

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

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:

доктор технических наук
Вознесенский Александр Сергеевич

Москва - 2025

Актуальность работы. 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 разрешающей 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.

Для достижения сформулированной цели были поставлены и решены следующие **задачи 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.

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 натурального 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 карстово-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-техническая конференция «Основные направления развития инновационных технологий при строительстве 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 специа-

листов «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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В *первой главе* анализируется современное состояние проблем, связанных с выявлением неоднородностей в массиве, влияющих на строительство и эксплуатацию подземных сооружений, в частности тоннелей метрополитенов. Стоит отметить большую роль в выявлении неоднородностей в массиве таких учёных, как Бауков А.Ю., Бауков Ю.Н., Владов М.Л., Вознесенский А.С., Гринёв А.Ю., Дручинин С.В., Золотарев В.П., Изюмов С.В., Капустин В.В., Конюхов Д.С., Копейкин В.В., Мазеин С.В., Меркин В.Е., Морозов П.А., Павлов С.В., Старовойтов А.В., Фёдорова Л.Л., Чуркин А.А. и др. Большой вклад внесён зарубежными учеными Meguid M.A., Jifei W., Azari H., Song K., Harry M. Jol, Aggelis D.G., Guangyan Cui, Jie Cui, Jinxing Lai, Junling Qiu. Проведенный анализ публикаций в выбранной области исследования позволил установить ряд особенностей, характерных для современного состояния задач выявления неоднородностей массива, среди которых ключевыми являются:

– направленность существующих методов в основном на картирование областей ослабленного контакта без оценки свойств и состояния массива в заобделочном пространстве;

– присутствие проблем с подтверждением получаемого прогноза и его достоверностью, что требует дальнейшего развития методов геофизического прогноза полостей в заобделочном пространстве;

– воздействие на результаты геофизического прогноза большого количества помеховых факторов, среди которых присутствуют как общие для различных методов факторы (конструктивные особенности обделки, трудоёмкость съёмки, либо интерпретации), так и источники помех, специфичные для каждого метода («воздушные» помехи для георадиолокации, характер удара для сейсморазведки). 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.

Ключевой проблемой в сфере вопросов достоверности является то, что подтверждение результатов обследований должно производиться прямым методом. Однако в действующих тоннелях это обследование крайне нежелательно, поскольку может привести к поступлению грунтовых вод в выработку, что может обострить ситуацию с полостями в заобделочном пространстве за счёт выноса грунта в выработку вместе с водой. Особенно остро эта ситуация стоит в случае работ в действующих тоннелях – появившиеся течь должна быть устранена в рамках короткого ночного окна, когда производятся работы.

Выходами здесь могут быть: проверка методов на тех участках, на которых расположение полостей известно, комплексирование с другими методами, развитие уже существующих методов (повышение помехозащищённости и специфичности методов, другие подходы).

Вторая глава посвящена вопросам развития метода сейсмоакустического контроля заобделочного пространства. Основой для исследований, описанных в этой главе, стали плановые съёмки, а также натурные эксперименты, производившиеся в тоннелях Московского метрополитена.

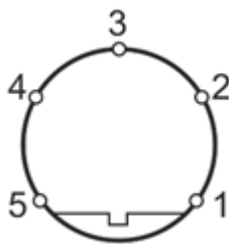


Рис. 1. Схема расположения точек обследования на внутренней поверхности тоннеля с указанием их номеров n

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. Для измерений использовалась двухканальная сеймостанция ИДС-1. В качестве приёмника использовались как электродинамические, так и пьезокерамические преобразователи. Параметры регистрации: полоса пропускания ре-

гистрирующей системы от 7 Гц до 8 кГц, частота дискретизации 96 кГц. В процессе обследования преобразователь прижимался к обделке. На расстоянии 10-30 см от преобразователя производилась серия из 5 ударов по обделке с последующим усреднением зарегистрированного отклика. На рис. 1 представлена схема расположения точек обследования на внутренней поверхности тоннеля. При отсутствии полости (рис. 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, *б*). В этом случае обделка играет роль мембраны, а демпфирующее воздействие среды за обделкой гораздо меньше, чем при наличии грунта. Так же могут возникать сигналы с выраженной низкочастотной составляющей (рис. 2, *в*), которые могут как указывать на полость, так и быть результатом помехового воздействия.

Описанные особенности сигналов удобно оценивать по энергии сигнала:

$$E_p = \int_0^{t_{\max}} A^2(t) dt, \quad (1)$$

где $t_{\max}$ – длительность записи сигнала; E_p – значение энергетического параметра за отрезок времени от $t = 0$ до $t = t_{\max}$; $A(t)$ – амплитудные значения сигнала. Превышение определённого порогового значения этим параметром будет указывать на наличие полости за обделкой. При обработке результатов обследования значения E_p между точками интерполировались (кригинг, либо метод Шепарда) и отстраивались в виде карт качества контакта.

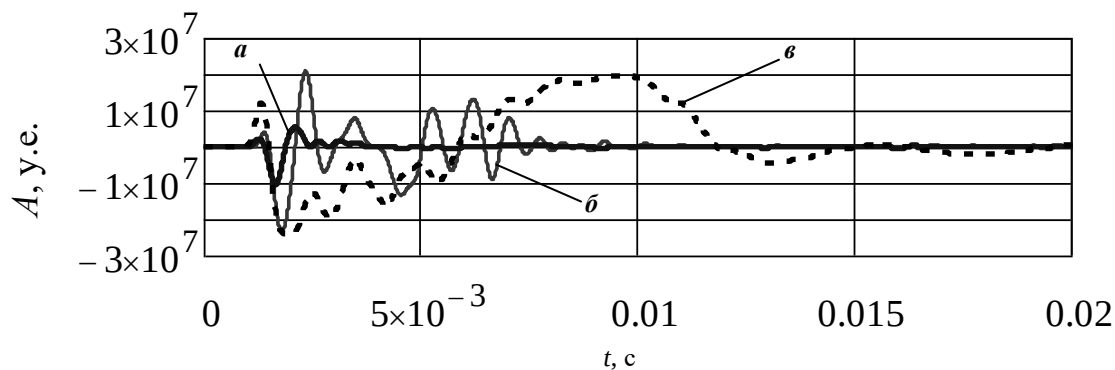


Рис. 2. Пример волновых форм для различных вариантов заполнителя: *а* – нет полости за обделкой, *б* – есть полость за обделкой, *в* – есть полость за обделкой (случай с выраженными низкочастотными компонентами в сигнале)

Распознавание вида заполнителя в полостях заобделочного пространства. Наиболее интересные результаты этой части работы были получены при моделировании сигналов отклика обделки на ударное воздействие. Основным принципом этого исследования было сопоставление сейсмоакустических откликов, полученных при съёмках в тоннелях, с откликами, полученными в результате конечно-элементного моделирования.

Было проведено компьютерное моделирование методом конечных элементов в двумерной постановке в среде COMSOL Multiphysics, в рамках упругой модели, основанной на принципе Мора–Кулона. Модель грунтового массива, ограниченного сверху дневной по-

верхностью и включающего выработку с обделкой, имела размеры 500x250 м. Высота и ширина моделируемого тоннеля $H = 4.9$ м, толщина плиты обделки $B = 0.2$ м. Отражения от боковых и донной поверхностей всей модели подавлялись пространственной нелинейной функцией затухания. На рис. 3 представлена схема той части 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 (рис. 3). Модели различались размером полости. Физико-механические свойства, как массива, так и конструкций выработки были заданы как типичные значения, взятые по справочным материалам.

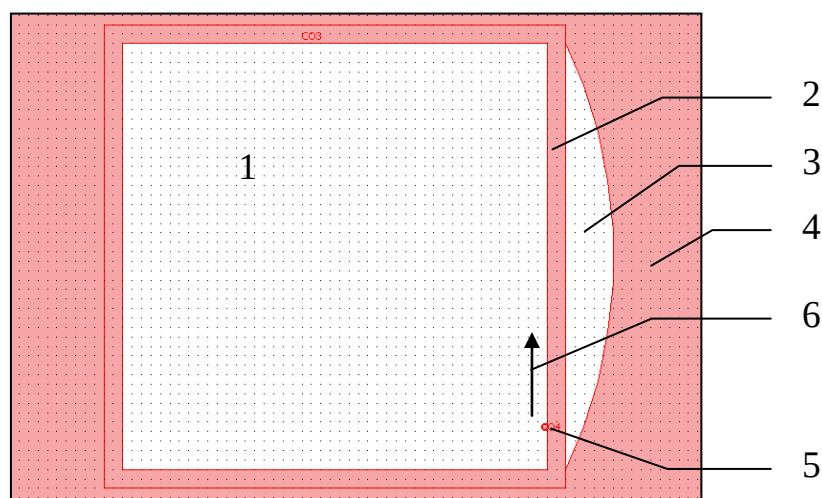


Рис. 3. Основные элементы модели: 1 – пространство тоннеля, 2 – обделка тоннеля, 3 – полость (вариант с размером полости, равным высоте обделки), 4 – массив пород, 5 – ударник, 6 – направление передвижения ударника при измерениях

Модель была подвергнута верификации и валидации. Для этого в модели был имитирован процесс съёмки вдоль профиля, расположенного на внутренней поверхности тоннеля (см. рис. 3 цифра 6). Всего было «пройдено» три профиля для трёх разных моделей: большая полость, малая полость и без полости. Графики энергии отклика показали подъём значений E_p на участках, за которыми располагалась полость. Это показало, что модель ведёт себя корректно. Спектры рассчитанных при моделировании откликов показали высокую соизменчивость с сигналами, зарегистрированным в тоннелях московского метрополитена. При размере полости $0.5 H$ корреляция между модельным и натурным спектрами диапазоне частот $840 \div 4200$ Гц составила $R = 0.91$. В процессе работы с моделью возникла необходимость удлинять трассу (по сравнению с натурными данными), для того чтобы более детально анализировать низкочастотную часть спектра, а также менять параметры затухания в среде, чтобы сделать спектр менее «изрезанным».

При моделировании изменялся наполнитель полости (воздух, вода, смесь грунта и воды, грунт – т.е. без полости). Эта стадия работы показала, что именно для варианта "в полости вода" возникает резонансный максимум вблизи $f_{res} = 900$ Гц (см. рис. 4). Варианты "в полости воздух" и "без полости" представлены относительно гладкими графиками спектров. 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" (см. рис. 4).

Это позволяет использовать результаты моделирования для выявления типа наполнителя 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 наполнителя дает значение коэффициента корреляции $R = 0.91$, вариант "в полости воздух" – $R = 0.79$, а модель "без полости" – $R = 0.77$. На основании полученных результатов появляется возможность идентифицировать в качестве наполнителя именно воду, для которой коэффициент корреляции модельных и натурных спектров имеет максимальное значение по сравнению другими случаями.

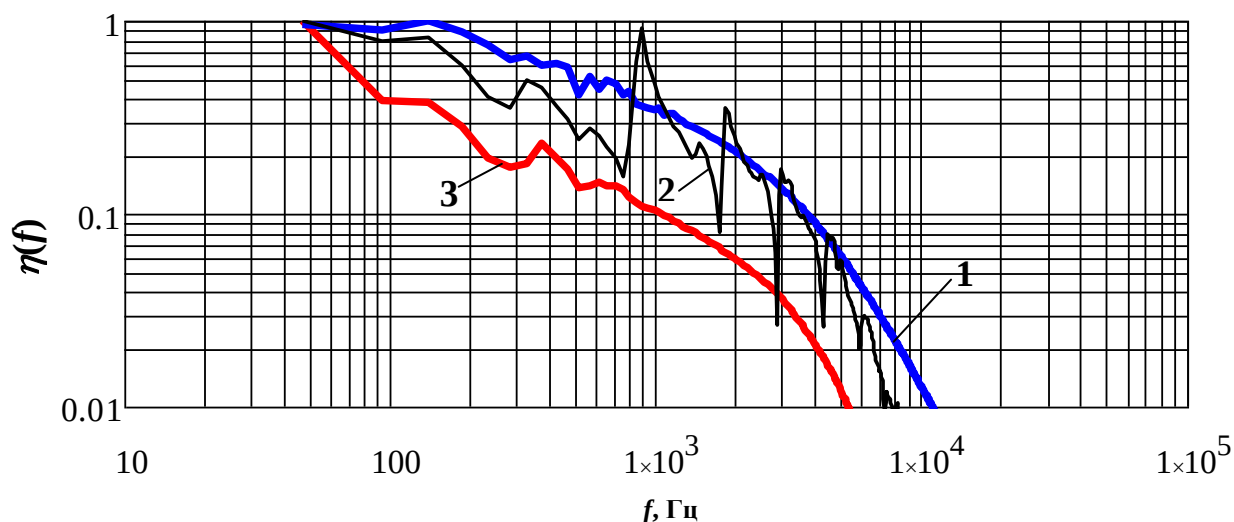


Рис. 4. Спектры откликов обделки для случаев моделей: грунт за обделкой (1); полость заполнена водой (2); полость заполнена воздухом (3)

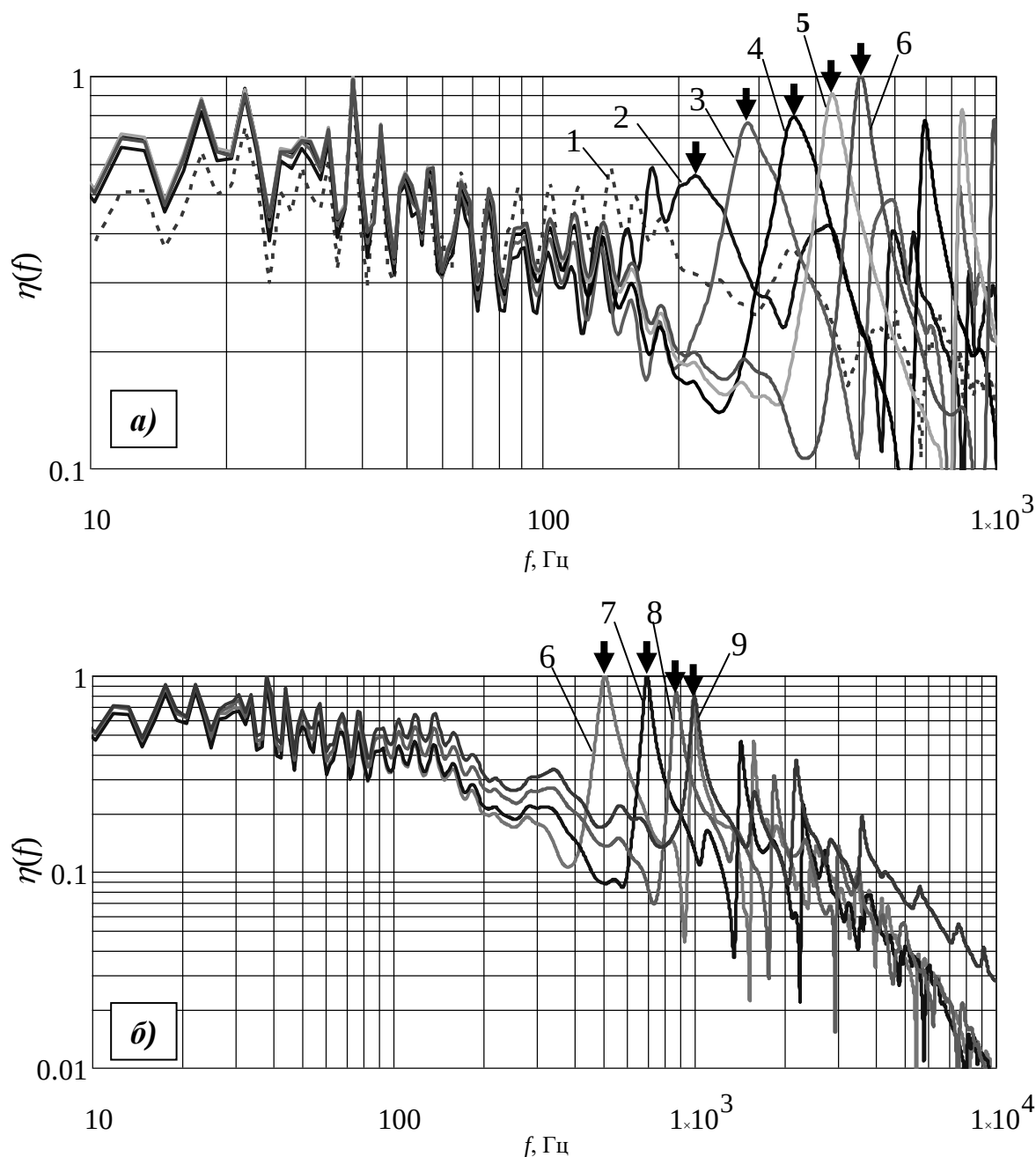


Рис. 5. Спектры, полученные в результате изменения параметров заполнителя полости: *a* – спектры моделей 1-6, *б*– спектры моделей 6-9; 1-9 – номера моделей, описанных в таблице 1

Далее было исследовано изменение спектров при постепенном изменении таких параметров, как плотность и скорость упругих волн в заполнителе полости. Подразумевалось, что заполнитель полости изменяет свои свойства от случая "грунт" через ряд случаев "грунт, перемешанный с водой" к случаю "вода в полости". Параметры заполнителей полости даны в таблице 1. На рис. 5 показаны спектры зарегистрированных откликов, соответствующих различным заполнителям. По оси ординат отложены значения нормированной на максимум спектра амплитуды η . Нумерация на графике соответствует номерам моделей в таблице 1.

Анализируя рис. 5, *a*, в спектрах можно заметить резонансный пик с частотой f_{res} , который на каждом графике последовательно смещается в область высоких частот (эти сме-

щающиеся пики отмечены стрелками). При анализе моделей 6-9 (рис. 5, 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. 5, что-бы было легче сориентироваться.

Можно заметить, что для случая "в полости грунт" описываемый спектральный максимум f_{res} фактически не наблюдается. А при изменении свойств заполнителя полости в сторону параметров 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. Во всех моделях глубина полости составляет $h = 0.5$ м. В таблице 1 даны оценки длины волны λ , взятые на основании заданной в модели скорости упругих волн 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 (при этом моделируется вариант полости не заполненной водой). 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.

Таблица 1. 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

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.

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. Эти результаты позволили сформулировать 1-е научное положение.

Структурные особенности поведения заобделочного пространства, выявленные по результатам сейсмоакустических исследований. Основным принципом этого исследования было сопоставление результатов натурных исследований, произведённых методом IR и результатов компьютерного моделирования.

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»). Основной целью был анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) массива пород вокруг выработки и его сопоставление с результатами геофизических обследований. В частности, интерес представлял размер и положение зон пластической деформации грунтов. Задача решалась в двумерной постановке. В основу используемой модели был положен критерий прочности Друкера-Прагера. 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. Физические свойства массива пород и обделки задавались по результатам испытаний образцов грунта в лаборатории (в соответствии с технологической ситуацией, о которой речь пойдёт ниже).

Результаты моделирования выводились как карты параметров σ_e (эквивалентное девиаторное напряжение, обозначаемое изолиниями) и ε_{pl} (эффективные пластические деформации, обозначаемые цветовой шкалой). Для ε_{pl} использовалась бинарная шкала: для $\varepsilon_{pl} > 1$ (наличие пластических деформаций, красный) и для $\varepsilon_{pl} \leq 0$ (отсутствие пластических деформаций, синий). Примеры результатов изображены на рис. 6, где деформации представлены как бинарная шкала (а) и шкала с градациями оттенков (б). Можно отметить, что зоны пластических деформаций возникают сбоку от тоннеля и практически не наблюдаются сверху и внизу. Подобная картина оказалась очень стабильной, 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 $n = 5$ (см. рис. 1). Существенно реже полости наблюдаются в точках при $n = 2$, $n = 4$, и почти не наблюдаются в верхней точке тоннеля при $n = 5$. На рис. 7 представлена гистограмма, позволяющая оценить вероятность наблюдения полости в тех или иных точках тоннелях. Объём выборки включал 102 значения. Данные собраны по 6 съёмкам на площадках, соответствующих диаметру и форме моделируемого тоннеля.

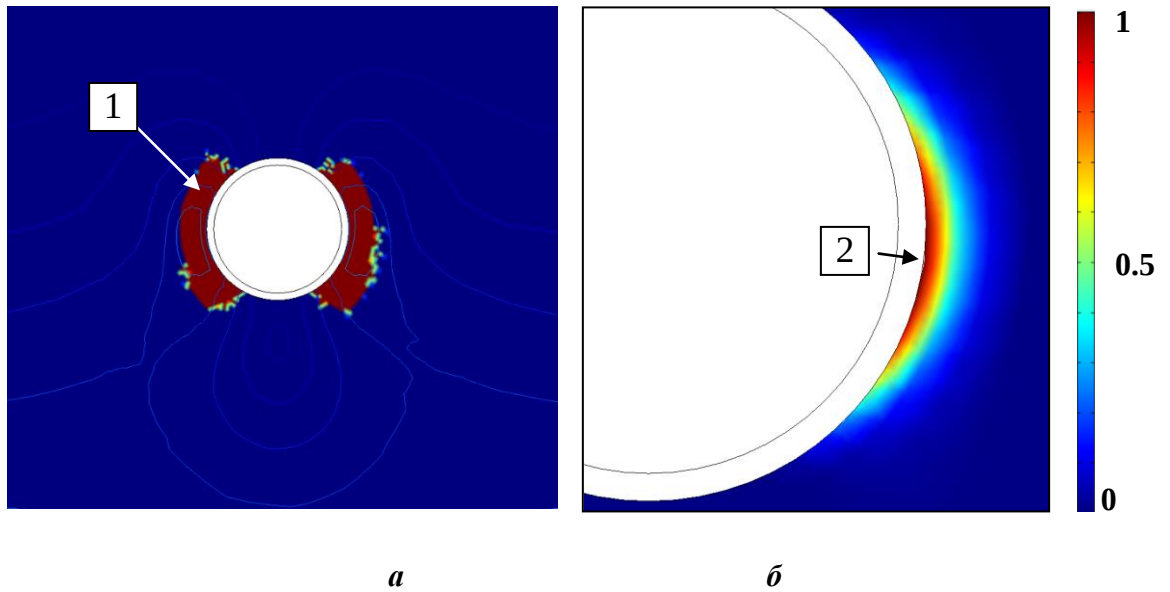


Рис. 6. Распределение зон пластической деформации в массиве вблизи от тоннеля: *а* – карта значений эффективных пластических деформаций ε_{pl} , отстроенная с помощью бинарной шкалы (красный цвет – зона пластической деформации); *б* – те же результаты, отстроенные с помощью непрерывной шкалы

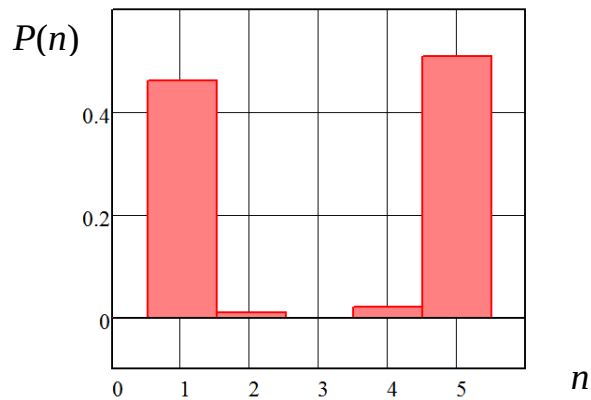


Рис. 7. Гистограмма, иллюстрирующая вероятность наблюдения полости в точках с различным номером n

Анализируя результаты моделирования, можно отметить, что 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. 6 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.

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

Также производились работы по исследованию НДС породного массива, возникающего в сложной горнотехнической ситуации – проходке двух новых тоннелей под двумя эксплуатируемыми. В процессе проходки велись мониторинговые сейсмоакустические измерения в эксплуатируемых тоннелях. При этом сопоставлялось положение забоя при проходке новых тоннелей, размеры полостей заобделочного пространства эксплуатируемого тоннеля и результаты конечно-элементного моделирования. Это позволило сделать следующие выводы.

В процессе проходки зоны пластических деформаций (в рамках которых подразумевается формирование полостей) могут развиваться не в той точке, где строящийся тоннель проходит под действующим, а там, где проходка велась несколько месяцев назад – вблизи уже построенного тоннеля. При этом за счёт эффекта задержки в точке пересечения действующего тоннеля и строящегося в момент проходки области разуплотнения ещё не наблюдаются. Также может возникать ситуация, когда участки плохого контакта будут развиваться не в стороны от точки пересечения действующих и строящихся тоннелей, а к верхней точке эксплуатируемого тоннеля, формируя, таким образом кольцо разуплотненных грунтов вокруг него.

Третья глава посвящена георадиолокационному контролю заобделочного пространства. Предложено несколько методик съёмки и обработки данных с целью выявления полостей при обследовании из пространства тоннеля. Также предложена методика обработки данных при выявлении зон разуплотнённых грунтов рядом с тоннелями и коллекторами при съёмке с поверхности с помощью низкочастотных георадаров.

Выявление полостей в заобделочном пространстве с помощью георадиолокации при обследованиях из тоннеля. Экспериментальные натурные результаты были получены на железобетонных обделках Московского метро с помощью георадара ОКО-2 с антенными бло-

ками 1200 и 1700 МГц. В части случаев измерения можно было производить на участках строящегося метро, а также в условиях полигона, когда положение полостей за конструкцией можно было контролировать визуально.

Основными идентификаторами полости можно назвать: «звон», начинающийся со времён, соответствующих приходу отражений от границы «обделка-грунт»; изменение коэффициента отражения на границе «грунт-обделка». Под «звоном» понимается длительный периодический сигнал повышенной амплитуды. Пример такого сигнала после процедуры выравнивания амплитуд представлен на рис. 8, а-в. Дана радарограмма и две трассы (без «звона» рис. 8 б и со «звоном» рис. 8 в). Хорошо просматривается стабильно высокая амплитуда «звона», хотя обе трассы подвергнуты одинаковому выравниванию амплитуд. Также хорошо видно, что «звон» начинается на временах, где ожидается отражённый сигнал от границы «обделка-грунт» (это время показано пунктирной чертой, подписанной цифрой 4). Сам сигнал может просматриваться довольно нестабильно, это приводит к сложностям с интерпретацией ситуации по коэффициенту отражения.

При работе с данными, снятыми в тоннелях, в большинстве случаев для радарограмм, приходится искать тот граф обработки, который позволит наиболее заметно выделить сигнал - идентификатор полости. Это привело к необходимости разработать граф обработки, наилучшим образом подчёркивающий наличие «звона» и позволяющий помочь принять решение в спорных случаях. На первоначальном этапе этот граф предполагает автоматическую регулировку уровня амплитуд, в основе которой вычисление в скользящем (двухмерном) окне статистической характеристики и последующее её использование для выравнивания. Далее предполагается получение огибающей сигнала с помощью амплитудного преобразования Гильберта, вычитание среднего значения в скользящем горизонтальном окне; сглаживание скользящим средним.

Также этот граф является хорошим вариантом предварительной обработки для одного из информативных параметров (признаков), использованного в третьей и четвёртой главах (H_s – сумма значений амплитуд огибающей георадиолокационной трассы). Пример применения этого графа обработки представлен на рис. 8, г. Двойными белыми линиями указан участок профиля, где выявлена полость. Высокие уровни H_s показаны на радарограмме чёрным цветом – хорошо видно, что H_s указывает на присутствие полости.

Стоит отметить, что информативный признак, который бы указывал на наличие изменений в значениях коэффициента отражения, найти не удалось. Причиной является сильное помеховое влияние прутков армирования и малая амплитуда отражения, получаемого от границы.

Отдельным направлением работы стала разработка метода подавления прямой волны путём вычитания помеховой модели, что позволило выделять те полезные сигналы, которые искажаются при применении традиционной обработки. Поскольку характер армирования может влиять на качество сейсмоакустических исследований, в частности менять интерпретацию результатов, часть исследований посвящена вопросам выявления параметров армирования, вопросам выделения второго ряда и т.п.

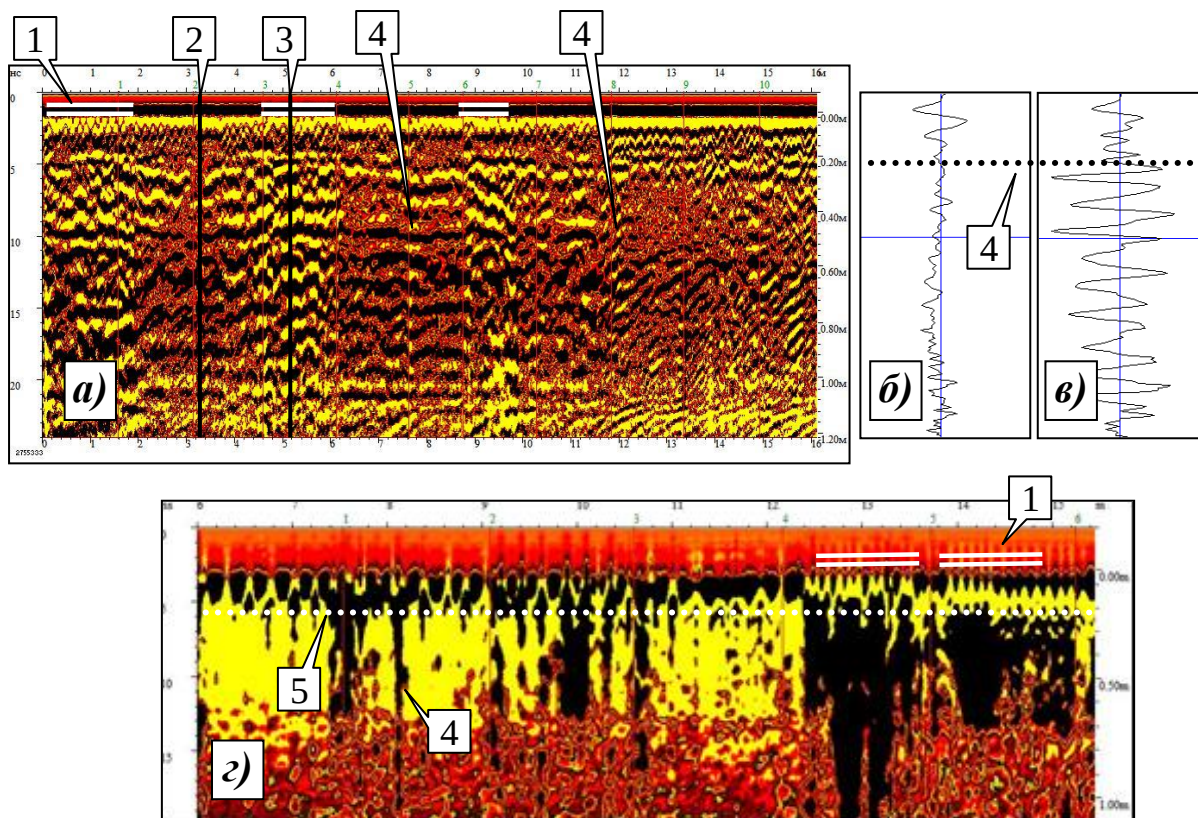


Рис. 8. Примеры результатов, полученных при съёмках тоннелях: *а* – пример радарограммы, *б*, *в* – трассы с наличием и отсутствием «звона» соответственно, *г* – радарограмма после применения графа обработки; 1 – наличие полости в заобделочном пространстве, 2 – трасса без влияния «звона», 3 – трасса с влиянием «звона», 4 – зашумлённые трассы, 5 – времена, соответствующие отражению «обделка-грунт»

Поиск зон разуплотнения в массиве пород вблизи тоннелей при обследованиях с поверхности. Отдельный полевой материал был собран в связи с вопросами возможности выявления областей разуплотнённых грунтов при съёмках с поверхности. 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, пливунь, 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. Также опасность этих областей может быть связана с быстрой их разгрузкой во внутреннее пространство тоннеля, способностью к быстрому изменению НДС внутри и вблизи них. Подобные области выявляются с помощью геофизических методов, таких как сейсморазведка и низкочастотная георадиолокация.

Материалы этого раздела получены на георадаре "Лоза-1Н" с трёхметровыми (50 МГц) и шестиметровыми (25 МГц) антеннами. Предпочтение в выборе именно георадио-локации 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 (и более). Это является типичной глубиной залегания как множество коллекторов, так и значительного количества тоннелей метрополитенов.

Исследования, полученные при георадиолокационных съёмках вблизи тоннелей и подземных коллекторов с помощью низкочастотных георадаров, позволили выявить характерную особенность, связанную с наличием зон разуплотнения. В этом случае на трассе появляется низкочастотная составляющая (низкочастотный "хвост" – НЧХ), представленный на рис. 9 (зона, где влияние НЧХ легко просматривается, выделена пунктирным прямоугольником). То, что причиной подобных аномалий является водонасыщенная область, подтверждается анализом годографов, снятых с помощью подхода CMP (common mid point). Столь выраженное проявление аномалии наблюдается не всегда, поэтому перспективным является поиск информативных параметров, способных указывать на подобные особенности сигнала.

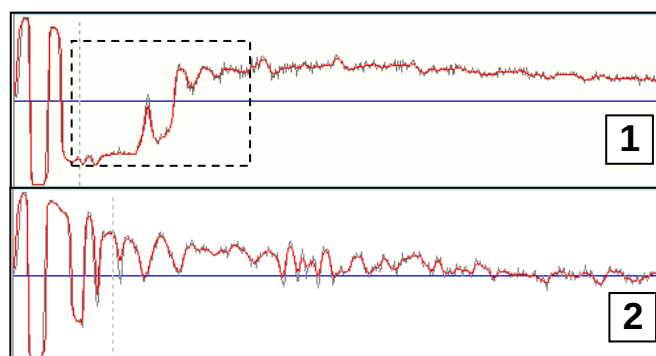


Рис. 9. Примеры георадиолокационных трасс: 1 – трасса получена вне водонасыщенной линзы; 2 – трасса получена над водонасыщенной линзой

В качестве подобного параметра может выступить информационная энтропия. На рис. 10 представлены примеры, показывающие, как изменяется закон распределения значений амплитуд в зависимости от наличия в массиве разуплотнения. Если волновая форма, полученная вне водонасыщенной линзы, имеет амплитудные значения, находящиеся вблизи нуля (трасса 1), то сигнал, на который повлияла зона разуплотнения имеет распределение амплитуд более растянутым (трасса 2), приближающимся к равномерному, что удобно оценивать с помощью информационной энтропии.

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:

$$H = - \sum_{i=1}^N P_i \log_g P_i, \quad (2)$$

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.

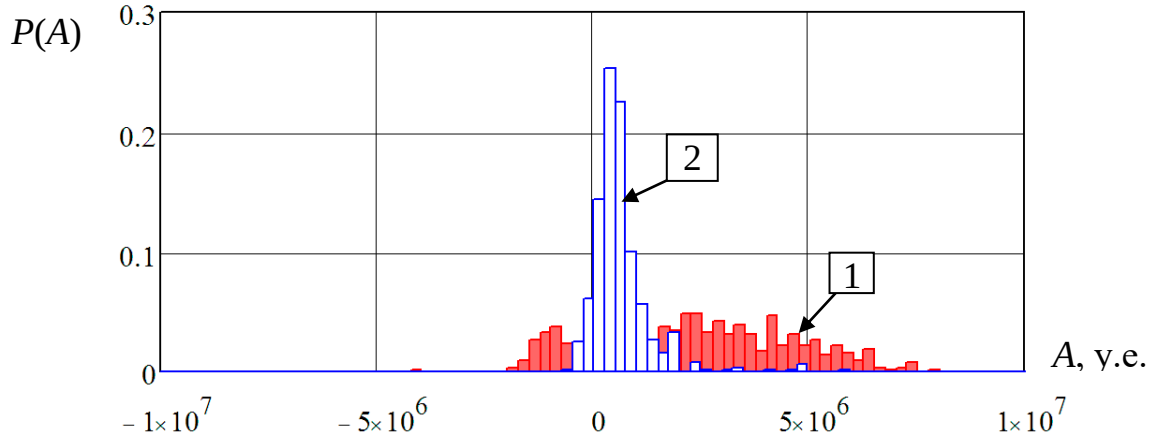


Рис. 10. Примеры распределений значений выровненных значений георадиолокационных трасс: 1 – трасса получена над водонасыщенной линзой, 2 – трасса получена вне влияния водонасыщенной линзы

Энтропия H_R также используется как характеристика закона распределения случайной величины. В этом случае она описывает неопределённость её поведения и определяется через значения вероятностей $P_i = f_i \cdot \Delta x$, взятые в m дискретных интервалах шириной Δx , так называемых разрядах, следующим образом:

$$H_R = - \sum_{i=1}^m f_i \Delta x \log_g f_i - \sum_{i=1}^m f_i \Delta x \log_g \Delta x, \quad (3)$$

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 попадания очередной реализации случайной величины в отрезок в интервале $x_i + \Delta x$. Чем более равномерное распределение, тем выше неопределённость поведения случайной величины и тем выше значение H_R – если значения P_i в разрядах равны друг другу, труднее определить, в какой из них попадёт случайная величина при её очередной реализации.

Практика показала, что большие значения H_R , взятые вдоль профиля в виде функции $H_R(l)$, где l – привязка точки на профиле в метрах, стабильно указывают на те участки массива, под которыми находятся водонасыщенные линзы. При этом для хорошей локализации аномальных мест потребовалось учесть ряд специфических особенностей. Во-первых, необходимо корректировать влияние слагаемого $\log_g \Delta x$ ($\sum_{i=1}^m f_i \Delta x \approx 1$ при малом Δx) в выражении (3), которое создаёт критическое зашумляющее воздействие на график $H_R(l)$. Во-вторых, при

отсутствии выравнивания слишком большие амплитуды прямой волны искажали форму распределений, и идентифицирующий эффект $H_R(l)$ становится либо слабо выраженным, либо отсутствующим. Это корректировалось с помощью выравнивания амплитуд на трассе. Было опробовано несколько функций выравнивания. Лучшим вариантом оказалось сигмоидальное выравнивание с подбором оптимальных коэффициентов. Для подбора использовался полный перебор значений с выбором той пары коэффициентов, которые дают наибольшее различие аномалии и фона.

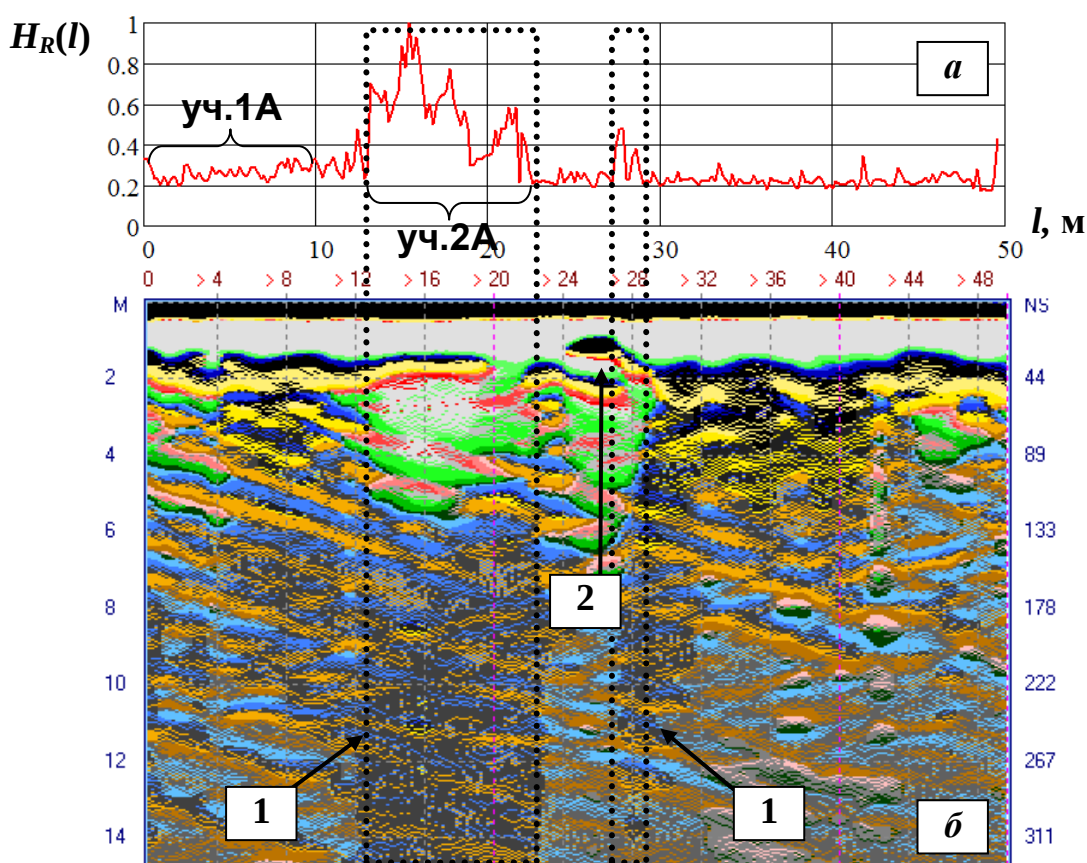


Рис. 11. Пример применения энтропии амплитуд георадиолокационной трассы H_R в качестве индикатора зоны разуплотнения: *а* – вычисленная по радарограмме функция $H_R(l)$, *б* – исходная радарограмма; 1 – аномальные зоны, 2 – влияние подземной коммуникации

Описанная выше методика применялась в ряде случаев при выявлении водонасыщенных линз вблизи объектов подземного строительства. Результаты этих исследований представлены на рис. 11. Наличие линз либо заверено по нарушениям (в частности, известны аварийные участки коллекторов), либо по анализу годографов. На рис. 11 приведена радарограмма и результат её обработки в виде функции $H_R(l)$. Трассы, которые испытали влияние водонасыщенных линз, выделены пунктирными прямоугольниками (цифра 1). Для приведённого случая отношение значений H_R в зоне аномалии к значению H_R вне аномалии доходило до 3.36. Для других профилей это отношение доходило до уровня $Z = 6.6$.

Обобщая результаты проведенных исследований, можно отметить, что удалось подобрать граф обработки, а также вычисляемый с его помощью информативный параметр (эн-

тропия выровненных амплитуд), который позволяет выявлять водонасыщенные линзы в приповерхностной части массива пород. Это позволило сформулировать третье научное положение.

Четвёртая глава посвящена вопросам первичного выбора информативных параметров (признаков) и оптимальной предварительной обработки данных, получаемых при введении геофизической съёмки из выработанного пространства. Использовались два метода: высокочастотная георадиолокация (ОКО-2 1200 МГц) и сейсмоакустика. Предполагается, что значения признаков будут объединяться в комплексы, эффективность которых при принятии решения о наличии полости может быть значительно выше, чем эффективность принятия решения по одному параметру. Это может происходить по различным причинам: за счёт извлечения различной информации из результатов съёмки одним методом; за счёт того, что на различные методы действуют различные помеховые факторы; за счёт того, что методы различным образом реагируют на появление аномалии или на её отсутствие. В результате признаки в эффективных комплексах компенсируют недостатки различных методов, что приводит к повышению качества распознавания.

Поведение информативных параметров существенно зависит от того, какая предварительная обработка данных производилась. В процессе ведения пробных работ стало ясно, что как способность информативных параметров указывать на полости, так и параметры оптимальной предварительной обработки могут существенно меняться. Причиной этого является время и условия эксплуатации выработки, состояние обделки. Предполагается, что процедуры обработки нужно настраивать, опираясь на такие критерии, как интенсивность аномалии (отношение между средними значениями признаков в области аномалии и в области фона, μ), надёжность разделения (предполагается использовать параметры ROC-кривых, в частности, коэффициент Джинни G).

Независимость признаков можно оценивать по коэффициенту корреляции Пирсона R . Слишком высокие значения R между двумя признаками говорят о том, что в комплекс нужно вносить только один из них, иначе не будет повышаться информационная эффективность комплекса. Также это будет приводить к тому, что оба признака будут однотипно реагировать на помеховые факторы. Слишком низкие значения R указывают на то, что признаки по-разному реагируют на аномалию. При этом R стоит использовать только как ориентировочное значение: возможны случаи, когда за счёт корреляции между помехами корреляция между признаками при увеличении погрешностей измерения увеличивается.

Эти критерии предполагается использовать для предварительной подготовки значений признаков и выборе оптимальной обработки. Финальный вывод о том, что включать, а что не включать в комплекс, предполагается делать на основании понятия информационной эффективности, о которой речь пойдёт в пятой главе.

В процессе работы было отобрано четыре наиболее информативных признака. Для удобства каждый из этих признаков в последующем описании исследования будет обозначаться буквами (A, B, C, D).

A – H_s (георадиолокация) – сумма значений амплитуд огибающей георадиолокационной трассы, полученной с помощью амплитудного преобразования Гильберта. Признак описан выше, в третьей главе. Эта характеристика требует выравнивания амплитуд, подбора участка трассы, для которого он считается, а также нормировки на среднее значение H_s для всего профиля.

B – Δf^{-1} (георадиолокация) – обратная ширина спектрального максимума. При вычислении нежелательно использовать общепринятое решение, когда ширина спектрального максимума берётся на уровне $h = 0.707$, что связано с изрезанностью спектральной функции. Предпочтительно искать оптимальное, более высокое значение этого уровня.

C – E_p (сейсмоакустика) – энергия сигнала. Этот признак описан в материале второй главы. Здесь рекомендации в первую очередь касаются особенностей аккуратной съёмки в тоннеле – необходимо следить за характером удара, соскальзываниями датчика и т.п.

D – E_x (сейсмоакустика) – коэффициент эксцесса E_x амплитуд зарегистрированного сигнала.

В случае наличия участков, где расположение полостей известно, предпочтительным подходом является опробование различных признаков, а не только этих четырёх.

Для проведения исследования была составлена образцовая (35 элементов) и тестовая (24 элемента) выборки значений признаков A, B, C, D. Материал был собран на трёх различных участках метрополитена, на которых расположение полостей было известно.

В процессе работы с признаками были выяснены недостатки, присущие используемым методам. Георадиолокационные признаки достаточно хорошо реагировали на такие проявления сигнала, как «звоны», описанные выше. Единственной проблемой здесь было возникновение помеховых «звонов», которые были связаны со стыками тубингов, 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. Примеры этих помех указаны цифрой 4 на рис. 8. Для исключения их влияния достаточно брать значения признака на незашумлённом отрезке.

Более существенной проблемой было то, что в ряде случаев полости просматриваются на радарограммах как изменение коэффициента отражения на границе грунт-обделка. Подобные ситуации с разной степенью эффективности могут выявляться с помощью оператора при субъективной интерпретации данных. Однако с помощью информативных параметров выявлять такие участки сложно, поскольку донный сигнал сильно искажён влиянием армирования и слаб по амплитуде. Подобные ситуации могут приводить к пропуску цели.

Анализ поведения информативных параметров сейсмоакустического метода указал на обратную ситуацию. В случае наличия полости признак имеет достаточно стабильные значения, однако в случае отсутствия полости его дисперсия резко возрастает, создавая ошибки типа ложное срабатывание. Очевидно, что причиной такой ситуации может быть слишком существенная зависимость от характера удара. На рис. 12 представлены примеры такого поведения. Здесь помимо уже описанных параметров E_p и E_x даны еще максимальная амплиту-

да A_{max} и частота спектрального максимума f_{max} . Ситуации наличия полости обозначены буквами P (Positive), отсутствия буквами N (Negative). Хорошо заметно, что случаи отсутствия полости дают значительно более высокую дисперсию практически у всех информативных параметров. Также хорошо видна разделимость случаев наличия и отсутствия полости у E_p и E_x . При этом ошибки и для этих параметров могут в некоторых случаях возникать.

Выводы, сделанные в четвёртой главе, также проверялись с участием автора при обследованиях, произведённых на физической модели.

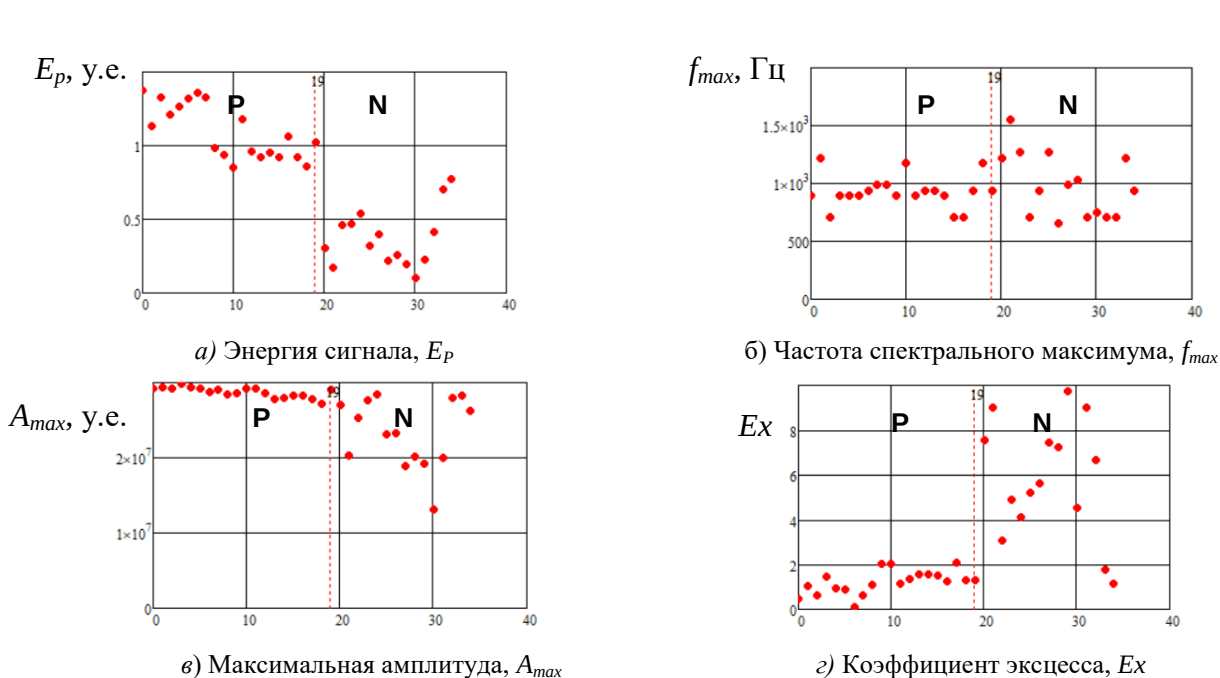


Рис. 12. Примеры поведения информативных параметров: а – энергия сигнала E_p ; б – частота спектрального максимума f_{max} ; в – максимальная амплитуда A_{max} , г – коэффициент эксцесса значений амплитуд сигнала γ . Ситуации наличия полости обозначены буквами P, отсутствия буквами N

Всё это указывает на важность комплексирования информативных признаков от двух различных методов.

Исходные данные методов имеют различную структуру. Георадиолокационная съёмка для одного кольца обделки может дать десятки трасс. Сейсмоакустика даёт одну точку. Различия в структуре данных снимались следующим образом: сейсмоакустические признаки использовались как есть, георадиолокационные представляли собой результат осреднения информативного параметра по трассам, принадлежащим к одному тюбингу.

Малый объём данных при работе с сейсмоакустическими признаками привёл к необходимости использовать методы, способные работать с малыми выборками, в частности, это привело к решению использовать байесовскую классификацию, опирающуюся на вычисление плотностей вероятности с помощью ядерной оценки.

Пятая глава посвящена вопросам разработки комплексного геофизического метода обнаружения полостей в заобделочном пространстве. Решены такие вопросы, как разработка критериев отбора информативных параметров в комплекс на основании их информационной эффективности, предложены подходы, обеспечивающие получение необходимых для байесовской классификации значений априорных и апостериорных вероятностей, предложен принцип подбора оптимальных параметров байесовской классификации.

Использование коэффициента информационной эффективности при составлении комплексов. В основу подобного похода можно положить основные понятия теории информации. Первоначально определим два основных значения неопределённости (энтропии), возникающей при решении задачи контроля. Понятие возникало раньше, в третьей главе, и характеризовало неопределённость поведения случайной величины (выражение (1)).

Теперь 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 $P(w_p)$. Тогда, в соответствии с определением энтропии, в рамках теории информации априорная энтропия будет равна

$$\begin{aligned} H(w) &= -\sum_{i=1}^N P(w_i) \log_2 P(w_i) = \\ &= -P(w_p) \log_2 P(w_p) - (1 - P(w_p)) \log_2 (1 - P(w_p)), \end{aligned} \quad (4)$$

где N – количество состояний ($N = 2$ – наличие полости и отсутствие полости), $P(w_p)$ – априорная вероятность присутствия полости в заобделочном пространстве.

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. 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 (в этом случае будем понимать под ней ошибку выявления полости):

$$H_d(w) = -P_e (\log_2 P_e) - (1 - P_e) P_e (\log_2 (1 - P_e)). \quad (5)$$

Введём ещё два понятия. Необходимость контроля N и эффективность контроля $\mathcal{E}$. Необходимость контроля будем оценивать с помощью коэффициента необходимости контроля N :

$$N = \frac{H(w) - H_d}{H(w)}, \quad (6)$$

а эффективность – с помощью коэффициента эффективности контроля $\mathcal{E}$:

$$\mathcal{E} = \frac{H(w) - \bar{H}(w|x)}{H(w)}, \quad (7)$$

где $\bar{H}(w|x)$ – апостериорная энтропия, соответствующая также понятию полной условной энтропии.

Фактически $\bar{H}(w|x)$ – это уровень неопределённости, наблюдающийся после применения процедур контроля. Если $H(w)$ это исходная неопределённость до процедур контроля,

а $\bar{H}(w|x)$ это неопределённость после применения процедур контроля, тогда выражение $H(w) - \bar{H}(w|x) = I$ фактически описывает количество информации I , полученной при измерениях. Необходимость контроля N , очевидно, показывает какое количество информации (нормированной на априорную энтропию) нужно для того, чтобы в результате процедур контроля уменьшить уровень неопределённости до допустимого. Тогда эффективность контроля $\mathcal{E}$ – это то количество информации, которое способны принести процедуры контроля.

В соответствии с (7) для расчёта $\mathcal{E}$ комплекса нужно задаться априорной энтропией $H(w)$ и рассчитать полную условную энтропию $\bar{H}(w|x)$.

$$\bar{H}(w|x) = \int p(x) \cdot H(w|x) dx, \quad (8)$$

где $H(w|x)$ – частная условная энтропия, которая может быть вычислена с помощью апостериорных условных плотностей вероятностей $P(w_p|x)$ и $P(w_N|x)$ полученных для случаев наличия (Positive – P) либо отсутствия (Negative – N) полостей на участке где расположение полостей известно. Непосредственно сама частная условная энтропия может быть вычислена следующим образом:

$$H(w|x) = -P(w_N|x) \log_2 P(w_N|x) - P(w_p|x) \log_2 P(w_p|x). \quad (9)$$

Апостериорные вероятности $P(w_p|x)$ и $P(w_N|x)$ для случаев наличия либо отсутствия полости могут быть вычислены следующим образом:

$$P(w_N|x) = \frac{P(w_N) \cdot p(x|w_N)}{p(x)}, \quad P(w_p|x) = \frac{P(w_p) \cdot p(x|w_p)}{p(x)}, \quad (10)$$

$$p(x) = P(w_N) \cdot p(x|w_N) + P(w_p) \cdot p(x|w_p). \quad (11)$$

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 (10) в (9) и (9) в (8), можно получить следующее выражение:

$$\bar{H}(w|x) = - \int \left[P(w_p) \cdot p(x|w_p) \cdot \log \frac{P(w_p) \cdot p(x|w_p)}{p(x)} + P(w_N) \cdot p(x|w_N) \cdot \log \frac{P(w_N) \cdot p(x|w_N)}{p(x)} \right] dx, \quad (12)$$

что позволит рассчитать $\mathcal{E}$.

Достоинство применения коэффициента информационной эффективности контроля $\mathcal{E}$ состоит в том, что он позволяет оценивать необходимый и достаточный объём информации, который должна привести в ситуацию процедура контроля. Поскольку $\mathcal{E}$ определяется также уровнем априорной энтропии для тех или иных участков, можно будет обосновывать необходимость применения различных комплексов и необходимость привлечения тех или иных методов. Так, например, в случае участка с низкой априорной энтропией $H(w)$ достаточно будет применение одного геофизического метода с небольшим количеством информативных параметров.

При этом подразумевается подход, когда настройка предварительной обработки данных производится не по $\mathcal{E}$, а по описанным выше критериям, таким как μ , G , поскольку вычисление $\mathcal{E}$ для многомерных случаев может занимать достаточно большое время.

Эмпирическая оценка величины априорной вероятности наличия полости $P(w_P)$ от времени эксплуатации тоннеля. Для оценки коэффициента информационной эффективности $\mathcal{E}$ применяемого комплекса параметров и выбора, какие признаки должны составлять комплекс, необходимо опереться на оценку априорной энтропии, которую можно вычислить по результатам 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. Например, если на участке было отснято 100 точек и из них 4 содержали геофизические аномалии, указывающие на наличие полости, это позволяло получить оценку $P(w_P) = 0.04$. Объёмы выборок, используемых для вычисления каждой вероятности, составляли минимум 30 точек. При этом типичное значение объёма выборки порядка 100 точек.

Данные по множеству 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. Одним из самых сильных предикторов является время эксплуатации выработки t , лет. На рисунке 13 представлена диаграмма рассеяния для случая $P(w_P)$ – зависимая переменная, t – независимая. Дана также линия линейной аппроксимации вероятности наличия полости во временном диапазоне до 90 лет, описываемая уравнением:

$$P(w_P) = 0.0134 + 0.0008 t \quad (13)$$

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 $p = 0.001$). На рисунке 13 так же пунктирными линиями доверительный интервал (область, в рамках которой линия регрессии, при получении её по другим выборкам, должна располагаться с 95% вероятностью). Видно, что этот интервал достаточно узок. Полученное уравнение нельзя использовать для принятия решения об аварийности выработок, однако эту зависимость можно использовать для ориентировочной оценки априорной вероятности $P(w_P)$.

Анализ полученного облака рассеяния позволяет выделить два кластера в полученных данных. Первый – $t = 30 \dots 90$ лет (время активного строительства метро в СССР). Среднее значение $P(w_P) = 0.057$. Второй – $t = 0 \dots 20$ лет (активное строительство метро в последнее время). Среднее значение $P(w_P) = 0.018$. Эти результаты позволили сформулировать четвертое научное положение.

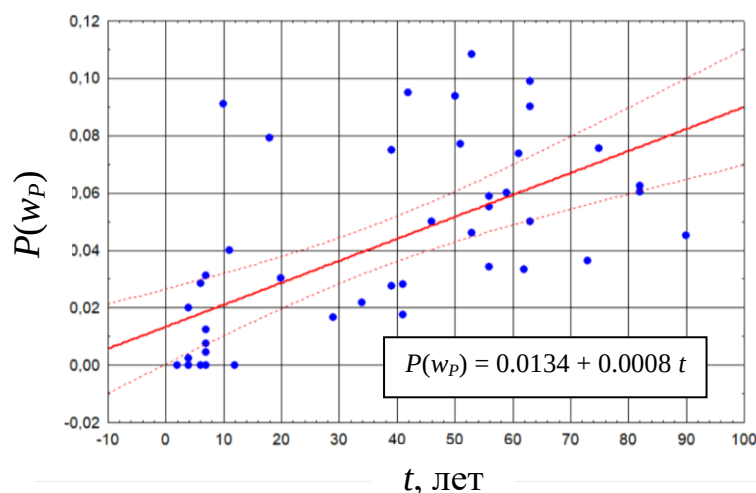
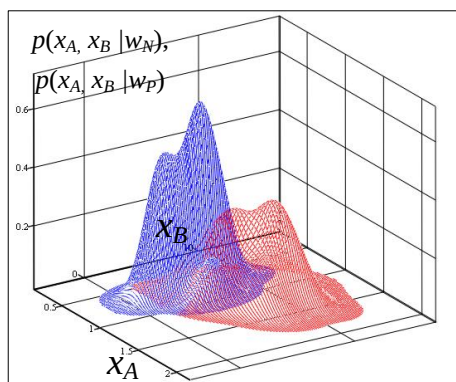


Рис. 13. Диаграмма рассеяния и линия аппроксимации зависимости априорной вероятности наличия полости $P(w_p)$ от времени

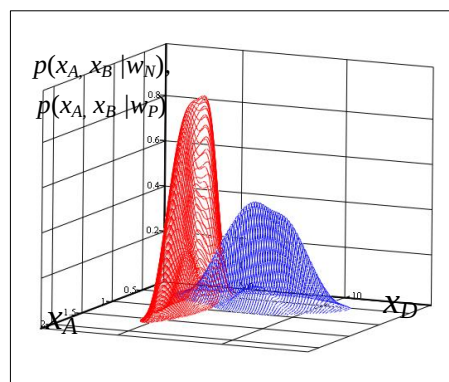
Оценка плотностей вероятности по результатам геофизических измерений. Отдельным вопросом является оценка плотностей вероятности распределения параметра $p(x | w_p)$, $p(x | w_N)$ и $p(x)$ по результатам измерений. Они необходимы и для оценки информационной эффективности и непосредственно для классификации состояния.

Если георадиолокационные измерения характеризуются большим объёмом данных (можно снять множество трасс на одном кольце), то сейсмоакустическое обследование позволяет собирать только ограниченные выборки. Поэтому параметрические методы не подходят для оценок формы плотностей вероятностей параметра и их условных вариантов. Хорошим решением здесь будет построение плотностей вероятности методом ядерной оценки плотности (ЯОП). 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 этого суммирования. Для образцовой выборки были сделаны расчёты плотностей вероятности. На рис. 14 даны их примеры для комплексов, состоящих из двух параметров, для них также приводятся значения Θ .

На рис. 14 а представлен пример двумерных законов для слабой эффективности (параметры А и В, $\Theta = 0.64$). Поверхности довольно существенно пересекаются, что приводит к появлению большого количества ошибок. Другая пара А и D, представленная на рис. 14 б, демонстрирует гораздо меньшее перекрытие поверхностей ($\Theta = 0.85$) – можно заметить, что это информативные параметры различных методов.



а) АВ ($\Theta=0.64$)



б) АД ($\Theta=0.85$)

Рис. 14 – Примеры двумерных законов распределения, полученных с помощью ЯОП: а – признаки А и В, б – признаки А и D. Синяя поверхность – закон распределения признака для случая Negative, красная поверхность – закон распределения признака для случая Positive.

Эмпирическая оценка информационной эффективности комплексов признаков. Результаты расчётов информационной эффективности комплексов признаков представлены в таблице 2. Можно отметить, что пары признаков почти всегда имеют более высокое значение Θ , чем отдельные параметры (исключением является только пара ВС). 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, $\Theta_{AC} = 0,93$) может быть эффективнее, чем комплекс из трёх признаков в который эта пара входит ($\Theta_{ABC} = 0,91$).

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 Θ . Стоит при этом отметить, что пара ВD обладает высокой эффективностью – по-видимому, это случай оптимального взаимодействия двух параметров.

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, АД, 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 ($\Theta_{AC} = 0.93$).

Таблица 2. Таблица значений коэффициента информационной эффективности Ξ для различных сочетаний параметров

Сочетание признаков	N , кол-во параметров	Ξ	Средний Ξ
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

Для набора значений таблицы 2 была построена экспоненциальная регрессионная модель:

$$\Xi = 1 - e^{-0.9N}.$$

График полученной функции и диаграмма рассеяния данных таблицы 2 представлены на рисунке 15. Полученную функцию можно использовать для ориентировочной оценки значения Ξ для различных объёмов комплекса.

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 коэффициента эффективности контроля Ξ , тогда можно, получить оценку априорной вероятности, удовлетворяющей условию (7):

$$H(w) = \frac{H_d}{1 - \Xi}.$$

Если оценить $H(w)$ по выражениям (13) и (4), возникает возможность подбирать нужный комплекс методов, оценивая его эффективность и ориентируясь на заданную допустимую энтропию. При этом фактически допустимая энтропия – это энтропия ошибки, возникающей при проведении процедур 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 $H_e = H_d$.

$$H(w) = \frac{H_e}{1 - \Xi}. \quad (16)$$

Таким образом, возникает возможность при оценённой априорной вероятности $H(w)$ подбирать по информационной эффективности Ξ геофизический метод или комплекс методов, соответствующий вероятности ошибочного решения P_e . Для практического применения на основании (16) были построены графики зависимости априорной вероятности $P(w_p)$ от вероятности ошибки P_e (подразумевался пропуск цели) с учётом конкретного значения Ξ . Для этого была написана программа в среде MathCad. Значения Ξ для этой программы были взяты по значениям регрессионной модели (13): $\Xi_1 = 0.59$, $\Xi_2 = 0.83$, $\Xi_3 = 0.93$, $\Xi_4 = 0.97$, где нижний индекс означает количество признаков в комплексе. P_e задавалось как диапазон значений, которые пересчитывались в H_e . По полученным значениям H_e через выражение (16) рассчитывались соответствующие им значения $H(w)$. Далее с помощью численного метода получались значения вероятностей ошибки.

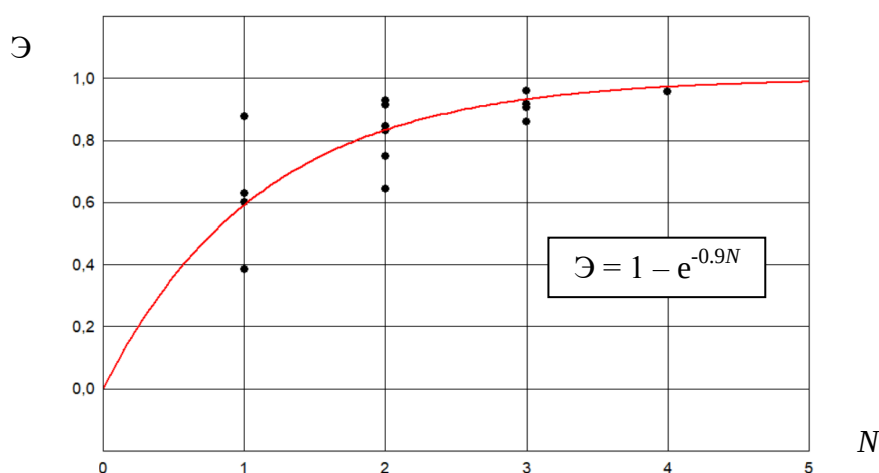


Рис. 15. Диаграмма рассеяния и экспоненциальная регрессионная модель, описывающая зависимость коэффициента информационной эффективности Ξ от количества информативных параметров N

Результат построения графиков с помощью этой программы представлен на рис. 16. Линии 2, 3, 4 соответствуют зависимости между априорной вероятностью $P(w_p)$ и вероятностью ошибки P_e для значений Ξ_2 , Ξ_3 , Ξ_4 . 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 $P_{e,2} = 0.54\%$, 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 Ξ , 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.

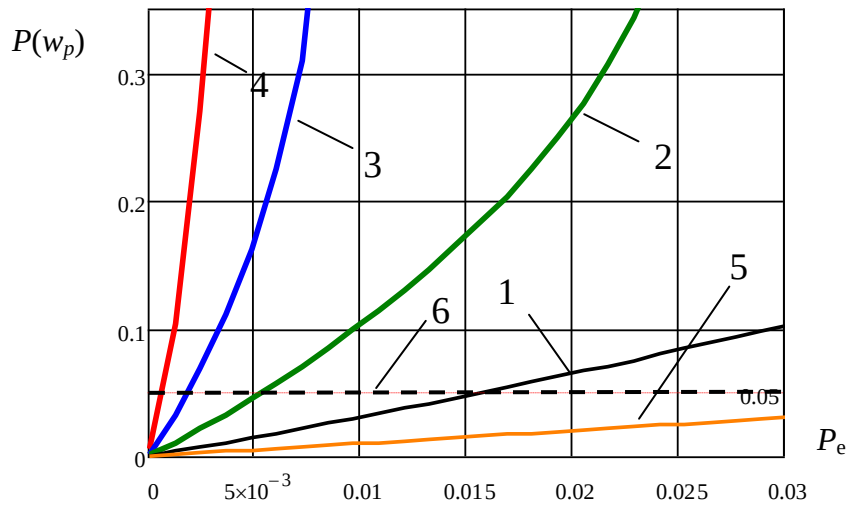


Рис. 16. Зависимости априорной вероятности $P(w_p)$ от ошибки определения полости P_e при различных значениях коэффициента информационной эффективности $\mathfrak{E}$: 1 – $\mathfrak{E}_1 = 0.59$; 2 – $\mathfrak{E}_2 = 0.83$; 3 – зависимость при $\mathfrak{E}_3 = 0.93$; 4 – зависимость при $\mathfrak{E}_4 = 0.97$; 5 – $\mathfrak{E} = 0$ (контроль не производился); 6 – уровень $P(w_p) = 0.05$

На графике также дана линия $P_e = P(w_p) = 0.05$, что соответствует ситуации отсутствия контроля. Если оператор будет использовать контроль по принципу 1 метод 1 параметр, это позволит снизить вероятность ошибки в 3.13 раза по сравнению с ситуацией отсутствия контроля. Использование комплексов из 2 и 3 информативных параметров снижает вероятность ошибки в 9,26 раза и 26,3 раза соответственно, а из 4 – в 83,3 раза. Это происходит за счёт информации, приносимой результатами измерений. Подход позволяет подбирать объём комплексов при отсутствии участка, на котором известно расположение полостей за обделкой. Эти результаты позволили сформулировать 5-е научное положение.

Принятие решения о наличии полости с использованием комплексного метода. В качестве метода принятия решения была выбрана Байесовская классификация. Такие подходы как кластерный анализ или весовое суммирование, также были опробованы, но лучше работали для георадиолокации, где можно было собрать большой объём данных для локального участка обследования.

Общие принципы Байесовской классификации. Байесовская классификация требует знания априорной вероятности присутствия $P(w_p)$ и отсутствия $P(w_N)$ полости, а также распределение информативного параметра в случае наличия $p(x|w_p)$ либо отсутствия $p(x|w_N)$ полости – так называемые условные плотности вероятности. Эти значения и функции позволяют вычислить апостериорные условные вероятности $P(w_N|x)$ и $P(w_p|x)$ для конкретных значений параметров, на основании которых принимаются решения при байесовской классификации. При этом этот подход также предполагает использовать функцию потерь, расширяющую возможности метода.

Весовые коэффициенты функции потерь λ_{TP} , λ_{FP} , λ_{TN} , λ_{FN} задают штрафы за принятые решения. В случае если принято решение о наличии полости оно может оказаться верным (λ_{TP}), либо ложным (λ_{FP} , так называемое «ложное срабатывание»). Решение об отсутствии полости так же может быть верным (λ_{TN}), либо ложным (λ_{FN} , так называемый «пропуск цели»). Описываемые весовые коэффициенты можно записать в виде матрицы потерь:

$$\lambda_{ij} = \begin{pmatrix} \lambda_{TP} & \lambda_{FP} \\ \lambda_{FN} & \lambda_{TN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (17)$$

В выражении (17) представлен пример такой матрицы, подразумевающий, что за правильные решения расплата будет нулевой, а за ошибки максимальной и одинаковой. В реальной практике, очевидно, что пропуск цели может стоить существенно дороже, чем ложное срабатывание (например, $\lambda_{FP} = 1$, $\lambda_{FN} = 3$). Также и потери от верных решений могут быть разными – однако этот вариант можно посчитать второстепенным, и не рассматривать.

Решение принимается на основании вычисления рисков от принятия решения:

$$R_P(x) = \lambda_{TP} \cdot P(w_P | x) + \lambda_{FP} P(w_N | x), \quad (18)$$

$$R_N(x) = \lambda_{FN} \cdot P(w_P | x) + \lambda_{TN} P(w_N | x).$$

Это позволяет применить так называемое байесовское решающее правило: если $R_P(x) < R_N(x)$ – полость присутствует, если $R_P(x) > R_N(x)$ – отсутствует. То есть выбирается то решение, где риск меньше. Отметим, что матрица потерь позволяет управлять вероятностью ошибок типа ложное срабатывание и пропуск цели. Можно также отметить, что 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.

5.2. Результаты распознавания. Оценка влияния матрицы потерь. Было проведено исследование того, как ведёт себя байесовский классификатор при работе с данными, полученными при обследовании тоннелей, при различных соотношениях коэффициентов функции потерь. Уровень априорной вероятности был принят $P(w_P) = 0.05$ и $P(w_N) = 0.95$. Байесовский классификатор настраивался на образцовой выборке, после чего вероятность ошибок классификации проверялась по тестовой выборке. Вероятность ошибки от принятия каждого решения $P_{e,P}$ (ошибка пропуска цели) и $P_{e,N}$ (ошибка ложного срабатывания) вычислялось по формуле полной вероятности:

$$P_{e,P} = P(w_P)P(\alpha_N | w_P), \quad P_{e,N} = P(w_N)P(\alpha_P | w_N), \quad (19)$$

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).

В таблице 3 даны значения коэффициентов функции 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 $P_{e,P}(\lambda_{FP}/\lambda_{FN})$. На рис. 17 представлены усреднённые графики $P_{e,P}(\lambda_{FP}/\lambda_{FN})$. Для различного количества параметров в комплексах (усреднены все возможные сочетания параметров). Количество параметров, входящих в комплексы, подписаны на графиках.

Таблица 3. Соотношения штрафов, использовавшиеся при исследовании влияния функции потерь

λ_{FN}	1	1	1	1	1	1	1	2	3	4	6
λ_{FP}	8	6	5	4	3	2	1	1	1	1	1
$\lambda_{FN}/\lambda_{FP}$	0,125	0,167	0,2	0,25	0,333	0,5	1	2	3	4	6

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 $\lambda_{FN}/\lambda_{FP}$ имеет более высокую ошибку – графики почти не пересекаются.

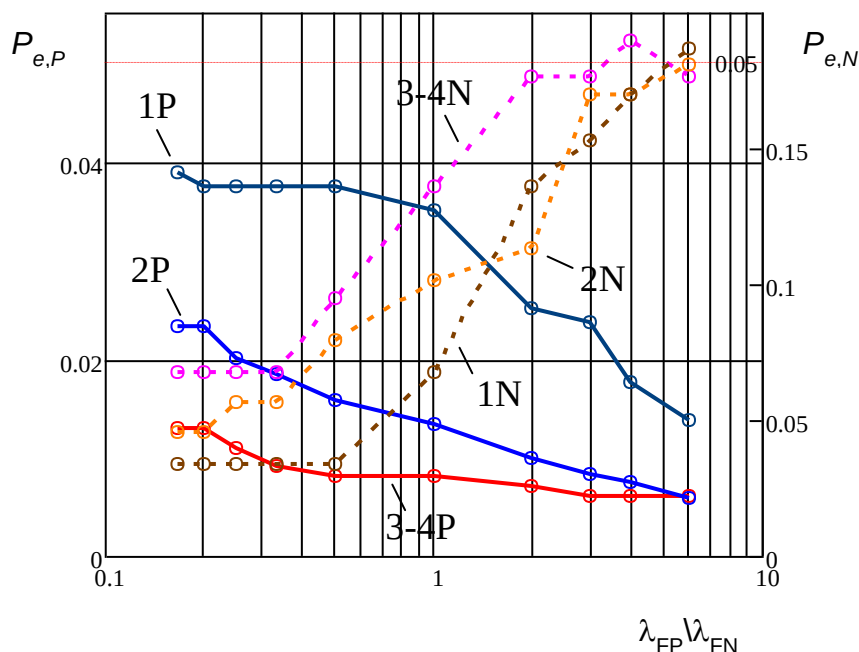


Рис. 17. Средние значения ошибок классификации $P_{e,P}$ и $P_{e,N}$ при различных соотношениях коэффициентов матрицы потерь $\lambda_{FN}/\lambda_{FP}$: 1P, 2P, 3-4P – графики $P_{e,P}$ при объемах комплексов «1», «2», «3-4» информативных параметра; 1N, 2N, 3-4N – графики $P_{e,N}$ при объемах комплексов «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 $P_{e,p}(\lambda_{FN}/\lambda_{FP})$, 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.

Таким образом, управляя коэффициентами матрицы потерь, можно управлять уровнем ошибок типа ложное срабатывание и пропуск цели, в зависимости от того, какие из них более важны. При этом вероятность ошибки типа ложное срабатывание представляет меньший интерес, поскольку спорные участки можно контролировать повторно, через некоторое время, контролируя развитие ситуации во времени. Эти результаты позволили сформулировать шестое научное положение.

Таким образом, был разработан и опробован на реальных натурных данных комплексный геофизический метод обнаружения полостей в заобделочном пространстве, опирающийся на использование информативных параметров, полученных при обработке результатов георадиолокационного и сейсмоакустического контроля.

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 позво-

лило разработать метод определения типа заполнителя полости по максимуму коэффициента корреляции между спектральными составляющими модельного и натурного 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».

Основные положения научно-квалификационной работы (диссертации) опубликованы в следующих работах:

В изданиях, входящих в перечень ВАК и Scopus по защищаемой специальности:

1. 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. Москва, 2011, №8. С. 202-211.

2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Набатов В.В. Георадиолокационные обследования массивов пород вблизи аварийных коллекторов с привлечением данных СМР-измерений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015, №3. С. 197-206.
10. 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>
11. Николенко П.В., Набатов В.В. Об обеспечении помехозащищённости геоакустического контроля критических напряжений в породном массиве // Горный журнал. 2015, №9. С. 33 - 35. <http://dx.doi.org/10.17580/gzh.2015.09.06>
12. 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.
13. 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

14. 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.

15. 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

16. 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

17. 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

18. 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

19. 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

В прочих изданиях:

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

25. Набатов В.В. Георадиолокационное обследование массива пород в заобделочном пространстве: особенности обработки и интерпретации результатов // Транспортное строительство. 2017, №11. С. 12-15.

26. 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.

27. Nabatov V.V., Voznesenskii A.S. Geomechanical analysis of the impact of the new tunnels construction in the vicinity of existing underground subway structures on the state of the soil massif // Journal of Mining Institute. 2023. Vol. 264. p. 926-936.

28. 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.

29. 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.

30. 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.

31. Набатов В.В. Комплексирование признаков при сейсмоакустическом выявлении полостей в заобделочном 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

32. 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.

Нормативные документы:

33. 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.

34. Меркин В.Е., Зерцалов М.Г., Петрова Е.Н., Хохлов И.Н., Ляпидевский Б.В., Пархоменко В.Н., Анисеева 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.

35. 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.