-обделочном пространстве тоннелей метрополитенов // «Акустика среды обитания» X Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (Москва 29-30 мая 2025 года): материалы конференции / МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025. – 423 с. ISBN: 978-5-7038-6584-2.

329. Набатов В.В. Использование байесовской классификации при оценке структуры заобделочного пространства тоннелей метрополитенов // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 17 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. 27-31 октября 2025 г. – М: ИПКОН РАН, 2025 – 416 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Информация об использовании результатов работы



СПРАВКА

Результаты диссертационной работы на соискание доктора технических наук Набатова Владимира Вячеславовича на тему «Обоснование и разработка комплексного геофизического метода обнаружения полостей в заобделочном пространстве при строительстве и эксплуатации подземных сооружений» использованы АО «Мосинжпроект» при разработке следующих нормативных документов:

СТО-75-25 «Контроль качества скрытых работ геофизическими методами при строительстве объектов метрополитена»;

ГОСТ Р 71733-2024 «Строительные работы и типовые технологические процессы. Контроль качества скрытых работ геофизическими методами при строительстве подземных объектов»;

СП 120.13330.2022 «СНиП 32-02-2003. Метрополитены», а также внедрены в практику контроля качества тампонажа заобделочного пространства при проходке перегонных тоннелей метрополитена города Москвы.

И.о. заместителя генерального директора –
технический директор



В.П. Кивлюк



Исх № 1256 от 30.10.2025 г.

Справка

Результаты диссертационной работы на соискание доктора технических наук Набатов Владимира Вячеславовича на тему «Обоснование и разработка комплексного геофизического метода обнаружения полостей в заобделочном пространстве при строительстве и эксплуатации подземных сооружений» использованы при разработке руководящих технических материалов по заказу Департамента градостроительной политики города Москвы:

1. Меркин В.Е., Харченко И.Я., Панченко А.И., Зерцалов М.Г., Вознесенский А.С., Хохлов И.Н., Симутин А.Н., Петрова Е.Н., Набатов В.В., Алексеев В.А., Медведев Г.М., Елифанов С.В., Мильчевский П.С., Минин К.Е., Волынчикова Е.С. Руководство по проектированию и технологии выполнения работ по компенсационному нагнетанию в грунты основания для обеспечения сохранности зданий и сооружений при освоении подземного пространства в городе Москве (Нормативно-методическое издание) // Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. – 69 с.

2. Меркин В.Е., Зерцалов М.Г., Петрова Е.Н., Хохлов И.Н., Ляпидевский Б.В., Пархоменко В.Н., Аникеева А.А., Постоева Г.П., Казеева А.И., Кучукова М.М., Беляева В.Л., Чунюка Д.Ю., Уткина М.М., Вознесенский А.С., Набатов В.В. Руководство по строительству подземных сооружений транспортного назначения в условиях карстово-суффозионной и оползневой опасности в городе Москве // Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 176 с.

3. Капустин В.В., Чуркин А.А., Ломоносов М.В., Владов М.Л., Набатов В.В., Гайсин Р.М., Николенко П.В. Руководство по контролю качества скрытых работ геофизическими методами при строительстве подземных объектов, включая объекты метрополитена, на территории Москвы // Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы, 114 с: [Электронный документ]. (URL - <https://mtsk.mos.ru/documents/33218/>). Проверено 01-10-2025.

Генеральный директор А.Т.Н.



В.Е. Русанов