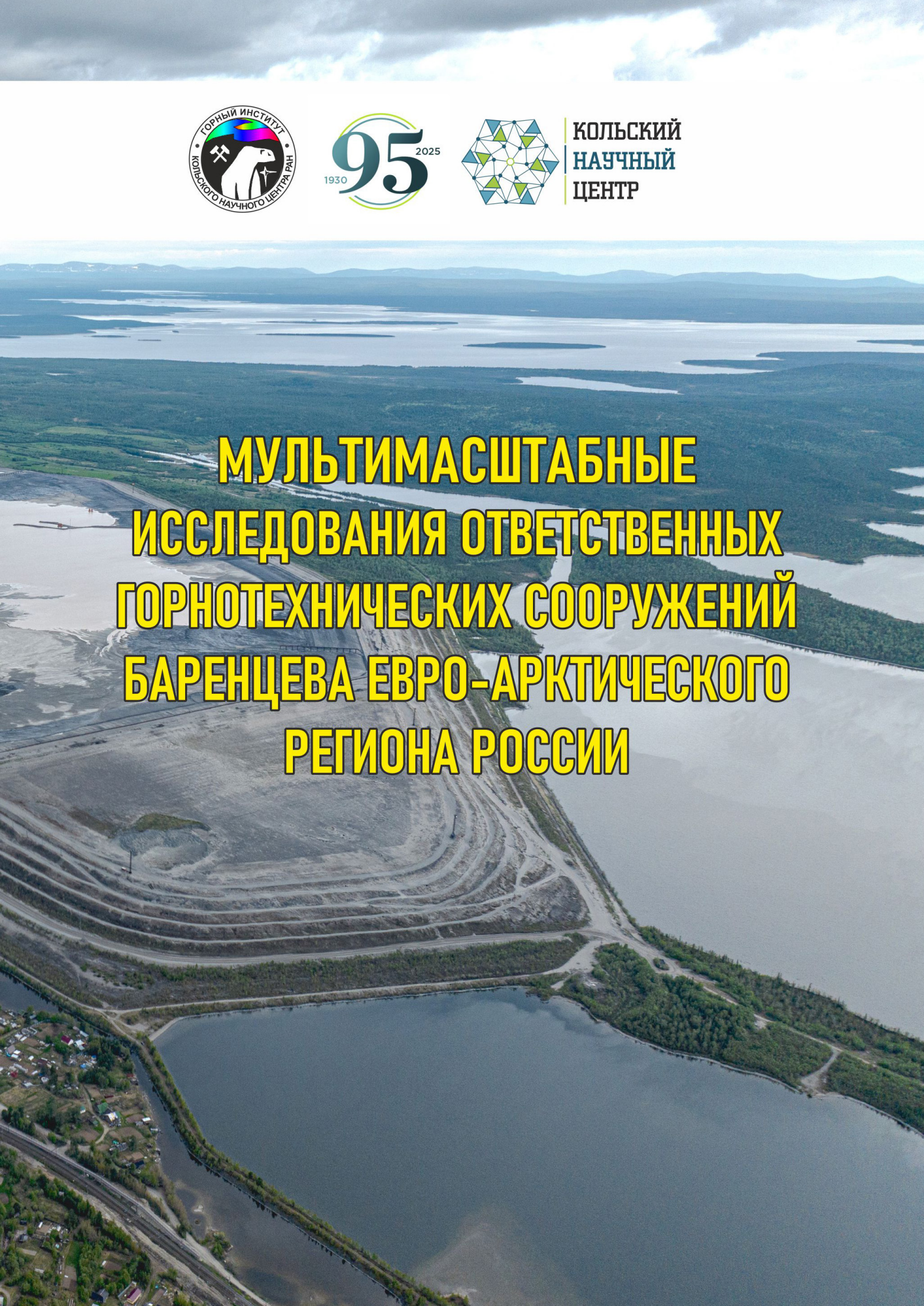
ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ КОЛЬСКОГО НАУЧНОГО ЦЕНТРА РАН

1930 95 2025

КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР



МУЛЬТИМАСШТАБНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ БАРЕНЦЕВА ЕВРО-АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА РОССИИ

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ

А. И. Калашник, А. Ю. Дьяков, Д. В. Запорожец, Н. А. Калашник, М. В. Мелихов

МУЛЬТИМАСШТАБНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ БАРЕНЦЕВА ЕВРО-АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА РОССИИ

Апатиты
Издательство Кольского научного центра РАН
2025

УДК622’17:624.136(470.21)
ББК 33
М90

Печатается по решению Редакционного совета по книжным изданиям ФИЦ КНЦ РАН

Мультимасштабные исследования ответственных горнотехнических
М90 сооружений Баренцева Евро-Арктического региона России : монография / А. И. Калашник, А. Ю. Дьяков, Д. В. Запорожец, Н. А. Калашник, М. В. Мелихов. — Апатиты : Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2025. — 316 с. : ил.
ISBN 978-5-91137-554-6

Главной целью монографии являлось развитие методологии мультимасштабных исследований ответственных горнотехнических сооружений Баренцева Евро-Арктического региона России для получения более полной, детализированной и иерархически структурированной информации о состоянии контролируемых объектов. Основными объектами исследований являлись комплексы складирования жидких минеральных отходов горнодобывающих предприятий западной части российского сектора Арктики. Методология проведения работы базировалась на комплексировании мультидисциплинарных полевых наблюдений, обеспечивших мультимасштабность определений (от долей миллиметра (зерна и частицы грунта) до десятков километров (сооружения в целом, с сопряженными природно-техническими системами)). Теоретическую базу полевых измерений составляло геофильтрационное и гидрогеомеханическое 3D-моделирование; регистрацию, передачу и обработку данных обеспечивали цифровые технологии. Научно-методический подход, заключавшийся в комплексировании полевых измерений и компьютерного моделирования, позволил решать как текущие ситуационные задачи, так и осуществлять кратко и среднесрочный прогноз изменения состояния контролируемых объектов. В монографии дано описание примененных методов и инструментария, подходов к обработке и интерпретации полученных результатов, основных выявленных зависимостей и установленных закономерностей. Методология мультимасштабных исследований апробирована на ответственных горнотехнических сооружениях Баренцева Евро-Арктического региона России и может быть применена в других горнодобывающих регионах РФ.

Монография может быть полезна специалистам и инженерам горнопромышленных предприятий, а также аспирантам и студентам горнотехнических и гидрогеологических специальностей.

УДК 622’17:624.136(470.21)
ББК 33

Научное издание
МУЛЬТИМАСШТАБНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ БАРЕНЦЕВА ЕВРО-АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА РОССИИ
Калашник Анатолий Ильич, Дьяков Андрей Юрьевич, Запорожец Дмитрий Васильевич, Калашник Надежда Анатольевна, Мелихов Михаил Владимирович
Редактор Ю. Н. Еремеева
Технический редактор В. Ю. Жиганов
Подписано в печать 22.12.2025. Формат бумаги 70 × 108 1/16.
Усл. печ. л. 27,65. Заказ № 89. Тираж 300 экз.
Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр РАН».
184209, Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14.

ISBN 978-5-91137-554-6
doi10.37614/978.5.91137.554.6

© А. И. Калашник, А. Ю. Дьяков, Д. В. Запорожец, Н. А. Калашник, М. В. Мелихов, 2025
© ГоИ КНЦ РАН, 2025
© ФИЦ КНЦ РАН, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ……	5
ВВЕДЕНИЕ……..	6
1. МЕЖДУНАРОДНЫЕ ПОДХОДЫ К МОНИТОРИНГУ И ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ХВОСТОХРАНИЛИЩ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ……..	9
1.1. Подходы к организации мониторинга……...	9
1.2. Основные виды и причины отказов хвостохранилищ……..	10
1.3. Необходимость мониторинга и обеспечение безопасности хвостохранилищ……...	11
1.4. Виды отказов хвостохранилищ и требования к мониторингу безопасности…….	13
1.5. Основные принципы обеспечения безопасности хвостохранилищ…	16
1.6. Цели программы безопасности……...	18
1.7. Процедуры проведения программы мониторинга безопасности……	19
1.8. Сравнение основных требований к дамбам хвостовых отвалов и обычным плотинам……...	21
1.9. Отказы дамб хвостовых отвалов и необходимость в инструментарии, измерениях и наблюдениях…….	23
1.10. Параметры безопасности и использование инструментов……	24
1.11. Стоимость против ценности систем мониторинга хвостохранилищ	36
1.12. Основные комментарии и выводы……...	38
2. РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ МУЛЬТИМАСШТАБНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОТВЕТСТВЕННЫХ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ БАРЕНЦЕВА ЕВРО-АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА РОССИИ……...	41
2.1. Развитие методических подходов к многоуровневым комплексным исследованиям и мониторингу горнотехнических объектов……...	41
2.2. Георадарные подповерхностные обследования горнотехнических объектов	48
2.2.1. Георадарное исследование ограждающей дамбы на объекте складирования намывных отходов горного производства……..	49
2.2.2. Исследование трансформации наведенных волновых полей в объектах складирования отходов……..	53
2.2.3. Комплексирование волновых методов для выявления опасных фильтрационно-деформационных процессов…….....	56
2.2.4. Методический подход к идентификации зон повышенного водонасыщения и структурных неоднородностей…….....	58
2.2.5. Георадарные зондирования горнотехнических объектов: комплексный анализ динамических и кинематических характеристик волнового поля…….	59
2.2.6. Мультимасштабность в георадарных обследованиях объектов складирования отходов……	69
2.2.7. Примеры георадарных подповерхностных обследований объектов складирования отходов…….....	74
2.2.8. Георадарное зондирование ограждающего сооружения водохранилища…….....	83
2.2.9. Основные комментарии и выводы……..	86
2.3. Развитие методов космического мультимасштабного мониторинга горнотехнических объектов……..	87
2.3.1. Современные методы и технологии мультимасштабной съемки объектов……..	87
2.3.2. Методический подход к дистанционному мультимасштабному мониторингу горнотехнических объектов……...	96

2.3.3. Реализация дистанционного мультимасштабного мониторинга горнотехнических объектов…… 99
2.3.4. Создание региональной базы данных горнотехнических объектов Евро-Арктического региона……... 102
2.4. Аэрофотосъемки горнотехнических объектов с применением БПЛА…..... 105
2.5. Создание геофильтрационных и гидрогеомеханических моделей горнотехнических объектов……..... 108
3. МУЛЬТИМАСШТАБНЫЙ МОНИТОРИНГ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ КОЛЬСКОГО РЕГИОНА…… 115
3.1. Хвостохранилище горнодобывающего предприятия (на примере АО «СЗФК»)…… 115
3.1.1. Применяемые методы и подходы……. 115
3.1.2. Фотооптические и визуальные наблюдения……... 115
3.1.3. Георадарное зондирование ограждающих дамб…….. 118
3.1.4. Геодезические наблюдения по контрольно-наблюдательным реперам 126
3.1.5. Компьютерное 3D-моделирование фильтрационно-деформационных процессов в ограждающей дамбе……... 132
3.1.6. Особенности гидрогеомехнического состояния хвостохранилища по данным полевых наблюдений и компьютерного моделирования 154
3.2. Разделительная дамба хвостохранилища (на примере АНОФ-3 КФ АО «Апатит»)..... 157
3.2.1. Краткая характеристика……... 157
3.2.2. Инженерные изыскания территории……... 158
3.2.3. Параметры разделяющей дамбы…… 159
3.2.4. Рекогносцировочное и визуальное обследования……... 161
3.2.5. Дистанционные исследования на основе анализа космоснимков…….. 164
3.2.6. Георадарное обследование внутренней структуры и состояния разделительной дамбы……... 165
3.2.7. Компьютерное гидрогеомеханическое 3D-моделирование состояния разделительной дамбы……... 175
3.2.8. Особенности гидрогеомеханического состояния разделяющей дамбы 197
3.3. Плотина водохранилища горнопромышленного назначения…… 198
3.3.1. Построение цифровых моделей……... 198
3.3.2. Построение гидрогеомеханической 3D-модели водохранилища…….. 202
3.3.3. Гидрогеомеханическое моделирование текущего состояния…… 206
3.3.4. Гидрогеомеханическое моделирование прогнозного состояния……... 217
3.3.5. Основные комментарии и выводы……. 273
4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ БАРЕНЦЕВА ЕВРО-АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА РОССИИ……. 279
4.1. Методические подходы к многофакторной оценке состояния хвостохранилища……... 279
4.2. Обоснование индикаторов локальных фильтрационно-деформационных процессов на основе многофакторного анализа растительности…… 281
4.3. Пример оценки гидрогеомеханической безопасности хвостохранилища.. 288
4.4. Трансформация горнотехнического объекта из стационарного гидрогеомеханического состояния в нестационарное…….. 290
4.5. Практические примеры мультимасштабных исследований ответственных горнотехнических сооружений Баренцева Евро-Арктического региона России 294
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 297
ЛИТЕРАТУРА 301

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АНОФ — апатитонефелиновая обогатительная фабрика
АО — акционерное общество
БВС — беспилотное воздушное судно
БД — базы данных
БПЛА — беспилотные пилотируемые летательные аппараты
ГИС — геоинформационная система (географическая информационная система)
ГМК — горно-металлургическая компания
ГОК — горно-обогатительный комбинат
ГТС — гидротехническое сооружение
ДДЗЗ — данные дистанционного зондирования Земли
ДЗЗ — дистанционное зондирование Земли
ДУ — условный диаметр
КА — космические аппараты
КФ — Кольский филиал
НСУ — наземная станция управления
ОФ — обогатительная фабрика
ПК — персональный компьютер
ПО — программное обеспечение
ПОР — поле обратного рассеяния
ПРД — первичная разделительная дамба
РФ — Российская Федерация
ЦММ — цифровая модель местности
AI — Artificial Intelligence (искусственный интеллект)
GPS — Global Positioning System (система глобального позиционирования)

ВВЕДЕНИЕ

Горное производство Баренцева Евро-Арктического региона России обуславливает создание объектов складирования минеральных отходов, которые являются потенциально опасными сооружениями, а в некоторых случаях имеют категорию особо ответственных, что наиболее важно в арктических климатических условиях. Разработка месторождений приводит к нарушению гидрогеологического режима, активизации тектонических разломов и современных движений земной коры, проседаниям, сдвижениям, подвижкам, оползням пород, интенсивному заводнению и пр. Эти проявления могут быть «спусковым механизмом» для нарушений и, возможно, разрушений объектов складирования минеральных отходов горного производства, что приведет к значимым социально-экономическим потерям: токсичное загрязнение отходами земель, рек и озер; разрушение близлежащих населенных пунктов и промышленных объектов; человеческие жертвы; остановка горнодобывающего предприятия; как следствие — экономический ущерб, измеряющийся порой сотнями миллионов долларов. Наиболее известные чрезвычайные ситуации и аварии объектов хранения жидких минеральных отходов: Качканарский ГОК (РФ), рудник Эль-Кобра (Чили), Карамкенский ГМК (РФ), углеобогатительная фабрика в Буффало-Крик (Западная Виргиния, США), шахта «Преставель» (Италия), хвостохранилище в Колонтаре (Венгрия), ОАО «Аммофос» (РФ), ОАО «Уралкалий» (РФ) и др.

Обязательным условием обеспечения промышленной безопасности объектов складирования минеральных отходов горного производства должен являться мониторинг их состояния, проведение которого позволяет выявить на ранней стадии развитие опасных фильтрационно-деформационных процессов и своевременно принять управленческое решение по предотвращению чрезвычайной и аварийной ситуации. На ряде горнодобывающих предприятий мониторинговые исследования ведутся А. И. Калашником, Э. В. Каспарьяном, В. В. Рыбиным (Кольский полуостров); А. Д. Сашуриным, А. А. Панжиным, А. Н. Шабаровым, Ю. О. Кузьминым и др. (Урал); В. Н. Опариным, В. П. Потаповым, В. О. Михайловым, Ю. А. Кашниковым, Ю. О. Кузьминым и др. (Западная Сибирь); Ж. Е. Мусагалиевой, Ж. Т. Кожаевым и др. (Казахстан) и др. Для жидких минеральных отходов горных предприятий большой вклад в решение вопросов обеспечения их безопасной эксплуатации внесли А. М. Гальперин, Ю. И. Кутепов, Д. С. Круподеров, В. С. Кузнецов, В. А. Шестаков, А. А. Харионовский, В. П. Недрига, В. Г. Зотеев и др. Предложен и развивается новый подход для решения задач геомониторинга, базирующийся на применении современных информационных технологий BIG DATA и Cloud Service (В. П. Потапов, В. Н. Опарин).

В данном исследовании исполнителями развивается системная структура мультимасштабного мониторинга, учитывающая гидрогеологические и климатические особенности региона и включающая комплексы натурных измерений мультидисциплинарными методами, цифровые технологии и гидрогеомеханическое 3D-моделирование. Такой комплексный и разномасштабный подход позволяет обнаруживать на ранних стадиях признаки (индикаторы) возникновения потенциально опасных фильтрационно-деформационных процессов, оценивать текущее состояние и прогнозировать тенденции изменения контролируемого объекта.

В развитие методологических подходов, изложенных в предыдущих публикациях, исполнителями работ предложено комплексирование мультидисциплинарных

методов наблюдений на различных уровнях, соотнесенных с дневной поверхностью контролируемого объекта.

Наряду с уже традиционными сейсмическими и сейсмологическими методами для мониторинга геолого-геофизической среды, предлагается активно использовать георадарное зондирование, достаточно хорошо зарекомендовавшее себя при мониторинге горнотехнических объектов. Зарубежными исследователями, в частности, сотрудниками университетов: University of Novi Sad, Province of Vojvodina, Serbia; Cagliari, Sardinia, Italy; Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brazil и др., показано успешное применение неразрушающего подповерхностного зондирования георадарными технологиями.

Смещения и деформации дневной поверхности и горнопромышленных объектов достаточно уверенно и с высокой точностью определяются классической (нивелирование и полигонометрия) и спутниковой геодезией, в дополнение к которым целесообразно использование результатов мультиспектрального и интерферометрического анализа спутниковых радарных снимков.

Важное значение имеет разработка цифровых моделей и гидрогеомеханическое 3D-моделирование текущего и прогнозного состояния контролируемых объектов.

Выполненный анализ современного состояния исследований по тематике книги свидетельствует о достаточно хорошем уровне проработки и полученных значимых результатах. Вместе с тем следует отметить, что фундаментальная проблема оценки промышленной безопасности объектов складирования минеральных отходов горного производства западной части российского сектора Арктики, создаваемых при воздействии циклических климатических, экзогенных и эндогенных воздействий (в арктических условиях), в целях минимизации рисков опасных проявлений фильтрационно-деформационных процессов является актуальной и имеет научное и практическое значение. Целью являлось развитие методологии мультимасштабных исследований ответственных горнотехнических сооружений Баренцева Евро-Арктического региона России для получения более полной, детализированной и иерархически структурированной информации о состоянии контролируемых объектов. Основными объектами исследований являлись комплексы складирования жидких минеральных отходов горнодобывающих предприятий западной части российского сектора Арктики. Методология проведения работы базировалась на комплексировании мультидисциплинарных полевых наблюдений, обеспечивших мультимасштабность определений (от долей миллиметра (зерна и частицы грунта) до десятков километров (сооружения в целом, с сопряженными природно-техническими системами)). Теоретическую базу полевых измерений составляло геофильтрационное и гидрогеомеханическое 3D-моделирование, регистрацию, передачу и обработку данных обеспечивали цифровые технологии. Научно-методический подход, заключавшийся в комплексировании полевых измерений и компьютерного моделирования, позволил решать как текущие ситуационные задачи, так и осуществлять кратко и среднесрочный прогноз изменения состояния контролируемых объектов. В монографии дано описание примененных методов и инструментария, подходов к обработке и интерпретации полученных результатов, основных выявленных зависимостей и установленных закономерностей.

Идея написания книги, генерация общей цели, задач, обобщение и систематизация полученных результатов принадлежат к. т. н. А. И. Калашнику. Им написана аннотация, введение, заключение и бóльшая часть книги

(гл. 1, разделы 2.1, 2.2.7, 2.2.9, 2.3.1, 3.1.1, 3.1.5, 3.1.6, 3.2.3, 3.2.7, 3.2.8, 3.3.1–3.3.5, 4.1, 4.3–4.5, в том числе и некоторые другие разделы в соавторстве), выполнена компоновка и общая редакция текста. Написание отдельных разделов выполнено научными сотрудниками: А. Ю. Дьяков — разделы 2.2.1–2.2.9, 3.1.3, 3.2.6; Д. В. Запорожец — разделы 2.2.1, 2.4, 3.1.1, 3.2.3, 3.2.4, 3.2.6; Н. А. Калашник — разделы 2.1, 2.5, 3.1.5, 3.1.6, 3.2.7, 3.2.8, 3.3.1–3.3.5, 4.3, 4.4; к. т. н. М. В. Мелихов — разделы 2.3.1–2.3.4, 3.2.2. Раздел 4.2 скомпанован по материалам Д. А. Максимова. В обработке данных полевых исследований принимали участие вед. инж. Д. Н. Еграшичева и инж. О. В. Смирнова, в построении геофильтрационных моделей — инж. Е. Ю. Лебедик, в обработке данных моделирования — инж. О. В. Смирнова.

Авторы считают своим долгом упомянуть академика Н. Н. Мельникова, который на начальном этапе способствовал становлению данного научного направления. Активную поддержку исследований оказывал член-корреспондент РАН, д. т. н. С. В. Лукичев, благодаря чему был получен ряд значимых результатов, включенных в доклад РАН, годовые отчеты научного совета РАН по проблемам горных наук, ФИЦ КНЦ РАН, Горного института КНЦ РАН, а также опубликованных в профильных российских и зарубежных журналах с высоким цитированием. Часть полевых работ выполнена с участием или с помощью сотрудников Отдела геомеханики Горного института КНЦ РАН, и авторы книги признательны за это к. т. н. И. Э. Семеновой, д. т. н. В. В. Рыбину, к. т. н. Н. Н. Кузнецову.

Комплексные многоуровневые исследования и мониторинг действующих хвостохранилищ горнодобывающих предприятий выполнены при активном содействии и помощи в течение ряда лет главных специалистов — горных инженеров предприятий: А. А. Данилкина, В. А. Сохарева, А. В. Завьялова, И. Д. Севостьянова (АО «Ковдорский ГОК»); К. А. Осипова, П. А. Кукушкина, Е. И. Дивисенко (АО «Кольская ГМК»); А. А. Гладкова (ГОК «Олений ручей» «СЗФК»); А. В. Лебедика (АО «Апатит»); А. Г. Устинова (АО «Олкон»), которым авторы выражают свою благодарность.

Авторы выражает искреннюю признательность рецензентам: д. т. н. С. В. Терещенко и к. г.-м. н. А. У. Корчагину, а также чл.-корр. РАН, д. т. н. С. В. Лукичеву, д. т. н. В. В. Рыбину, д. т. н. С. В. Сольскому («Проектводстрой») за ценные советы, обсуждение результатов исследований и замечания, способствовавшие улучшению работы, инженеру О. В. Смирновой — за помощь в подготовке рукописи книги.

1. МЕЖДУНАРОДНЫЕ ПОДХОДЫ К МОНИТОРИНГУ И ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОСТИ ХВОСТОХРАНИЛИЩ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ[1]

1.1. Подходы к организации мониторинга

Осознание необходимости мониторинга и обеспечения безопасности хвостохранилищ горнодобывающих предприятий растет из-за аварий и катастроф, вызванных разрушениями ограждающих дамб, усугубленных увеличением объемов хвостовых отложений и строительством протяженных и высоких ограждающих сооружений. Убытки, понесенные горнодобывающей промышленностью из-за высоких затрат на ремонтно-восстановительные работы, компенсации, штрафы и работы по восстановлению окружающей природно-технической среды, все больше привлекают внимание к этой проблеме. В зарубежных исследованиях все чаще подчеркивается необходимость комплексного мониторинга и обеспечение безопасности хвостохранилищ, исследуются виды сбоев, отказов, аварий и факторы, приводящие к ним. Изучаются основные принципы мониторинга, описываются явления и процессы, требующие наблюдения, и объясняются механизмы их воздействия. Прежде всего, как и для традиционных плотин, мониторинговые наблюдения выполняются путем визуального осмотра, фотофиксации, а также с использованием геотехнических, геофизических и геодезических методов и инструментов. Наблюдения и измерения проводятся аналогичным образом для определения количества и качества фильтрующейся воды, уровня депрессионной поверхности и порового давления, а также значений общего гравитационного давления, помимо измерений деформаций; и все это делается с помощью аналогичных устройств и методов таких, как водосборы, пьезометры, инклинометры, нивелирование и геодезическая съемка. При этом подчеркивается непрерывность мониторинга безопасности хвостохранилищ не только во время длительного этапа строительства, но и после него, на этапах заполнения и консервации, которые могут продолжаться относительно бесконечно, чтобы следить за возможными неблагоприятными воздействиями на окружающую среду и экосистему из-за ветров, разрушающих и переносящих ядовитое содержимое хвостовых отложений, а также загрязненной фильтрующейся воды, попадающей в поверхностные водоемы и в подземные (грунтовые) воды [1].

Исследователями обосновывается использование систем мониторинга в реальном времени для записи и передачи всех данных в контрольный центр, особое внимание уделяется экономии труда и времени и необходимости обнаружения предупреждающих проявлений (индикаторов), позволяющих заблаговременно поднять тревогу о возможной аварии или инциденте и принять меры предотвращения. Утверждается, что, несмотря на большие инвестиции в создание и эксплуатацию систем мониторинга безопасности хвостохранилищ,

[1] Данный раздел подготовлен по материалам работы Nasrat Adamo, Nadhir Al-Ansari, Varoujan Sissakian, Jan Laue, Sven Knutsson Dam Safety: Monitoring of Tailings Dams and Safety Reviews // Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, Vol. 11, No. 1, 2020, 249-289 https://doi.org/10.47260/jesge/1117

такие затраты оправданы, поскольку они составляют лишь небольшой процент от общих инвестиций в проекты по обустройству хвостохранилищ и могут сэкономить огромные суммы, если произойдет сбой, отказ или авария. Системы мониторинга рассматриваются как дополнительная страховка против подобных событий.

1.2. Основные виды и причины отказов хвостохранилищ

Международными исследователями упоминается около 18 тыс. хвостохранилищ по всему миру и оценивается, что за последние 100 лет отказы таких сооружений составляют 1,2 % от общего их числа. При этом следует принять во внимание, что отказы традиционных водохранилищ составляют всего 0,01 % [2]. Вероятность отказов и аварий на хвостохранилищах более чем в 10 раз выше, чем на радиционных водохранилищах.

Эксплуатация хвостохранилища включает в себя риски, которые необходимо идентифицировать, количественно оценить и снизить. В среднем каждый год отказывают 3 из 3500 хвостохранилищ мира [3]. Статистика из доступных данных показывает, что отказы из-за проливных (ливневых) дождей увеличились с 25 % до 2000 г. до 40 % после 2000 г. из-за изменений климатических условий, особенно на горных участках, близких к морям и/или расположенных в экваториальных регионах, которые получили большие осадки. Отказы из-за плохого административно-технического управления составили 10 и 30 % соответственно, за те же два временных периода. Сравнение двух временных групп показывает, что отказы в дамбах высотой до 15 м увеличились с 28 до 30 %, в то время как отказы в дамбах высотой от 15 до 30 м увеличились с 21 до 60 %. Увеличение отказов на высоте дамбы может быть связано с комбинированным эффектом быстрого ее строительства вместе с плохим мониторингом качества [4].

В работе [5] указывается, что хвостохранилища более склонны к отказам, чем водохранилища, из-за определенных уникальных характеристик, включая:

- насыпи, построенные из остаточного материала от горнодобывающей деятельности;
- повышение (наращивание) дамбы в несколько этапов для увеличения емкости хранения;
- отсутствие регулирования и критериев проектирования;
- недостаточность мониторинга для обеспечения стабильности дамбы;
- высокая стоимость обслуживания после закрытия горнодобывающего предприятия [6].

Поддержание безопасности и стабильности пруда-накопителя хвостохранилища является самой сложной задачей обеспечения безопасности. Следующие пункты являются причинами, почему хвостохранилища более подвержены повреждениям, чем другие типы водохранилищ:

- насыпные ограждающие дамбы, построенные из почвы, грубых отходов и остаточных материалов от горнодобывающих операций;
- количество сточных вод увеличивается по мере увеличения высоты хвостохранилища;
- отсутствие разумных регулирований по стандартам проектирования;
- высокая стоимость мониторинга хвостохранилища во время эксплуатации шахты и закрытия [7].

Отказы хвостохранилищ могут происходить по нескольким механизмам. Эти механизмы включают фильтрацию, отказ основания, перелив и землетрясение. Учитывая серьезные повреждения, вызванные разрушением хвостохранилища,

важно понимать основные причины и механизмы их отказа и принимать все возможные меры для повышения их безопасности. Основные причины нестабильности хвостохранилищ могут быть следующими:

- фильтрация и внутренняя эрозия;
- плохие условия основания;
- перелив;
- воздействие землетрясения, вызывающее статическую и сейсмическую нестабильность,
- другие причины такие, как: суффозия, карст, структурные, внешние эрозии.

1.3. Необходимость мониторинга и обеспечение безопасности хвостохранилищ

Целостность и безопасность хвостохранилища зависят от качества проектирования, добросовестной эксплуатации и непрерывного, экономически эффективного, мониторинга.

Геотехнические проекты могут быть улучшены за счет увеличения коэффициентов сопротивления; однако даже плотины с консервативными характеристиками могут столкнуться с неожиданным отказом из-за наличия своевременно неидентифицированных геологических особенностей, аномальных погодных условий, сейсмического удара и принципиально переменного качества строительного проекта, охватывающего несколько десятилетий и технологические парадигмы. Поэтому добросовестные, хорошо обученные специалисты и надежная система мониторинга критически важны для предотвращения отказов и снижения потерь в условиях известных и неизвестных данных. В этом контексте адекватная система мониторинга должна выявлять проблемное поведение, которое может привести к отказу хвостохранилища с предварительным предупреждением. Эксперты в этой области напоминают нам, что: «Для любого инженера считать плотину стабильной в долгосрочной перспективе просто потому, что она была видимо стабильной в течение такого долгого периода времени, без какого-либо другого подтверждения, потенциально катастрофическая ошибка суждения» [8]. Если любую обычную плотину во время ее эксплуатации сравнить с хвостохранилищем с тем же потенциалом опасности, расположенным в отдаленной местности во время фазы закрытия, то очень немногие, если вообще есть, руководства по безопасности плотин различают такие плотины, когда они утверждают требования к программе безопасности плотин. И все же эти требования, скорее всего, будут значительно отличаться. Например, обычную плотину можно видеть каждый день при наблюдении переходов персоналом объекта или проводить еженедельные осмотры, в то время как хвостохранилище может быть обследовано только раз в год. Или обычная плотина будет эксплуатироваться для получения экономической выгоды такой, как контроль за паводками или генерация электроэнергии, в то время как хвостохранилище — нет. Или планы готовности к чрезвычайным ситуациям и реагирования на них, а также система предупреждения могут существовать и быть легко реализованы для обычной плотины, в то время как для хвостохранилища такие планы могут не существовать или, по крайней мере, иметь другой смысл и, безусловно, другие протоколы реагирования. Мониторинг загрязненных грунтовых вод не будет актуален для оценки безопасности обычной плотины, но может быть вполне требуемым для хвостохранилищ. Список таких различий можно значительно расширить за пределами этих примеров. Частота и объем проверок плотин и обзоров безопасности должны учитывать практичность

реализации программы безопасности плотин. Во многих случаях объем и, возможно, частота проверок безопасности плотин должны быть более интенсивными в случае хвостохранилища во время фазы закрытия, «компенсируемые» более низкой частотой обзоров безопасности плотин. Частоты наблюдения за безопасностью плотин персоналом объекта, проверки и обзоры, рекомендованные в руководствах по безопасности плотин, часто кажутся довольно произвольными, или, в лучшем случае, обычными. Однако наличие обоснования для таких частот может быть очень желательным, где связанные с этим затраты высоки; как в случае удаленного закрытого объекта хвостохранилища. По крайней мере, в некоторых отношениях такое обоснование может быть разработано. Например, одним из факторов, которые могут поддерживать указание частоты обзоров безопасности плотин, является ожидаемое «возможное» изменение метеорологической или сейсмической базы данных.

Например, в проекте в Канадской Арктике в 1995 году было показано, что наблюдалась определенная тенденция к охлаждению, а после расширения базы данных на 7 лет, примерно в 2000 году, был сделан вывод, что на месте происходит явная тенденция к потеплению. В качестве другого примера в проекте в провинции Британская Колумбия гидрологические проекты пришлось пересмотреть в 1998 году после того, как исходная база данных была расширена дополнительными записями о выпадении осадков за 7 лет. Наряду с некоторыми другими факторами, такие временные периоды могут направлять частоту и, возможно, объем обзоров безопасности для хвостохранилища во время фазы закрытия [9].

Очевидно, что важность данных о потеплении климата или выпадении осадков будет варьироваться от места к месту. С точки зрения сейсмичности, например, в Канаде, происходит постоянное повышение карт сейсмической опасности и сейсмических рейтингов Национального строительного кодекса Канады каждые 5–10 лет, показывающее заметное увеличение пикового ускорения грунта для редких сейсмических событий почти во всех регионах страны; последнее обновление было сделано в 2015 г. [9]. В то время как действующая обычная плотина может видеть одно или два таких крупных пересмотра, закрытое хвостохранилище будет подвержено изменениям в метеорологических и сейсмических базах данных для любого понятия предсказуемого будущего. Наличие сосредоточенного руководства было бы наиболее полезным для создания рамок для разработки специфической для каждого сайта программы безопасности для каждого хвостохранилища во время этапов наращивания дамб и на этапе закрытия [10, 11].

Мониторинг места хвостохранилища во время и после закрытия рудника необходим для оценки эффективности и результативности мер по закрытию. Характер и продолжительность мониторинга после закрытия во многом зависят от характера и размера операции и могут продолжаться десятилетия после закрытия рудника. На основе информации, собранной во время мониторинга, могут быть приняты решения относительно дальнейших действий на закрытых/рекультивированных участках рудников. Цели мониторинга направлены на обеспечение надлежащего закрытия рудника. Поэтому необходим процесс систематического сбора информации для использования в принятии решений. Различные цели закрытия, т. е. достижение физической, химической и биологической стабильности, а также контроль над социально-экономическими воздействиями требуют различных параметров мониторинга, которые зависят от конкретных условий на месте. Технологии, которые будут использоваться в мониторинге, должны быть выбраны специально для каждого места хвостохранилища после тщательной оценки их пригодности [12, 13].

1.4. Виды отказов хвостохранилищ и требования к мониторингу безопасности

Возможные виды отказов хвостохранилищ должны быть учтены в любом исследовании их безопасности. Параметры, приводящие к любому из них, должны быть определены, и должны быть применены соответствующие процедуры мониторинга безопасности для устранения возможных опасностей любого отказа и их последствий. Основные виды отказов были определены Комитетом США по крупным плотинам (USCOLD), и количество отказов, приписываемых каждому виду, суммируется из 106 инцидентов на рис. 1.1 [14].

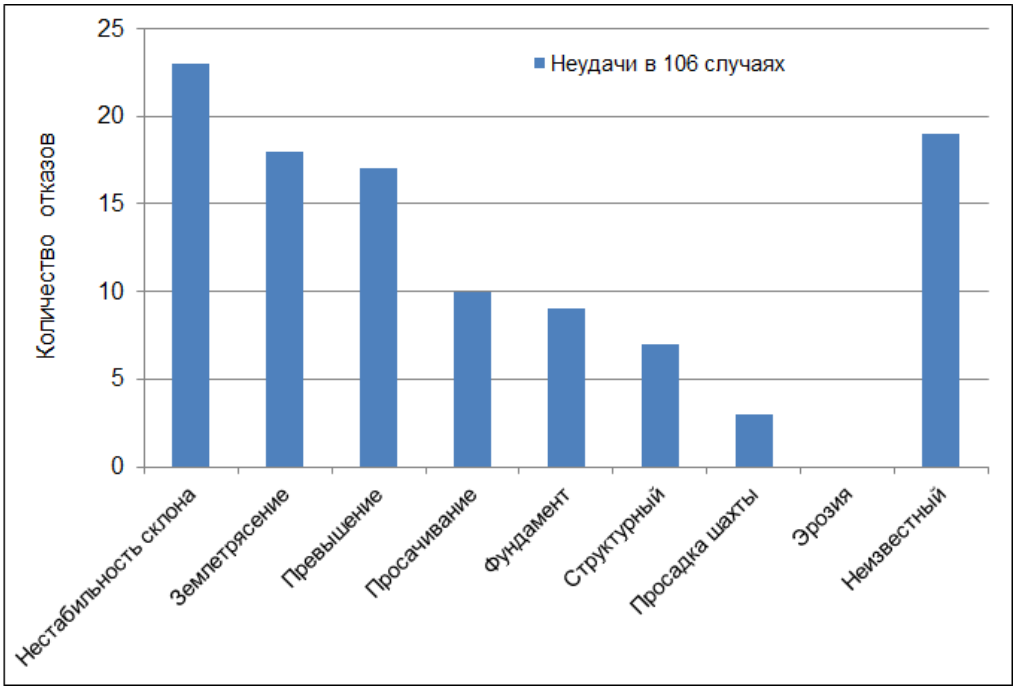


Рис. 1.1. Виды отказов хвостохранилищ и их частотное распределение [14]

Отказы из-за нестабильности склона, вызванные землетрясением, и отказы из-за перелива гребня дамбы идентифицируются как основные виды отказов, в то время как просачивание, нарушения основания, сдвижение пород в выработанное пространство рудников предшествовали меньшему количеству инцидентов.

Однако следует отметить, что в этих статистических данных, вероятно, присутствует смещение, поскольку отказы склонов, землетрясения и события перелива легче идентифицировать вспомогательно, и, следовательно, они более легко приписываются к отказу, чем менее заметные явления такие, как просачивание, нестабильность основания и внутренние структурные неоднородности. Кроме того, признается, что эти данные представляют основной вид отказа (т. е. тот, который привел к потере устойчивости) и что другие второстепенные способы и лежащие в их основе механизмы также могли способствовать окончательному отказу. Например, воздействие поднятой воды за дамбой хвостохранилища может способствовать значительному отказу, инициированному нестабильностью склона, переливом и просачиванием вместе [15], и начальные

отказы склонов очень редко происходят без какого-либо деформирования или поверхностного выражения.

Обновленное исследование, проведенное в 2019 г., показывает различное распределение частоты отказов и их причин, как показано на рис. 1.2. Это может быть связано с большим пониманием отказов дамб, обусловленных лучшим мониторингом, большим использованием приборов и более широким отчетом о случаях отказов хвостохранилищ за последние 100 лет.

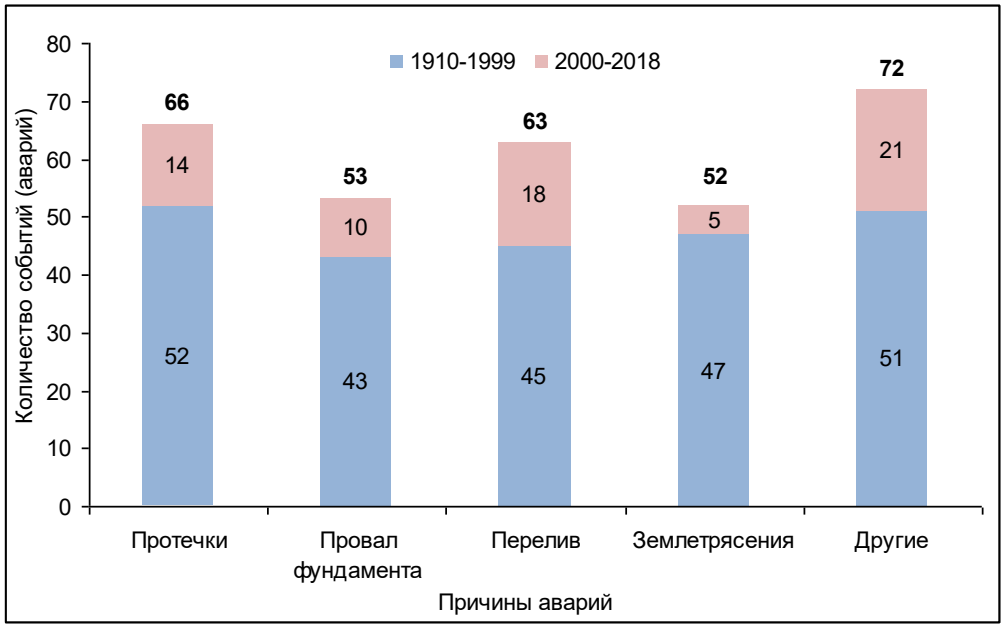


Рис. 1.2. Виды отказов хвостохранилищ и распределение частоты [13, 16]

Предложено разделение причин разрушения хвостохранилищ на 11 категорий, а именно: просачивание или трубопровод, отказ основания, перелив, сейсмическое воздействие (землетрясение), оседание шахт, проливной дождь, таяние снега, структура, нестабильность склона, обслуживание и неизвестная причина. Но многие аварии являются результатом сочетания нескольких причин, и эта классификация имеет некоторые перекрывающиеся части такие, как необычный дождь, таяние снега и перелив. Согласно основной причине отказа хвостохранилища, процент аварий от просачивания, отказа основания, перелива, землетрясения и других составляет соответственно 21,6, 17,3, 20,6, 17,0 и 23,5 %. Из собранных данных видно, что экстремальная погода наносит серьезный ущерб безопасности и стабильности хвостохранилищ. Поскольку деятельность человека вызывает потепление климата, отношение отказов хвостохранилищ, вызванных экстремальной погодой, может постепенно увеличиваться [16].

По мере того, как исследования отказов становятся более судебно-медицинскими по своей природе, понимание взаимозависимостей системы хвостохранилищ и сложности механизмов отказа становится более очевидным. Значительное количество неизвестных видов отказа на рис. 1.1 и даже на рис. 1.2 указывает на системную, недостаточно развитую культуру мониторинга, отсутствие установленных отраслевых лучших практик и недостаточные исследования

после отказа. К сожалению, анализ коренных причин может указывать на самодовольство или незнание внутри организации и ее акционеров, что приводит к отсутствию выделенных ресурсов.

Таблицы 1.1 и 1.2 обобщают связь между возможными видами отказа и возможностями снижения риска отказа. Следует отметить, что землетрясения и отказы, вызванные сейсмическими явлениями, трудно предотвратить в течение любого значимого временного интервала, и поэтому места, подверженные землетрясениям, должны в значительной степени полагаться на параметры проектирования и планирования чрезвычайных ситуаций.

Таблица 1.1

Виды отказов и возможности снижения риска

Режим отказа	Дизайн	Операция	Мониторинг
Неустойчивость склона	●	●	●
Землетрясение	●		
Превышение		●	●
Просачивание	●		●
Фундамент	●		●
Структурный	●	●	●
Просадка шахты	●	●	●
Неизвестный			?

Таблица 1.2

Виды отказов и соответствующие параметры мониторинга

Режим отказа	Контролируемые параметры и поведение
Неустойчивость склона	Смещение, вращение, осадка, изменение порового давления, трещины растяжения
Землетрясение	Ускорение грунта, изменение порового давления, осадка
Превышение	Изменение надводного борта, изменение порового давления, поток просачивания
Просачивание	Количество и качество просачивания, оседание/отверждение
Фундамент	Смещение, вращение, трещины растяжения
Структурный	Смещение, трещины растяжения, просачивание (разрушение сердечника)
Просадка шахты	Ускорение грунта, осадка
Эрозия	Изменение количества и качества стоков, изменение высоты поверхности

Все известные виды отказа могут быть отслежены и разумно предсказаны при наличии достаточной информации и понимания ожидаемого поведения системы. Таблица 1.1 перечисляет несколько интересующих параметров, изменения в которых характеризуют изменения в поведении системы плотины.

Таблица 1.2 перечисляет несколько интересующих параметров, изменения в которых характеризуют изменения в поведении системы плотины.

Идентификация нежелательных поведенческих характеристик является ключом к оценке риска отказа [17].

В заключение, основные механизмы отказов хвостохранилищ ясно определены, и они включают: просачивание, отказ основания, перелив и землетрясения, а также другие механизмы классических примеров отказов хвостохранилищ. Правильное понимание этих механизмов вместе с достаточным

надзором и хорошим управлением эксплуатацией объекта помогают устранить причины таких отказов и аварий.

Не трудно сделать вывод, что каждый отказ хвостохранилища включает инженерные и человеческие факторы, и эти факторы могут быть устранены с помощью правильных процедур проектирования и управления, строгих наблюдений и измерений поведения и реакций плотины.

Наконец, сегодняшняя доступность широкого спектра современных измерительных приборов и процедур мониторинга безопасности можно считать ценными активами при проверке проекта, улучшении производительности необходимых проверок безопасности, которые могут выдать рекомендации по защите плотины от возможных неблагоприятных условий.

1.5. Основные принципы обеспечения безопасности хвостохранилищ

Любая рациональная программа обеспечения безопасности хвостохранилищ должна удовлетворять основным требованиям, если она должна дать ожидаемые результаты по предотвращению инцидентов и аварий в таких проектах с высокими инвестициями. Эти требования рассматриваются в следующих пунктах.

Непрерывность. Мониторинг является существенным элементом наблюдательного подхода к проектированию и строительству, который так идеально подходит и так часто применяется к хвостохранилищам. Многим видам отказа хвостохранилищ предшествуют предупреждающие индикаторы, которые можно легко обнаружить заблаговременно с помощью надлежащей программы наблюдения. Если предупреждающие индикаторы быстро обнаружены и соответствующим образом оценены, есть время для внедрения защитных мероприятий. Для многих из этих обнаруживаемых видов отказа хорошая программа наблюдения за хвостохранилищем в сочетании с планами готовности к чрезвычайным ситуациям и реагирования на них представляет собой высокоэффективный, проактивный инструмент управления рисками по сравнению с вариантами отказа или ненужно чрезмерной и дорогостоящей степени консерватизма проектирования. Однако это не предоставляет возможности безопасного управления объектом, дизайн и/или строительство которого недостаточно хороши. Непрерывность мониторинга и наблюдения за объектом является существенной частью успешного и хорошего управления объектами хвостохранилищ, включая ограждающие дамбы, пруд и все прочие вспомогательные объекты. Необходимость рациональной программы мониторинга безопасности устанавливается с момента начала проекта и продолжается долго после его закрытия. Любая значимая программа мониторинга безопасности хранилища хвостов должна рассматриваться как непрерывный процесс, охватывающий жизненный цикл объекта, и она должна проводиться на всех этапах его существования.

Программы мониторинга безопасности должны проводиться путем регулярных визуальных осмотров, установки и регулярного чтения приборов и устройств, установленных для этой конкретной цели, а также путем оценки всех собранных данных опытными специалистами в обзорах безопасности. Такие обзоры безопасности направлены на определение необходимости каких-либо дальнейших действий для повышения уровня безопасности хвостохранилища. Следовательно, любая значимая программа безопасности плотины должна рассматриваться как длинная цепь непрерывных действий,

проводимых в последовательных этапах и продолжающихся очень долгое время, которое может длиться десятилетиями.

Этапы программы безопасности. Этапы программы безопасности обязательно охватывают полный жизненный цикл объекта, начиная с этапа планирования открытия шахты, через этап эксплуатации, и после закрытия, когда все отходы складированы в хвостохранилище. Это последнее требование предназначено для обеспечения сохранения окружающей среды, свободной от любых вредных эффектов отложений, а также для обнаружения и устранения любой опасности для поселений, жизни людей и их благополучия. Действия, необходимые на каждом из этих этапов, можно суммировать в следующих подразделах.

A. На предварительном этапе строительства.

На этом этапе определяется метод наращивания дамб, и все возможные воздействия на окружающую среду должны быть тщательно изучены.

Должен быть накоплен полный файл данных о гидрологических и климатических условиях на месте, включая информацию о выпадении дождя и снега. Эти данные будут использоваться в качестве базовой линии для сравнения любых будущих изменений и возможных последствий для дамбы или пруда-отстойника. Прогнозы таких данных на ожидаемый жизненный цикл должны быть оценены. Изменения в условиях окружающих грунтовых вод и поверхностных вод должны быть наблюдаемыми и сведены к абсолютному минимуму. Поэтому на этом предварительном этапе необходимо собрать информацию об уровнях грунтовых вод и качестве воды, и это должно продолжаться в течение срока службы проекта с использованием пьезометров, пробуренных для этой цели. Эти пьезометры должны быть спроектированы и установлены в качестве станций отбора проб воды для анализа любых опасных изменений качества, возникающих из-за увеличения содержания вредных химических веществ и тяжелых металлов, которые могут образоваться из-за просачивания воды из пруда в грунтовые воды. Поверхностные водные потоки должны контролироваться на предмет возможных изменений стока и возможного затопления дамбы и пруда хвостохранилища, и может потребоваться перенаправление некоторых из них. Сбор таких данных на этом этапе необходим для проведения также исследования воздействия на окружающую среду объекта и его обновления в будущем. Это наблюдение должно следовать руководствам, подготовленным проектировщиком, которые определяют цели, частоту и средства такого наблюдения.

B. На этапе строительства.

Этап строительства любого хвостохранилища охватывает весь период эксплуатации горнодобывающего объекта, который может продолжаться десятилетиями в зависимости от размера объекта и темпов производства. Поэтому важно строго контролировать безопасность хвостохранилища, пруда и всех вспомогательных работ, чтобы инциденты или отказы были предотвращены. Это делается путем наблюдения за безопасностью через регулярные визуальные осмотры, запись показаний установленных приборов и наблюдение и документирование любых аномалий в поведении, которые должны быть немедленно сообщены руководству для незамедлительных действий. Эта процедура — единственное средство обнаружить проблемы на раннем этапе и найти решения для обеспечения безопасности и предотвращения отказа. Быстрый ответ на любую угрозу, которая может появиться на этом этапе, принятием соответствующих корректирующих мер имеет чрезвычайно важное значение. Наблюдение за безопасностью плотин

хвостохранилищ проводится аналогичным образом, как и для обычных плотин, и следует руководствам, составленным проектировщиком. Использование систем инструментов является нормальным в программах обеспечения безопасности дамб хвостохранилищ на этом этапе и во многих отношениях похоже на те, которые используются для обычных плотин. Однако существуют различия, и эти различия подробно описываются позже. Больше говорится также о типах измерений и факторах, способствующих безопасности плотин хвостохранилищ.

C. На этапе закрытия и рекультивации.

Сразу после закрытия горнодобывающего объекта начинается этап рекультивации, и возникает вопрос о необходимости мониторинга консервированного хвостохранилища. В зависимости от конкретных деталей могут быть выполнены различные работы такие, как защита поверхностей от эрозии воды и ветра путем покрытия чистым перекрытием или другими доступными грунтами или каменными материалами. Это может быть дополнено гумусной почвой, засеянной подходящими культурами. Если токсичность высока, культуры могут быть не пригодны для потребления, но если она находится в допустимых пределах или снижена до таких пределов после определенного периода, то она может использоваться для сельскохозяйственных целей. Склоны могут быть покрыты земляными травами и залесены быстрорастущими деревьями и кустарниками, хотя следует заботиться о том, чтобы поверхностный сток был перехвачен канавами и предотвращен от попадания в пруды хвостохранилищ.

Дамба хвостохранилища должна быть защищена от экстремальных наводнений, и должны быть приняты меры для полного перехвата и переработки просачивающейся воды. Обычно требуемый мониторинг на начальных этапах рекультивации включает измерение стока просачивающейся воды на содержание твердых веществ, химический состав и значения pH, положение депрессионной поверхности для подтверждения того, что она безопасна внутри водохранилища и чиста от нижнего склона дамбы. Условия порового давления внутри водохранилища могут использоваться для указания консолидации и должны показывать эффект дренажей, давая четкое указание на их эффективность. Гидравлические измерения покажут эффективность обеспеченных устройств для перенаправления и сброса воды, и необходимо проверить осадки, чтобы убедиться, что гидрологические мероприятия не аннулируются развитием неблагоприятных градиентов.

Измерения и наблюдения должны проводиться таким же образом, как и в последние годы эксплуатации. Измеряются те же параметры, т. е. те, которые связаны с устойчивостью плотины, эрозией склонов и защитой окружающей среды. Используются те же инструменты, пока они продолжают давать надежные результаты после длительного периода эксплуатации. Частота наблюдений и измерений обычно постепенно уменьшается во время фазы рекультивации и в течение следующего долгосрочного периода, в зависимости от успеха стабилизации плотины хвостохранилища и снижения опасности для окружающей среды.

1.6. Цели программы безопасности

Инспекции объекта должны проводиться компетентными органами на всех этапах его жизненного цикла. Цели и их реализация уже были описаны в предыдущем тексте, но повторение может помочь подчеркнуть необходимые шаги для их достижения и важность устранения любого риска для окружающей среды или здоровья человека. Одной из дополнительных и важных целей

является проверка того, управляются ли хвосты в соответствии с применимыми законодательными и нормативными стандартами, а также с утвержденным руководством по эксплуатации и планом управления отходами. Таким образом, цели заключаются в следующем.

1. Проверка того, что выбранное место для объекта складирования отходов хорошо сочетается с его производительностью и согласуется с предполагаемыми факторами, влияющими на его проектирование и строительство.
2. Проверка того, что физическая устойчивость объекта складирования отходов обеспечена и что предотвращается загрязнение или загрязнение почвы, воздуха, поверхностных вод или грунтовых вод.
3. Проверка адекватности регулярного мониторинга выбросов и измерений выбросов.
4. Проверка того, было ли должным образом сообщено об отказах и были ли приняты надлежащие корректирующие меры.
5. Проверка того, что физическая устойчивость объекта складирования отходов обеспечена.
6. Проверка того, что процесс рекультивации выполнен хорошо, включая его надлежащую документацию.
7. Если управление объектом хвостохранилища не соответствует руководству по эксплуатации и/или плану управления отходами, в таком случае регулирующий орган должен призвать оператора ввести корректирующие действия в течение определенного периода, и, если это не сделано, отозвать разрешение на эксплуатацию [18].

1.7. Процедуры проведения программы мониторинга безопасности

Программа мониторинга безопасности обычно проводится по хорошо установленным и определенным наблюдательным пунктам на важных объектах хвостохранилищ. Это делается через визуальные осмотры специалистами объекта и желательно с участием персонала проектировщика, а также путем периодического чтения, записи и анализа сетей приборов и проведения различных измерений и испытаний, в которых также должен участвовать проектировщик, и, наконец, оценка безопасности дамбы проектировщиком в обзорах безопасности на основе накопленных данных за прошедшие годы. Если в любое время в течение этого периода появляется критическое состояние, то это оправдывает проведение немедленного обзора безопасности проектировщиком, и рекомендуемые действия должны быть реализованы для восстановления требуемого уровня безопасности; это объясняется в следующем.

Визуальные осмотры. Визуальные осмотры обычно направлены на поиск и обнаружение в ранний период трещин, признаков утечки, насыщенных участков и влажных пятен, появления источников, трубопроводов, эрозии, провалов, просадки, подъема мороза, отклонений в выравнивании гребня, выпуклости или изменений в склонах и просадке берм. Кроме того, систему дренажа необходимо проверить на возможные препятствия или повреждения, вызванные потенциальными химическими реакциями или ростом бактерий. Источники просачивания, если они есть, должны быть обнаружены, а скорость и качество воды должны быть проверены, в то время как объем просачивания измеряется и связывается с прогрессом в высоте уровня поднимающегося пруда хвостовых отвалов. Все вспомогательные сооружения должны быть проверены на правильную работу. Частота визуальных осмотров должна быть определена

проектировщиком в начале и может быть изменена им в течение срока службы, но ежегодный осмотр является нормальной практикой, он должен охватывать все части хранилища, дамбу, пруд и все вспомогательные работы. Если дамба хвостовых отвалов подвергалась недавнему землетрясению, то все последствия должны быть немедленно отмечены и исследованы, а все повреждения записаны и оценены немедленно, не дожидаясь рутинного осмотра после установления магнитуды события и его эпицентра. Каждый осмотр должен предшествовать оценке предыдущего отчета об осмотре, чтобы проверить, были ли выполнены предыдущие рекомендации, и если нет, то почему. Осмотр должен следовать подготовленному и обновленному чек-листу, включающему все элементы, которые нужно увидеть или измерить. Результаты визуального осмотра должны быть собраны в отчете, но если обнаружено какое-либо отклонение, то оно должно быть немедленно сообщено. В отчет об осмотре должно включаться описание методов, использованных для измерений, резюме результатов и рекомендации по дальнейшим действиям, он должен быть подкреплен чертежами и фотографической документацией.

Использование инструментов мониторинга. Мониторинг производительности с использованием инструментов является важным способом определения того, ведут ли себя все сооружения так, как предполагалось при проектировании. Это включает установку и использование таких инструментов, как наблюдение за развитием порового давления в теле дамбы, изменение уровня депрессионной поверхности внутри нее, осадка, смещения и деформации в наполнителе, и, если дамба расположена в сейсмическом регионе, то должны быть предусмотрены меры для измерения сильных движений параметров на месте и ответа дамбы. В то время как чтение этих устройств производится на регулярной основе, предопределенной проектировщиком, их адекватность и правильное функционирование также должны быть проверены в соответствии с фиксированными графиками. Некоторые органы по регулированию безопасности дамб указывают два года как нормальный период для этого.

Исследования по обзору безопасности дамб. Регулирующие органы обычно требуют, чтобы отчеты об обзоре безопасности дамб время от времени представлялись им руководством в качестве условия для продолжения действия разрешения на эксплуатацию объекта. Отчет о любом таком исследовании должен четко указывать уровень безопасности дамбы хвостовых отвалов и пруда и что они не представляют угрозы для третьих сторон. Такой отчет составляется проектировщиком и должен основываться на анализе всех данных и информации, предоставленных ему из предыдущих инспекций безопасности и чтений и измерений инструментов. Такие отчеты приобретают особое значение после происшествий; в таком случае он должен включать полное описание происшествия, его наиболее вероятные причины и его влияние на безопасность операций. Он также должен описывать все ремонтные работы и любые другие работы, которые были выполнены для повышения уровня безопасности до приемлемых стандартов. Рекомендации владельцам и операторам, которые имеют конкретные обязанности по применению процедур управления безопасностью для повышения уровня безопасности и снижения риска, заключаются в проведении следующих действий, которые в значительной степени опираются на наблюдение за безопасностью и мониторинг.

1. Детальное исследование местности опытными геологами и геотехническими инженерами для определения возможного потенциала для отказа с in situ и лабораторными испытаниями для определения свойств основных материалов.
2. Применение передовых процедур для проектирования.

3. Экспертный надзор за строительством и инспекцией.
4. Лабораторное тестирование для «как построено» условий.
5. Регулярный мониторинг.
6. Оценка безопасности для наблюдаемых условий, включая «как построено» геометрию, материалы и сопротивление сдвигу. Наблюдения и эффекты пьезометрических условий.
7. Исследования разрушения дамб.
8. План по аварийной готовности.
9. Периодические аудиты безопасности.

Регулирующие органы должны быть более обеспокоены безопасностью дамб хвостовых отвалов, которые подпадают под их юрисдикцию, и должны требовать периодических обзоров, проводимых назначенными специалистами. В некоторых странах необходимо было получить одобрение на конкретные этапы строительства, что приводит к автоматической проверке стабильности, общего состояния и безопасности время от времени [2].

1.8. Сравнение основных требований к дамбам хвостовых отвалов и обычным плотинам

Наблюдение за дамбами хвостовых отвалов должно выполнять три жизненно важные функции:

1) подтвердить, что дамба безопасна и работает в соответствии с критериями и целями проектирования;

2) подтвердить предположения проектирования и при необходимости корректировать текущее проектирование и строительство дамбы на основе наблюдений, менее благоприятных, чем предположения проектирования, или оптимизировать проектирование и строительство на основе наблюдений, более благоприятных, чем предположения проектирования;

3) четкое определение режимов отказа, которые могут быть обнаружены программой наблюдения, и тех, которые не могут быть обнаружены, чтобы не приводить к самодовольству в отношении последних.

Непрерывность работ на дамбах хвостовых отвалов на протяжении всей жизни проекта и характер цели и методов строительства делают эти дамбы отличными от обычных плотин во многих аспектах. Хотя необходимость сохранения высокого уровня безопасности общая для обоих, требования к наблюдению могут отличаться. Таблица 1.3 показывает сравнение между двумя типами требований.

Несмотря на различные цели и методы строительства, наблюдение за дамбами хвостовых отвалов требует всех действий, необходимых для обеспечения безопасности и непрерывности обслуживания, аналогичных обычной плотине, и должно включать все составляющие, как в обычных плотинх, т. е. определение данных, которые необходимо собрать для подтверждения удовлетворительной работы, проектирование программы наблюдения, которая получит требуемые данные, с подходящим уровнем избыточности (повторяемости), обучение тех сотрудников, которые отвечают за сбор данных, как получать и управлять данными и обеспечивать осведомленность о предупреждающих знаках, предоставление установок и ресурсов, необходимых в форме инструментов, времени, персонала, доступа, чтобы позволить ответственным сотрудникам выполнять программу, обслуживание установок таких, как пьезометры, инклинометры, водосборные воронки, необходимые для выполнения программы и установление уровня

«уважения» к установкам среди всего персонала на месте, чтобы избежать, например, повреждения критических установок транспортным средством.

Таблица 1.3

Хвостохранилища в сравнении с обычными плотинами с точки зрения требований к надзору

Обычные плотины	Дамбы хвостохранилищ	Следствия программы наблюдения за хвостохранилищами
Строительство происходит в один этап, за которым следует эксплуатация в установившемся режиме	Строительство ведется на регулярной, почти непрерывной основе. Устойчивое состояние не достигается до закрытия	Условия эксплуатации плотины и нагрузки, которым подвергается дамба, а, следовательно, и требования к надзору, постоянно меняются. Нет возможности «расслабиться»
Построены и эксплуатируются организациями, имеющими опыт и специализирующимися на эксплуатации плотин и надзоре за ними	Построены и эксплуатируются организациями, чье внимание и опыт сосредоточены на извлечении богатств из-под земли, а не на строительстве дамб	Оперативный персонал нуждается в обучении, поддержке и приверженности — от корпоративного уровня до уровня руководства шахты
Обычно принадлежит государству или крупному коммунальному предприятию, располагающему значительными финансовыми ресурсами для обеспечения безопасности плотин	Экономика добычи полезных ископаемых ограничивает ресурсы, которые могут быть использованы при строительстве и эксплуатации дамбы хвостохранилища	Владельцы хвостохранилищ должны противостоять неизбежному искушению сократить программу наблюдения в пользу выделения большего количества ресурсов центрам прибыли. Ресурсы, используемые для наблюдения, должны быть независимы от циклических условий ведения бизнеса
Рассматривается как значительный актив (приносящий доход) владельцем и, как правило, общественностью, которая получает прямую ощутимую выгоду от плотины	Центр затрат при добыче полезных ископаемых, «необходимое зло», и, по понятным причинам, не является целью операции. Общественность определенно не рассматривает его как актив	Как указано выше, владельцы хвостохранилищ должны противостоять очевидному и понятному искушению сократить ресурсы, доступные для наблюдения за плотинами. Должны не просто проявлять необходимую осмотрительность, но и демонстрировать это, чтобы успокоить регулирующие органы и общественность
Владельцы, как правило, обладают собственным опытом проектирования плотин, включая персонал, единственной функцией которого является наблюдение	Как правило, нет собственного опыта проектирования дамб, приходится полагаться на консультантов. Наблюдение за дамбами — это не карьерный путь для шахтеров	Существует разрыв между теми, кто осуществляет программу наблюдения (операторами), и специалистами по проектированию дамб, необходимыми для оценки результатов программы (консультантами). Необходимы непрерывность консультаций и четкая коммуникация
Имеют ограниченный срок службы, не обязательно должны длиться «вечно»	Имеют фазу закрытия так же, как и фазу эксплуатации, должны служить «вечно»	Большинство хвостохранилищных дамб (плотин) потребуют определенной степени наблюдения «навсегда», особенно в связи с растущим числом водоудерживающих хвостохранилищных плотин, используемых для удержания сульфидных хвостохранилищ под водой

Важнейшим в операциях с дамбами хвостовых отвалов является представление в любое время данных в виде графика уровня пьезометра во времени и уровней воды,

включая уровни срабатывания, чтобы обеспечить быструю и эффективную интерпретацию и реакцию.

Предварительное определение предупреждающих признаков и планов реагирования должны быть приняты в случае, если отмечены предупреждающие признаки. Из-за необходимости быстрого реагирования в чрезвычайных ситуациях необходимы четкие и задокументированные линии связи и ответственности в отношении сбора данных, построения графиков, отчетности и действий [19].

Поддержание разумного стандарта безопасности на дамбах хвостовых отвалов является совместной работой владельца, операторов, проектировщиков, экспертов по безопасности и регуляторов, но в отличие от обычных плотин оно требует гораздо более глубокого участия общественности. Это требует признания жизненно важного значения горнодобывающей промышленности для современного общества и экономик развивающихся стран и того, что ликвидация горнодобывающей промышленности в конечном итоге должна означать возвращение к палеолитическому образу жизни. Также требуется постоянное ответственное управление окружающей средой этой важной отрасли и признание того, что подавляющее большинство операторов и операций горнодобывающей промышленности заслуживают похвалы за свои усилия [20].

1.9. Отказы дамб хвостовых отвалов и необходимость в инструментарии, измерениях и наблюдениях

Понимание режимов отказа дамб хвостовых отвалов является очень важным шагом в оценке их безопасности, и это требует предварительного понимания того, что может пойти не так и какие входные данные требуются. Такие данные могут быть получены только из визуальных наблюдений, записей приборов, измерений и лабораторных испытаний, которые все вместе формируют полную программу мониторинга безопасности. В следующем представлено краткое описание режимов отказа, чтобы позже были указаны необходимые измерения и типы необходимых инструментов.

Вращательный отказ (скольжение по круглоцилиндрической поверхности). Вращательные отказы могут варьироваться от местного скольжения хвостовых отвалов в случайных местах вдоль лица насыпи до массовых круговых скольжений, охватывающих всю структуру. В целом для стабильного склона сопротивление сдвигу, препятствующее движению вдоль потенциальной поверхности отказа, превышает сдвиговое напряжение, вызывающее движение. Нестабильность происходит, когда сдвиговое напряжение на поверхности отказа равно сопротивлению сдвигу. В частности, причины вращательного отказа могут включать изменения в уровне грунтовых вод, изменения в проницаемости основных материалов, нарушения насыпи, вызванные вибрацией или ударной нагрузкой, оседание основных материалов и т. д.

Отказы основания. Отказы основания не редки среди земляных сооружений. Если слабый слой почвы или породы существует на небольшой глубине в основании под структурой, движение вдоль плоскости отказа произойдет, если нагрузка земляного насыпа создает напряжения, превышающие сопротивление сдвигу почвы в слабом слое.

Перелив. Одной из наиболее распространенных причин отказа является перелив водой при наводнении. Перелив обычно происходит, когда объем воды, поступающей в водохранилище, от неправильного перенаправления поверхностных

вод или чрезмерного стока дождевой воды превышает вместимость водохранилища. Поскольку дамбы хвостовых отвалов строятся из высокоэрозионных материалов, трение, вызванное быстрым потоком через незащищенный гребень насыпи, может быстро эродировать водоотвод в наполнителе, позволяя происходить устойчивому выбросу. Кроме того, быстрое увеличение порового давления, связанное с большим притоком дождевой воды, может привести к депрессии неуплотненных затопленных песков и слизи.

Устойчивый высокий поток через гребень насыпи таким образом может привести к крупному отказу всего водохранилища в течение нескольких минут.

Эрозия. В районах с большим количеством осадков обычно требуется некоторая защита от эрозии. Дамбы хвостовых отвалов могут быть подвержены эрозионному разрушению в двух основных областях: опорах насыпи и лицевой стороне насыпи. Эрозия вдоль линии контакта между насыпью и опорой может произойти из-за потока дождевой воды, который концентрируется там. Обычно этот тип отказа можно предотвратить с помощью правильных методов отвода дождевой воды, и поэтому он является результатом неправильного проектирования или обслуживания. Эрозия лицевых сторон насыпи может произойти из-за разрыва в трубопроводах хвостовых отвалов, установленных на гребне насыпи. Опять же, обслуживание и альтернативное размещение линий хвостовых отвалов могут предотвратить этот тип отказа.

Трубчатость. Трубчатость относится к подповерхностной эрозии вдоль пути просачивания внутри или под насыпью, что приводит к образованию низкодавленческого канала, позволяющего концентрированный поток воды. Трубчатость также может произойти из-за просачивания, выходящего из насыпи с достаточной скоростью, чтобы эродировать лицевую сторону насыпи. Возникающее пустое пространство способствует прогрессивной эрозии, распространяющейся вверх по течению к источнику просачивания. В худшем случае просачивание может привести к созданию прямого канала от пруда хвостовых отвалов к лицу дамбы.

Чрезмерная трубчатость может привести к местному или общему отказу насыпи или основания насыпи.

Водонасыщенность. Водонасыщенность является одним из наиболее распространенных режимов отказа поперечно-долинных дамб. Поскольку отложения хвостовых отвалов обычно состоят из неуплотненных, насыщенных отложений одинакового размера зерен, они подвержены временному подвешиванию в воде. Водонасыщенные хвостовые отвалы могут вести себя как вязкая жидкость, так что они могут проходить через узкие отверстия и течь на значительные расстояния. Соответственно, даже небольшие отказы дамб могут привести к значительным выбросам потока хвостовых отвалов.

1.10. Параметры безопасности и использование инструментов

В работе [1] с сохранением структуры изложения представлены основные параметры, влияющие на безопасность дамб хвостохранилищ, с описанием методов, способов и средств, используемых в программах мониторинга безопасности.

Мониторинг линии насыщения дамбы

Одной из общепринятых практик мониторинга линии насыщения или изменения уровня депрессионной поверхности в насыпи и, следовательно, условий порового давления является использование открытых пьезометров. Режим порового водяного давления в дамбе хвостовых отвалов или любой другой земляной

дамбе в значительной степени влияет на стабильность стенки дамбы. Одиночные пьезометры различных сечений вокруг дамбы хвостовых отвалов обычно используются для мониторинга порового давления в области, близкой к внешней стенке. Обычно данные пьезометров записываются ежемесячно и используются в анализах стабильности. После проведения базового анализа дальнейшие анализы обычно проводятся только после того, как в пьезометрических значениях произошли значительные изменения. Иногда используются другие пьезометры в виде измерительных ячеек порового давления. Доступны два типа этого рода. Первый — это тип диафрагмы, где диафрагма расположена между преобразователем и поровой водой. Это пневматическая вибрирующая проволока или электрический сопротивляющийся датчик деформации. Второй тип — это стояк без диафрагмы и использует двухтрубную гидравлическую конструкцию, которая известна в литературе как пьезометр типа Казагранде [1].

Конструкция стоячего пьезометра состоит из пористого фильтрующего элемента на кончике, так что прибор реагирует на подповерхностное водяное давление вокруг фильтрующего элемента, а не на колебания на других уровнях. Уровень воды в стоячем трубопроводе стабилизируется на пьезометрической высоте и определяется звучанием с помощью зонда, который обычно является электрическим дипметром. В таком случае уровень воды, записанный в одиночном стоячем пьезометре, не может измерить колебания депрессионной поверхности, и поэтому такое изменение можно получить только из множественного числа таких пьезометров, установленных в одном и том же поперечном сечении и имеющих свои устья на разных высотах [21]. Следование за измерениями депрессионной поверхности с помощью пьезометров помогает указать состояние стабильности безопасности дамбы и приводит к выполнению корректирующих мер для улучшения условий безопасности. Согласно шведским руководящим принципам безопасности дамб, коэффициент безопасности в отношении устойчивости склона дамб хвостовых отвалов должен быть не менее 1,5 при нормальных условиях.

Чтобы предотвратить снижение коэффициента безопасности ниже 1,5, необходимы усиливающие действия для дамбы. В реальном исследовательском случае на нижнюю опору была добавлена насыпь из каменной кладки, и, чтобы оптимизировать количество каменной кладки, план поддержки каменной кладки был выполнен путем измерений на месте высоты депрессионной поверхности с помощью установленных пьезометров и расчета условий стабильности дамбы. Рисунок 1.3 показывает измеренную депрессионную водную поверхность до добавления бермы из каменной кладки и местоположение скользящей поверхности в дамбе. С другой стороны, рис. 1.4 показывает фактические условия после строительства насыпи. Поскольку безопасность дамбы поддерживается, даже если существуют избыточные поровые водяные давления, предлагаемый уровень тревоги, следовательно, является пределом, где гидростатическое поровое водяное давление превышено. Гидростатическое давление здесь основано на депрессионной линии на поверхности хвостовых отвалов.

Если поровое водяное давление, измеренное на месте, ниже этого уровня тревоги, измерение считается находящимся в зеленой стадии.

Коэффициент безопасности выше 1,5 на зеленой стадии, в то время как на желтой стадии обеспечивается стабильность, даже при некотором избыточном поровом давлении, но стабильность должна наблюдаться с осторожностью. Прохождение этой стадии в красную стадию было бы неприемлемым и должно быть предотвращено, что схематически показано на рис. 1.5 [22].

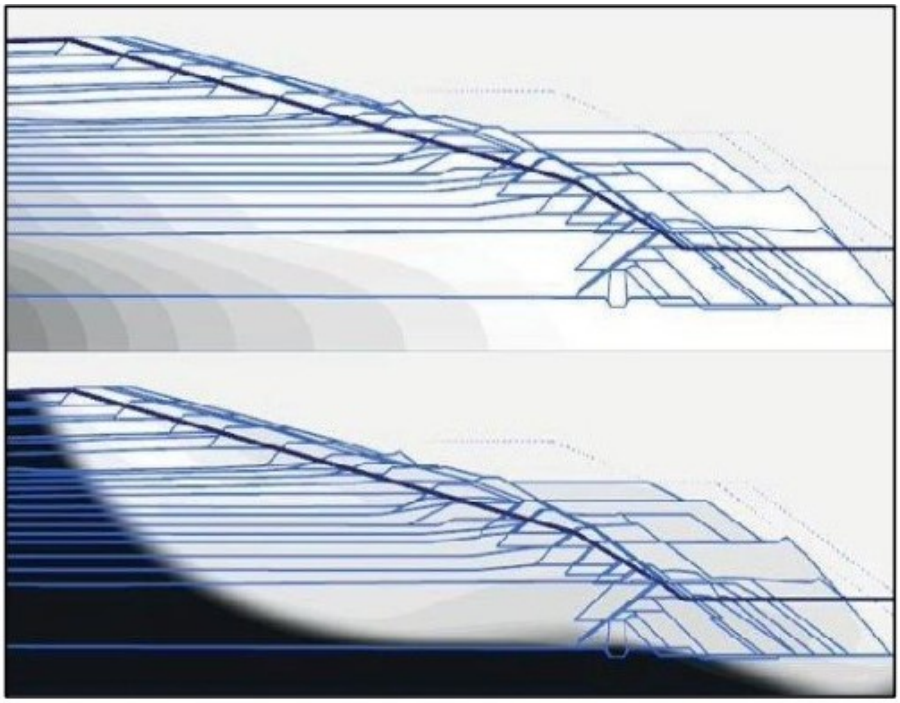


Рис. 1.3. До каменной наброски. Сверху — имитация избыточного порового давления, внизу — наиболее вероятная плоскость скольжения (коэффициент запаса прочности — 1,58) [22]

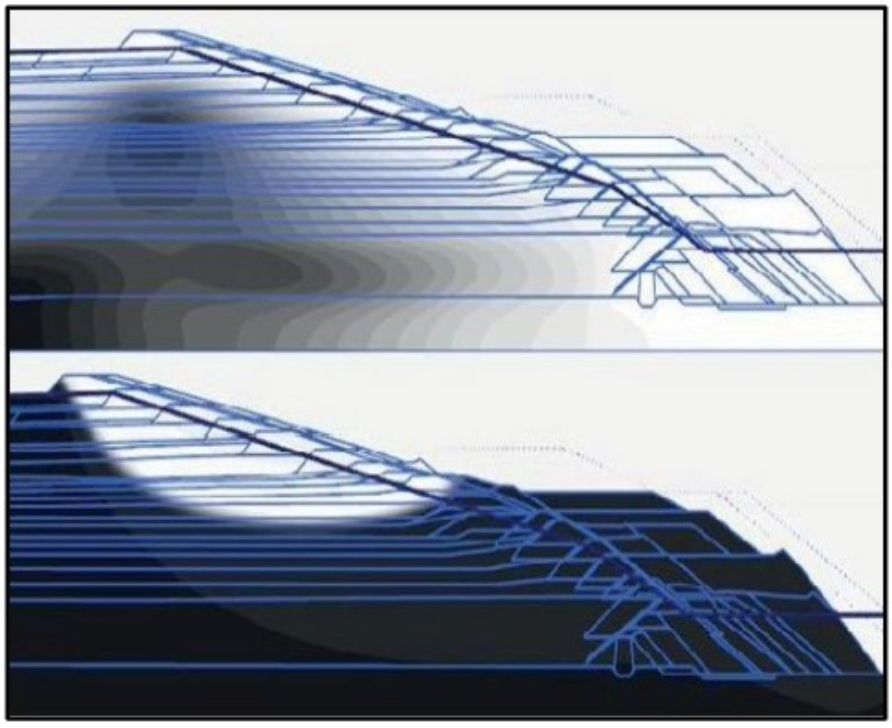


Рис. 1.4. После каменной наброски. Сверху — имитация избыточного давления воды, внизу — вероятная поверхность скольжения (коэффициент запаса прочности — 1,49) [22]

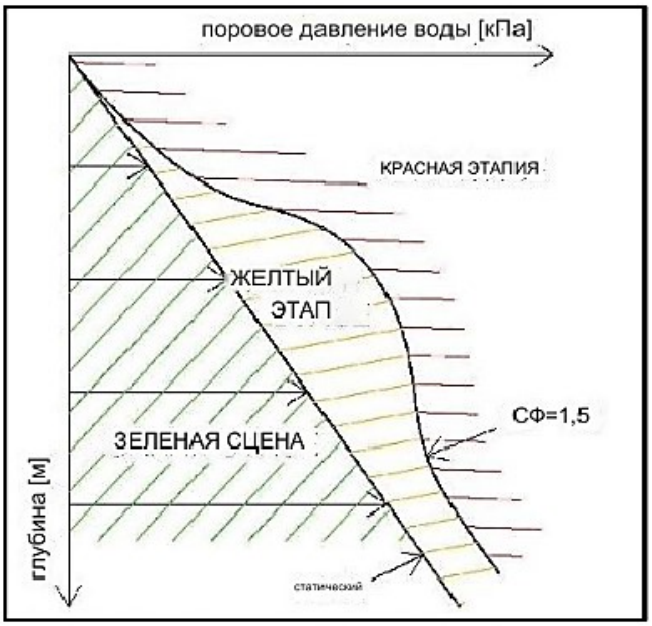


Рис. 1.5. Схематическое представление уровней оповещения о давлении поровой воды (три этапа оповещения: зеленый, желтый, красный) [22]

Мониторинг уровней воды

Одним из наиболее критических параметров для безопасной эксплуатации дамбы хвостовых отвалов является контроль уровня воды, не только уровня воды в пруду, но и поверхностной воды и уровня грунтовых вод под дамбой.

Мониторинг уровня поверхностной воды может дать ранний индикатор, если есть внезапные подъемы уровней из-за наводнений, дождя или таяния льда. Радарный передатчик уровня отлично подходит для этого типа приложения. Что касается уровня грунтовых вод, он осуществляется путем установки гидростатического датчика уровня в пьезометрах. Что касается максимального безопасного уровня воды в пруду, его определение на стадии проектирования важно для предотвращения перелива дамбы хвостовых отвалов, что может привести к ее разрушению и выбросу опасных отходов. Обычно минимальный безопасный свободный борт определяется национальным/местным законодательством и/или политикой компании. На стадии проектирования важно, чтобы расчеты водного баланса учитывали средние и экстремальные условия, чтобы предотвратить потерю свободного борта во время эксплуатации, что может привести к переливу. Управление свободным бортом и мониторинг уровня воды в пруду являются критическими факторами для контроля воды как в обычных, так и в хранилищах хвостовых отвалов [23]. Для обеспечения хорошего дренажа насыпей пруд должен быть как можно дальше от насыпей и поддерживать высокий свободный борт и широкий пляж. Идеально, если пруд будет небольшой площади, чтобы уменьшить просачивание, и будет на максимальной глубине у установки для декантации, чтобы улучшить ясность воды для восстановления. Рисунок 1.6 показывает примеры потери свободного борта и высокого свободного борта.



Рис. 1.6. Потеря надводнго борта (слева) и высокий надводный борт (справа). (Джон Энгельс, фото справа предоставлена Angio American) [23]

Схемы, показанные на рис. 1.7, объясняют определения, связанные со свободным бортом, в возможных условиях пруда.

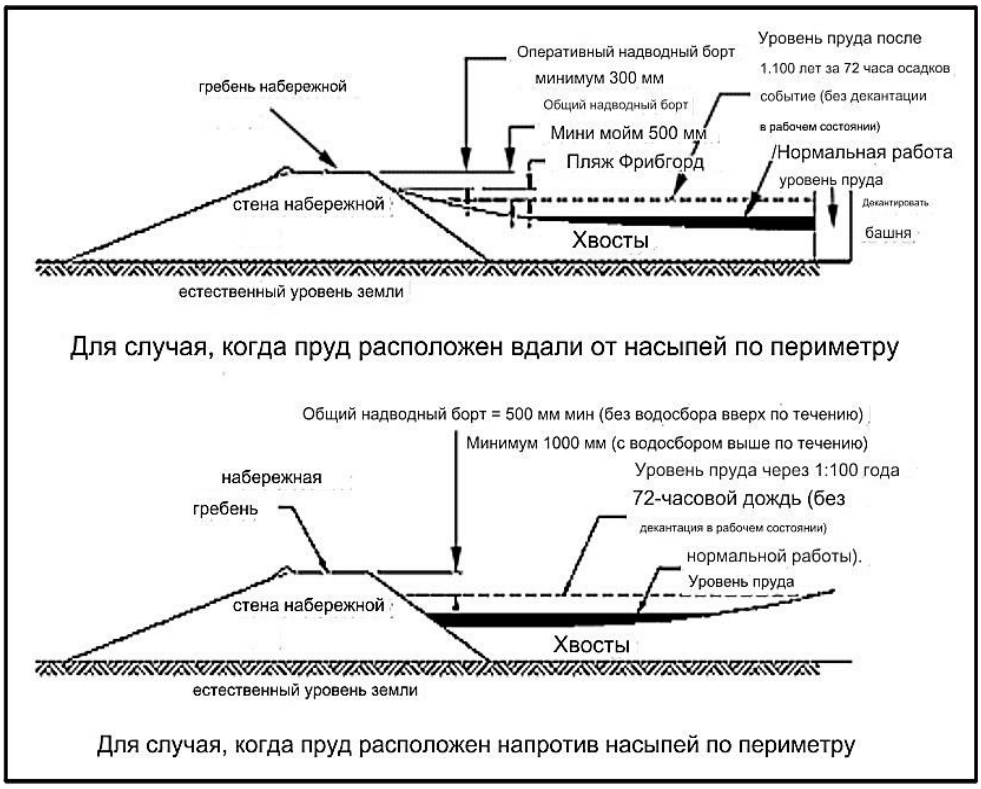


Рис. 1.7. Объяснение надводного борта хвостохранилища (адаптировано из (DME 1999). (Джон Энгельс) [23]

Потеря свободного пространства может привести к переливу, что, в свою очередь, приводит к быстрому разрушению хвостохранилища, такая потеря может быть результатом повреждения обводного водосброса или его блокировки, неправильной оценки фактического уровня воды и неправильных критериев проектирования. Как показано на рис. 1.8, необходимо проверять состояние водосброса, уровень воды в хвостохранилище должен постоянно контролироваться с помощью датчиков уровня воды и звуковых устройств. Существуют приборы для измерения, записи и телеметрии в реальном времени на постоянной основе, и для крупных объектов их высокая стоимость оправдана [19].

Сегодня доступны современные технологии для точного мониторинга уровня воды в хвостохранилище путем установки полной системы сборки на барже, которая плавает на пруду и соединена с насыпью мостом.

Фактический пример, обеспеченный возможностями мониторинга в реальном времени и работающий на солнечной энергии, сейчас используется канадской компанией по добыче нефтяных песков, и он показан на рис. 1.9. В этой системе для обеспечения связи с сайтом (RTU) и сервером (SatSCADA) используются сотовые данные. Дифференциальный приемопередатчик (GPS) (DGPS) и радарные датчики уровня (RLS) используются для достижения требуемой точности и для предоставления правильного уровня (GPS) баржи. Радарный датчик уровня (RLS) подключен к регистратору данных, который используется для измерения расстояния до водной линии. Расстояние (RLS) в сочетании с опорным уровнем (GPS) используется для расчета точного уровня воды. Все данные периодически отправляются обратно на сервер (SatSCADA) для архивации, отслеживания и отображения. Доступ пользователей к данным осуществляется через веб-клиент (SatSCADA), который может обеспечить доступ через ноутбук, настольный компьютер, планшеты и смартфоны.

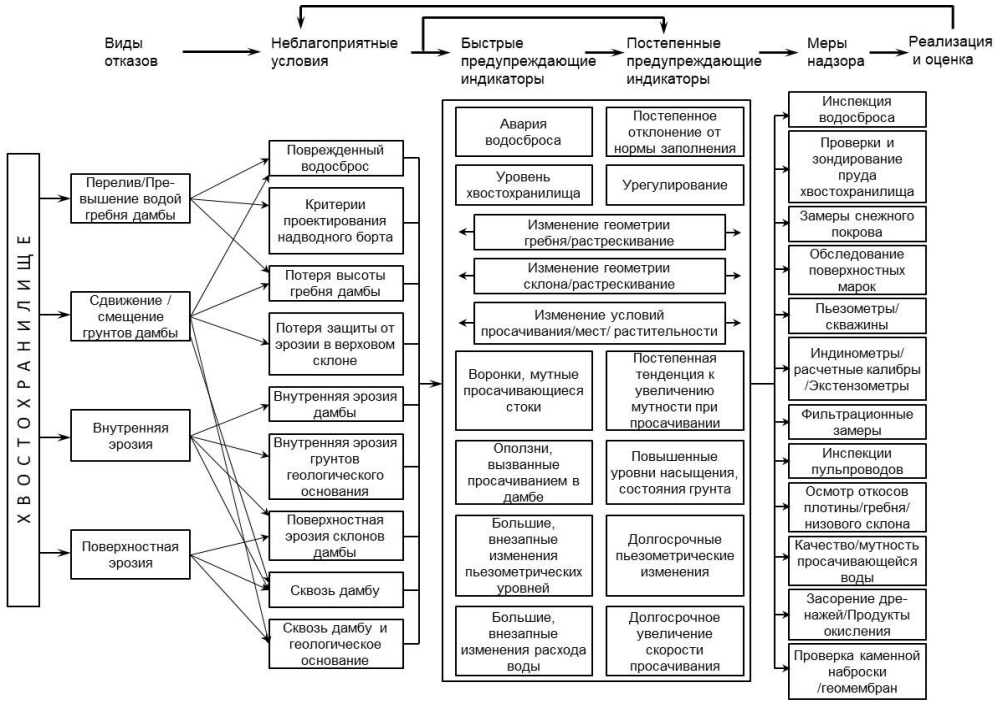


Рис. 1.8. Объяснение пути отказа в режиме превышения мощности. Показаны проверки водосброса и хвостохранилища, а также проверка и мониторинг уровня [19] (рисунок изменен авторами)



Рис. 1.9. Слева — вид на баржу, справа — устройство датчика и коробки передач

Измерения расхода фильтрационного стока

Всю фильтрационную воду следует собирать и расход измерять с помощью водосливов типа V-образный, прямоугольный или трапециевидный. Для измерения низких расходов могут использоваться калиброванные емкости. Расход фильтрации — это самый важный фактор, который должен измеряться в отношении стабильности плотины, и он может свидетельствовать о любом серьезном сбое в хвостохранилищах. Он указывает на внутреннюю эрозию в теле плотины с серьезными последствиями, если все необходимые меры не будут приняты вовремя.

Это измерение должно быть автоматизировано, и показания должны записываться без прерывания в контрольной комнате. Целесообразно отдельно регистрировать расход, выходящий из каждого дренажа и места, чтобы можно было более легко определить место любого увеличения фильтрации и возможного возникновения эрозии. Для хвостохранилищ важно хорошее дренирование, чтобы депрессионная поверхность была как можно дальше от нижнего склона, чтобы снизить поровое давление и уменьшить опасность ликвифакции. Дренирование увеличивает фильтрационный расход, который гораздо больше, чем в земляных плотинах. Однако это не опасно, если есть правильно работающие фильтры и дренажи и если количество фильтрации собирается и возвращается обратно в хвостохранилище или на обогатительную фабрику. Наблюдательные данные из нескольких действующих хвостохранилищ указывают, что сети потоков могут использоваться для оценки фильтрационных потоков и для определения местоположения депрессионной поверхности через пляж и хвостохранилище с достаточной точностью для большинства целей проектирования. Самым большим неизвестным является эффективная проницаемость пляжа хвостохранилища, и рекомендуется использовать максимально вероятные значения как для проницаемости, так и для отношения проницаемости (k_{max}/k_{min}) для всех расчетов. Эта процедура даст консервативно высокие значения как для количества фильтрации, так и для местоположения депрессионной линии.

Меры контроля за фильтрацией, безусловно, увеличивают общие затраты на объекты хранения хвостовых отвалов. Однако они значительно повышают общую безопасность хвостохранилищ и при правильном проектировании

и строительстве удовлетворяют требованиям регулирующих органов по безопасности и контролю загрязнения. Дополнительные затраты, связанные со строительством адекватных мер контроля за фильтрацией, следует считать необходимой частью затрат на строительство и эксплуатацию шахты в современном обществе [24]. Не нужно говорить, что, если это будет сопряжено с хорошей процедурой наблюдения и мониторинга, это улучшит условия безопасности и снизит риск непредусмотренных условий.

Измерения качества фильтрационной и дренажной воды

Окружающая среда может подвергаться воздействию многих горнодобывающих операций и работ. Производство кислотных шахтных стоков (AMD) и загрязненной фильтрационной воды, вызванной окислением сульфидных минералов в присутствии воды, вероятно, является основной угрозой для многих экосистем. AMD признается многофакторным загрязнителем; основными факторами являются кислотность, токсичность, взвешенные твердые вещества и соленость.

Одной из главных целей управления водой хвостохранилищ является обеспечение того, чтобы качество воды в окружающих водоемах не ухудшалось из-за дренажной и фильтрационной воды, генерируемой хвостохранилищами. В этом отношении некоторые производители могут предложить как стационарные, так и портативные станции отбора проб воды в полном соответствии со всеми соответствующими национальными и международными стандартами. Такой отбор проб и последующие измерения могут помочь в выборе наиболее подходящей технологии для обработки, размера очистных сооружений, которые будут использоваться перед возвращением собранного стока в окружающую среду.

Химический состав фильтрационной и дренажной воды хвостохранилищ важен для определения любых потенциальных воздействий на окружающую среду. К факторам относятся характеристики отходов, такие как минералогия породы-хозяина и методы обработки, используемые для производства хвостов, а также взаимодействие фильтрационной воды хвостохранилищ с геомембраной, если она есть, и подповерхностью. Подвижность загрязнителей может увеличиваться физическими горнодобывающими процессами такими, как обработка, при которой мелкое измельчение приводит к увеличению поверхности для выщелачивания. Большинство горнодобывающих компаний манипулируют pH и используют хелатирующие агенты для извлечения минералов из руды. Эти же процессы могут быть применены к судьбе и транспортировке загрязнителей в хвостах. Хотя многие тяжелые металлы гидрофобны с сильными тенденциями к адсорбции на почве, химические реагенты, используемые в горнодобывающих процессах, могут присутствовать в материале хвостов. Они способны удалять металлы, делая их подвижными в фильтрате или поверхностных водах.

Загрязненная вода может образовываться из-за вертикальной миграции составляющих накопления или движения грунтовых вод через хвосты.

Транспортировка загрязнителей в системах грунтовых вод в основном происходит от адвекции, т. е. движения жидкости и смешивания загрязнителей. Геохимия водоносного горизонта, физико-химические свойства хвостов и фильтрации определят буферную емкость почвы, типы химических реакций, будь то осадки или нейтрализация, и скорость адсорбции и ионного обмена. Связанная проблема — это производство кислоты окислением тиосолей, что является проблемой для некоторых металлических шахт в Восточной Канаде. Бактериальным виновником является тиобациллус тиооксиданс. Тиосоли могут быть удалены

из сточных вод мельницы биологическими методами обработки [25]. Во всех вышеупомянутых деталях ясно указывается на необходимость измерения качества хвостовых стоков. Это считается первым шагом к их улучшению и устранению угрозы загрязнения, которую они представляют для окружающей среды.

Измерения контроля входящей воды

Измерение того, что поступает в хвостохранилища, является первым шагом в ответственном управлении хвостами. Измерение потока рудной пульпы недостаточно. Однако можно также определить содержание твердых веществ в пульпе и рассчитать соотношение между твердыми веществами и водой. Используя электромагнитный расходомер, можно измерить оба параметра с помощью одного прибора. Когда речь идет о измерении качества, цифровые аналитические датчики могут сообщить, какие вещества попадают в хвосты. Такой расходомер, установленный на трубах подачи в хвостохранилище, показан на рис. 1.10 [26].



Рис. 1.10. Электромагнитный расходомер типа Endress и Houser [26]

Мониторинг вертикального смещения плотины

Вертикальные движения в отложениях хвостов большие и обусловлены уплотнением под собственным весом и консолидацией. Внешние движения измеряются с помощью сети опорных столбов и геодезических точек. Контрольные точки или столбы располагаются достаточно далеко от плотины, чтобы избежать влияния веса плотины. Геодезические памятники предоставляются в достаточном количестве и расположены вдоль гребня завершенных этапов, бермы нижнего склона, вдоль гребня завершенной плотины хвостов и на пляже завершенной плотины.

Мониторинг вертикального смещения плотины также может быть выполнен с помощью вибрационного многофункционального испытательного прибора, используя датчик смещения на вибрирующей проволоке в качестве измерительной головки. Измерительная головка, через стеклопластиковую стержень и якорную головку, соединяется в соответствии с требованиями проекта на различных глубинах

в скважине и окружающей почве с ее мобильным датчиком и может измерять вертикальные смещения на разных уровнях [27].

Мониторинг горизонтального смещения

В хвостохранилищах внешние горизонтальные движения обусловлены в основном неоднородным оседанием различных частей и в меньшей степени давлениями от задержанной воды. Они измеряются в тех же геодезических позициях, что и для измерения вертикальных движений. Более точные измерения могут быть выполнены, когда точки расположены на одной прямой линии, и движения измеряются относительно нее. Если гребень плотины и бермы не находятся на прямых линиях, могут быть использованы менее точные тригонометрические методы. Методы в этом случае — оптические клинометры или сложные лазерные приборы. Тщательное изучение последовательных наборов стереоскопических аэрофотографий может выявить произошедшие горизонтальные движения и может быть особенно использовано для проверки длинной плотины. Внутри тела плотины горизонтальное движение можно обнаружить с помощью инклинометров. Инклинометр устанавливается в трубном стринге. Движение слоя и структуры вызывает смещение инклинометра и заставляет трубу инклинометра деформироваться из начального положения в новое место. Датчик инклинометра измеряет угол наклона, и из его отклонения от исходного угла наклона можно получить смещение. Трубы инклинометра встраиваются снизу самой глубокой начальной точки каждого сегмента, и она отражает смещение почвы на этом уровне. Горизонтальное движение деформируемого основания можно измерить с помощью инклинометров или перевернутого маятника и может быть использовано абсолютно для стартовой плотины из-за их высокой стоимости. Использование ГИС также оправдано для использования в больших хвостохранилищах.

Большие движения не так опасны, если они распределены на больших площадях и если их скорость уменьшается со временем, напротив, малые движения могут быть опасны, если они сосредоточены в одном месте и если их скорость увеличивается со временем. В общем, высокоточное измерение деформации можно выполнить с использованием технологии точного позиционирования GPS, по сравнению с классическим измерением, это не только может удовлетворить требование точности (в пределах ±1 мм) мониторинга деформации плотины, но и помочь в реализации автоматизации работы по мониторингу. Например, чтобы контролировать деформацию плотины, техники выбирают станции непрерывного действия GIS (CORS) и ряд точек мониторинга в области деформации, далеко от соответствующего положения плотины. На базовой станции и в управляющем центре техники устанавливают приемники GPS, которые проводят непрерывное автоматическое наблюдение. Используя подходящую технологию передачи данных, данные мониторинга в реальном времени передаются в центр обработки для анализа и прогнозирования (рис. 1.11) [27]. Разрешающая способность измерения горизонтального и вертикального смещений лучше 1,0 мм обеспечивается с использованием точного эфемеридного вещания и 6~8-часовых двухчастотных наблюдений GPS.

Применяемая в мониторинге зданий технология GPS может быть свободной от ограничений при межвидимости и климатических условиях, которые проводят мониторинг в любую погоду в условиях тяжелого тумана и снежной бури, а также может собирать, передавать и управлять данными, анализировать деформацию и автоматически прогнозировать. Таким образом, можно достичь цели удаленного онлайн-мониторинга в реальном времени. Кроме того, GPS все еще может проводить динамический мониторинг деформации и выдавать результат реального времени позиционирования согласно частоте 10~20Hz. Базовые векторы, полученные

с помощью относительного позиционирования GPS, могут получить высокую точность геодезической высоты путем корректировки измерений. Поскольку здесь важным наблюдением является относительное оседание при мониторинге вертикального смещения. Мы могли бы, без преобразования, напрямую использовать систему геодезической высоты, что не только упростит вычислительную работу, но и обеспечит точность результатов наблюдения [28].

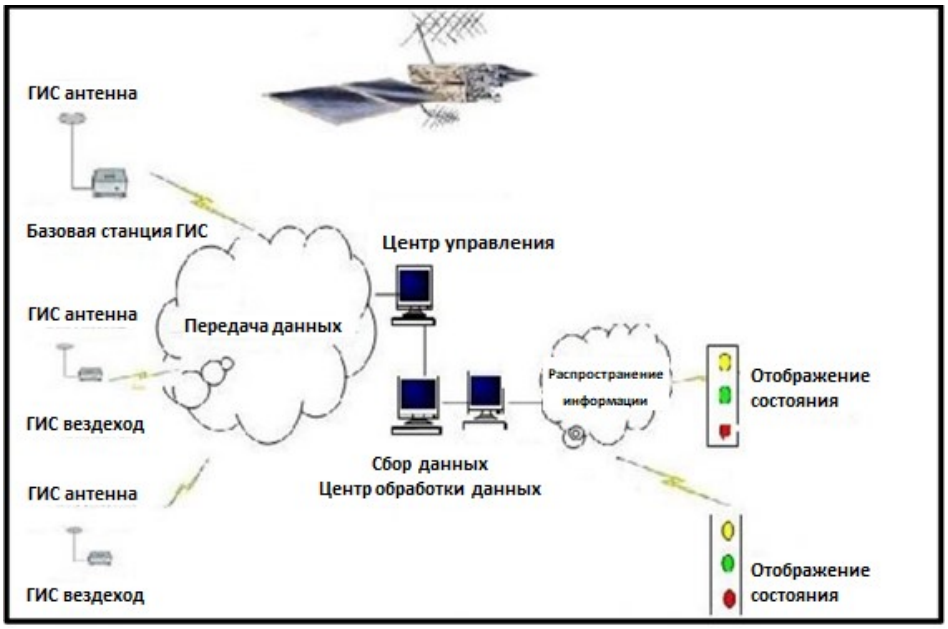


Рис. 1.11. Структура ГИС-системы [27]

Дифференциальное оседание насыпи

Дифференциальное оседание насыпи можно измерить с помощью внутренних устройств измерения вертикального движения. Наиболее подходящими являются ПВХ-стояки с пластинами или кольцами из нержавеющей стали, установленными на трубах, и электромагнитный зонд, опущенный в стояк, для измерения положения пластин. Пластины устанавливаются на поверхности поднимающихся хвостов и размещаются на определенном вертикальном интервале (чаще всего около 5 м). Они обычно имеют размеры 30–40 см и двигаются вместе с оседающими хвостами, скользя по трубам. Поскольку хвосты подвергаются большим осадкам, неуместно использовать телескопические трубы, которые применяются в земляных плотинах, потому что пластины осадки могут застрять на шплинте.

Предпочтительнее использовать плотно и гладко сплетенные трубы, чтобы позволить пластинам свободно скользить по трубам. Устройства осадки обычно используются для получения следующей информации:

- уплотнение отложенных хвостов и его изменение со временем на различных высотах плотины;

- оседание основания. Измерение осадки и порового давления дает информацию о консолидации хвостов в полном масштабе и предоставляет встроенные данные, дополняющие любые лабораторные испытания консолидации, которые были проведены для получения информации для проектирования. Из них можно определить модуль деформации и коэффициент порового давления (r_u) для каждого слоя в зависимости от нагрузки и времени. Эти функции являются входными

данными для более надежного расчета напряженно-деформированного состояния и консолидации плотины.

Измерение общего давления

Измерение общего давления используется для трех целей.

1. Для получения эффективного давления, которое требуется для расчета стабильности хвостохранилища. Это дается общим давлением после вычитания из него измеренного порового давления.
2. Действующие давления на структуры такие, как декантационные башни или желоба, кульверты и т. д., требуются для проверки расчетов проектирования и общей стабильности.
3. Измерение общего давления в горизонтальном и вертикальном направлениях для получения коэффициента общего давления, а также коэффициента Пуассона, который здесь можно считать зависящим от простого напряжения. Для измерения общего давления могут использоваться инструменты, аналогичные тем, которые используются в обычных земляных плотинах.

Мониторинг сейсмической активности

Большие хвостохранилища, особенно те, которые расположены в сейсмических регионах, требуют так называемых «ускоренных сейсмографов» для регистрации более сильных землетрясений выше определенного порога, который может быть изменен по желанию и обычно составляет 0,1 g. Как минимум должны использоваться два или три акселерографа. Один акселерограф, который является «основным» или «мастером», устанавливается на базовой породе, чтобы сначала зарегистрировать землетрясение. Он отправляет сигналы на компьютер, который управляет остальными, которые расположены в неглубоких раскопках в двух разных местах в верхней части нижнего склона. Они периодически перемещаются во время работы, чтобы быть в верхней части склона, и после того, как работа хвостохранилища прекращается, они размещаются на пляже в хвостах. Они используются для определения демпфирующего отклика хвостов, необходимого для калибровки сейсмической численной модели и расчета отклика хвостохранилищ на землетрясение. Помимо плотины, шахтный карьер также может контролироваться на микросейсмичность акселерографами, которые устанавливаются в неглубоких отверстиях на или около вершины шахты. На рис. 1.12 показан пример таких инструментов модели типа SP2, используемых для мониторинга микросейсмичности шахтного карьера, которые производит Sure Wave Technology Ltd.

Такая технология может использоваться для непрерывного мониторинга и обнаружения микросейсмических событий, происходящих внутри стенок склона открытых шахт и других поверхностных отложений материалов таких, как хвостохранилища, предупреждая о внутреннем движении и потенциальном обрушении. Каждый датчик обычно может контролировать микросейсмическую активность на определенном расстоянии в зависимости от используемой модели. Микросейсмическая активность может отображаться на 3D-изображении и обновляться в реальном времени. Отображаемые микросейсмические события являются индикаторами накопления напряжения внутри боковых стенок или структуры плотины с потенциалом привести к сбою. Кроме того, вариация порового давления воды может быть отображена в реальном времени для визуализации того, что происходит внутри структуры. Для плотины

это может включать поровую воду внутри хвостов, приводящую к движению базового материала в режиме ликвифакции.

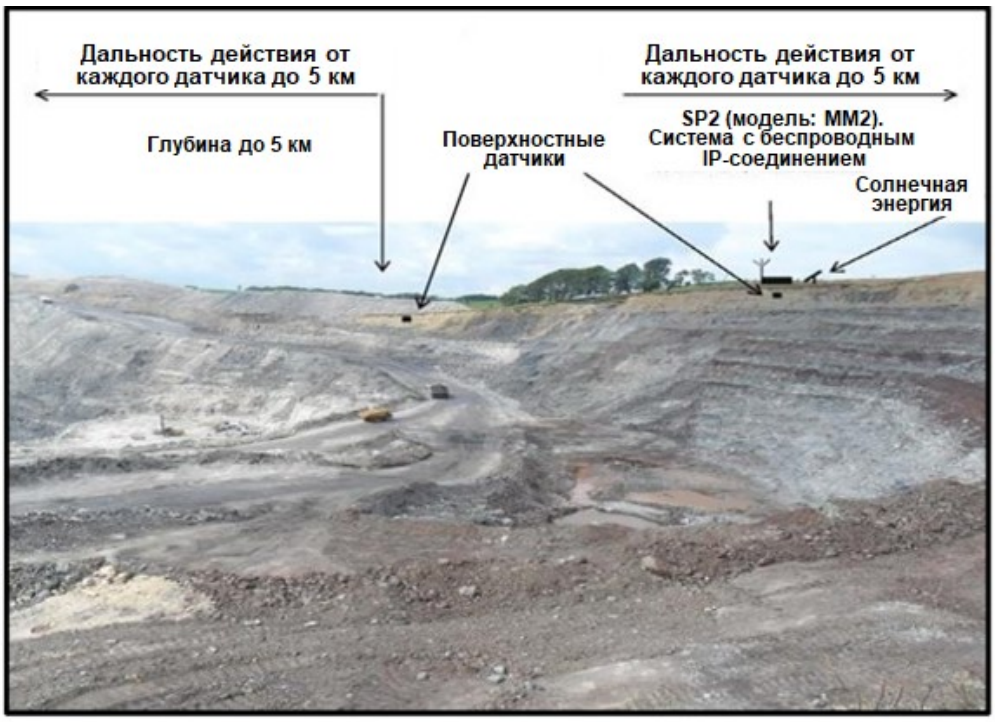


Рис. 1.12. Пример микросейсмических акселерографов, используемых для мониторинга карьеров и хвостохранилищ (SureWave Technology Ltd) [29]

1.11. Стоимость против ценности систем мониторинга хвостохранилищ

Хвостохранилища в десять раз чаще подвержены сбоям, чем другие обычные водохранилища [30]. Эксплуатация хвостохранилища включает в себя риски, которые необходимо идентифицировать, количественно оценить и снизить. Эти плотины подвергаются многим опасностям, которые напрямую влияют на их стабильность, которые необходимо правильно идентифицировать и оценить как на этапе строительства плотины, так и на последующем этапе закрытия. Основные опасности, потенциально влияющие на плотину по их вероятности и возможным последствиям, показаны в матричной форме на рис. 1.13 [3].

Необходимость мониторинга и его объем естественно вытекают из идентифицированных рисков и необходимости смягчения условий безопасности для предотвращения аварий и сбоев. Таким образом, методы, типы и объем любой программы мониторинга безопасности будут определяться факторами, указанными в вышеупомянутой матрице.

Поддержание целостности плотины требует постоянного внимания к соответствующему инженерному проектированию, качественному строительству и дисциплине эксплуатации. Это обеспечивается через обслуживание плотины, хорошее управление ее объектами и может быть сопровождено осведомленностью о потенциальных режимах отказа и непрерывным мониторингом и наблюдением,

за которыми следуют частые проверки безопасности. Постоянно действующая программа мониторинга безопасности необходима на протяжении всего жизненного цикла хвостовой плотины. Операционная фаза любой плотины динамична и, вероятно, будет включать расширение плотины, повышение высоты плотины и/или добавление плотин. Фаза закрытия плотины часто превышает по продолжительности операционную фазу плотины, но может потребовать постоянного наблюдения за количеством и качеством фильтрации и их воздействием на поверхностные и грунтовые воды, геохимическими и физическими изменениями, которые исходят от неактивной плотины [31]. Отказ хранилищ хвостовых отвалов (TSF) может иметь катастрофические последствия для близлежащих сообществ, экосистемы и для горнодобывающих компаний, которые, как следствие, могут столкнуться с высокими финансовыми и репутационными затратами.

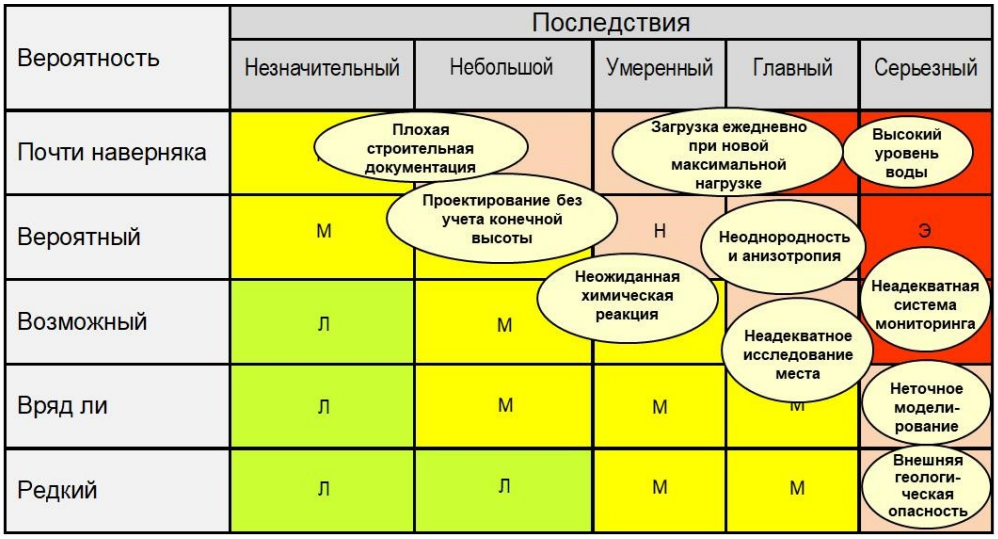


Рис. 1.13. Основные риски, непосредственно влияющие на устойчивость плотины [3]

Экосистемные воздействия, вызванные любым сбоем, могут длиться многие годы в зависимости от характера хвостовых отвалов. Например, в 2015 г. прорыв плотины хвостовых отвалов Фундан в шахте Самарко в Минас-Жерайс привел к 19 смертям и был признан худшей экологической катастрофой в истории Бразилии. Чтобы разрешить претензии, возникшие в результате этого сбоя, владельцам пришлось согласиться на план урегулирования стоимостью 2,4 млрд долл. для устранения и компенсации воздействий в течение 15 лет. Более того, 21 руководитель компании был обвинен в умышленном убийстве. В вышеупомянутом примере компания сейчас в процессе восстановления 5 тыс. ручьев, 16 тыс. га «Постоянных охраняемых территорий» вдоль бассейна р. Досе и 1200 га на речных берегах. Оценивается, что из-за сбоя были затронуты средства к существованию более 1 млн чел. [32].

Затраты на установку, эксплуатацию и обслуживание программы мониторинга безопасности хвостовых плотин могут быть высокими, но не такими высокими, если результатом будут потери схожих масштабов, как в вышеуказанном случае. Стоимость любой программы мониторинга безопасности может увеличиться, если

введены современные методы регистрации и передачи данных в реальном времени. Но общая стоимость должна быть в любом случае соответствующей количеству необходимых измерений, типам используемых инструментов и методу регистрации данных, которые все являются функциями рисков плотины и масштаба последствий.

Эксплуатационные затраты системы мониторинга, будь то во время активной фазы строительства или во время неактивной фазы закрытия, прибавляются к первоначальной стоимости, и общий бюджет программы должен включать предусмотрение для проведения исследований по обзору безопасности для анализа собранных данных высококвалифицированным и высокооплачиваемым консультантом. Все эти затраты, однако, могут быть оправданы с учетом больших возможных потерь, которые горнодобывающее предприятие должно нести в случае сбоя. Любая программа мониторинга безопасности может быть, однако, адаптирована в соответствии с размером объекта хвостовых отвалов и его эксплуатационными операциями.

В большом количестве случаев временная стоимость денег увеличивает давление на частное предприятие, чтобы максимизировать прибыль в краткосрочной перспективе.

Таким образом, требуемые дополнительные первоначальные капитальные затраты на установку и текущие затраты на эксплуатацию инструментированной программы мониторинга безопасности могут поставить эти системы в невыгодное положение из-за продолжающегося управленческого акцента на отсрочке расходов, продвижении решений по утилизации хвостовых отвалов с низким капиталом с небольшим акцентом на затраты на мониторинг и восстановление.

1.12. Основные комментарии и выводы

Статистика последних 20 лет показывает возрастающую тенденцию к сбоям хвостовых плотин. Это могло быть результатом неблагоприятных погодных условий из-за изменения климата и плохого управления очень крупными горнодобывающими объектами. Более того, быстрое строительство дамб в ответ на потребность удовлетворять спрос развивающихся отраслей на добытые металлы, вероятно, во многом способствовало этому. В случаях отсутствия звуковых процедур управления увеличение требований безопасности плотин и большее осознание их увеличивающихся угроз для окружающей среды и общества способствовали развитию более продвинутых средств и методов мониторинга. Хотя системы мониторинга хранилищ хвостовых отвалов более продвинуты, чем у обычных плотин, еще более точны и автоматизированы, они все еще не абсолютно надежны, и за последние десятилетия было зарегистрировано множество катастрофических сбоев.

Современная инженерная практика в области проектирования хвостовых плотин основана на принципах создания обычных плотин, при котором выбор соответствующей величины нагрузки при проектировании определяется потенциальными последствиями, и чем выше последствия, тем выше используемые нагрузки. Увеличение величины нагрузок при проектировании также значительно увеличивает уровень неопределенности в анализе устойчивости, характеристиках материала, его производительности и параметрах нагрузки на плотину. Уникальная природа хвостовых плотин вводит дополнительные неопределенности, которых нет в водных плотинах [33]. Эти факты, плюс недавние опасные происшествия, связанные с хвостовыми плотинами, поддерживают необходимость создания жесткой и непрерывной программы мониторинга безопасности плотин в течение обоих ее сроков службы и закрытия.

Опубликованная статистика сбоев и инцидентов с хвостовыми плотинами ограничена по сравнению с теми, которые принадлежат обычным плотинам, и были

зарегистрированы только крупные катастрофы. Большинство аварий проходят незамеченными либо из-за удаленного расположения шахт, либо из-за желания владельцев не публиковать такие события и сохранять чистый образ в глазах общественности, либо даже потому, что их основная забота — поддерживать производство без перебоев.

Режимы сбоев хвостовых плотин в этих случаях показывают, что многие такие аварии могли бы быть предотвращены при хорошем и ответственном управлении, поддерживаемом жесткими и непрерывными рутинами наблюдения за безопасностью и обзорами безопасности. Как и в обычных плотинах, это достигается путем визуального наблюдения и измерений, использования записывающих приборов и анализа всех накопленных данных компетентными инженерами для выработки рекомендаций по изменениям и модернизации работ. Программа мониторинга для хвостовых плотин часто включена во всеобъемлющее «Руководство по эксплуатации».

Руководство по эксплуатации — это документ, требуемый законодательством в растущем числе юрисдикций [1]. Однако из-за отсутствия четких руководящих принципов по мониторингу некоторые из них являются результатом внутренних правил, местных условий и потребностей. Большинство горнодобывающих компаний разработали свое собственное руководство по безопасности хвостовых плотин.

Несмотря на различные цели и методы строительства, наблюдение за хвостовыми плотинами требует всех действий, необходимых для обеспечения безопасности и непрерывности службы, аналогичных обычным плотинам, и должно включать все, и даже больше ингредиентов, как в обычных плотинах. Любая полезная программа мониторинга безопасности для хвостовых плотин должна быть непрерывной цепью действий, проводимых на протяжении очень долгого времени, которое может длиться десятилетиями. Программы безопасности плотин для хвостовых плотин отличаются от тех, что применяются в обычных плотинах, по своей продолжительности. Такие программы должны охватывать активную жизнь строительства плотины, которая продолжается, пока шахта остается открытой для производства, и ее фазу закрытия после этого. Проверки безопасности обычно состоят из рутинного визуального осмотра, использования записывающих приборов, проведения различных измерений и часто использования автоматизации для записи и передачи данных в контрольный центр для анализа и оценки. Кроме того, частые обзоры безопасности, проводимые профессиональными инженерами, стали обязательным требованием регулирующих органов в соответствии с национальным законодательством. Требования этого законодательства обычно соответствуют категории риска плотины.

Распознавание общих режимов сбоя этих плотин показывает, что они варьируются между следующими: вращательные сбои, сбои основания, перелив, эрозия склонов, трубопровод и внутренняя эрозия, ликвефакция под сейсмической нагрузкой, которые также общи для обычных земляных плотин. Параметры, приводящие к этим режимам сбоя, включают чрезмерное повышение уровня воды в пруду, высокий уровень депрессионной поверхности и избыточное давление поровой воды в наполнителе, развитие фильтрации через наполнитель и основания, деформацию плотины, осадку и дифференциальную осадку, общее земное давление и сейсмичность. Множество приборов, устройств и методов для измерения и записи включают, измерители расхода впадающего потока, пьезометры, водосбросы, плиты осадки, инклинометры и геодезические обследования, в то время как сейсмографы являются важными

элементами любого мониторинга безопасности для плотин, особенно в известных асейсмически активных регионах. Хвостовые плотины предлагают очень хорошие возможности для использования современного оборудования для измерения, передачи и записи данных в реальном времени с учетом большого объема таких измерений и записей, требуемых на очень больших объектах. При этом предприятия по обработке хвостов, несмотря на высокую стоимость такого оборудования, экономят много в стоимости труда в работе, которую они считают не относящейся к их основной деятельности. Более того, такие системы предлагают возможность обнаружения ранней угрозы, прежде чем станет слишком поздно вмешаться с ремонтными или модернизационными действиями.

Главное отличие между обычными и хвостовыми плотинами — это более высокие угрозы, которые хвостовые плотины представляют для природной среды и экосистемы. Большинство элементов, в настоящее время используемых в промышленных приложениях, развитии технологий и генерации энергии, производятся через горнодобывающие операции и утилизацию отходов в хвостовых плотинах и прудах. Неблагоприятные изменения в ландшафте могут быть результатом высокого спроса на воду и энергию и больших количеств подвижных эффлюентов, связанных с производством и утилизацией хвостов. Исторически эту деятельность можно считать одной из главных антропогенных деятельностей, которые способствуют загрязнению речных бассейнов по всему миру металлами и микроэлементами, что может привести к серьезным последствиям для здоровья людей, а также к долгосрочному ухудшению водных путей и биоразнообразия.

Существуют две серьезные проблемы, обычно связанные с горнодобывающей деятельностью, — кислотный сток из шахт и хвостовые отвалы, которые умышленно и/или случайно способствуют нагрузке на речные бассейны производными от антропогенных металлов. То, что отличает аварии на хвостовых плотинах от других антропогенных деятельностей, — это количество и скорость, с которой шлам может перемещаться, покрывая почвы, речные осадки, пойменные земли, речные берега, нанося ущерб качеству воды и неблагоприятно влияя на растительную и животную жизнь.

Учитывая все это, стоит серьезно задуматься о вопросе создания хорошей и надежной программы мониторинга безопасности. Любой анализ затрат и выгод такой программы должен основываться на оценке рисков, связанных с разливами хвостов из-за аварий или полных отказов. Инвестиции в такую программу должны соответствовать высоким затратам на компенсации, восстановление и реставрацию поврежденной окружающей среды, которые могут занять поколения после фазы закрытия. В итоге, создание и ведение такой программы настоятельно рекомендуется, и она может рассматриваться как часть страховых затрат на безопасное ведение и управление этой отраслью.

2. РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ МУЛЬТИМАСШТАБНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОТВЕТСТВЕННЫХ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ БАРЕНЦЕВА ЕВРО-АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА РОССИИ

2.1. Развитие методических подходов к многоуровневым комплексным исследованиям и мониторингу горнотехнических объектов

Произошедшие разрушения природно-технических объектов горнодобывающих предприятий, а также всемирно известные аварии объектов складирования жидких отходов (Бразилия (Брумадинью), Венгрия (Айка), Пакистан (Инд) и др.), приведшие к огромному природно-техническому ущербу и даже к гибели людей, обуславливают жесткие требования к диагностике и контролю таких объектов в целях обеспечения их геоэкологической безопасности [13, 34–39].

Нарушение механической прочности и фильтрационной устойчивости ограждающих сооружений объектов складирования жидких отходов в большинстве случаев становится причиной чрезвычайной ситуации и аварии. Вследствие этого населению, инженерно-техническим коммуникациям, дорогам, промышленным и гражданским зданиям и т. п. наносится огромный социально-экономический ущерб. Последствия аварии включают финансовые потери, остановку отдельных цехов или даже всего предприятия; затраты на ремонт, восстановление сооружений, коммуникаций, дорог, оборудования и механизмов, реабилитацию окружающей природной среды. Кроме того, не исключены и штрафы за загрязнение природных водных и воздушных сред [34, 38, 40–48].

В Кольском регионе минеральное рудное сырье добывается и перерабатывается горнопромышленными предприятиями, входящими во всемирно известные холдинги: КФ АО «Апатит» («ФосАгро»), АО «Кольская ГМК» («Норникель»), АО «Олкон» («Северсталь»), АО «Ковдорский ГОК» («ЕвроХим»), ООО «Ловозерский ГОК» («Росатом»), АО «СЗФК» («Акрон»). Суммарно этими предприятиями ежегодно добывается и перерабатывается до 60–80 млн т руды. Обогатительными фабриками предприятий после переработки руды в концентрат складируются в хвостохранилища до 40–50 млн т отходов. Необходимо отметить, что хвостохранилища обогатительных фабрик горнодобывающих предприятий западной части российского сектора Арктики построены в оврагах или котловинах рек (ручьев), на относительно слабых грунтах подстилающего геологического основания [34, 49–53].

Вследствие интенсивного недропользования на протяжении практически 90 лет в Кольском регионе созданы крупные природно-технические объекты, в которых складировано 1 млрд м^3 (около 2,43 млрд т.) отходов переработанного рудного сырья. При этом площадь этих объектов может достигать 16,5 млн м^2 (1650 га) с объемом заполненной чаши более 318 млн м^3 (318,4*10^9 л) и весом общей массы хвостовых отложений до 732 млн т. Высота ограждающих дамб достигает 70 м, что превышает высоту пятиэтажного дома почти в 5 раз. Хвостохранилища региона относятся к категории особо ответственных (опасных) объектов, с классом опасности I–II.

Большого внимания требует гидрогеологический режим месторасположения природно-технических объектов горнопромышленных предприятий, характеризуемый достаточно высоким уровнем грунтовых вод, который вследствие водонасыщенных отходов и сбросов промышленных вод непрерывно изменяется [40, 54–59]. В грунтах природно-технических объектов хвостохранилища формируется повышенное поровое давление, эффективное напряжение, в свою очередь, становится низким. Поэтому необходимо определенное время для уплотнения грунтов за счет их консолидации

и тем самым для безопасной эксплуатации хвостохранилища и ограждающих их дамб [34, 37]. Консолидация грунтов приводит к рассеиванию и снижению избыточного давления воды и приобретению грунтами «скелетной» жесткости [34, 37, 60].

Вышесказанное, с учетом социально-экономических последствий аварий на таких природно-технических объектах, подтверждает необходимость и актуальность диагностики их состояния и контроля [34, 37, 38, 60]. При этом следует принимать во внимание, что потенциально опасные деформационные процессы зарождаются в зонах переувлажненных и разжиженных грунтов, не поддающихся прямым инструментальным и визуальным наблюдениям. Проявления таких процессов могут быть зафиксированы на ранней стадии только с применением междисциплинарных методов исследований разного масштаба, что также позволяет контролировать всесторонне как сам природно-технический объект, так и окружающие природные системы [34, 60].

Целью являлось обоснование применения многоуровневых комплексных исследований и мониторинга природно-технических горнопромышленных объектов для решения конкретных задач обеспечения промышленной и геоэкологической безопасности окружающей среды в евро-арктических условиях.

Основная идея заключалась в привлечении междисциплинарных исследований и цифровых технологий для натурных наблюдений и компьютерного моделирования природно-технического горнопромышленного объекта как особо ответственного (I–II класса опасности). В работе использованы междисциплинарные методы натурных наблюдений, а также цифровые технологии для обработки разноформатных данных (рис. 2.1). Такой подход позволяет реализовать оперативную диагностику и оценку состояния природно-технического объекта, своевременно обнаруживать снижения его надежности и функциональности и обеспечивать оперативный контроль за развитием потенциально опасных фильтрационно-деформационных процессов.

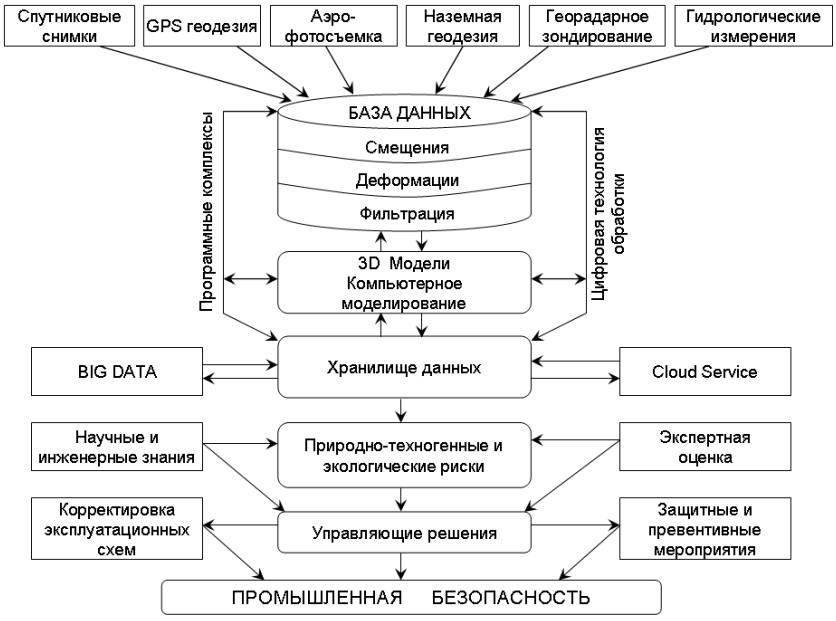


Рис. 2.1. Методический подход к комплексным исследованиям и мониторингу природно-технических горнопромышленных объектов [13]

Для этого используется разработанная автором концепция применения междисциплинарных методов наблюдений на разных уровнях

(по отношению к дневной поверхности) в мониторинге горнопромышленных объектов [13, 61, 62] (рис. 2.2).

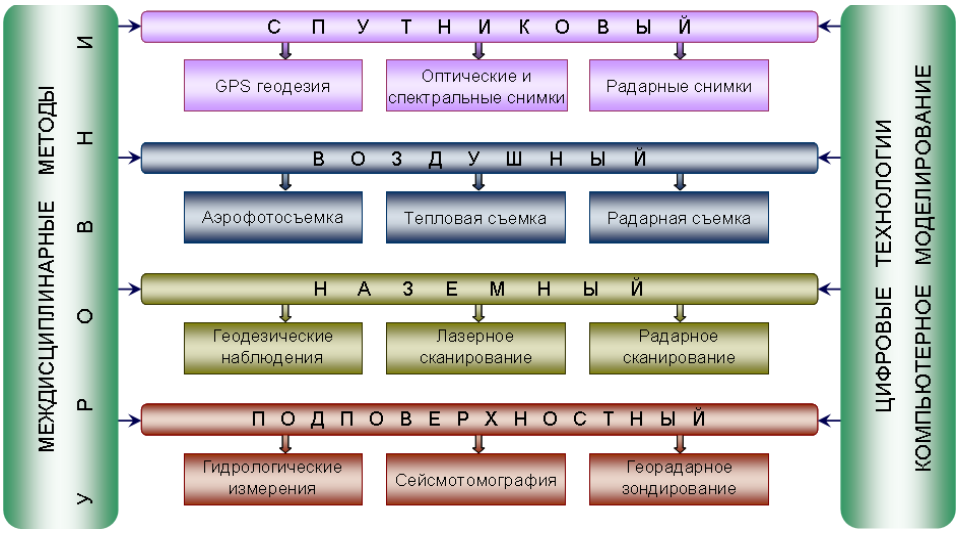


Рис. 2.2. Распределение междисциплинарных методов исследований по уровням наблюдений и мониторинга природно-технического объекта [13]

Как видно на рис. 2.2, в разработанной концепции используются современные междисциплинарные методы наблюдений на различных уровнях, что позволяет выполнять диагностику и контроль природно-технических объектов и выявлять потенциально опасные и разрушающие процессы на ранних стадиях их формирования [34, 63].

Междисциплинарные исследования природно-технического объекта осуществляются на различных уровнях по отношению к земной поверхности: подземном, поверхностном, высотном и спутниковом. Подземный уровень включает в себя гидрологические измерения, сейсмотомографию и георадарное зондирование [34, 64, 65]. На поверхностном уровне выполняются геодезические съемки, плановые и высотные измерения, геодезическая привязка и точное позиционирование объектов [34, 66]. Для высотного уровня применяются различные виды цифровой аэрофотосъемки БПЛА (рис. 2.3) [34, 63]. Основу спутникового уровня составляют обработка и анализ мультиспектральных и радиолокационных снимков (ДЗЗ) [34, 54, 63, 67–71]. Это позволяет решать мультимасштабные задачи мониторинга: от локальных участков и компонентов (от миллиметров до метров) до природно-технического в целом (от сотен метров до десятков километров). Важным дополнением к междисциплинарным методам натурных наблюдений являются цифровые технологии: построение 3D-моделей и гидрогеомеханическое 3D-моделирование (рис. 2.4) [44, 72, 73].

Применение и непосредственная взаимосвязь междисциплинарных методов и цифровых технологий в мониторинге природно-технического объекта показана на рис. 2.4. Это получение данных наблюдений в цифровом формате, первичная обработка и автоматизированное построение 3D-моделей поверхности контролируемых объектов, цифровое высокоточное позиционирование и определение цифровых плановых и высотных координат, цифровые скоростные (субинженерно-геологические разрезы, создание расчетных 3D-моделей, гидрогеомеханическое 3D-моделирование с выводом численных и графических результатов в цифровом виде и т. д.). Разноформатные (по методам) цифровые данные концентрируются в едином банке данных для дальнейшего анализа и обработки, а также

сопоставления с имеющимися научно-техническими и экспертными решениями (нормативно-методические документы) в базе знаний.

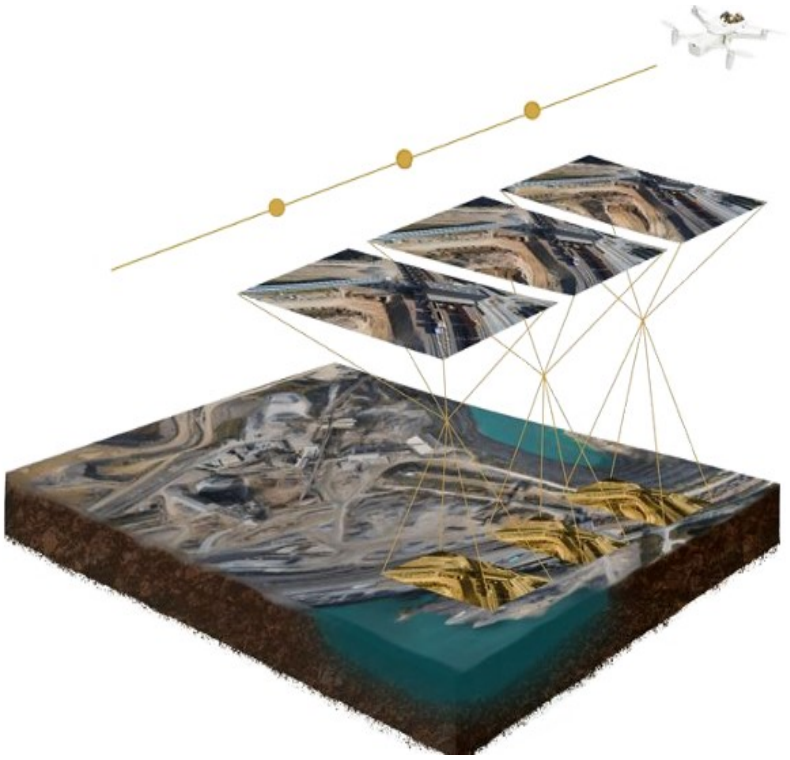


Рис. 2.3. Мультимасштабная съемка природно-технических объектов [74]



Рис. 2.4. Применение цифровых технологий в мониторинге природно-технического объекта

Методические подходы к многоуровневому применению междисциплинарных методов наблюдений и цифровых технологий в мониторинге состояния

природно-технических объектов апробированы на основных крупных горнодобывающих предприятиях западной части российского сектора Арктики (Кольский регион) (рис. 2.5, табл. 2.1) [34, 63].

Весь комплекс перечисленных выше методов и многоуровневых междисциплинарных наблюдений применяется для мониторинга природно-технических горнопромышленных объектов на АО «Ковдорский ГОК» (с 2012 г.), АО «Кольская ГМК» («Печенганикель») (с 2014 г.), АО «СЗФК» (с 2015 г.). На объектах этих горнопромышленных предприятий созданы наблюдательные полигоны, оборудованные геодезическими реперами и поверхностными марками, гидротехнической контрольно-измерительной аппаратурой, постоянными отражателями и опорными точками для аэрофотосъемки и привязки спутниковых снимков.

Получение данных мониторинговых наблюдений позволило выявить тенденции изменения состояния для контролируемого объекта вследствие влияния различных природно-технических факторов, а также создать интерактивные компьютерные 3D-модели (рис. 2.6). В качестве примеров полученных результатов можно привести оценку фильтрационной и механической устойчивости ограждающих дамб; локализацию переувлажненных зон грунтов и формирующихся фильтрационных каналов; выявление механизма инфильтрации; формирования зон механической суффозии [44]. На карьере рудника «Железный» Ковдорского ГОКа был определен механизм инфильтрации воды из накопителя промышленных стоков, реализующийся в формировании зон повышенных водотоков в насыпной ограждающей дамбе с выходом на рабочий борт карьера [34].



Рис. 2.5. Схематическое представление комплексных исследований и мониторинга природно-технических горнопромышленных объектов западной части российского сектора Арктики (Кольский регион)

Таблица 2.1

Комплексные исследования и мониторинг
природно-технических объектов Кольского региона

Природно-технические объекты	Цель и задачи исследований
Рудники, карьеры, горнотехнические конструкции, породные отвалы	Оценка геолого-структурного строения законтурного массива пород; выявление дислокаций и зон неоднородностей для обоснования параметров новых уступов
	Оценка состояния и структуры законтурного массива пород; выявление и трассирование тектонических нарушений; выявление дислокаций и зон с различными физическими характеристиками для целей оценки устойчивости обнажений пород в карьерах
	Выявление участков повышенной водонасыщенности скальных пород
	Выявление границ изменения литологической разности пород и руд
	Обследование законтурного состояния стенок подземной горной выработки (без крепи и с крепью)
	Оценка структуры отвалов с выявлением уплотненных породно-снежно-ледяных зон для решения задач их перемещения за пределы действующего карьера
Фундаменты и опоры скально-породных объектов	Определение качества бетонной заливки, состояния и структуры фундаментов, а также оценка влагонасыщенности пород под ними
	Оценка прочности, состояния и структуры фундаментов и опор
	Изучение состояния приповерхностных пород в районе расположения горнотехнических сооружений
Железнодорожные пути, автомобильные дороги, транспортные терминалы, трассы продуктопроводов	Определение структуры насыпных и естественных скальных пород полотна автомобильных дорог и железнодорожных путей
	Исследование состояния и структуры приповерхностной зоны земной коры на активных тектонических разломах
	Обследование состояния транспортных скально-породных сооружений

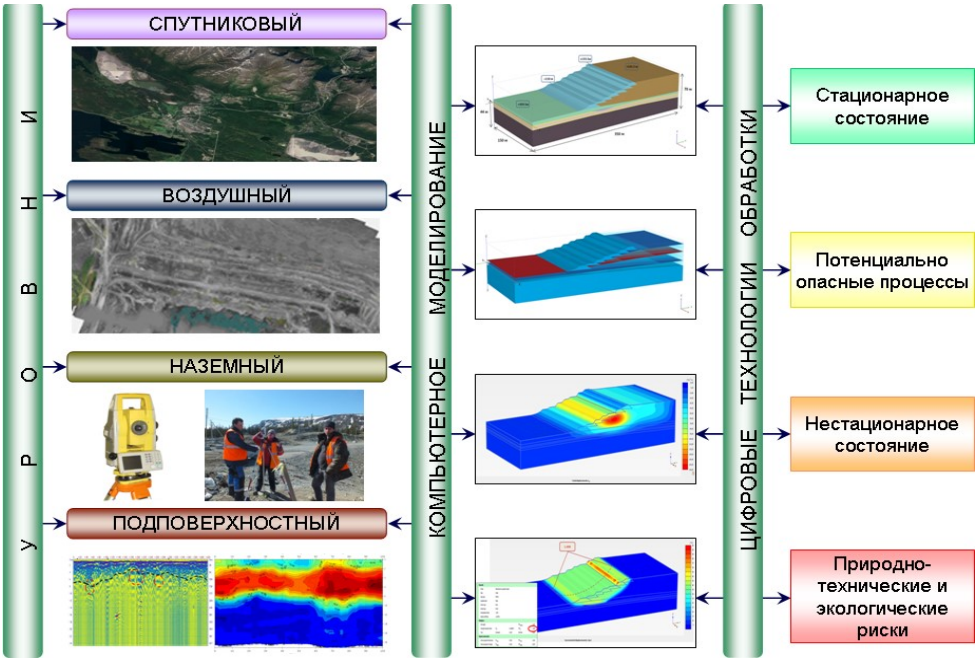


Рис. 2.6. Применение комплексных исследований и цифровых технологий в многоуровневом мониторинге природно-технического горнопромышленного объекта для выявления механизма формирования природно-технических и экологических рисков

На основе результатов мониторинга были разработаны защищающие и превентивные мероприятия, что позволило предотвратить и избежать разрушений накопителя. Посредством междисциплинарных наблюдений локализованы потенциально опасные зоны грунтов, для которых были выполнены укрепляющие мероприятия (подсыпка скальных крупнообломочных пород, уплотнение мелкодисперсным грунтом полок ограждающей дамбы и др.).

Междисциплинарные исследования и мониторинг были выполнены в 2016–2019 гг. на гидротехнических сооружениях КФ АО «Апатит» и в 2015–2021 гг. — на АО «Олкон». Получена детальная информация о внутренней структуре и состоянии грунтов ограждающих дамб на отстойниках Восточного рудника КФ АО «Апатит». Для хвостохранилища АО «Олкон» были выполнены исследования процессов оттока и притока воды, определение и анализ динамики водного баланса с учетом его значимости для обеспечения необходимыми объемами воды обогатительную фабрику предприятия.

Опыт выполнения многоуровневого мониторинга природно-технических горнопромышленных объектов основных горнодобывающих предприятий Кольского региона показал высокую эффективность полученных результатов в арктических условиях.

Применение междисциплинарных исследований и цифровых технологий в многоуровневом мониторинге позволил также решать задачи в разном масштабе: от природно-технического объекта в целом (десятки квадратных километров) до отдельных его сооружений (километры и сотни метров) и локальных их компонентов и участков (метры и доли метров). Полученные на каждом уровне наблюдений данные предоставляли основу и позволяли перейти в иерархии: от всего объекта (спутниковые снимки) к ограждающим сооружениям (снимки аэрофотосъемки), ее поверхностным деформациям (наземные геодезические измерения) и к фильтрационно-деформационным процессам (георадарные, сейсмические и гидрологические наблюдения).

Результаты уровневых натурных наблюдений (спутниковый — оптические и радарные снимки; воздушный — план высотных отметок, ортофотоплан; поверхностный — геодезические плановые и высотные смещения контрольных реперов и марок; подповерхностный — радарограммы (субинженерно-геологические разрезы), сейсмограммы, депрессионные поверхности) были очень эффективно дополнены ситуационным и сценарным гидрогеомеханическим 3D-моделированием фильтрационно-деформационных процессов. Моделирование при этом было также направлено на решение задач оценки устойчивости ограждающих сооружений на текущий момент и на среднесрочную перспективу.

Применение цифровых технологий в системе многоуровневого мониторинга природно-технического объекта позволило более обоснованно и надежно выполнить оценки состояния и раскрыть механизмы формирования потенциально опасных фильтрационно-деформационных процессов.

Приобретенный опыт показал, что применение междисциплинарных исследований и цифровых технологий как непосредственно в методах наблюдений, так и при обработке разноформатных данных, повышает информативность и эффективность получаемых результатов.

Значимость выполненных исследований заключается в обосновании применения междисциплинарных исследований и цифровых технологий в мониторинге природно-технических горнопромышленных объектов с оптимизацией их комплексирования для решения конкретных задач мониторинга в евро-арктических условиях. В мониторинге на разных уровнях используются междисциплинарные методы наблюдений и цифровые технологии. При этом решаются задачи мониторинга

в иерархии: от объекта в целом (десятки квадратных километров) до отдельных его сооружений (километры и сотни метров) и локальных их компонентов и участков (метры и доли метров).

Созданные основы позволяют более детально и достоверно достигать целей оперативной диагностики и оценки состояния природно-технических горнопромышленных объектов, своевременного обнаружения и локализации участков снижения их надежности и функциональности, непрерывного мультимасштабного контроля потенциально опасных фильтрационно-деформационных процессов и прогнозирования функциональности накопителя при различных сценариях.

Показано, что использование цифровых технологий как в применяемых методах мониторинга, так и в единой обработке разноформатных цифровых данных повышает информативность и эффективность получаемых результатов. Цифровые технологии позволили более достоверно и надежно выполнять оценку состояния природно-технических горнопромышленных объектов, а также способствовали раскрытию механизма формирования потенциально опасных фильтрационно-деформационных процессов в ограждающих дамбах.

2.2. Георадарные подповерхностные обследования горнотехнических объектов

Объекты складирования отходов минерального сырья горного производства такие, как хвостохранилища, являются потенциально опасными. Важнейшей задачей здесь стоит безопасная эксплуатация дамб, являющихся неотъемлемой частью этих объектов, которая не возможна без исследования структуры и состояния слагающих их пород и грунтов. Только за последние пять лет произошло несколько крупных аварий на насыпных гидротехнических сооружениях, где 31 % всех аварий — результат локального выхода воды [4, 75–76]. Использование геофизических методов обследования позволяет получать оперативную информацию о структурных особенностях таких сооружений и степени водонасыщености слагающих их грунтов [47, 77, 78]. Существование большого количества методов геофизики свидетельствует об отсутствии какого-то одного стандартного метода, способного обеспечить оперативное и качественное получение требуемой информации о структуре насыпных сооружений. Одним из оперативных геофизических методов изучения структуры и состояния этих объектов является георадарное зондирование, позволяющее исследовать изменение физических свойств в массиве пород и грунтов [78].

Опыт применения геофизических исследований при изучении физических свойств пород и грунтов на горнотехнических объектах месторождений Урала, Сибири, Дальнего Востока и западной части Российского сектора Арктики показывает, что возникающие изменения наведенного волнового поля при неразрушающем подповерхностном георадарном зондировании может эффективно использоваться для исследования их строения и состояния [78].

Так, например, на Кангалассском угольном разрезе в рамках геофизического мониторинга дамбы установлены границы фильтрационных потоков, которые просачиваются через тело и основание дабы [79]. Показана эффективность геофизических методов оперативного неразрушающего контроля на грунтовой плотине, расположенной в Свердловской области, для оценки устойчивости и прогноза ее физического состояния [80]. Рассмотрены примеры комплексирования геофизических методов таких, как электроразведка в модификации электротомографии и георадиолокационного профилирования, для получения информации о литологическом

строении плотины, выделении возможных зон повышенной влажности и участков разуплотнения на грунтовой плотине в составе сооружений МГЭС (Карелия) [81]. Обнаружены проводящие зоны, связанные с усиленной фильтрацией воды посредством геофизического мониторинга грунтовой плотины водохранилища, отмечена целесообразность проведения сезонного геофизического мониторинга для более достоверной оценки состояния грунтовых гидротехнических сооружений [82]. Выполнен анализ информативности геофизических методов при изучении строения плотин с обоснованием оптимального комплекса для диагностики и прогнозирования технического состояния земляных плотин Республики Казахстан [83–84].

Из зарубежного опыта применения геофизического мониторинга на горнотехнических объектах стоит отметить применение методов электрического сопротивления и георадара на горнодобывающем комплексе Тапира в штате Минас-Жерайс (Бразилия), где с их помощью определен уровень грунтовых вод, выявлены локальные зоны водонасыщения и показана эффективность такого рода мониторинга для грунтовых дамб [85]. Комплексирование геофизических методов в районе Линарес-Ла-Каролина (юг Испании) позволило оценить внутреннее строение горных дамб [86]. На плотине Гадвалян (Северный Пакистан) с использованием комплексирования геофизических методов выполнено картирование приповерхностных полостей [87]. При обследовании плотины Монте-Котуньо (юг Италии) с использованием геофизических методов выполнена локализация зон инфильтрации, показана эффективность использования неразрушающих методов для диагностики и мониторинга важнейших объектов инфраструктуры [88]. На основе георадарного зондирования определен уровень грунтовых вод на плотине Сутами (Индонезия), установлены значения диэлектрической проницаемости грунтов посредством сопоставления полученных данных со значениями пьезометров [89].

В свою очередь, следует отметить, что отсутствие обоснованных параметров, обеспечивающих идентификацию водонасыщенных зон в теле насыпных сооружений, зачастую приводит к субъективной интерпретации и, как следствие, к ошибочным выводам. Комплексирование геофизических методов, хоть и повышает качество получаемой информации, но приводит к значительным трудозатратам с удорожанием работ [90]. Теряется такой значимый элемент в исследовании, как оперативность, с возможностью получения информации в режиме in-situ (на месте). Использование уже полученных данных и закономерностей при комплексировании визуальных, сейсмических и георадарных исследований [91–93] на схожих объектах для целей выявления водонасыщенных зон в грунтовых гидротехнических сооружениях может применяться и на других объектах такого профиля.

2.2.1. Георадарное исследование ограждающей дамбы на объекте складирования намывных отходов горного производства

На наблюдательном полигоне насыпной дамбы хвостохранилища в целях локализации зон водонасыщения и намокания грунтов выполнено георадарное исследование. Для этого использовался георадарный комплекс Ramac шведского производства (компания Mala), оснащенный экранированной антенной 100 МГц, которая позволяет производить зондирование на глубину до 20 м.

Как известно, основным параметром для определений и интерпретации структуры и состояния грунтового гидротехнического сооружения георадарным зондированием является скорость распространения электромагнитных волн V [78]. Значения скорости

в конкретной среде напрямую связана с действительной частью относительной комплексной диэлектрической проницаемости среды [94, 95]:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}}, \tag{2.1}$$

где c — скорость света в вакууме; ε — действительная часть относительной комплексной диэлектрической проницаемости среды.

Поэтому, одним из основных физических свойств пород и грунтов, определяемых георадарным зондированием, является их диэлектрическая проницаемость ε. Диэлектрическая проницаемость грунтов напрямую связана с их влажностью, и на сегодняшний день получен ряд эмпирических выражений, определяющих эту связь. Например, для осадочных пород эмпирическая взаимосвязь диэлектрической проницаемости и влажности в диапазоне изменения влажности от 3 до 45 % имеет вид [94]:

$$\varepsilon = 3{,}03 + 9{,}3W_{\text{об.}} + 14W_{\text{об.}}^2 - 76{,}7W_{\text{об.}}^3, \tag{2.2}$$

для сред с большой влажностью:

$$\varepsilon = \frac{720}{180 - W}, \tag{2.3}$$

где $W_{\text{об.}}$ — объемная влажность; W — весовая влажность.

При этом под весовой влажностью понимается процентное отношение веса влаги, содержащейся в образце влажного материала, к весу того же образца, высушенного до постоянного веса. В свою очередь, объемная влажность является процентным отношением объема влаги, содержащейся в образце материала, к объему образца.

Из приведенных эмпирических выражений следует, что повышение влажности грунтов приводит к увеличению значений их диэлектрической проницаемости ε. Таким образом, в георадиолокации признаком роста влагонасыщения грунтов является увеличение определяемых значений ε, что, в свою очередь, отражается в снижении скорости электромагнитной волны. Вместе с тем, вследствие сложности получения распределенных скоростных данных георадарного зондирования, их интерпретация в подавляющем большинстве случаев производится на основе детального анализа волнового поля: амплитудных, частотных и фазовых характеристик электромагнитного сигнала [35].

На рис. 2.7 представлена радарограмма данных георадарного зондирования участка ограждающей дамбы в стандартной обработке с применением программы Rad Explorer. Обработка георадарных данных в общепринятом виде включает в себя удаление постоянной компоненты сигнала, прямой волны, коррекцию амплитуд вследствие расхождения и затухания сигнала, применение специализированных процедур обработки (деконволюция, преобразование Фурье и преобразование Гильберта), что в ряде случаев значительно увеличивает точность определения местоположения зон неоднородностей. Детальный анализ амплитудно-частотных характеристик электромагнитных трасс позволяет выявить структурные неоднородности в слагающих дамбу грунтах, а также локализовать уровень грунтовых вод (УГВ). Уровень грунтовых вод определяется по контрастному отражению и колеблется в интервале 2,2–3 м глубины. Выделяются три зоны возможного водонасыщения: 28–70, 76–91 и 108–130 м, которые отличаются по характеру изменения

волновой картины с большим количеством гиперболических отражений. Такого рода интерпретация достаточно субъективна и не позволяет точно определить, чем вызвано изменения волнового поля на данном участке измерений.

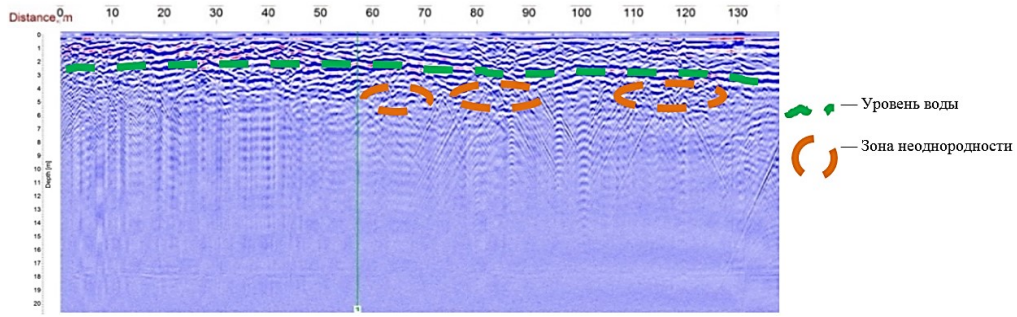


Рис. 2.7. Радарограмма георадарного зондирования участка ограждающей дамбы (стандартная обработка, Rad Explorer)

Использование данных анализа поля обратного рассеяния электромагнитных волн, полученных в программе «ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ», дает возможность существенно улучшить качественные и количественные показатели результирующих параметров. Такой подход позволяет производить построение разрезов как в случае наличия отражающих границ, так и в случае непрерывного изменения электрофизических свойств по профилю наблюдений [96].

На рис. 2.8 представлена радарограмма, построенная с использованием анализа поля обратного рассеяния. Как видно из рисунка, такая обработка данных позволяет получать количественные показатели электрофизических свойств грунтов, слагающих дамбу (изменение скорости прохождения электромагнитной волны и диэлектрической проницаемости грунтов).

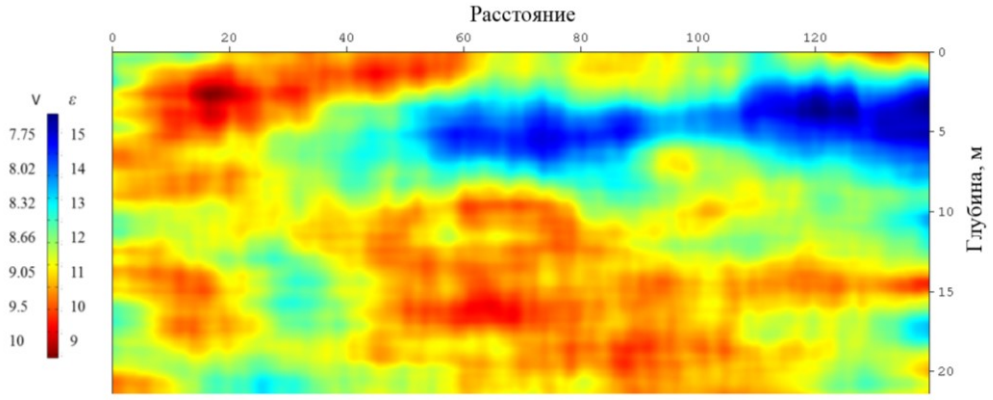


Рис. 2.8. Радарограмма георадарного зондирования участка ограждающей дамбы (обработка «ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ»)

Интерпретация анализируемых результатов выполненных исследований ограждающей дамбы (рис. 2.8) позволяет сделать следующие выводы. Приповерхностная зона грунтов дамбы, до глубины 1,5–2 м, характеризуется высокой скоростью электромагнитной волны V = 9,2–9,7 см/нс (плотные сухие грунты). Выделяется обширная зона в интервале 53–130 м с низкими значениями скорости электромагнитной волны V = 7,75–8,15 см/нс (синяя палитра) на глубинах 1,5–7 м, что обусловлено резким повышением влажности грунтов. На радарограмме выделяются две водонасыщенные зоны грунтов на интервалах профиля 53–90 и 108–130 м на глубине

1,5–7 м, которые в целом коррелируют с данными анализа амплитудно-частотных характеристик сигнала (рис. 2.7). Структура грунтов, находящихся ниже 7 м от поверхности, представляет собой плотный массив без каких-либо неоднородностей.

На основе многочисленных натурных георадарных определений, а также синхронизации с сейсмическим методом, выполненных на опытном участке дамбы хвостохранилища, установлены значения диэлектрической проницаемости ε и скорости электромагнитной волны *V*, позволяющие выполнить категорирование грунтов по водонасыщенности (табл. 2.2). Согласно данным табл. 2.2, выделяются три категории грунтов по водонасыщению: I — водонасыщенные грунты; II — грунты увлажненные, плотные; III — грунты плотные, естественной влажности [90, 91].

Таблица 2.2

Категорирование грунтов по водонасыщению по георадарным данным

Категория водонасыщенности грунта	I	II	III
Значения диэлектрической проницаемости, ε	>13,89	13,88–12	<11,99
Скорость электромагнитной волны, *V* см/нс	<8,05	8,06–8,66	8,67>

Таким образом, применительно к анализу рис. 2.8, зоны в интервалах 53–90 и 108–130 м отнесены к категории водонасыщенных грунтов.

В результате комплексного анализа данных основных параметров электромагнитного сигнала (амплитуда, фаза, период), параметров волнового поля (скорость распространения электромагнитных волн) георадарного зондирования и визуального обследования уступов дамбы установлены параметры, обеспечивающие идентификацию водонасыщенных зон исследуемого грунтового гидротехнического сооружения георадарным зондированием, которые также использовались для дальнейшего анализа и интерпретации всех радарограмм.

На рис. 2.9 представлена радарограмма, полученная на берме, находящейся выше. Приповерхностная зона 1–1,5 м характеризуется невысокими значениями скорости электромагнитной волны *V* = 8,22–8,35 см/нс, что связано с возможным увлажнением вследствие осадков. В интервале глубин 1,5–9 м значение скорости электромагнитной волны практически повсеместно составляет *V* = 9,2–10 см/нс, что соответствует плотным грунтам, естественной влажности. В интервале профиля 400–426 м на глубине 13–22 м выявлена зона с низкими значениями скорости электромагнитной волны *V* = 7,8–8,12 см/нс и интерпретируется как водонасыщенная.

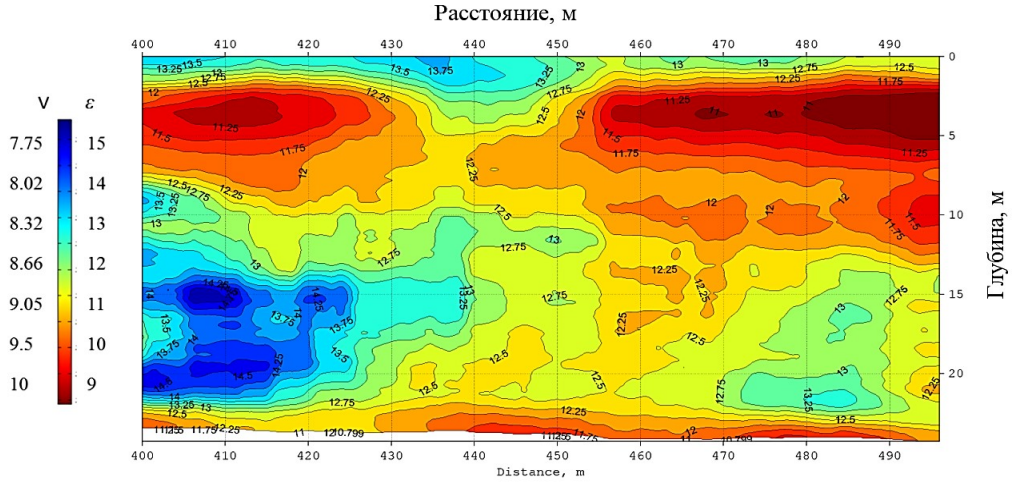


Рис. 2.9. Радарограмма георадарного зондирования участка ограждающей дамбы (обработка «ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ»)

Анализ волновых картин радарограмм, полученных при проведении исследования, подтвердили информативность георадарных определений для выявления наиболее уязвимых участков насыпного грунтового гидротехнического сооружения, а также для обнаружения и локализации водонасыщенных зон в грунтах с высокой достоверностью и технологичностью. На исследуемом участке выявлена зональная фильтрационная неоднородность грунтов и уточнена его структура.

В результате георадарного исследования ограждающей дамбы на объекте складирования намывных отходов горного производства установлены параметры, обеспечивающие идентификацию водонасыщенных зон с достаточной достоверностью и их количественной и качественной интерпретацией.

2.2.2. Исследование трансформации наведенных волновых полей в объектах складирования отходов

Исследование трансформации наведенных волновых полей в объектах складирования горнопромышленных отходов позволяет получить основу для количественной интерпретации данных георадарного обследования и анализа волновых картин радарограмм для выделения водонасыщенных зон и различных структурных неоднородностей. Развитие информационных технологий в последнее десятилетие подвигло большое количество специалистов-теоретиков в области георадиолокации на создание различных проектов по решению обратных задач георадиолокации, например, MatGPR и GPRMAX. Одним из методов расчета является конечно-разностное моделирование, основанное на решении уравнений Максвелла.

Конечно-разностный подход к моделированию заключается в дискретизации времени и пространства: решение ищется по сетке, состоящей из прямоугольных ячеек с заданным шагом по времени. Вначале задается функция источника, свойства среды и граничные условия (обычно поле равно нулю на бесконечности или на границах). Исходя из этих условий, значение поля известно в начальный момент времени t_0 в источнике. В следующий момент времени ($t_0 + \Delta t$) значения векторов электрической и магнитной напряженностей вычисляются в соседних ячейках и т. д. Интерактивный процесс продолжается, пока поле не достигнет границ модели или границ рассчитываемой радарограммы. В отличие от лучевого моделирования, при конечно-разностном поиск решения выполняется не только для дальней зоны, но и для ближней и переходной. Для расчета радарограмм в основном используют двухмерное приближение как более быстрое [95].

На наблюдательном полигоне насыпной дамбы хвостохранилища для локализации зон водонасыщения и намокания грунтов выполнено георадарное исследование. Для георадарного исследования использовался комплекс Ramac шведского производства компании Mala, оснащенного экранированной антенной 100 МГц, которая позволяет производить зондирование на глубину до 20 м. Для выявления влияния на состояние грунтов насыпной дамбы водонасыщения выполнено исследование трансформации наведенных волновых полей компьютерным моделированием электромагнитного поля, индуцированного георадарным зондированием. Расчеты выполнены методом конечных разностей во временной области с использованием программы MATGPR [97–99].

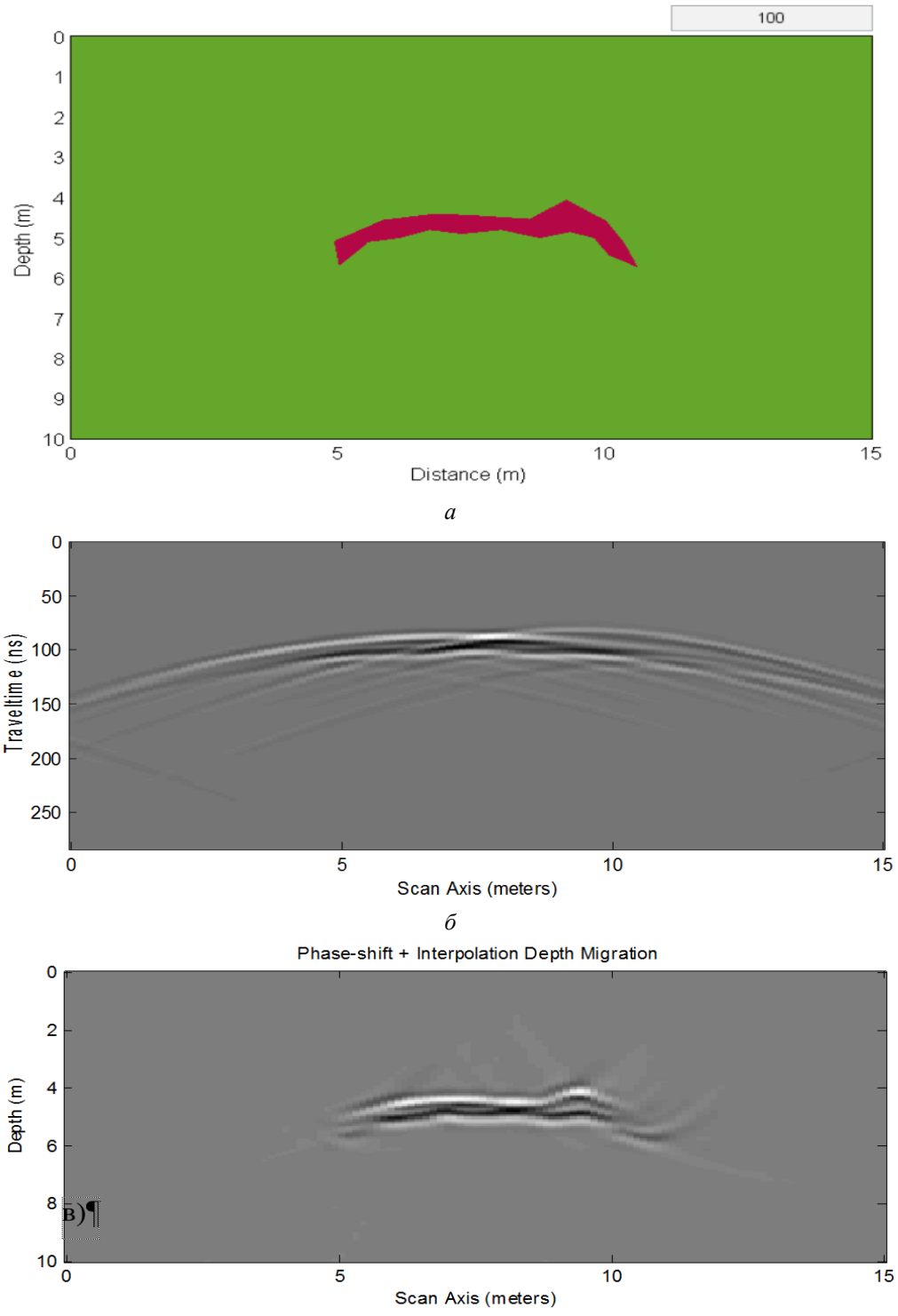
На рис. 2.10 представлена геометрическая схема модели и результат компьютерного моделирования электромагнитного поля, индуцированного георадарным зондированием (имитация работы георадара с антенной 100 МГц),

в массиве насыпных грунтов (дамба), включающем в себя криволинейную зону неоднородности. Геометрическая схема модели среды участка насыпных грунтов (рис. 2.10 *а*) представлена в виде вертикального разреза размером 15×10 м, включающего в себя криволинейную зону неоднородности мощностью 0,3 м, с глубиной залегания от 4 до 5,5 м. Значение диэлектрической проницаемости вмещающих грунтов в модели было принято равным 9 ед., согласно справочным данным физических свойств горных пород [100], а зоны неоднородности — 18 ед., что соответствует водонасыщенным грунтам. Анализ необработанной модельной радарограммы (рис. 2.10 *б*) позволил выявить амплитудные изменения волновой формы сигнала, отраженного от зоны неоднородности, где от углов криволинейной зоны образовались множественные гиперболические отражения, которые маскируют истинное положение границ данного объекта. Данный признак может служить индикатором для выявления таких зон в массиве насыпных грунтов при обработке радарограмм, полученных в полевых условиях. Для идентификации истинного положения объекта применена процедура миграции, которая заключается в том, чтобы все волны (невидимые на полевом материале) от элементарных источников просуммировать по своим гиперболическим осям синфазности, т. е. собрать энергию колебаний в вершину гиперболы — истинное местоположение элементарного источника колебаний [95].

На рис. 2.11 *а* представлена радарограмма в стандартной обработке данных георадарного зондирования участка ограждающей дамбы с применением программы RadExplorer. Детальный анализ амплитудно-частотных характеристик электромагнитных трасс позволил выявить структурные неоднородности в слагающих дамбу грунтах. Множественные гиперболические отражения в интервале профиля 48–85 м (глубина 3–7 м) могут служить индикатором для выделения таких аномальных зон, которые могут свидетельствовать о водонасыщении грунтов на данном участке.

На рис. 2.11 *б* представлена радарограмма, построенная с использованием технологии поля обратного рассеяния (ПОР) программы «ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ» [101]. Как видно из рисунка, такая обработка данных позволяет детализировать радарограмму, что предоставляет возможность увидеть даже незначительные изменения электрофизических свойств дамбы (изменение скорости прохождения электромагнитной волны и диэлектрической проницаемости грунтов).

Интерпретация анализируемых результатов выполненных исследований ограждающей дамбы рис. 2.11 *б* позволяет сделать следующие выводы. Приповерхностная зона грунтов дамбы до отметки 1,5–2 м характеризуется начальной высокой скоростью электромагнитной волны V = 9,5–9,9 см/нс (плотные сухие грунты) с дальнейшим относительно резким ее понижением локально до V = 8,45–7,75 см/нс на отметке 3–7 м (интервал профиля — 48–85 м), что обусловлено, скорее всего, увеличением влажности грунтов. Выделаются две водонасыщенные зоны (интервалы расстояний 0–25 и 48–85 м) на глубине 3–7 м, которые в целом коррелируют с данными анализа амплитудно-частотных характеристик сигнала рис. 2.11 *а*. Структура грунтов, находящихся ниже отметки 7 м представляет собой плотный массив без каких-либо нарушений. На основе многочисленных натурных георадарных определений, а также синхронизации с сейсмическим методом, проведенных на опытном участке дамбы хвостохранилища схожего по своей структуре [78, 90–91], выполнено категорирование грунтов по степени водонасыщения: зона в интервале 0–25 м отнесена к категории грунтов увлажненных плотных, а зона 48–85 м — водонасыщенных грунтов.

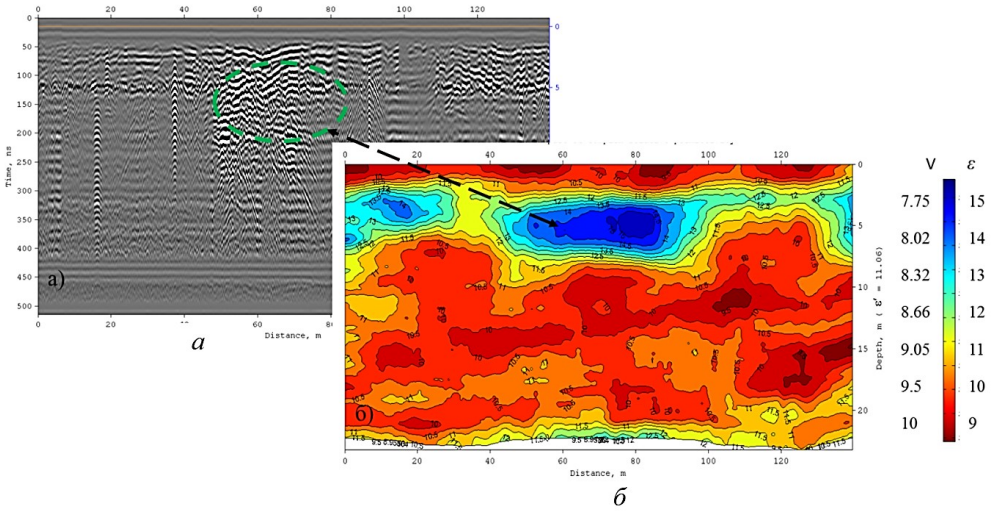


а

б

в

Рис. 2.10. Схема и результаты моделирования электромагнитного поля, индуцируемого электромагнитным зондированием: *а* — геометрическая схема модели; *б* — синтетическая модель радарограммы; *в* — обработанная радарограмма



а *б*

Рис. 2.11. Комплексный анализ данных георадарного зондирования: *а* — амплитудная форма сигнала; *б* — параметры волнового поля

В результате комплексного анализа данных компьютерного моделирования и основных параметров электромагнитного сигнала (амплитуда, фаза, период), параметров волнового поля (скорость распространения электромагнитных волн) георадарного зондирования установлены параметры, обеспечивающие идентификацию водонасыщенных зон в объектах складирования горнотехнических отходов.

2.2.3. Комплексирование волновых методов для выявления опасных фильтрационно-деформационных процессов

Комплексирование методов для исследования трансформации наведенных волновых полей с целью выявления потенциально опасных фильтрационно-деформационных процессов — это сочетание и проведение в определенной последовательности различных геофизических исследований для повышения информативности и надежности получаемых данных. Необходимость комплексирования методов обусловлена неоднозначностью истолкования результатов, где сложность геофизической интерпретации обусловлена математической некорректностью решения обратных задач геофизики, где независимо от количества априорной информации о физических свойствах пород решение будет неоднозначно (как правило, приближенное) ввиду того, что таких решений может быть много или не быть совсем. Следовательно, рациональный выбор и комплексирование геофизических методов позволяет повысить уровень и надежность данных при решении различных задач.

Комплексирование геофизических методов существенно повышает качество получаемой информации, однако приводит к значительным трудозатратам с удорожанием работ [13]. Теряется такой значимый элемент в исследовании, как оперативность, с возможностью получения информации в режиме in situ (на месте). В этом случае применение так называемого внутриметодного комплексирования с использованием различных модификаций одного геофизического метода является лучшим решением.

Для исследования трансформации наведенных волновых полей с целью выявления опасных фильтрационно-деформационных процессов на рабочих участках

уступов карьера «Железный» (АО «Ковдорский ГОК») при тесном сотрудничестве со специалистами предприятия выполнены георадарные определения комплексом «Лоза-1В», оснащенного неэкранированными антеннами 50 и 100 МГц. На данном участке синхронно выполнены сейсмические исследования, сходные по подходу к решению одних и тех же задач, но разные по физической природе. При решении задач в области комплексирования волновых методов георадиолокация здесь играет роль мобильного и производительного метода, пригодного как для рекогносцировочных работ, так и подробной съемки [95]. Георадарные исследования выполнены с использованием двух методик — метод профилирования на постоянной базе и метод общей глубинной точки.

Анализ волновых радарограмм, полученных методом профилирования на постоянной базе антеннами 50 и 100 МГц, показал фактически идентичную картину распределения полученных отражений в подповерхностной структуре. На рис. 2.12 *а* в интервале профиля 100–200 м и глубине 28 м (15 м от поверхности) фиксируется большое количество гиперболических отражений, которые приурочены к находящимся на поверхности конструкциям. Вычисленные скорости V по теоретически рассчитанной гиперболе лежат в интервале 11–13,8 см/нс и интерпретируются как воздушные помехи. В правой части профиля на отметках длины профиля 340, 400 и 440 м прослеживаются возможные структурные нарушения. Значения скоростей по теоретически рассчитанной гиперболе лежат в интервале 5,6–9,13 см/нс, что косвенно может свидетельствовать о том, что данные отражения получены от структур находящихся в массиве скальных пород.

Применение процедур низкочастотной фильтрации для полученных данных (рис. 2.12 *б*) позволило избавиться от большого количества паразитных отражений и представить полученные данные в форме изменения амплитуды сигнала по глубине. Анализ волновых радарограмм выполненных антеннами 50 и 100 МГц показал повторяемую картину изменения амплитудной формы сигнала, где на глубине 8,5–11,5 м от поверхности происходит значительное затухание сигнала, которое может свидетельствовать о переходе из сухого/мерзлого во влагонасыщенное состояние.

Методом общей глубинной точки построен годограф (рис. 2.12 *в*) на ровной площадке, который соответствует 320 м профиля. На рис. 2.12 *г* представлено изменение скорости электромагнитной волны и диэлектрической проницаемости по глубине на основе обработки годографа. Значение диэлектрической проницаемости в приповерхностных слоях (до глубины 8,3 м) находятся на достаточно низком уровне — ε равно от 4 до 5 ед., что может быть обусловлено мерзлым состоянием массива пород. Скорость электромагнитной волны здесь составляет V = 6,59–7,47 см/нс. Анализ изменения скорости электромагнитной волны и диэлектрической проницаемости показал значительное падение скорости (почти в 1,5 раза) на глубине 9,5 м — с 7,47 до 4,92 см/нс, что может свидетельствовать о наличии водонасыщения на этих глубинах (рис. 2.12 *г*). Таким образом, значительное падение скорости электромагнитной волны с глубины 8,3 до глубины 9,5 м может считаться условной зоной перехода грунтов от сухого до влагонасыщенного.

Таким образом, внутриметодное комплексирование с использованием различных модификаций одного геофизического метода (георадиолокации), а именно метода профилирования на постоянной базе и метода общей глубинной точки, позволило выявить и идентифицировать зоны повышенного водонасыщения и структурных нарушений в массиве пород. Данные синхронных опорных наблюдений

сейсмопрофилирования дали дополнительное обоснование для достоверной интерпретации данных георадиолокации при решении такого рода задач.

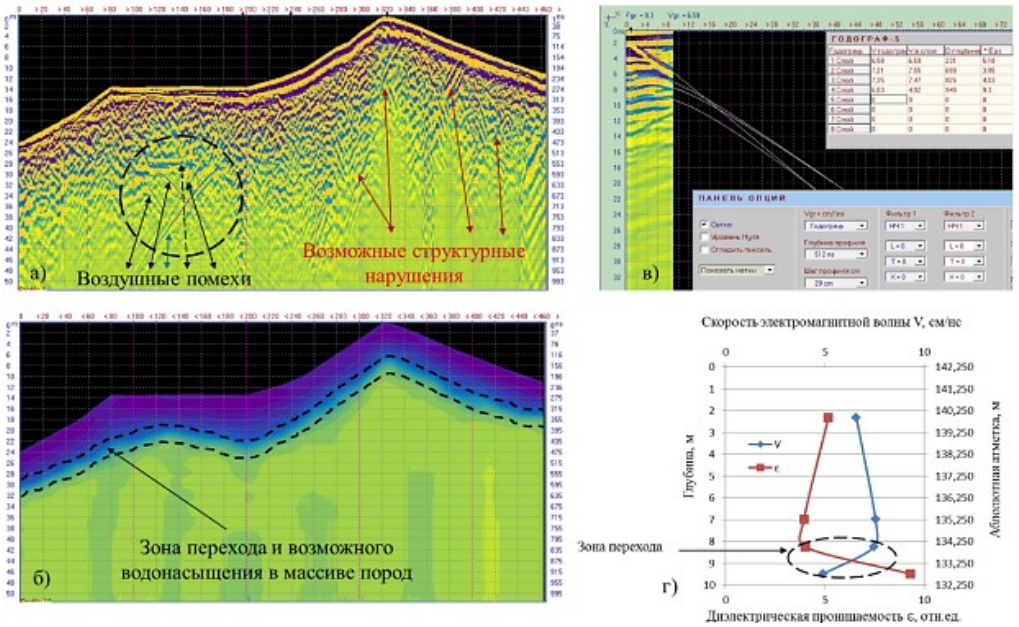


Рис. 2.12. Внутриметодное комплексирование: метод профилирования на постоянной базе: *а* — волновая форма сигнала; *б* — низкочастотная фильтрация, метод общей глубинной точки; *в* — годограф; *г* — изменение скорости электромагнитной волны и диэлектрической проницаемости по глубине

2.2.4. Методический подход к идентификации зон повышенного водонасыщения и структурных неоднородностей

Одними из основных взаимообусловленных факторов, влияющих на устойчивость ярусных (уступных) горнотехнических сооружений, являются, с одной стороны, размеры структурных неоднородностей и нарушенной зоны яруса, зависящие как от природных, так и от техногенных факторов, с другой стороны, уровень грунтовых вод, изменяющийся во времени в зависимости от сезона.

В связи с важностью совместного учета перечисленных факторов предложен комплексный методический подход исследования водонасыщенности и структурной неоднородности ярусного сооружения, заключающийся в выполнении периодических, сезонно синхронизированных геофизических исследований методами сейсмического профилирования и георадарного зондирования и позволяющий определять зоны повышенного водонасыщения и нарушенности прибортового массива. Методический подход реализован на конкретном объекте с получением синхронизированных результатов исследований (рис. 2.13).

Комплексный методический подход исследования водонасыщенности и структурной нарушенности пород ярусного горнотехнического сооружения базируется на периодических, сезонно-синхронизированных геофизических исследованиях: методе сейсмического профилирования и методе георадарного зондирования.

Результатом исследований являются идентификация и локализация зон повышенного водонасыщения и нарушенности ярусного (уступного) горнотехнического сооружения.

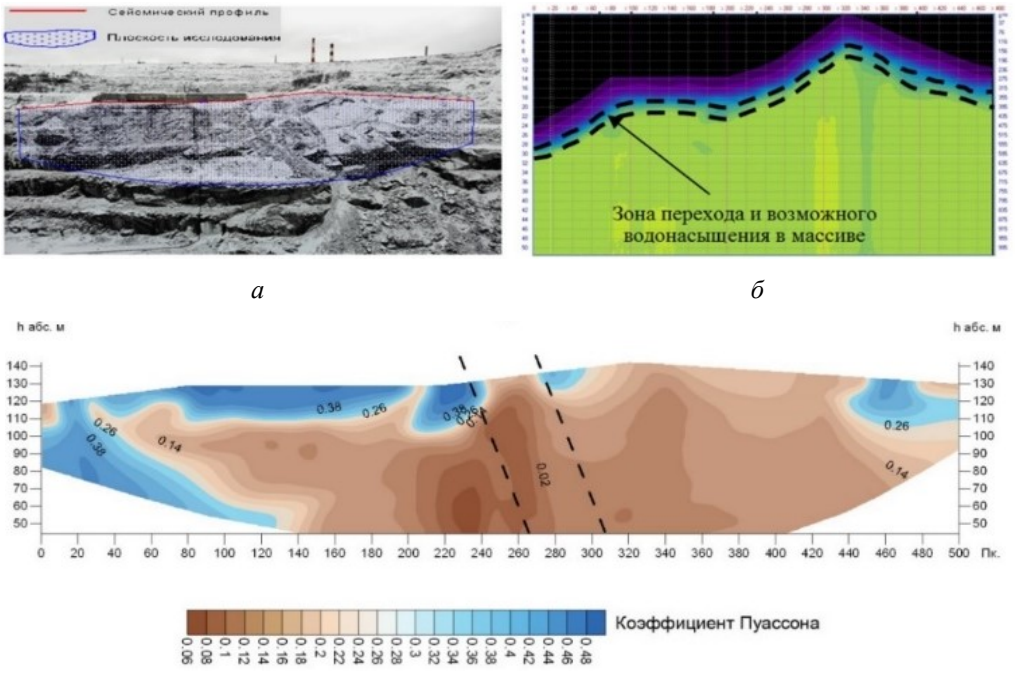


Рис. 2.13. Объект и результаты исследований с применением методического подхода: *а* — объект исследования (красная линия — георадарный и сейсмический профиль, синяя — граница зоны исследования); *б* — интерпретированная радарограмма; *в* — интерпретированная сейсмограмма

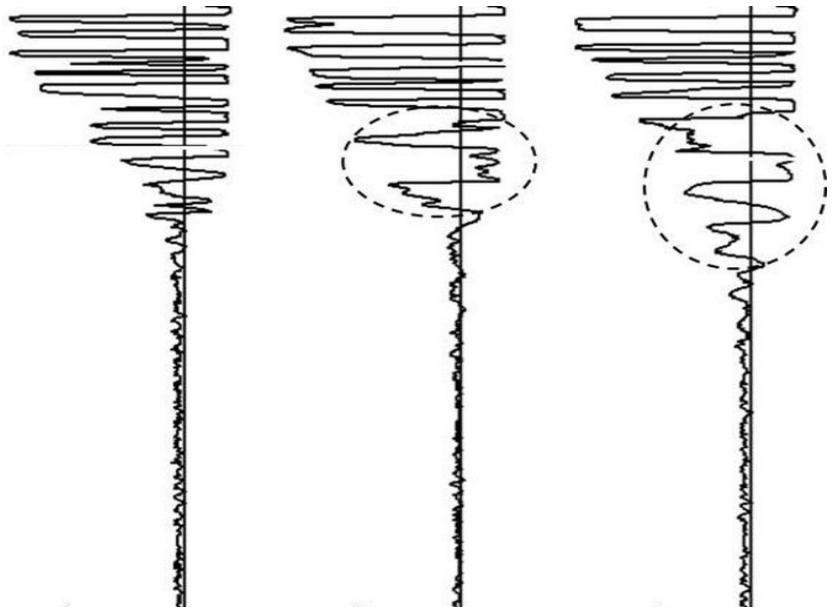
Предложенный методический подход позволяет оценивать влияние основных изменяющихся во времени влияющих факторов (водонасыщение, природная и техногенная структурная неоднородность и нарушенность, аномалии физических свойств пород) на устойчивость ярусов (уступов) и предоставляет научно-техническую основу для разработки инженерных мероприятий по повышению промышленной и экологической безопасности контролируемого объекта.

2.2.5. Георадарные зондирования горнотехнических объектов: комплексный анализ динамических и кинематических характеристик волнового поля

Обработка данных георадарного зондирования в классическом исполнении заключается в применении набора процедур, позволяющих избавиться от различного рода помех и искажений на волновом поле радарограммы. К таким процедурам, в частности, относится удаление постоянной компоненты сигнала с коррекцией амплитуд, что позволяет более контрастно выделить отражения от границ, имеющих различия в диэлектрической проницаемости. Использование процедур предсказывающей деконволюции и полосовой фильтрации позволяет увеличить разрешающую способность за счет сжатия отраженных сигналов. На этапе интерпретации происходит детальный анализ амплитуд отраженных сигналов и его фазовых характеристик, сопоставление осей синфазности выделенных на радарограмме участков, которые отличаются друг от друга характером волновой картины.

Одним из подходов по выявлению водонасыщенных зон в грунтовых сооружениях является анализ фазовых и амплитудных значений сигнала, где, как правило, при прохождении сигнала через водонасыщенную зону

меняется амплитуда, которая становится более растянутой, при этом фаза сигнала не меняется. На рис. 2.14 *а* представлена волновая форма сигнала на участке для сухих грунтов, амплитуда сигнала постепенно затухает, значение диэлектрической проницаемости изменяется незначительно. Наличие водонасыщенной зоны в грунтовом массиве отражается увеличением диэлектрической проницаемости, что, в свою очередь, отражается на волновой форме сигнала (на рис. 2.14 *б*, *в* выделена пунктиром): период сигнала становится шире, фаза сигнала не меняется, амплитуда растянута по времени.



а *б* *в*

Рис. 2.14. Волновая форма георадарного сигнала: *а* — для сухих грунтов; *б*, *в* — для водонасыщенных грунтов различной степени

Для преобразования полученных волновых разрезов в субгеологические (с определением глубины выявленных неоднородностей и границ зон) применены три основных способа: 1) годограф дифрагированной волны, в основе которого лежит способ гипербол (формирование волн гиперболической формы от локальных единичных внутриструктурных объектов; 2) годограф отраженной волны, в основе которого лежит способ определения времени задержки сигнала при поэтапном разнесении антенны-излучателя и антенны-приемника; 3) тарирование по данным геологического бурения (колонки скважин) — для исследования внутренней структуры или тарирование по пьезометрическим измерениям уровня грунтовых вод — для локализации водонасыщенных зон [78, 95, 102, 103].

Для решения поставленных задач на опытном участке ограждающей дамбы хвостохранилища (Хибинский горнорудный район) выполнено профилирование на постоянной базе георадарным комплексом «Лоза-1В» с антеннами 100, 200 и 300 МГц, с шагом зондирования 1, 0,5 и 0,25 м соответственно. Подход с последовательным увеличением частоты зондирования позволил повысить детальность и качество получаемой информации. Волновые картины радарограмм более детальны за счет

улучшения разрешающей способности и уменьшения шага обследования, однако при этом страдает такой важный параметр, как глубина проникновения георадарного сигнала. Так, например, ввиду сильного затухания сигнала, информативная часть отраженного сигнала при использовании антенн 300 МГц составила 4–5 м, а для антенн 200 МГц — 5–8 м, что недостаточно для данного вида обследования. Использование такого подхода на протяженных участках целесообразно проводить для уточнения или в качестве тарирования результатов в окрестностях пьезометров. В работе рассмотрены результаты профилирования на постоянной базе (130 см) с использованием передающей и приемной антенн 100 МГц и шагом зондирования 1 м. По годографу дифрагированной волны вычислено единичное значение диэлектрической проницаемости в слое до пересеченного локального объекта. Произведена тарировка значений диэлектрической проницаемости до уровня грунтовых вод по пьезометрическим данным.

Для вычисления диэлектрической проницаемости в исследуемых точках использовался способ общей глубинной точки с построением годографа отраженной волны. Для получения годографа приемник и передатчик устанавливались параллельно на расстоянии 100 см друг от друга на рулетку, далее выполнялись измерения посредством последовательного разноса антенн по 10 см в разные стороны. Этот способ является основным для определения истинной глубины до объекта и определения скорости распространения электромагнитной волны, а также единственным при отсутствии на радарограмме дифрагирующих объектов и какой-либо иной возможности получения сведений о скоростях распространения волн в среде. По двум измерениям задержек сигнала на расстояниях между приемником и передатчиком по уравнению годографа определяется мощность слоя, скорость электромагнитной волны в слое и его диэлектрическая проницаемость.

В случае плавного изменения диэлектрической проницаемости грунтов, что особенно проявляется в весенний период активного снеготаяния, выделение водонасыщенных зон крайне затруднительно. Для решения этой задачи использовалось применение современного метода обработки георадарного сигнала, в основе которого лежит анализ поля обратного рассеяния, что позволило получить количественные данные на исследуемом участке, а именно значение диэлектрической проницаемости по профилю и его скоростные характеристики, которые непосредственно отражают структурные особенности обследуемых грунтов [102].

Таким образом, в работе использован методический подход, основанный на комплексном анализе характеристик сигнала волнового поля (амплитуда, фаза, период), диэлектрической проницаемости и скорости электромагнитной волны, который позволяет существенно повысить точность определения и локализации водонасыщенных зон по данным георадарного зондирования. В подходе подразумевается использование всех доступных вышеперечисленных способов определения значений диэлектрической проницаемости (имеющих непосредственную связь с водонасыщением), а именно применение комплексирования профилированием на постоянной базе и общей глубинной точки с одновременной синхронизацией измерений уровня грунтовых вод в пьезометре. Комплексный анализ полученных волновых характеристик сигнала (амплитуда, фаза, период), а также скоростных характеристик разреза, полученных по данным вычисленных значений диэлектрической проницаемости, позволяет определить подходы, обеспечивающие локализацию зон и участков водонасыщенных грунтов с требуемой детальностью и обосновать их интерпретацию с большей степенью достоверности.

Для достижения поставленной цели были взяты результаты георадарного зондирования горнотехнических объектов, расположенных на территориях эксплуатируемых Ковдорского, Печенгского и Хибинских месторождений, с использованием георадарного комплекса «Лоза-1В», оснащенного неэкранированными антеннами с центральной частотой зондирования 100 МГц. Предварительная интерпретация и анализ результатов, прежде всего в части изменения наведенного волнового поля, позволили выделить основные признаки выявления особенностей внутренней структуры и водонасыщенных зон в теле насыпных сооружений и выявить подходы к их локализации. Выявлено, что зона водонасыщенности грунтов воспринимается георадарным сигналом как переход в более высокую по диэлектрической проницаемости среду и отражается максимумом амплитуды сигнала. Однако границы зон водонасыщения не являются резко выраженными, а плавно изменяются в зависимости от степени водонасыщения от естественного ненасыщенного влагой состояния до полного насыщения грунтов. Ниже идентифицируемой зоны водонасыщения заметно сглаживается структура массива грунтов, где из-за возрастания затухания резко падает амплитуда отраженного сигнала, что проявляется в заметном уменьшении контрастности волновой картины радарограммы.

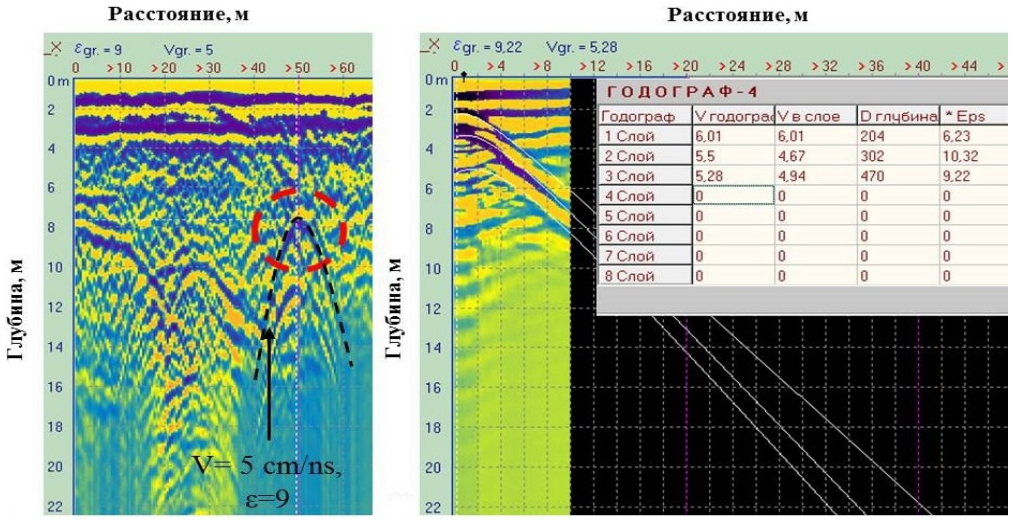
На наблюдательном полигоне насыпной дамбы хвостохранилища обогатительной фабрики горнодобывающего предприятия, расположенного в Хибинском горнорудном районе, исследованы особенности наведенного георадаром электромагнитного поля, отражающие изменчивость внутренней структуры дамбы и водонасыщенности грунтов. Результаты получены профилированием на постоянной базе с шагом 1 м. Георадарное обследование выполнено по нижней берме дамбы хвостохранилища.

Определение диэлектрической проницаемости грунтов и скорости распространения электромагнитных волн в теле дамбы на первом этапе интерпретации выполнено по годографу дифрагированной волны. На радарограмме выделяется участок (рис. 2.15 *а*), где на 50-м м профиля обнаружено дифрагированное отражение. В специализированной программе для обработки георадарных данных «Крот» выполнен анализ волн дифрагированного отражения [78]. На оси синфазности дифрагированного отражения накладывалась гипербола, посредством которой рассчитывалась скорость в вышележащем грунте и его диэлектрическая проницаемость [95, 102]. Полученные расчетные значения скорости электромагнитных вол и диэлектрической проницаемости этих грунтов до дифрагирующего объекта составили $V = 5$ см/нс, $\varepsilon = 9$ соответственно (рис. 2.15 *а*). Эти значения величин соответствуют справочным показателям для насыпных горнотехнических сооружений Хибинского горнорудного региона и приняты за основу для преобразования шкалы времени на радарограммах в глубину [100].

По резкому изменению амплитуды сигнала при значении диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 9$ локализован уровень грунтовых вод по глубине в окрестности пьезометров ПЗ-23 — 3 м, ПЗ-24 — 2 м, ПЗ-25 — 0,95 м. Такой подход приемлем, если интерпретируемые слои грунтов находятся выше годографа дифрагированной волны, в зоне интерпретации, где определена скорость распространения волн в среде, однако она может меняться по профилю и вносить значительные погрешности.

Для тарирования результатов и определения показателей скорости в приповерхностном слое на втором этапе интерпретации в непосредственной близости пьезометра ПЗ-23 (260 м профиля), используя способ отраженных волн, построен годограф (рис. 2.15 *б*), отражающий зависимость времени прихода электромагнитной волны от координат точек наблюдения. Данный методический подход, в основе которого лежит способ определения времени задержки сигнала при поэтапном разнесении антенны-излучателя и антенны-приемника, применим

на относительно ровных участках с горизонтальными границами отражающих горизонтов в нижележащих грунтах. Определено, что значение диэлектрической проницаемости грунтов в приповерхностном слое (до глубины 2,04 м) находится на достаточно низком уровне ε = 6,23 ед., что может быть обусловлено их плотным состоянием. Скорость электромагнитной волны здесь составляет V = 6,01 см/нс. Анализ изменения скорости электромагнитной волны и диэлектрической проницаемости показал значительное падение скорости (почти в 1,5 раза) на глубине 3,02 м, с 6,01 до 4,67 см/нс, что может свидетельствовать о наличии водонасыщения грунтов на этой глубине. Значение уровня воды по данным пьезометра ПЗ-23 на момент измерений составило 3,1 м. Таким образом, данный методический подход позволяет максимально точно определить уровень грунтовых вод в грунтах дамбы, где значительное падение скорости электромагнитной волны указывает на наличие водонасыщения грунтов. Среднее значение диэлектрической проницаемости до глубины 5 м составило ε = 8,6 ед. (с учетом значений вышележащих слоев, см. табл. на рис. 2.15 *б*), что фактически соответствует полученным данным на 50 м профиля по методу профилирования на постоянной базе путем анализа дифрагированной волны объекта ε = 9 ед. (рис. 2.15 *а*). Данный подход в значительной степени показывает на изменчивость значений диэлектрической проницаемости по глубине, такие резкие изменения могут вносить существенные погрешности в интерпретацию при использовании только годографа дифрагированной волны, которые, как правило, единичные на профиле, а то и вовсе отсутствуют.



а *б*

Рис. 2.15. Годограф: *а* — дифрагированной волны; *б* — отраженной волны по методу общей глубинной точки

Для реализации методического подхода с вычислением значения диэлектрической проницаемости по данным пьезометрических скважин на третьем этапе интерпретации произведена калибровка данных георадарного зондирования по трем пьезометрам дамбы: ПЗ-23 (рис. 2.16), ПЗ-24 и ПЗ-25. На каждом пьезометре произведены сравнение с показаниями георадарного зондирования и калибровка значений диэлектрической проницаемости по уровню грунтовых вод.

Принцип калибровки заключается в одновременном определении глубины уровня грунтовых вод в пьезометре и георадаром с последующим их сопоставлением. Затем с помощью компьютерной программы обработки георадарных данных,

итерационно изменяя значение диэлектрической проницаемости или скорости электромагнитной волны, выявленную границу уровня грунтовых вод на радарограмме совмещают с глубиной уровня грунтовых вод, определенной по пьезометрической скважине.

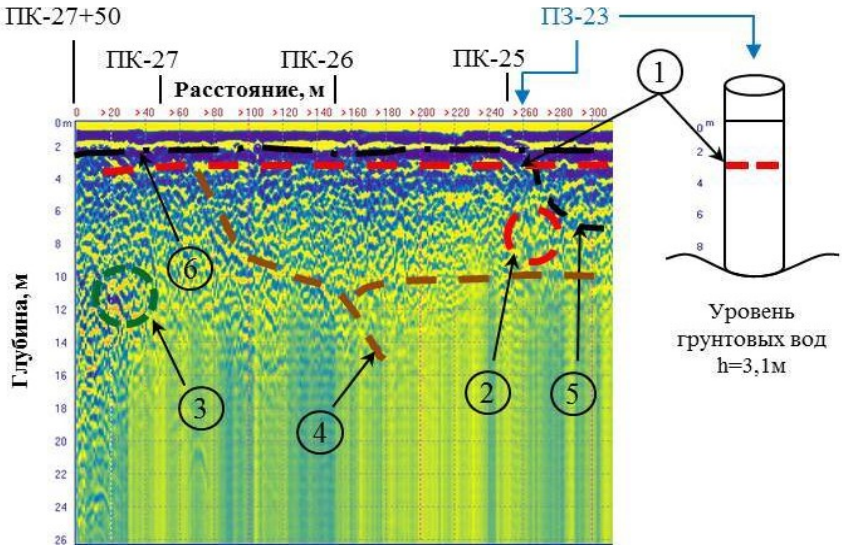


Рис. 2.16. Калибровка диэлектрической проницаемости по данным измерений установившегося уровня воды в пьезометре ПЗ-23

На рис. 2.16, который представляет собой фрагмент основной радарограммы, показан пример определения глубины уровня воды в теле дамбы посредством анализа волновой картины, полученной возле пьезометра ПЗ-23. Выделение уровня грунтовых вод было выполнено на основе резкого изменения амплитуды сигнала, вызванного наличием водоносного горизонта между грунтами различной степени влажности. Такая граница между водонасыщенным и влажными грунтами достаточно четко выделяется по всей длине радарограммы.

В результате калибровки определена диэлектрическая проницаемость грунтов до уровня грунтовых вод ε = 8,8 ед., что соответствует скорости прохождения волны V_{gr} = 5,06 см/нс. Глубина уровня воды в пьезометре ПЗ-23 по данным гидрогеологической службы — 3,1 м, положение зеркала вод на радарограмме — 3,1 м (вертикальная разрешающая способность — около 0,05 м, принятая точность — 0,1 м).

На заключительном этапе интерпретации с использованием комплексного анализа данных (рис. 2.17) установлено, что уровень грунтовых вод (*1*) колеблется в интервале глубин от 4 м в начале профиля (метка ПК-27+50) до 1,1 м на метке ПК-18+10 и в ключевых точках в окрестности пьезометров соответствует значениям на момент гидрогеологических измерений: ПЗ-23 — 3,1 м; ПЗ-24 — 2,1 м; ПЗ-25 — 1 м. Приповерхностная зона на глубину до 2-х м характеризуется равномерной волновой картиной, которая свидетельствует о наличии плотных грунтов без каких-либо аномалий и представляет собой моренный грунт. На профиле выделяются две предположительные зоны (*2*) возможного водонасыщения (интервалы 255–275 и 800–880 м), которые характеризуются наличием сильных низкочастотных откликов, которые, как правило, напрямую связаны с водонасыщенностью грунтов. В начале профиля (метка ПК-27+25), на глубине 10 м, выявлен контрастный локальный отклик (*3*), который вызван наличием трубы или иным металлическим объектом в теле дамбы. Выявлена геологическая граница грунтов (*4*), отличающихся по своим диэлектрическим свойствам. На протяжении всего профиля на глубине 2 м четко

идентифицируется граница уплотненных грунтов, представляющих собой моренные отложения (*6*). На интервале профиля 260–880 м выделяется область с типичной записью слоистых техногенных грунтов (*5*).

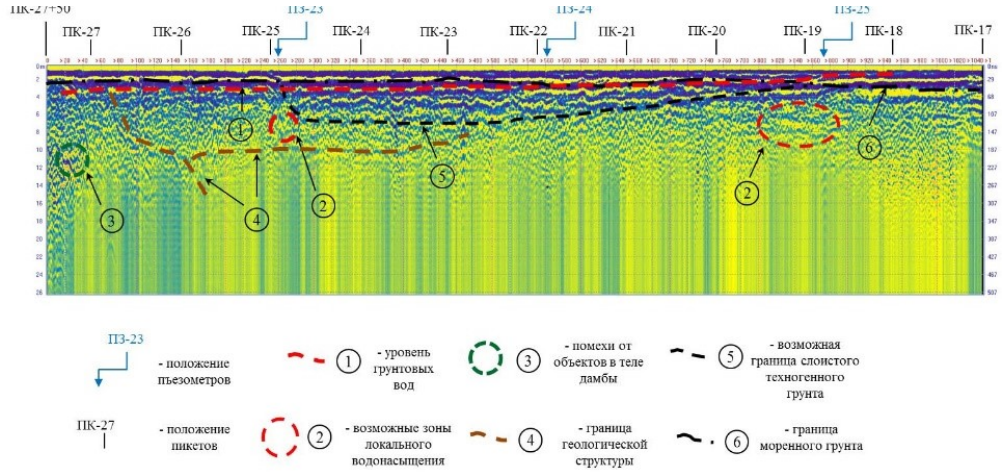


Рис. 2.17. Интерпретированная радарограмма георадарного зондирования дамбы хвостохранилища, расположенного в Хибинском горнорудном районе

Таким образом, применение комплексирования профилированием на постоянной базе и общей глубинной точки с одновременной синхронизацией измерений уровня грунтовых вод в пьезометрах позволило выявить и локализовать участки с зонами повышенного водонасыщения грунта и предоставило возможность для более надежной, достоверной и детализированной интерпретации георадарных данных при обследовании горнотехнических объектов — насыпных грунтовых дамб хвостохранилища.

Такой поэтапный подход к съемке и интерпретации данных георадарного зондирования реализован на наблюдательном полигоне насыпной грунтовой плотины водохранилища в Печенгском горнорудном районе, что позволило достоверно определить структуру насыпного сооружения с локализацией зон водонасыщения (рис. 2.18).

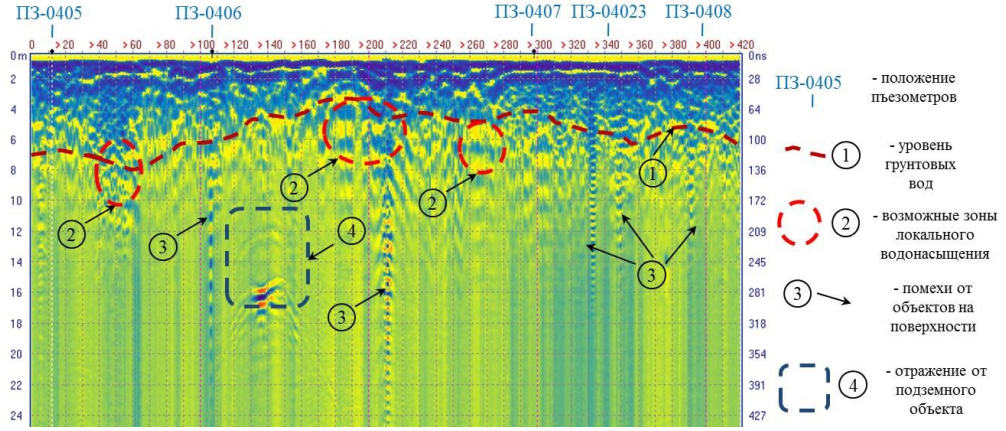


Рис. 2.18. Интерпретированная радарограмма плотины водохранилища, расположенного на территории Печенгского горнорудного региона

Сопоставительный анализ уровня грунтовых вод с данными пьезометрических скважин, указанных на рис. 2.18, показал его изменчивость и варьирование по глубине

от 4 до 8 м. В точках пересечения георадаром пьезометров их значения соответствуют выделенному уровню грунтовых вод по данным волновой картины на радарограмме. Равномерная волновая картина до глубины 4–6 м свидетельствует о наличии плотных грунтов, без каких-либо аномалий. На профиле выделяются три предположительные зоны (*2*) возможного водонасыщения: интервалы 40–60, 180–220 и 250–275 м, которые характеризуются наличием сильных низкочастотных помех, которые, как правило, напрямую связаны с водонасыщенностью грунтов. По всей длине профиля встречаются контрастные локальные помехи (*3*), которые приурочены к объектам на поверхности, представляющим из себя металлосодержащие объекты. На интервале 140 м профиля локализуется внутриструктурный объект (*4*), ориентировочной высотой 3,5 м, имеющий верхнюю отметку 12 и нижнюю — 15,5 м от поверхности.

Для насыпной дамбы хвостохранилища обогатительной фабрики горнодобывающего предприятия, расположенного в Ковдорском горнорудном районе, выполнен анализ волнового поля георадарного зондирования, посредством которого определена внутренняя структура грунтов и оконтурены зоны возможного повышенного водонасыщения (рис. 2.19, 2.20). Мониторинговые георадарные зондирования позволили выявить особенности изменения волнового поля в период сезонных климатических изменений. На рис. 2.19 представлена радарограмма, выполненная в летний период измерений. Картина распределения волнового поля характеризуется отсутствием значительных фоновых помех и контрастными границами между породами и грунтами с различной диэлектрической проницаемостью.

Отсутствие пьезометрических скважин и проявлений в виде годографа дифрагированной волны от внутриструктурных объектов в значительной степени затрудняют интерпретацию. Пересчет временных разрезов в субгеологические (с определением глубины) выполнен по данным построенного годографа отраженной волны. Локализация водонасыщенных зон выполнена посредством анализа амплитуд отраженных сигналов и его фазовых характеристик с использованием методического подхода, описанного выше для Хибинского горнорудного региона (см. также рис. 2.15–2.17).

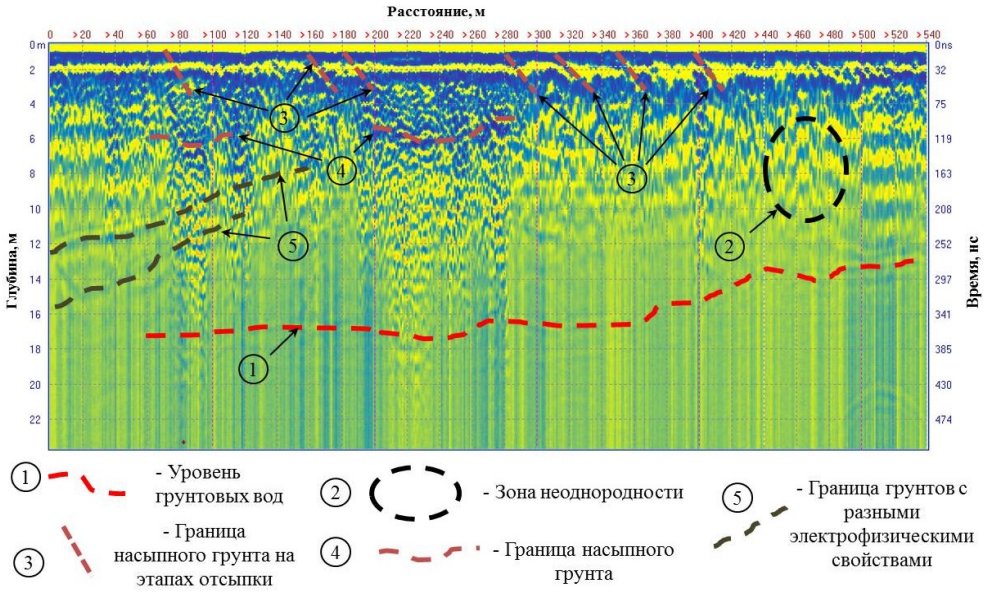


Рис. 2.19. Интерпретированная радарограмма георадарного зондирования дамбы хвостохранилища в Ковдорском горнорудном районе (летний период)

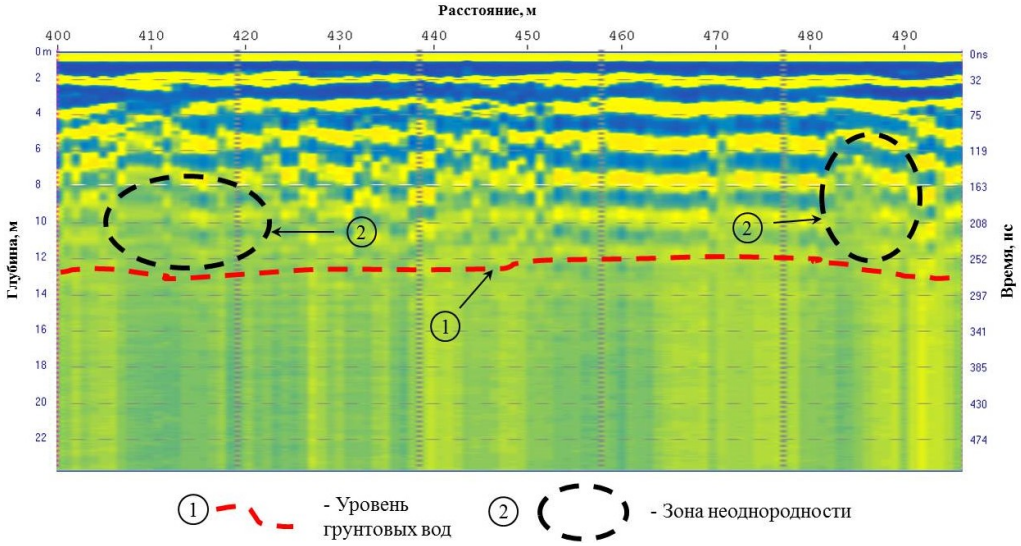


Рис. 2.20. Фрагмент интерпретированной радарограммы георадарного зондирования дамбы хвостохранилища в Ковдорском горнорудном районе (весенний период)

На профиле идентифицируется зона неоднородности в интервале 445–495 м его длины. По всей длине профиля, в приповерхностной зоне до глубины 4 м, фиксируются изменения волнового поля, проявляющиеся в виде наклонных границ (характерных при отсыпке песчаным грунтом), которые могут являться границей грунтов, образованных на этапе отсыпки ярусов дамбы различным грунтом. Выявлены два участка с контрастной горизонтальной границей (интервалы 60–110 и 190–280 м длины профиля), которая является границей насыпного грунта. В начале профиля (интервал 0–140 м) выявлены две наклонные, практически параллельные контрастные границы, которые могут быть связаны как с внутренним строением, так и с использованием грунтов с различными электрофизическими свойствами в процессе наращивания дамбы на данном участке. В интервале 70–540 м профиля прослеживается четкая контрастная граница, на глубине 17 м в начале, и с последующим подъемом до 13 м, в конце профиля, которая интерпретируется как уровень грунтовых вод.

Использование предложенных подходов к съемке и интерпретации данных георадарного зондирования, которые хорошо зарекомендовали себя на различных горнотехнических объектах, в некоторых случаях не применимы, получаемые данные не поддаются классической обработке и интерпретации. Отсутствие пьезометрических скважин и явных контрастных границ для применения метода общей глубинной точки, вследствие плавного изменения диэлектрической проницаемости, существенно затрудняют обработку таких данных. Но при этом на радарограммах отображается большое количество шумов и низкочастотных помех, что связано в первую очередь с водонасыщением грунтовых пород и особенно выраженно проявляется в период активного весеннего снеготаяния.

В этом случае одним из подходов для решения такого рода задач является использование современных методов обработки георадарного сигнала, в основе которых лежит анализ поля обратного рассеяния, что позволяет получать количественные данные на исследуемом участке, а именно: значения диэлектрической проницаемости по профилю и скоростные характеристики [102, 103].

Сущность подхода заключается в анализе амплитуд отраженных сигналов, полученных при георадарном зондировании, где в результате преобразований, основанных на эффекте дифракции, формируется массив данных со значениями диэлектрической проницаемости. Применение такого подхода позволяет производить построение разрезов как в случае наличия отражающих границ, так и в случае плавного изменения диэлектрической проницаемости по профилю наблюдений [102]. Выполненным ранее на этом горнотехническом объекте комплексированием георадарного и сейсмического зондирования в целях уточнения границ вариаций контрольных геофизических показателей при локализации водонасыщенных зон установлены диапазоны скорости электромагнитной волны при переходе из сухих плотных грунтов в водонасыщенные [103].

На рис. 2.20 представлен фрагмент интерпретированной радарограммы (в классической обработке отраженных сигналов: анализ амплитуды, фазы, периода), выполненного на нижнем ярусе дамбы хвостохранилища, в период активного весеннего снеготаяния. На профиле фиксируются зоны неоднородности в интервалах 405–422 и 481–491 м его длины. По всей длине профиля, на глубине 4–10 м, фиксируется большое количество низкочастотных помех, которые могут свидетельствовать о возможном увлажнении грунтов в этом интервале. Граница уровня воды слабоконтрастная и прерывиста по всему профилю. Таким образом, в период активного насыщения водой грунтов дамбы волновая картина слабо информативна, отсутствуют контрастные границы, происходит сильное затухание сигнала, что, в свою очередь, значительно уменьшает полезную глубину зондирования.

Количественный анализ участка радарограммы с применением технологии поля обратного рассеяния (для данных, представленных на рис. 2.20) наглядно показывает изменение распределения скоростных показателей в грунтах дамбы, а также изменения их диэлектрической проницаемости. По результатам анализа было установлено, что значения скорости электромагнитной волны в приповерхностной части разреза на глубину 2,5 м лежит в интервале V = 8,32–9,05 см/нс (ε = 11–13 ед.), что интерпретируется как увлажненные плотные грунты (рис. 2.21). Насыщение водой приповерхностных грунтов является следствием сезонного изменения, вследствие перехода снежной массы на дневной поверхности, а также фракций льда в теле дамы, в воду. Анализ значений скорости электромагнитной волны и диэлектрической проницаемости грунтов в интервале глубин 2,5–12 м показал средние значения этих величин V = 9,05–10 см/нс (ε = 9–11 ед.), что соответствует плотным грунтам естественной влажности. На наличие водонасыщенных грунтов в теле дамбы указывает резкий рост значений диэлектрической проницаемости (до ε = 15) и, как следствие, значительное падение скорости электромагнитной волны до V = 7,75 см/нс. Выделяются две зоны с повышенным водонасыщением (интервал профиля 408–420 м, глубина 6–13 м и интервал 480–492 м, глубина 5–12 м), в которых количественные показатели скорости электромагнитной волны, а также значения диэлектрической проницаемости достигают предельных величин, что требует дальнейших наблюдений посредством постоянного мониторинга состояния дамбы хвостохранилища.

Таким образом, комплексный подход к выделению возможных зон повышенного водонасыщения посредством анализа характеристик волнового поля существенно повысил качество интерпретации полученных данных. Накопленный опыт георадарных исследований на различных горнотехнических объектах горного производства Кольского региона, в том числе в комплексе с сейсмическим методом, позволил более надежно выполнить категорирование грунтов по степени их водонасыщения [78, 102, 103].

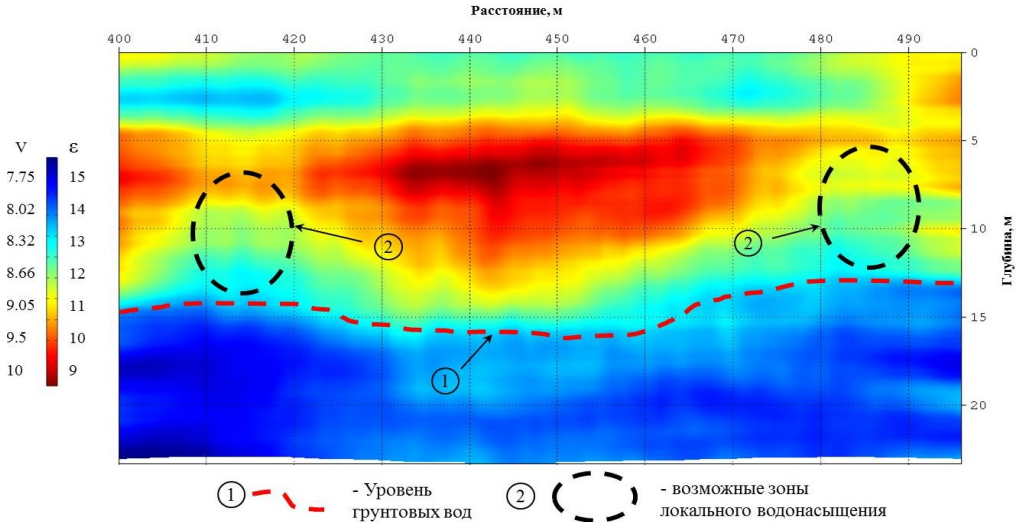


Рис. 2.21. Фрагмент интерпретированной радарограммы георадарного зондирования дамбы хвостохранилища в Ковдорском горнорудном районе

Предварительная интерпретация волновых картин радарограмм по выполненным георадарным зондированиям горнотехнических объектов, расположенных в Ковдорском, Печенском и Хибинском горнорудных регионах позволила выделить основные признаки выявления водонасыщенных зон грунтов в теле насыпных сооружений и выявить подходы к их локализации. Зона водонасыщенности грунтов воспринимается георадарным сигналом как переход в более высокую по диэлектрической проницаемости среду и отражается максимумом амплитуды сигнала, период сигнала становиться шире, фаза сигнала не меняется, амплитуда растянута по времени. Границы зон водонасыщения не всегда являются резко выраженными, а плавно изменяются в зависимости от степени водонасыщения от естественного ненасыщенного влагой состояния до полного насыщения грунтов. Ниже идентифицируемой зоны водонасыщения заметно сглаживается структура массива грунтов, где из-за возрастания затухания резко падает амплитуда сигнала, что проявляется в заметном уменьшении контрастности волновой картины радарограммы.

Применение методического подхода, основанного на комплексировании результатов по способу профилирования на постоянной базе и по способу общей глубинной точки с одновременной синхронизацией с измерениями уровня грунтовых вод в имеющихся пьезометрах позволило более достоверно и детально идентифицировать и локализовать уровень грунтовых вод и зоны повышенного водонасыщения в грунтах насыпной дамбы хвостохранилища горнодобывающего предприятия. Кроме того, примененный подход дополнительно дает возможность выявлять структурные аномалии и зоны водонасыщенности при отсутствии явных признаков присутствия воды и отсутствии контрастных границ на волновом поле с плавным изменением значений диэлектрической проницаемости.

2.2.6. Мультимасштабность в георадарных обследованиях объектов складирования отходов

Мультимасштабность как переход от большего к частному в георадарных обследованиях проявляется в выборе и использовании различного вида оборудования и методов съемки. Для оборудования это рациональный выбор центральной частоты антенны, которая в свою очередь непосредственно связана с разрешающей способностью и глубиной исследований. Разрешающей способностью при георадарных обследованиях

является минимальное расстояние по глубине, на котором могут быть различимы два отражающих объекта или их детали. Разрешающая способность определяется длиной волны, которая прямо пропорциональна скорости и обратно пропорциональна частоте электромагнитных волн в массиве пород. При понижении частоты уменьшается разрешающая способность, но увеличивается глубинность исследований. Например, для скальных пород глубинность зондирования антеннами 50–100 МГц составляет в среднем 50–30 м с разрешающей способностью 0,5–0,25 м, а для антенн 500–800 МГц разрешающая способность составит 0,1–0,05 м при глубине 15–5 м. Технические характеристики антенн георадарных систем представлены в табл. 2.3, максимальная глубина обследования зависит от типов обследуемых пород/грунтов [78].

Таблица 2.3

Технические характеристики антенн георадарных систем

Частота антенны, МГц	10	50	100	200	300	500	800
Тип волны	Короткие	Ультракороткие					
Диапазон	Декаметровые	Метровые				Дециметровые	
Длина волны, м	30	6	3	1,5	1	0,6	0,375
Разрешающая способность, м	0,6	0,2	0,1	0,1	0,05	0,04	0,02
Максимальная глубина обследования, м	250	80	35	30	25	20	10

Основными методами съемки являются профилирование на постоянной базе с шагом от сантиметра до метра в зависимости от типа оборудования и поставленных задач, а также зондирование как метод общей глубинной точки или метод отраженных волн, который применим для георадаров с изменяемым расстоянием между передающей и приемной антеннами. Таким образом, имея в своем распоряжении только антенны, где приемник и передатчик находятся в едином корпусе, возможно проведение только профилирования, в случае применения независимых антенн для излучения и приема возможно проведение точечного зондирования (по годографу отраженной волны). Использование на опытном участке антенн с частотой от 100 до 300 МГц, уменьшая глубинность, но увеличивая разрешающую способность с уменьшением шага обследования и методов съемки, можно получать более детальные геофизические данные.

В целях выявления опасных фильтрационных процессов на опытном участке объекта складирования отходов минерального сырья в Хибинском рудном районе выполнено георадарное обследование с применением георадарного комплекса «Лоза-1В», оснащенного неэкранированными антеннами 100–300 МГц. Георадарное обследование разделительной дамбы хвостохранилища выполнено в два цикла. Для антенн 100 МГц глубина проникновения сигнала георадара составляла 512 нс, что соответствует ориентировочной глубине 25 м (шаг измерений 1 м). В окрестности пьезометров ПЗ-23 и ПЗ-25 выполнено обследование антеннами 200 МГЦ с шагом 0,5 и 300 МГц с шагом 0,25 м, с глубиной проникновения сигнала георадара 256 нс, что соответствует ориентировочной глубине 13 м.

Первый цикл измерений представлен на рис. 2.22. Уровень грунтовых вод (*1*) колеблется в интервале глубин от 3,8 м в начале профиля (метка ПК-27+50) до 1,4 м на метке ПК-18+10 и в окрестности пьезометров соответствует значениям измерений уровня воды в них. Приповерхностная зона до глубины 2 м представляет собой равномерную волновую картину, которая свидетельствует о наличии плотных грунтов без наличия каких-либо аномалий и представляет собой моренный грунт. На профиле выделяются две предположительные зоны (*2*) возможного водонасыщения 255–275 и 790–850 м, которые характеризуются наличием сильных низкочастотных

помех, которые, как правило, напрямую связаны с водонасыщенностью вмещающих пород. В начале профиля (меткаПК-27+25) на глубине 10 м выявлена контрастная локальная помеха (*3*), которая вызвана наличием трубы или металлическим мусором в теле дамбы. Выявлена возможная геологическая граница грунтов (*4*), отличающаяся по своим диэлектрическим свойствам. На протяжении всего профиля на глубине 2 м четко идентифицируется граница уплотненных грунтов, представляющих из себя моренные отложения (*6*). На интервале профиля 260–880 м выделяется область с типичной записью слоистых техногенных грунтов (*5*).

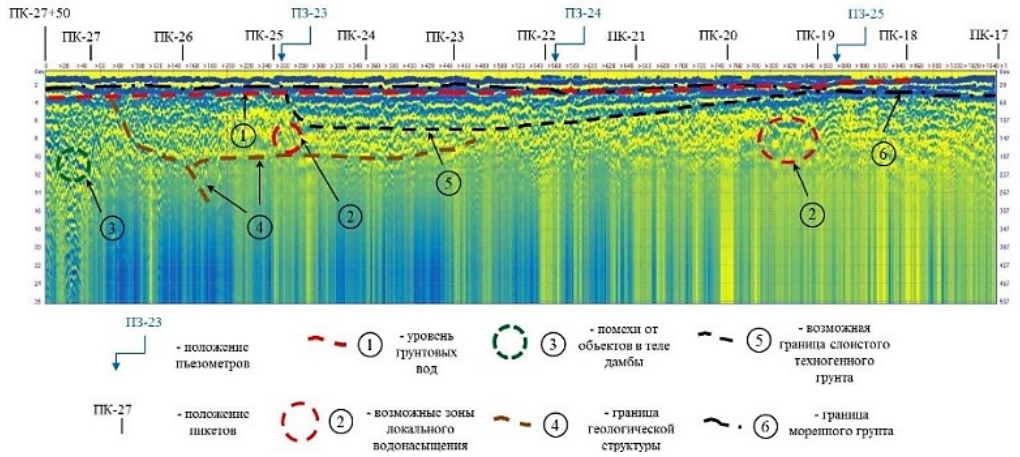


Рис. 2.22. Радарограмма георадарного обследования грунтов дамбы хвостохранилища, расположенного в Хибинском горнорудном районе (первый цикл)

В окрестности пьезометра ПЗ-23 выполнено обследование антеннами 200 МГц (рис. 2.23 *а*) с шагом 0,5 и 300 МГц (рис. 2.23 *б*) с шагом 0,25 м, с глубиной проникновения сигнала георадара 256 нс, что соответствует ориентировочной глубине 13 м. На профиле, полученном антенной 200 МГц (рис. 2.23 *а*) с шагом зондирования 0,5 м, уровень грунтовых вод (*1*) колеблется в интервале от 3,1 м в начале профиля ПК-25+50 до 3,8 м на отметке ПК-24. В ключевой точке в окрестности пьезометра соответствует его значению на момент измерений. На профиле выделяется предположительная зона (*2*) возможного водонасыщения 50–70 м, которая характеризуются наличием сильных низкочастотных помех, которые, как правило, напрямую связаны с водонасыщенностью вмещающих пород. Приповерхностная зона до глубины 2–2,7 м представляет собой равномерную волновую картину, которая свидетельствует о наличии плотных грунтов без наличия каких-либо аномалий и представляет собой моренный грунт (*6*). На протяжении всего профиля на глубине 4–6 м идентифицируется граница уплотненных грунтов с типичной записью для слоистых техногенных грунтов (*5*). На профиле, полученном антенной 300 МГц с шагом зондирования 0,25 м (рис. 2.23 *б*), получены схожие результаты с более детальной волновой картиной.

Второй цикл измерений представлен на рис. 2.24. Уровень грунтовых вод (*1*) колеблется в интервале от 3,9 м в начале профиля ПК-27+50 до 1,5 м на отметке ПК-18+10, в ключевых точках в окрестности пьезометров соответствует их значениям на момент измерений. Приповерхностная зона до глубины 2 м представляет собой равномерную волновую картину, которая свидетельствует о наличии плотных грунтов без наличия каких-либо аномалий и представляет собой моренный грунт. На профиле выделяются две предположительные зоны (*2*) возможного

водонасыщения 255–275 и 790–850 м, которые характеризуются наличием сильных низкочастотных помех, которые, как правило, напрямую связаны с водонасыщенностью вмещающих пород. В начале профиля ПК-27+25 на глубине 10 м выявлена контрастная локальная помеха (*3*), которая вызвана наличием трубы или металлическим мусором в теле дамбы. Выявлена возможная геологическая граница грунтов (*4*), отличающаяся по своим диэлектрическим свойствам. На протяжении всего профиля на глубине 2 м четко идентифицируется граница уплотненных грунтов, представляющих из себя моренные отложения (*6*). На интервале профиля 260–880 м выделяется область с типичной записью слоистых техногенных грунтов (*5*).

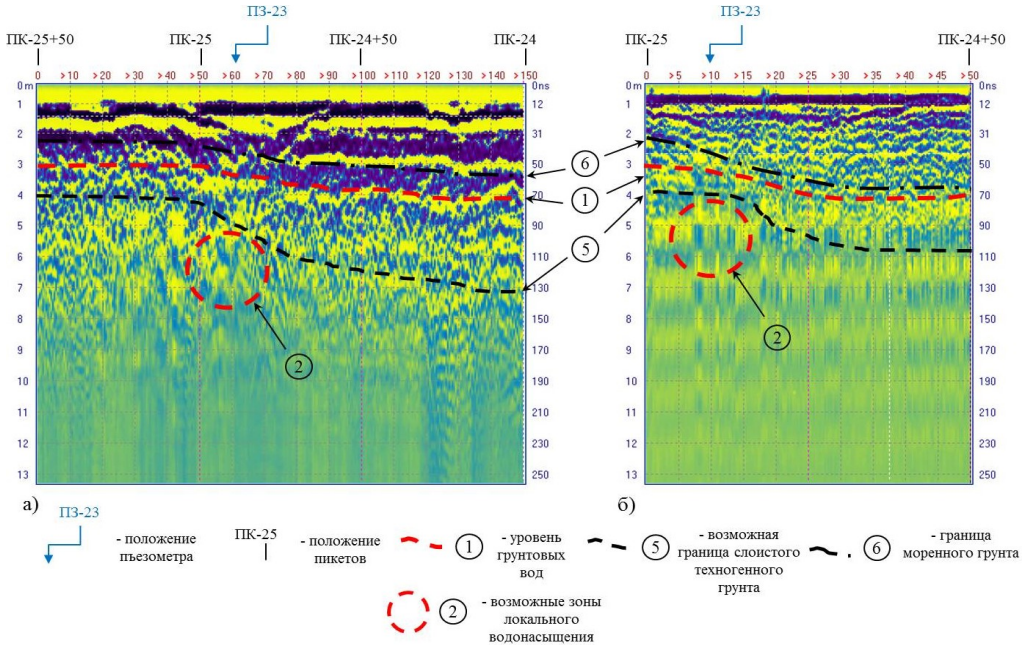


Рис. 2.23. Радарограмма георадарного обследования грунтов дамбы хвостохранилища, расположенного в Хибинском горнорудном районе (первый цикл) в окрестности ПЗ-23: *а* — антенна 200 МГц; *б* — антенна 300 МГц

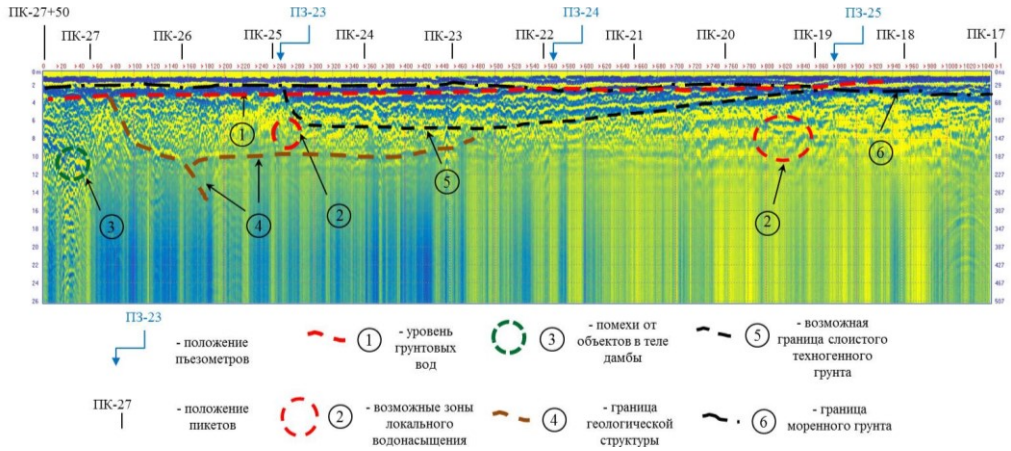


Рис. 2.24. Радарограмма георадарного обследования грунтов дамбы хвостохранилища, расположенного в Хибинском горнорудном районе (второй цикл)

В окрестности пьезометра ПЗ-25 выполнено обследование антеннами 200 МГц (рис. 2.25 *а*) с шагом 0,5 и 300 МГц (рис. 2.25 *б*) с шагом 0,25 м, с глубиной проникновения сигнала георадара 256 нс, что соответствует ориентировочной глубине 13 м. На профиле, полученном антенной 200 МГц (рис. 2.25 *а*) с шагом зондирования 0,5 м, уровень грунтовых вод (*1*) колеблется в интервале от 1,9 м в начале профиля ПК-19+50 до 1,5 м на отметке ПК-18+50. В ключевой точке в окрестности пьезометра соответствует его значению на момент измерений. На профиле выделяется предположительная зона (*2*) возможного водонасыщения 0–30 м, которая характеризуется наличием сильных низкочастотных помех, которые, как правило, напрямую связаны с водонасыщенностью вмещающих пород. Приповерхностная зона до глубины 2,2–2,7 м представляет собой равномерную волновую картину, которая свидетельствует о наличии плотных грунтов без наличия каких-либо аномалий и представляет собой моренный грунт (рис. 2.25 *б*). На протяжении всего профиля на глубине 3–4 м идентифицируется граница уплотненных грунтов с типичной записью для слоистых техногенных грунтов (*5*). На профиле, полученном антенной 300 МГц с шагом зондирования 0,25 м (рис. 2.25 *б*), получены схожие результаты с более детальной волновой картиной.

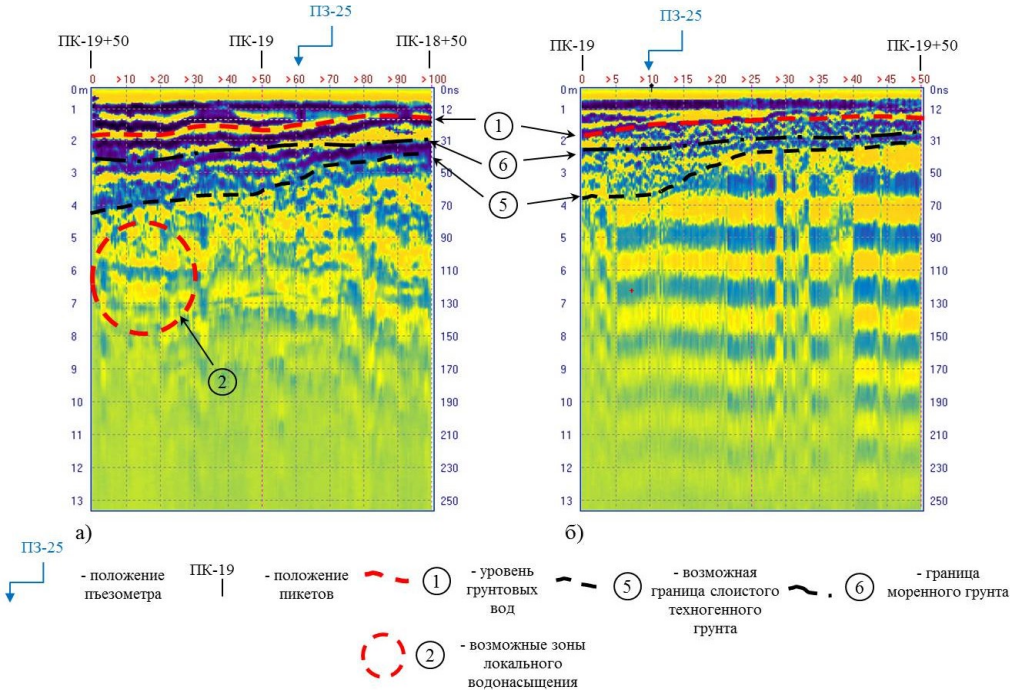


Рис. 2.25. Радарограмма георадарного обследования грунтов дамбы хвостохранилища, расположенного в Хибинском горнорудном районе (первый цикл) в окрестности ПЗ-23: *а* — антенна 200 МГц; *б* — антенна 300 МГц

Выполненное георадарное обследование на опытном участке объекта складирования отходов минерального сырья с применением последовательного увеличения частоты зондирования показало значительное увеличение качества получаемой информации. Волновые картины радарограмм более детальны за счет улучшения разрешающей способности и уменьшения шага обследования,

однако при этом страдает такой важный параметр, как глубина проникновения георадарного сигнала. Использование такого подхода на протяженных участках целесообразно проводить для уточнения или в качестве тарирования результатов в окрестностях пъезометров применительно к задачам мониторинга уровня грунтовых вод и выявления опасных фильтрационных процессов на ранней стадии. Применение мультимасштабности как подхода в георадарных обследованиях позволяет существенно повысить качество получаемой информации, а также более детально обследовать потенциально опасные зоны возможного проявления фильтрации.

2.2.7. Примеры георадарных подповерхностных обследований объектов складирования отходов

В западной части Арктики на территории Евро-Арктического Баренц-региона сосредоточенно значительное число горнотехнических сооружений, связанных с добычей, переработкой и транспортировкой минерального рудного сырья, большая часть которых попадает в категорию особо ответственных объектов. К ним относятся рудники, карьеры, фабрики, дороги, объекты складирования минеральных отходов горного производства, гидротехнические сооружения различного назначения, приемные и перевалочные транспортные терминалы, а также другие объекты и сооружения. В различных сочетаниях они входят в организационные структуры крупных горнодобывающих предприятий Кольского полуострова: АО «Кольская ГМК», АО «Олкон», ООО «Ловозерский ГОК», КФ АО «Апатит», ГОК «Олений ручей» «СЗФК», АО «Ковдорский ГОК».

Евро-Арктический регион находится в суровых арктических условиях: протяженный до 6 мес. зимний период с соответствующим снежным покровом до 1 м и выше; полярная ночь длительностью более 1 мес., частые снегопады и метели при коротком (2–3 мес.) и дождливом теплом времени года. Это предопределяет не только дискомфортные условия для населения и урбанизированных территорий, но и повышенные требования к обеспечению промышленной и экологической безопасности горнотехнических сооружений и объектов.

Кроме того, горно-геологическая среда (приповерхностная часть земной коры) западной части Арктики, и особенно Кольского полуострова, является геодинамически активной — здесь постоянно формируются различные геомеханические и гидрогеомеханические процессы, вследствие чего происходят геодинамические проявления различного масштаба [104]. В центральной части Кольского полуострова, вследствие крупномасштабных горных работ на Хибинских и Ловозерских месторождениях, произошли индуцированные землетрясения магнитудой свыше 4, приведшие к катастрофическим разрушениям как подземных горных выработок, так и наземных сооружений и коммуникаций. При этом область воздействия землетрясений в десятки раз превышала район ведения горнодобывающих работ.

К специфическим для западной части Арктики следует отнести также следующие горно-геологические и индустриально-промышленные особенности:

- сейсмичность как природного, так и техногенного характера, имеющая ярко выраженную зональность, приуроченную к прибрежным зонам и центральной части Кольского полуострова [104];

- изменчивость рельефа земной поверхности в окрестности объектов и сооружений горнодобывающих предприятий с перепадом высот до 200–500 м [13];

- крупномасштабная и интенсивная разработка месторождений рудных полезных ископаемых на горных территориях с выемкой, перемещением и отвалообразованием огромных объемов породных масс на ограниченных участках склонов сопок, гор, котлованов водоемов [105];

- большое число сопряженных с горнотехническими сооружениями и объектами природных озер и рек, имеющих социально-экономическое значение (источники водоснабжения городов, населенных пунктов и промышленных предприятий, ГЭС и т. п.) [13];

- наличие крупных приемоперевалочных терминалов продукции горного производства в морских портах: Мурманском, Кандалакшском и Витино;

- все горнодобывающие предприятия западной части Арктики являются градообразующими, при этом города и населенные пункты находятся в непосредственной близости и в зоне влияния горных разработок.

Вследствие чего, в целях обеспечения промышленной и экологической безопасности горнотехнических сооружений и объектов региона, необходима оценка их состояния и надежности выполнения функционального назначения на основе регулярных геотехнических исследований и контроля их состояния. Эти исследования, как правило, включают в себя комплексы натурных инженерно-геологических, геодезических и геофизических наблюдений [13], к числу которых следует отнести и георадарное подповерхностное зондирование [106–115]. Поэтому георадарные исследования активно используются Горным институтом КНЦ РАН на всех крупных горнодобывающих предприятиях Кольского полуострова [13, 78, 116] (рис. 2.26).

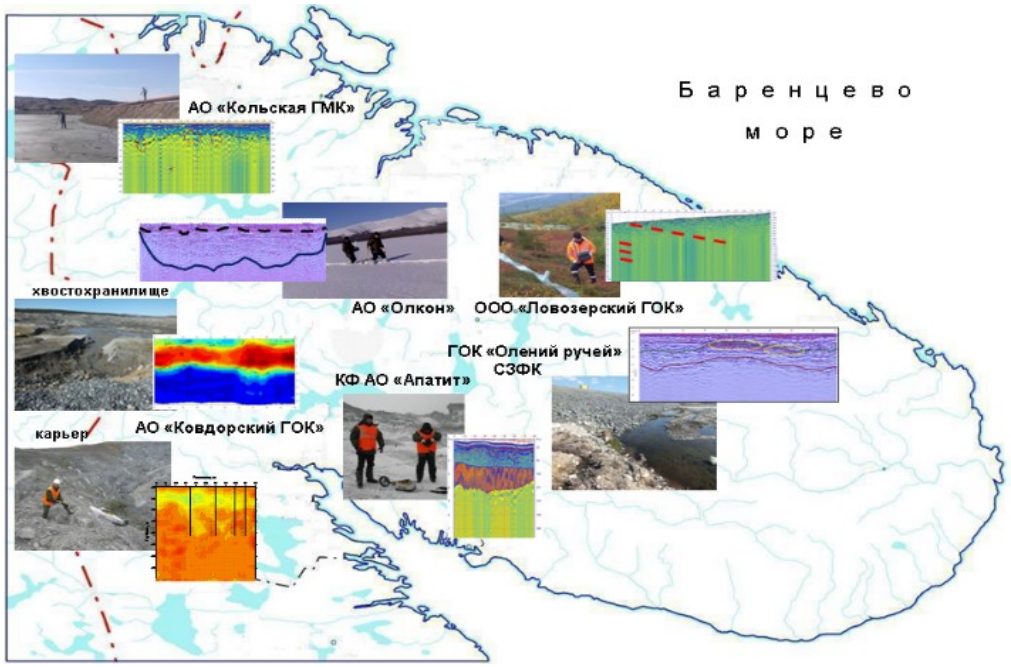


Рис. 2.26. Георадарные исследования объектов горнодобывающих предприятий Кольского региона

Исследования выполняются тремя георадарными комплексами: Ramac GPR/X3M (производства компании Mala Geo Science, Швеция), «Лоза-1В» и «Лоза-1Н» (производства ООО «ВНИИСМИ», Россия).

Георадарный комплекс Ramac GPR/X3M включает в себя: блок управления X3M, три экранированные антенны, внешний водо- и пылезащищенный ноутбук и модуль управления и визуализации (монитор Ramac XV10), который обрабатывает

принятый сигнал и отображает полученные данные на дисплее в реальном времени. Экранированный тип антенн отличается тем, что большая часть энергии излучается только в нижнюю полусферу пространства, в зондируемый объект. Диапазон рабочих глубин составляет от 0 до 40 м при разрешающей способности 0,05–0,25 м.

Георадары «Лоза-1В» и «Лоза-1Н» представляют собой переносные комплексы, состоящие из функциональных частей: блок управления и индикации; блок формирования зондирующих импульсов; блок регистрации; передающая и приемная антенны. В зависимости от решаемых задач применялись антенны различной длины с центральными частотами в диапазоне: 50–300 МГц — «Лоза-1В», 10 МГц — «Лоза-1Н» и разной степенью демпфирования. Диапазон рабочих глубин для «Лоза-1В» составляет от 0 до 50 м при разрешающей способности 0,05–0,2 м, для «Лоза-1Н» — от 0 до 200 м и 1,5 м соответственно [78].

Следует отметить, что для горнотехнических сооружений реальные показатели могут отличаться до 30–40 % от указанных технических в зависимости от разновидностей зондируемых пород и грунтов, их водонасыщенности и природно-технических условий эксплуатации сооружения.

С использованием георадарных обследований получены данные о внутренней структуре, механическом состоянии и водонасыщенности пород и грунтов для более 20 различного рода объектов всех крупных горнодобывающих предприятий региона (табл. 2.4), а также для АО «Арктикуголь» (о. Шпицберген). Ниже приведены отдельные примеры георадарных подповерхностных исследований и полученных результатов.

Георадарные обследования объектов АО «Ковдорский ГОК» выполняются с 2012 г. На карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК» измерения выполнены в целях оценки состояния и исследования внутренней структуры массива пород рабочих уступов, а также для выявления и геометризации пространственного положения плоскостей тектонических нарушений, геологических дислокаций, зон неоднородностей и структурной нарушенности [13, 116] (рис. 2.27).

На рабочем участке карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК» выполнено георадарное зондирование уступа в целях уточнения внутренней структуры и водонасыщенности пород. На обследуемом участке визуальным обследованием и фотосъемкой обнажения уступа был зафиксирован выход тектонического нарушения пород на обнажении откоса уступа (рис. 2.28 *а*).

Анализ волновой радарограммы, полученной методом профилирования на постоянной базе (рис. 2.28 *а*), показал, что в интервале георадарного профиля 100–200 м и глубине 15 м от поверхности фиксируется большое количество гиперболических отражений, которые приурочены к находящимся на поверхности техническим конструкциям. Вычисленные скорости V по теоретически рассчитанной гиперболе имеют значения в интервале 11–13,8 см/нс, что позволяет интерпретировать отражения как воздушные помехи. В правой части профиля, на отметках 340, 400 и 440 м, предположительно, прослеживаются структурные нарушения массива пород. Это подтверждается тем, что значения скорости электромагнитного сигнала, рассчитанные по теоретической гиперболе, лежат в интервале 5,6–9,13 см/нс. Такие значения свидетельствуют, что данные отражения получены от структурных неоднородностей, находящихся в массиве скальных пород. Дальнейшая локализация и трассирование структурных нарушений производилось путем анализа волновой картины и сопоставлением осей синфазности электромагнитных сигналов. Интерпретированные данные на фрагменте радарограммы 300–340 м (рис. 2.28 *б*) совпадают с визуальным обследованием уступа (рис. 2.28 *а*), где четко наблюдается структурное нарушение. Использование общего среднего значения диэлектрической проницаемости пород по георадарному профилю, принятого равным 9, определено, что угол падения структурного нарушения, выявленного георадарным обследованием в массиве скальных пород, составляет 23°.

Таблица 2.4

Применение георадарных исследований
горнотехнических объектов западной части Арктики

Горнотехнические объекты. Горнодобывающие предприятия	Цель и задачи георадарных исследований
Карьеры, горнотехнические сооружения, породные отвалы, хвостохранилища КФ АО «Апатит», АО «Ковдорский ГОК»	Оценка геолого-структурного строения законтурного массива пород; выявление дислокаций и зон неоднородностей для обоснования параметров новых уступов
	Оценка состояния и структуры законтурного массива пород; выявление и трассирование тектонических нарушений; выявление дислокаций и зон с различными физическими характеристиками для целей оценки устойчивости обнажений пород в карьерах
	Выявление зон повышенной водонасыщенности скальных пород
	Выявление границ изменения литологической разности пород и руд
	Обследование законтурного состояния стенок подземной горной выработки (без крепи и с крепью)
	Оценка структуры отвалов с выявлением уплотненных породно-снежно-ледяных зон для решения задач их перемещения за пределы действующего карьера. Обследование внутренней структуры и состояния породных отвалов на горных склонах
Горнотехнические водоемы, ограждающие и водорегулирующие сооружения АО «Кольская ГМК», АО «Ковдорский ГОК», КФ АО «Апатит», ГОК «Олений ручей» «СЗФК», АО «Олкон»	Мониторинг состояния и выявление скрытых фильтрационно-деформационных процессов для минимизации рисков потери противофильтрационной функциональности и механической устойчивости ограждающих и водорегулирующих сооружений
	Определение положения депрессионной плоскости, выявление скрытых фильтрационно-деформационных зон в теле водорегулирующего сооружения с целью выяснения причины повышенной протечки и для выработки рекомендаций по управлению фильтрационной проницаемостью
Фундаменты и опоры горнотехнических сооружений ГОК «Олений ручей» «СЗФК», АО «Арктикуголь»	Определение качества бетонной заливки, состояния и структуры фундаментов, а также оценка влагонасыщенности пород под ними
	Оценка прочности, состояния и структуры фундаментов и опор
	Изучение состояния приповерхностных грунтов в районе расположения горнотехнических сооружений, определение верхней границы зоны вечной мерзлоты
Площадки, котлованы, инженерно-геологические изыскания на территории горного отвода ГОК «Олений ручей» «СЗФК», ООО «Ловозерский ГОК»	Определение структуры насыпных и естественных грунтов разгрузочной площадки железнодорожных складов. Уточнение и дополнение геологических разрезов
	Оценка качества выторфовки; выявление влагонасыщенных и водоносных слоев в подстилающих породах; оконтуривание сформировавшейся при выемке естественного грунта контура поверхности
	Оценка мощности моренных отложений для целей строительства горнотехнического сооружения
	Обследование устойчивости горных откосов при врезке дорожного полотна
Железнодорожные пути, автомобильные дороги, трассы продуктопроводов ФГУП «Атомфлот», ГОК «Олений ручей» «СЗФК», КФ АО «Апатит»	Определение структуры насыпных и естественных грунтов полотна железнодорожных путей
	Определение структуры насыпных и естественных грунтов полотна дороги
	Исследование состояния и структуры приповерхностной зоны земной коры на активных тектонических разломах; оценка изменчивости физических характеристик по мере удаления от разлома
	Оценка мощности промерзания и состояния водонасыщенного слоистого массива грунтов
Близповерхностные инженерные коммуникации АО «Ковдорский ГОК», КФ АО «Апатит» АО «Кольская ГМК»	Поиск и картирование подземных инженерных сетей и коммуникаций
	Обследование пород и грунтов для сооружения искусственного дренажа
Береговые приемные и перегрузочные терминалы ФГУП «Атомфлот»	Обследование состояния береговых скально-породных сооружений



а *б*

Рис. 2.27. Георадарные обследования участка борта карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК» с использованием георадарных комплексов: *а* — Ramac GPR/X3M; *б* — «Лоза-1Н»

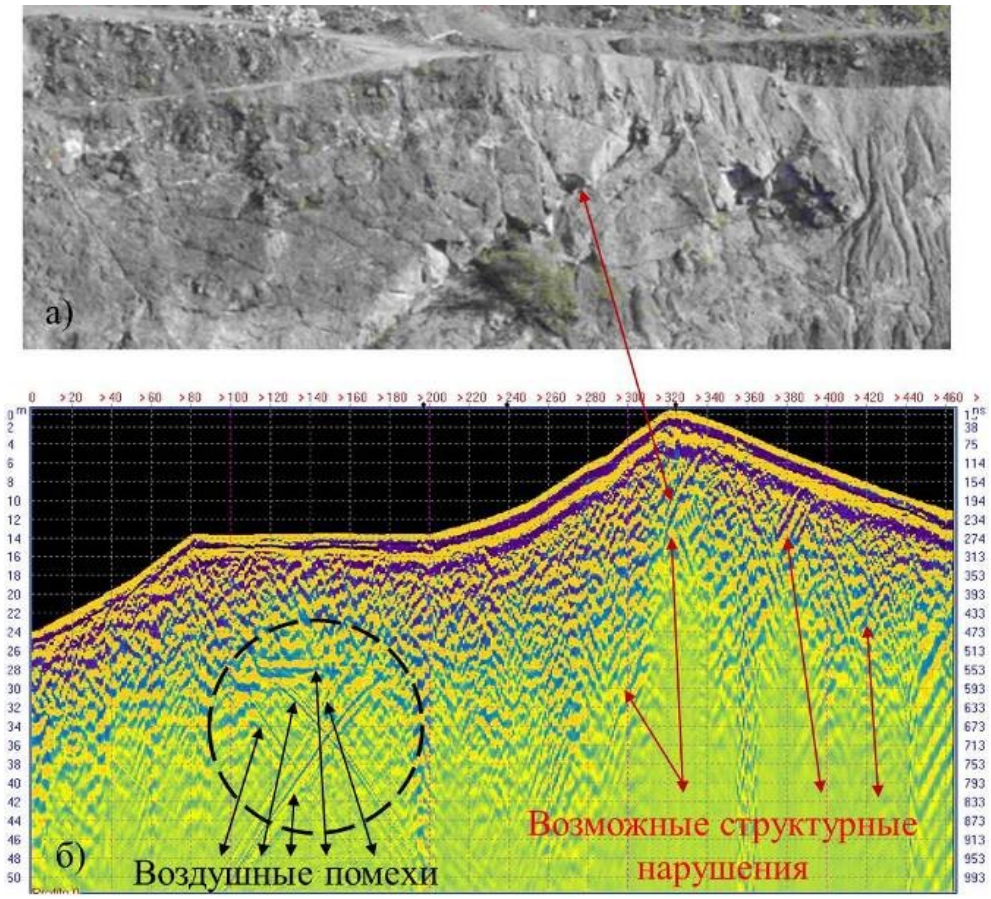


Рис. 2.28. Комплексное обследование уступа карьера: *а* — визуальное обследование и фотосъемка; *б* — интерпретированная радарограмма участка обследования

Среди других исследований необходимо отметить оценку качества БВР, локализацию размеров и формы закола на откосе уступа, оценку степени водонасыщенности близповерхностных пород и др. [78, 116].

Выполнено также георадарное обследование предгорья Ковдорского горнорудного массива, представляющего собой природно-техническую систему, подвергающуюся периодическим взрывным (волновым) воздействиям. Выявлен и трассирован на глубину до 100 м в массив пород скрытый под мореной и сильнотрещиноватыми породами крупный тектонический разлом, представляющий потенциальную опасность для устойчивости борта карьера и промышленных сооружений.

В течение последних 10 лет георадарные обследования применяются для мониторинга состояния ограждающих дамб хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК» в целях минимизации рисков фильтрационно-деформационных процессов. На рис. 2.29 приведена интерпретированная радарограмма георадарного профилирования ограждающей дамбы хвостохранилища, на которой цветами отражена степень водонасыщенности грунтов.

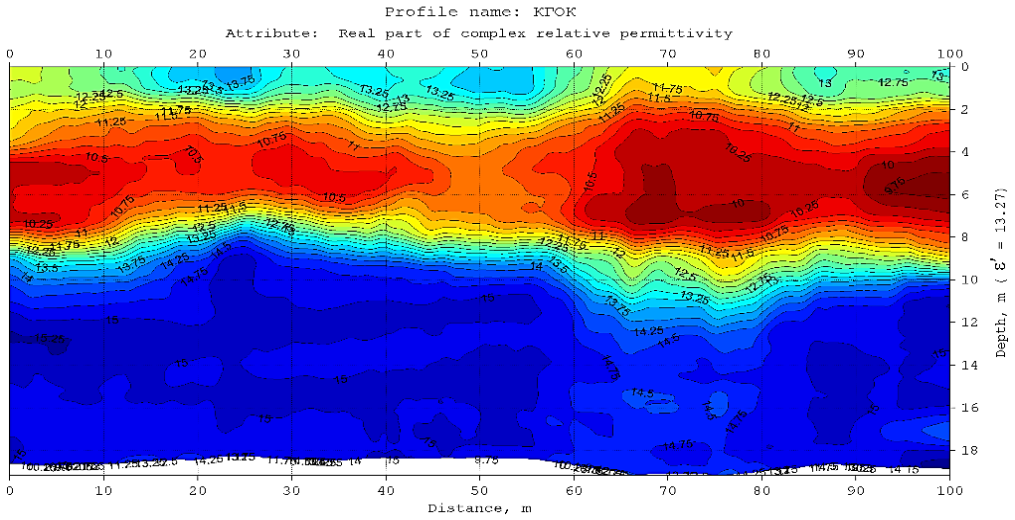


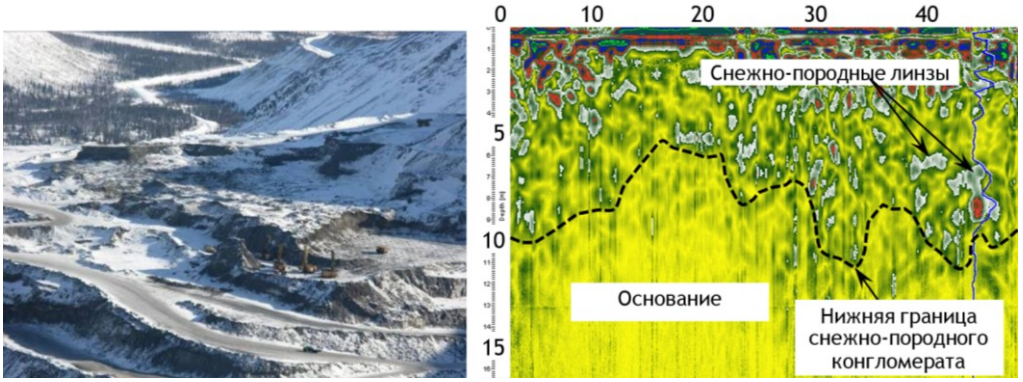
Рис. 2.29. Интерпретированная радарограмма георадарного профилирования ограждающей дамбы хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК»

Сопоставительный анализ данных пьезометров об уровне воды и значений скорости электромагнитной волны позволил определить интервал изменения скорости (8,017–8,165 см/нс) и диэлектрической проницаемости (14,0–13,5 ед.), соответствующих установившемуся в теле дамбы уровню воды на момент измерений. В расположенном выше уровня грунтовых вод сухом и уплотненном грунте значения скорости изменяются в интервале 8,170–9,672 см/нс (диэлектрическая проницаемость, соответственно, — от 13,5 до 9,62 ед.). Снижение скорости электромагнитной волны ниже уровня воды обусловлено повышением диэлектрической проницаемости, что, в свою очередь, связано с увеличением объемов воды в поровом пространстве и водонасыщением грунтов дамбы.

Для АО «Ковдорский ГОК» выполнена оценка фильтрационной устойчивости ограждающих накопители сооружений, выявлены и локализованы потенциально опасные фильтрационно-деформационные процессы, определены механизмы повышенной фильтрации, формирования фильтрационных каналов. Был раскрыт механизм

инфильтрации воды из накопителя в действующий карьер, реализующийся в формировании в теле ограждающей насыпной дамбы трех зон механической суффозии с повышенными фильтрационными характеристиками. Выявлены зависимости устойчивости ограждающих накопитель промышленных отходов сооружений от скорости и объемов фильтрующихся вод.

На АО «Апатит» выполнена оценка внутренней структуры породных отвалов карьера «Центральный» в целях выявления уплотненных породно-снежно-ледяных зон (линз) (рис. 2.30), а перспективный участок рудника «Восточный» дифференцирован по литологической разности пород и руд.



а *б*

Рис. 2.30. Георадарные исследования снежно-породных отвалов: *а* — общий вид; *б* — интерпретированная радарограмма с детализацией и нижней границей снежно-породного конгломерата

Для ГОК «Олений Ручей» («СЗФК»), начиная с 2012 г., георадарными исследованиями выполнены: оценка качества подготовки котлована для сооружения хвостохранилища площадок для приемо-перегрузночных железнодорожных терминалов, фундаментов под установку мельниц. С применением высокочастотных георадарных комплексов проведено подповерхностное зондирование площадки под строительство хвостохранилища, а также сделана оценка качества уплотнения грунтов при поэтапной отсыпке ограждающих дамб. В целях контроля состояния и эффективности работы ГТС хвостохранилища, был создан наблюдательный полигон, включающий в себя линии универсальных контрольно-наблюдательных реперов (для классической наземной и GPS-геодезии) на всех ограждающих дамбах, сеть гидрогеологических скважин и пьезометров, линии постоянных георадарных и сейсмических профилей.

На ГТС АО «Кольская ГМК» мониторинговые наблюдения проводятся с 2014 г. Хвостохранилище обогатительной фабрики ОАО «Кольская ГМК» овражного типа, по способу заполнения — намывное, предназначено для непрерывного складирования хвостов обогащения медно-никелевых руд и обеспечения фабрики чистой оборотной водой по замкнутому циклу оборотного водоснабжения. Ограждающие дамбы хвостохранилища (Северная и Южная) протяженностью около 4 км каждая, относятся к I классу капитальности. На ГТС хвостохранилища ежегодно проводятся мониторинговые наблюдения, включающие в себя: высокоточные режимные геодезические измерения по контрольным реперам; исполнительную съемку откосов

по створам дамб; топографическую съемку текущей ситуации дамб; техническое нивелирование гребней дамб обвалования и намывных дамб; измерения длин намывных пляжей и уровня воды; промер глубин отстойного пляжа с измерением толщины донных отложений.

Кроме того, был решен ряд задач для АО «Апатит» и АО «Олкон». На гидротехнических сооружениях (плотинах) отстойников Восточного рудника АО «Апатит» были выполнены режимные мониторинговые геофизические исследования, в результате которых была получена детальная информация об их структуре и состоянии. В процессе сравнительного анализа были выделены проблемные участки в теле ГТС, за развитием которых впоследствии велось инструментальное наблюдение с более высокой периодичностью. Для повышения качества инструментального мониторинга деформационных процессов в теле ГТС были заложены контрольные реперы/марки и организован геодезический полигон.

Для оценки объемов отложений в отстойнике в зоне сброса хвостов обогащения фабрики АНОФ-2 (АО «Апатит») на площади участка 3,6 га было проведено георадарное зондирование. Анализ полученных результатов позволяет выявить следующие особенности отстойника промышленных вод: толщина ледового покрова составляет около 1,5 м; на границе донных отложений с водой отмечается резкая смена волновой картины, что дает возможность четко определить глубину водоема на исследованном участке, которая составляет порядка 6–8 м; подошва отложений идентифицирована по интенсивным осям синфазности более сложной формы по сравнению с донным отражением и поэтому уверенно выделяется; коренные отложения отличаются от донных отложений на радарограмме характером осей синфазности; глубина залегания коренных пород составляет от 1–2 м у берега до 5 м при удалении от береговой черты (рис. 2.31).

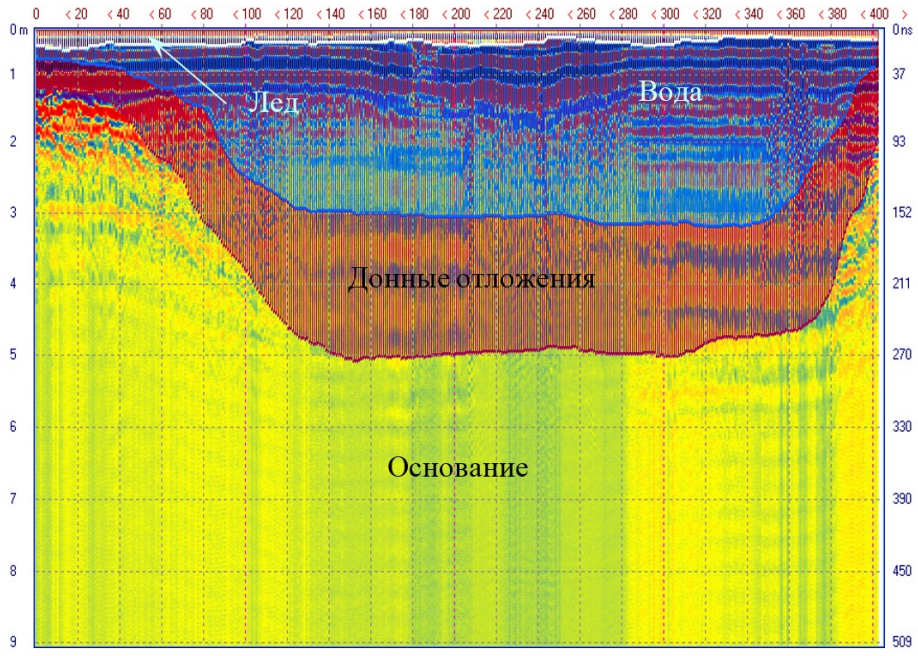


Рис. 2.31. Интерпретированная радарограмма обследования отстойника промышленных вод (АНОФ-2 КФ АО «Апатит»)

Особенностью мониторинговых работ на хвостохранилище АО «Олкон» было определение притока и оттока воды в бассейне ГТС, составление водного баланса хвостохранилища и выявление его значимости. Для этих целей в зимний период были выполнены два цикла измерения глубины водоема при помощи георадарного зондирования с поверхности льда. В прудке-отстойнике хвостохранилища было выполнено профилирование по сетке с шагом 150×150 с жесткой привязкой в узловых точках путем измерения глубины воды. Была выполнена топографическая съемка по периметру ледового покрова, а по результатам обработки георадарных данных произведен расчет объемов воды в хвостохранилище. В летний период произведены, с водной поверхности, замеры глубины прудка-отстойника хвостохранилища, выполнена съемка пляжного контура воды, а на участке дамбы с повышенной фильтрацией был произведен эксперимент с применением флюоресцирующего раствора в целях определения скорости и объемов фильтрующейся воды.

Для АО «Олкон» георадарными определениями (2019–2022 гг.) выполнялся мониторинг накопителя промышленных отходов (оценка динамики техногенных и природных водопритоков, трассирование фильтрационных водотоков, локализация зон повышенной водонасыщенности грунтов) для обеспечения промышленной и экологической безопасности накопителя. Выявлены особенности консолидации намывных отходов в накопителе, определяемые климатическими условиями западной части Арктики.

Отдельно следует отметить георадарное обследование площадки здания ТЭЦ ОАО «Арктикуголь» в пос. Баренцбург (о. Шпицберген). Целью работ являлось выявление верхнего контура мерзлоты, который, по данным инженерно-геологических изысканий 25-летней давности, располагался на глубине 6,2–6,7 м от дневной поверхности. Георадарным определением было установлено, что верхний контур мерзлых пород на момент работ расположен на глубине 6,5–7,5 м на различных участках обследуемой площадки.

В целом за период 2009–2025 гг. для решения различных горно-геологических и геотехнических задач, георадарные исследования были выполнены на более чем 20 объектах всех крупных горнодобывающих предприятий западной части Арктики: АО «Кольская ГМК», АО «Олкон», ООО «Ловозерский ГОК», КФ АО «Апатит», ГОК «Олений ручей» «СЗФК», АО «Ковдорский ГОК».

Опыт проведения работ и полученные результаты позволяют уверенно констатировать, что георадарное подповерхностное зондирование, обладающее такими качествами, как оперативность и информативность, является эффективным дополнением (а в отдельных случаях — самостоятельным средством) инженерных исследований и мониторинга горнотехнических сооружений для условий западной части российского сектора Арктики. Показано, что применение георадарных обследований как неразрушающего метода исследования позволяет получать детализированную сплошную (профильную) картину внутренней структуры и водонасыщенности пород и грунтов горнотехнических сооружений. Используя ключевое положение, что наведенное георадаром электромагнитное поле искажается на участках различия физических свойств скальных пород и грунтов (неоднородности, повышенная трещиноватость, тектонические нарушения, разломы, зоны повышенного водонасыщения, и т. п.), выполнены их идентификация и количественная оценка. Приведены результаты георадарных обследований конкретных объектов крупных горнодобывающих предприятий западной части Арктики. На основе этого выявлены особенности строения скальных пород карьера «Железный» АО «Ковдорский ГОК», рудника Восточный КФ АО «Апатит» и др. Выявлены

и трассированы скрытые тектонические разломы и неоднородности массива, представляющие потенциальную опасность для горных работ и промышленных сооружений. На основе многолетних мониторинговых георадарных обследований ограждающих дамб хвостохранилищ АО «Ковдорский ГОК», АО «Кольская ГМК», ГОК «Олений ручей» «СЗФК», АО «Олкон» установлены закономерности формирования фильтрационно-деформационных процессов. Для ГОК «Олений Ручей» выполнены оценка качества сооружения ограждающих дамб хвостохранилища, строительства бетонных фундаментов для мельниц и железнодорожных погрузо-разгрузочных терминалов. На о. Шпицберген георадарными обследованиями уточнена верхняя граница мерзлых пород под площадкой ТЭЦ АО «Арктикуголь». К настоящему времени георадарные обследования выполнены на более двадцати горнотехнических сооружениях горнодобывающих предприятий западной части Арктики.

2.2.8. Георадарное зондирование ограждающего сооружения водохранилища

Использование предложенных подходов, в основе которых лежат установленные параметры, обеспечивающие идентификацию водонасыщенных зон, применительно к другим объектам ограждающих сооружений показало свою эффективность. На рис. 2.32–2.35 представлено георадарное обследование плотины георадарным комплексом «Лоза-1В» с неэкранированной антенной 100 МГц.

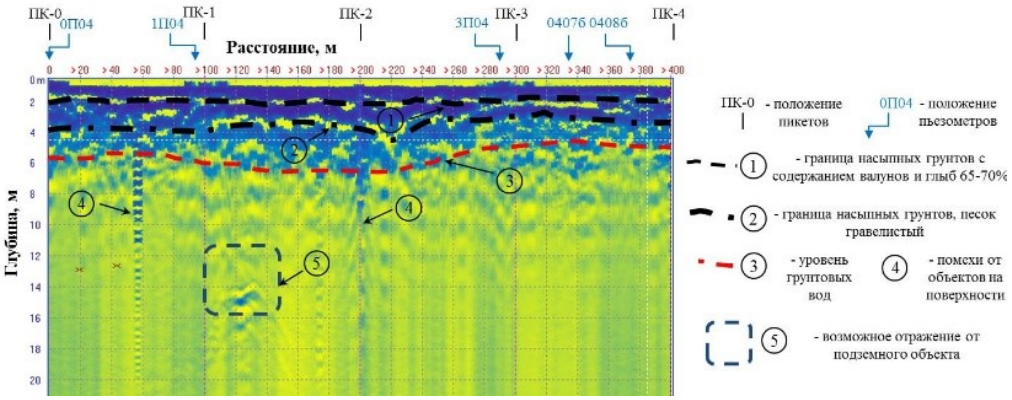


Рис. 2.32. Георадарный профиль № 1 по гребню плотины

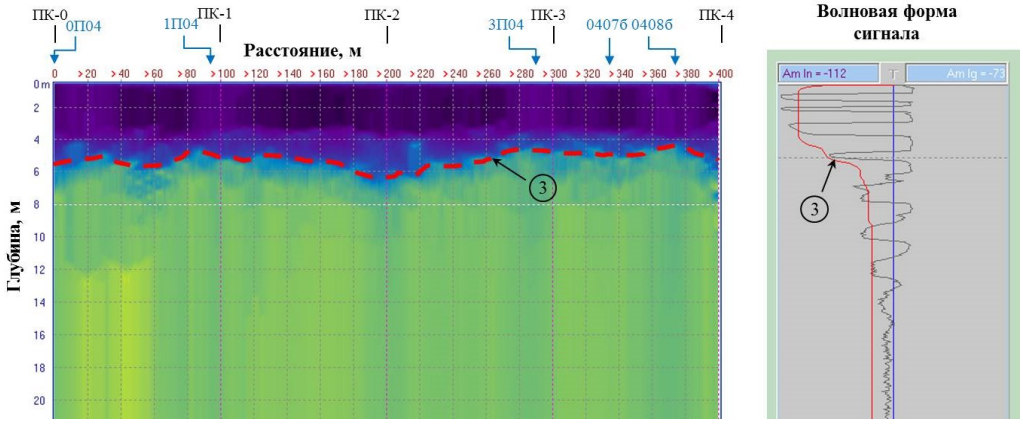


Рис. 2.33. Георадарный профиль № 1 по гребню

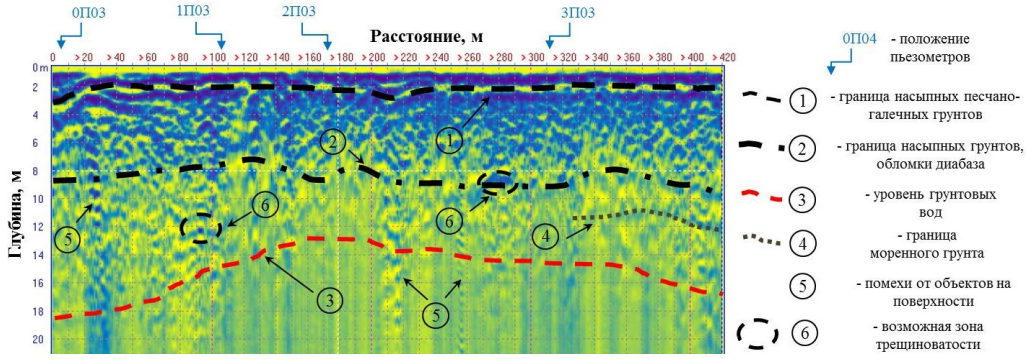


Рис. 2.34. Георадарный профиль № 2 параллельно гребню плотины

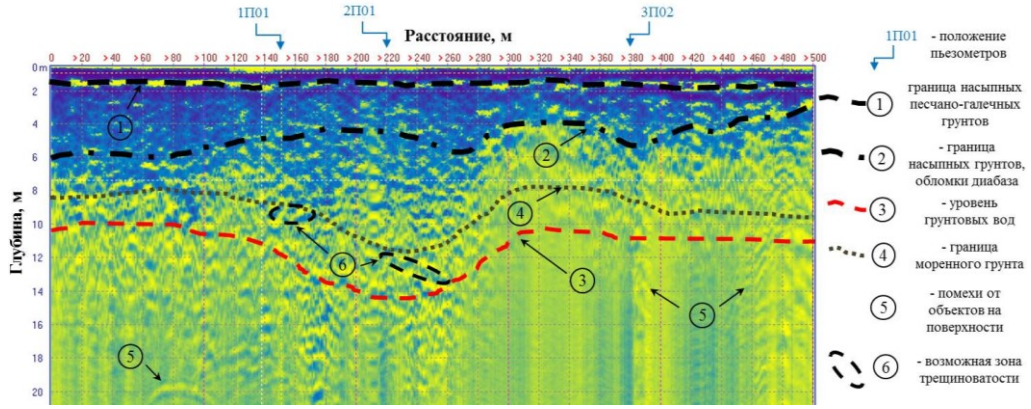


Рис. 2.35. Георадарный профиль № 3 по низовой части плотины

Обследование плотины выполнялось тремя продольными профилями по гребню (профиль № 1) от ПК0 (0П04), параллельно (профиль № 2) 0П03 и по низовой части плотины (профиль № 3) в непосредственной близости пьезометров 1П01 и 2П01. Профили сориентированы в сторону увеличения номеров пикетов плотины, нулевая отметка профиля № 1 соответствует нулевому пикету.

Результаты георадарного обследования плотины водохранилища обрабатывались с использованием специализированной для данного вида исследований компьютерной программы «Крот», интерпретировались, а затем выполнялся комплексный анализ полученных данных в пространственно-глубинной взаимосвязи. Приповерхностная зона (рис. 2.32) до глубины 5–6 м представляет собой равномерную волновую картину, которая свидетельствует о наличии плотных грунтов без наличия каких-либо аномалий. На данном интервале глубин контрастно выделяются границы насыпных грунтов, привязка данных границ выполнена по комплексному анализу волнового поля и данных паспортов пьезометров. В интервале глубин 1,8–2,2 м прослеживается граница насыпных грунтов с содержанием валунов и глыб 60–75 % (*1*), далее в интервале глубин 3,1–4,5 м — граница насыпных грунтов, представляющих собой песок гравелистый (*2*). Рассматривая вопрос о возможных зонах водонасыщения или кривой депрессии воды, стоит отметить, что зоны возможной водонасыщенности пород воспринимается георадарным сигналом как переход в более высокую по диэлектрической проницаемости среду и отражается максимумом амплитуды сигнала. Однако границы зон водонасыщения не всегда являются резко выраженными, а плавно изменяются в зависимости от степени водонасыщения от естественного

ненасыщенного влагой состояния до полного насыщения пор в массиве. Ниже предполагаемой зоны водонасыщения заметно сглаживается структура массива, где из-за возрастания затухания резко падает амплитуда сигнала, что проявляется в заметном уменьшении контрастности волновой картины радарограммы. Определено, что уровень грунтовых вод (*3*) колеблется в интервале глубин 4–6,3 м в ключевых точках в окрестности пьезометров, что соответствует показаниям измерений уровня воды в них. Наличие сильных низкочастотных помех ниже выделенного уровня грунтовых вод также указывает на водонасыщенность вмещающих пород плотины в этом интервале. На профиле встречаются контрастные локальные помехи (*4*), которые приурочены к объектам на поверхности, представляющим из себя металлический мусор. На 125 м профиля локализуется точечный подземный объект (*5*) с характерными гиперболическими отражениями.

Применение процедур низкочастотной фильтрации для полученных данных (профиль № 1) позволило избавиться от большого количества отражений и представить полученные данные в форме изменения амплитуды сигнала по глубине (рис. 2.33). Анализ изменения амплитудной формы сигнала показал падение амплитуд на глубине 4–6,3 м от поверхности, которое свидетельствует о значительном затухание сигнала, что также указывает на водонасышеность вмещающих пород плотины ниже этой границы.

Приповерхностная зона (рис. 2.34) до глубины 8–9 м представляет собой равномерную волновую картину, которая свидетельствует о наличии плотных грунтов без наличия каких-либо аномалий. На данном интервале глубин контрастно выделяются границы насыпных грунтов, привязка данных границ выполнена по комплексному анализу волнового поля и данных паспортов пьезометров. В интервале глубин 2–3,2 м прослеживается граница насыпных песчано-галечных грунтов (*1*), далее в интервале глубин 7,8–9 м граница насыпных грунтов, представляющих собой осколки диабаза (*2*). Граница уровня грунтовых вод слабоконтрастная и прерывиста по профилю в достаточно широком интервале 13–18,2 м (*3*), в ключевых точках в окрестности пьезометров соответствует их показаниям на момент измерений. Ниже предполагаемой границы уровня грунтовых вод заметно сглаживается структура массива, где из-за возрастания затухания резко падает амплитуда сигнала, что проявляется в заметном уменьшении контрастности волновой картины радарограммы. В интервале профиля 325–420 м, на глубине 11–12,2 м прослеживается граница моренного грунта (*4*). На профиле встречаются контрастные локальные помехи (*5*), которые приурочены к объектам на поверхности, представляющим из себя металлический мусор. В интервале профиля 80–104 и 265–290 м выделяются предположительно трещиноватые зоны мощностью 2 и 1,5 м соответственно (*6*).

Приповерхностная зона (рис. 2.35) до глубины 8 м представляет собой равномерную волновую картину, которая свидетельствует о наличии плотных грунтов без наличия каких-либо аномалий. В интервале глубин 1–1,5 м прослеживается контрастная граница, которая отсутствует в паспортах пьезометрах в качестве геологической границы, однако выделяется на радарограмме и интерпретируется как песчано-галечный грунт (*1*). Для выделения границ насыпных грунтов ниже выполнена привязка по комплексному анализу волнового поля и данных паспортов пьезометров. В интервале глубин 6 м в начале профиля с дальнейшим подъемом до 4 м прослеживается граница насыпных грунтов, сложенных обломками диабаза (*2*). Граница уровня грунтовых вод слабоконтрастная и прерывиста по профилю в достаточно широком интервале 10–14,2 м (*3*), в ключевых точках в окрестности пьезометров соответствует их показаниям на момент измерений. Стоит отметить, что пьезометр 3П02 находится на значительном удалении от траектории измерений как в плане, так

и по высоте и спроецирован на профиль для информативности. Ниже предполагаемой границы уровня грунтовых вод заметно сглаживается структура массива, где из-за возрастания затухания резко падает амплитуда сигнала, что проявляется в заметном уменьшении контрастности волновой картины радарограммы. По всей длине профиля на глубине 7,3–11 м выделяется прерывистая слабоконтрастная граница моренного грунта (*4*). На профиле встречаются контрастные локальные помехи (*5*), которые приурочены к объектам на поверхности, в том числе находящийся в непосредственной близости от траектории измерений металлический мусор. В интервале профиля 143–170 и 215–262 м выделяются предположительно трещиноватые зоны мощностью 1,5 и 1 м соответственно (*6*).

По данным георадарного зондирования определены уровни депрессионной поверхности на момент измерения. Уточнена структура плотины и подстилающего основания. Выполнено картирование границ насыпных и моренных грунтов, а также коренного диабаза в теле плотины. Локализованы зоны трещиноватости пород в теле плотины: в интервале профиля № 2 80–104 м (подтверждено бурением) и 265–290 м мощностью 2 и 1,5 м соответственно; в интервале профиля № 3 143–170 м (подтверждено бурением) и 215–262 м (подтверждено бурением) мощностью 1,5 и 1 м соответственно. В целом по результатам георадарного обследования дамба находится в устойчивом состоянии, опасных фильтрационно-деформационных процессов не выявлено.

2.2.9. Основные комментарии и выводы

На основе выполненных георадарных обследований ограждающих сооружений на объектах складирования намывных отходов горного производства выявлена взаимосвязь изменения волнового поля и диэлектрической проницаемости грунтов с зонами повышенного влагонасыщения и фильтрации дамбы, что позволяет оценивать состояние ограждающей дамбы хвостохранилища и выявлять локальные зоны повышенного влагонасыщения и фильтрации.

Исследование трансформации наведенных волновых полей в объектах складирования отходов позволило получить основу для количественной интерпретации данных георадиолокации и анализа волновых картин радарограмм для выделения водонасыщенных зон и различных структурных неоднородностей. В результате комплексного анализа данных компьютерного моделирования и основных параметров электромагнитного сигнала (амплитуда, фаза, период), параметров волнового поля (скорость распространения электромагнитных волн) георадарного зондирования установлены параметры, обеспечивающие идентификацию водонасыщенных зон в объектах складирования горнотехнических отходов.

Комплексирование волновых методов георадиолокации и сейсмопрофилирования для выявления опасных фильтрационно-деформационных процессов позволило повысить достоверность интерпретации данных электромагнитного зондирования. Применение георадарного внутриметодного комплексирования методом профилирования на постоянной базе и общей глубинной точки с одновременной синхронизацией сейсмопрофилирования позволило выявить и идентифицировать зоны повышенного водонасыщения и структурных нарушений в массиве пород, что дало возможность получить дополнительное обоснование для достоверной интерпретации данных георадиолокации при решении такого рода задач.

Предложен комплексный методический подход к оценке влияния на устойчивость ярусных горнотехнических сооружений зон повышенного водонасыщения и структурных неоднородностей пород, выявляемых с использованием методов сейсмопрофилирования и георадарного зондирования. Подход позволяет

оценивать влияние основных изменяющихся во времени влияющих факторов (водонасыщение, природная и техногенная структурная неоднородность и нарушенность, аномалии физических свойств пород) на устойчивость ярусов (уступов) и предоставляет научно-техническую основу для разработки инженерных мероприятий по повышению промышленной и экологической безопасности контролируемого объекта.

Анализ изменения наведенного волнового поля в объектах складирования отходов минерального сырья горного производства Хибинского, Печенгского и Ковдорского рудных районов позволил выделить основные признаки выявления потенциально опасных зон в теле насыпных сооружений и выявить подходы к их локализации. Зона водонасыщенности грунтов воспринимается георадарным сигналом как переход в более высокую по диэлектрической проницаемости среду и отражается максимумом амплитуды сигнала. Границы зон водонасыщения не всегда являются резко выраженными, а плавно изменяются в зависимости от степени водонасыщения от естественного ненасыщенного влагой состояния до полного насыщения грунтов. Ниже идентифицируемой зоны водонасыщения заметно сглаживается структура массива грунтов, где из-за возрастания затухания резко падает амплитуда сигнала, что проявляется в заметном уменьшении контрастности волновой картины радарограммы.

Применение внутриметодного комплексирования профилирования на постоянной базе и общей глубинной точки с одновременной синхронизацией измерений уровня грунтовых вод в пьезометре позволило выявить и идентифицировать уровень грунтовых вод и зоны повышенного водонасыщения в грунтах насыпной дамбы хвостохранилища горнодобывающего предприятия, что дало возможность получить дополнительное обоснование для достоверной интерпретации данных георадиолокации при решении такого рода задач.

2.3. Развитие методов космического мультимасштабного мониторинга горнотехнических объектов

2.3.1. Современные методы и технологии мультимасштабной съемки объектов

В условиях цифровизации горной промышленности [117] возросла актуальность воспроизводства геоинформационных продуктов. На современном горном предприятии данные генерируются с помощью автоматизированных средств сбора и передачи информации в едином цифровом пространстве [118], что позволяет дистанционно отслеживать и прогнозировать состояние и процессы в природно-технических комплексах. Развитие систем мониторинга за счет синергии инновационных технологий обеспечивает более высокий уровень ее функционирования и, как следствие, способствует повышению эффективности управления горным предприятием [73, 119].

Известно, что воспроизведение цифровой геопространственной информации [120, 121] необходимо для решения следующего ряда ключевых задач и процессов.

Проектирование и планирование. Данная информация влияет на выбор параметров и расположения капитальных и других инфраструктурных сооружений, что позволяет рационально разместить горнотехнические комплексы, технологическое оборудование, транспортные пути, площадки для складирования и хранения отходов и др.

Оценка запасов и отходов. Данная информация используется в оценке количества добываемых ресурсов, на основе которой производятся аналитические расчеты объемов доступных минеральных запасов и складируемых отходов.

Экономическое обоснование. Данная информация используется в создании экономических моделей, оценке затрат и прибыли, а также в разработке бизнес-планов и инвестиционных проектов.

Мониторинг и управление. Данная информация используется в текущем управлении производственными процессами, включая контроль строительства, безопасностью и соблюдением проектных решений.

Экологическое воздействие. Данная информация используется для оценки потенциального воздействия горных работ на окружающую среду, в том числе при планировании мер по рекультивации земель по завершению разработки месторождения.

Законодательство и лицензирование. Данная информация используется для получения лицензий и разрешений на добычу и утилизацию сырья, что необходимо для юридического оформления деятельности и соблюдения норм и предписаний органов государственного надзора.

Мировой опыт показывает, что минеральные отходы горного производства (к ним относят: хвостохранилища, отвалы, отстойники воды и др.) занимают значительные территории площадью десятки, сотни квадратных километров и являются объектами будущих инвестиций в повторную разработку минеральных ресурсов при соответствующих социально-экономических и экологических рисках [122–127]. Эффективный и безопасный контроль и управление хранилищами горных отходов достигается комплексными междисциплинарными стратегиями и подходами к решению проблем с учетом внутренних и внешних факторов. Приоритетными направлениями в данной области является разработка новых автоматизированных и дистанционных систем контроля и управления на базе пилотных и интеллектуальных IT-решений в обеспечении промышленной и экологической безопасности горных объектов.

В настоящее время при дистанционной мультиплощадной съемке рассматриваемых капитальных сооружений применяются различные инструменты и технологии (табл. 2.5 и 2.6), которые обеспечивают относительно высокую точность и эффективность пространственных измерений: фотограмметрия, геодезия, лазерное сканирование, БПЛА, ДЗЗ и др. Каждый из вышеперечисленных методов отличается типовым набором характеристик съемочной аппаратуры, областью использования и технологией ведения съемочных работ, а также возможностями программно-вычислительного инструментария (табл. 2.6). Выбор конкретного способа или их совокупности зависит от задач съемки, условий эксплуатации объекта и финансовых возможностей компании. В области геомониторинга передовые технологии часто используются в различной комбинации для повышения точности и получения более полной информации [60, 128, 129].

Таблица 2.5

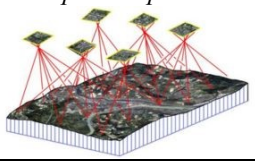
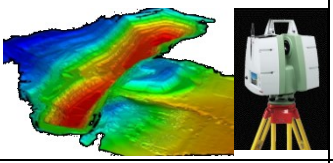
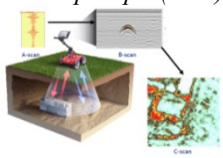
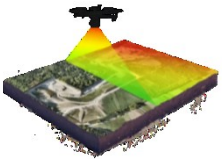
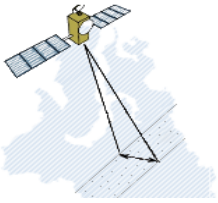
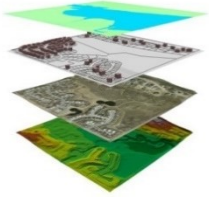
Сравнительный анализ* современных средств мультиплощадных инструментальных измерений и контроля в условиях Северо-Западного региона Российской Арктики

Критерии	Инструменты					
	лазерная рулетка	тахеометр	GPS	сканер	аэросъемка	ДЗЗ
Точность	●	●	●	●		
Производительность				●	●	●
Обзорность					●	●
Информативность					●	●
Периодичность				●		●
Всесезонность	●	●	●			

* Информация носит условный характер и зависит от конкретного месторождения и условий его эксплуатации.

Таблица 2.6

Современные средства мультиплощадных инструментальных измерений и контроля

№	Методы	Описание
1	*Фотограмметрия* 	Наземная фотограмметрия использует перекрывающиеся снимки, сделанные с различных точек для создания 3D-моделей. Аэрофотограмметрия имеет схожий принцип с аэрофотосъемкой, но с акцентом на получение данных с высоким перекрытием для создания детализированных топографических карт и 3D-моделей
2	*Геодезическая съемка (GPS)* 	Тахеометры используются для измерения расстояний и углов, которые применяются для создания точных топографических планов и карт. Геодезические системы глобального позиционирования GPS/GNSS позволяют получать координаты с высокой точностью, что особенно полезно для съемки больших территорий
3	*Лазерное сканирование (LiDAR)* 	Наземные LiDAR-системы устанавливаются на штативе или транспортных средствах и используются для детальной съемки местности и объектов. Аэролазерное сканирование применяется для съемки больших площадей с воздуха с помощью БПЛА или дронов
4	*Грунтовые радары (GPR)* 	Грунтовые радары (GPR) используются для маршрутной подповерхностной съемки и позволяют дополнительно выявлять и картировать на плане подземные структуры в массиве
5	*БПЛА или дроны* 	БПЛА или дроны с фотокамерами и LiDAR-системами предоставляют высокоточные данные для картирования и мониторинга и особенно эффективны на труднодоступных или опасных для традиционной съемки территориях
6	*ДЗЗ или аэрофотосъемка* 	ДЗЗ производится с помощью спутниковых систем или аэрофотосъемки с небольших самолетов, БПЛА или дронов. Спутниковые снимки используются для создания общих планов и мониторинга обширных территорий, отдельные КА позволяют получать детализированные данные. Аэрофотосъемка применяется для создания высокоточных ортофотопланов и 3D-моделей наземной инфраструктуры и ландшафта местности
7	*Географические информационные системы (ГИС)* 	ГИС используются для интеграции и генерации данных из различных источников (геодезические измерения, спутниковые снимки, LiDAR и т. д.) с целью создания комплексных карт/планов и пространственных 3D-моделей, БД

На глобальном рынке спутниковые системы [130] являются наиболее перспективным инструментом в изучении и создании цифрового двойника планет. Существуют разновидности группировок космических аппаратов, предназначенных для получения информации о физических, химических и биологических аспектах окружающей среды. Космическая отрасль динамично развивается по пути создания интеллектуальной геометавселенной (AI-GEO-META), ориентированной на виртуальное взаимодействие людей и технологий при работе с совокупностью пространственных данных в режиме реального времени [131]. Основными преимуществами методов ДЗЗ являются мультимасштабность и высокотехнологичность процессов, а также доступность и информативность геоданных.

В ключе космических научно-исследовательских миссий глобального мониторинга создана сеть спутниковых систем, непрерывно собирающих массив всевозможных геопространственных данных. В ключе межгосударственных инициатив реализуется внедрение пилотных проектов по оказанию информационных услуг, касающихся окружающей среды и ее экологической безопасности. Национальные целевые космические программы устанавливают приоритетный курс развития отрасли в отдельных регионах. Международное сотрудничество направлено на взаимный доступ к спутниковым данным и их массовое применение в разных сферах деятельности человека.

Космические аппараты производят с околоземной орбиты регулярную автоматизированную и дистанционную съемку в запланированный период времени в широком диапазоне электромагнитного спектра от 0,01 мкм до 1 м с полным покрытием всей земной поверхности (в том числе водной поверхности и атмосферы). Основной принцип ДЗЗ (рис. 2.36) заключается в фиксировании специальными сенсорами сигнала отраженной солнечной и излученной земной поверхностью тепловой энергии с последующей ретрансляцией пространственных данных в наземные приемные станции. При анализе космоснимков распознавание исследуемых объектов осуществляется в определенных спектральных каналах и режимах съемки на основе отражательной способности (спектральных свойств) их поверхности (рис. 2.37). Данная отличительная особенность широко используется при мониторинге различных объектов и территорий (промышленные сооружения, дороги, почвы, растительность, вода и др.) с целью создания их классификации и картирования на основе геопространственного анализа.

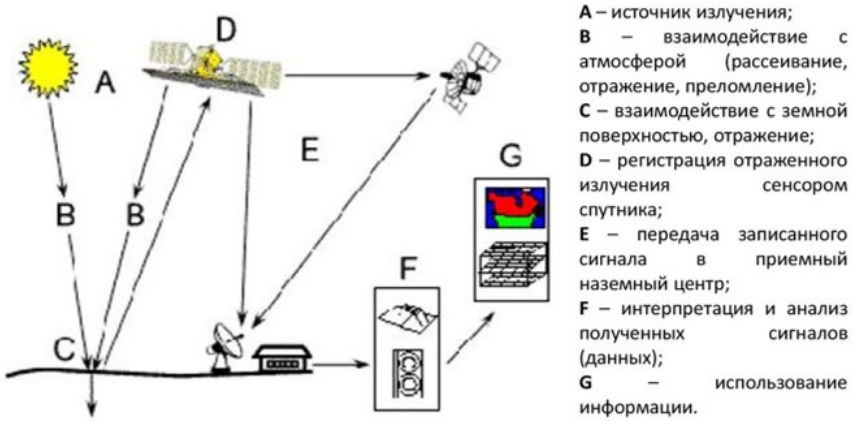


Рис. 2.36. Общий принцип сбора и анализа пространственной информации на основе космических и цифровых технологий дистанционного зондирования Земли [132]

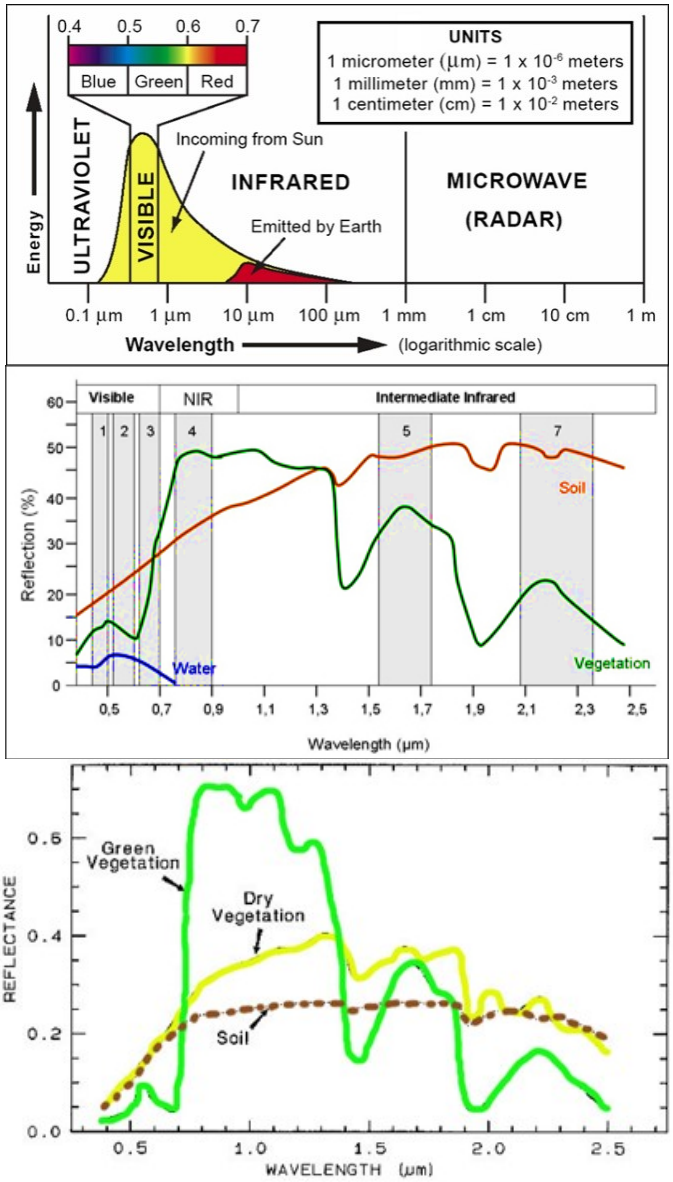


Рис. 2.37. Спектральные каналы и режимы съемки при использовании космических аппаратов для распознавания различных характеристик земной и водной поверхности в разных условиях [132]

Космические и цифровые технологии находят прикладное применение в задачах геоинформационного сопровождения строительства и эксплуатации хранилищ горных отходов [133]. Внедрение спутниковых систем способствует более безопасному и эффективному контролю и управлению горным предприятием и критически важной инфраструктурой на всей его территории. Главными преимуществами технологий ДЗЗ является возможность предотвращения нахождения человека и съемочной техники в опасной зоне, большой информативностью и площадью обзора, а также высокой степенью интеграции с другими системами наблюдений и надзора. В основе цифровой трансформации

данных ДЗЗ (ДДЗЗ) используются принципы: стандартизации и открытости геоданных, автоматизации процессов их сбора и анализа.

Геоинформационный космический мониторинг [134] реализуется с помощью прикладного программного обеспечения на базе интегрированных систем и веб-платформ (рис. 2.38 и 2.39). В области ДЗЗ существует многообразие ПО: автономные или веб-приложения, математические или скомпилированные программы, открытые архивные облачные базы данных или онлайн-карты, прикладные ГИС- или геопорталы, многофункциональные программные комплексы, а также универсальные интегрированные платформы. Цифровые платформы имеют сложный аппаратно-вычислительный модуль работы с большими данными (Big Data) и поддержкой облачных онлайн-сервисов хранения информации (Cloud Service) на базе геопространственного искусственного интеллекта (GeoAI). Их применение позволяет совершать интерактивную визуализацию (включая многослойные изображения), автоматизированную тематическую обработку и ретроспективный статистический анализ динамических пространственных изменений, в том числе по >150 стандартизованным тематическим (аэрозольным, водным, вегетативным, геологическим и т. д.) индексным геоиндикаторам.



Рис. 2.38. Архитектура современной геоинформационной системы ДЗЗ [135]

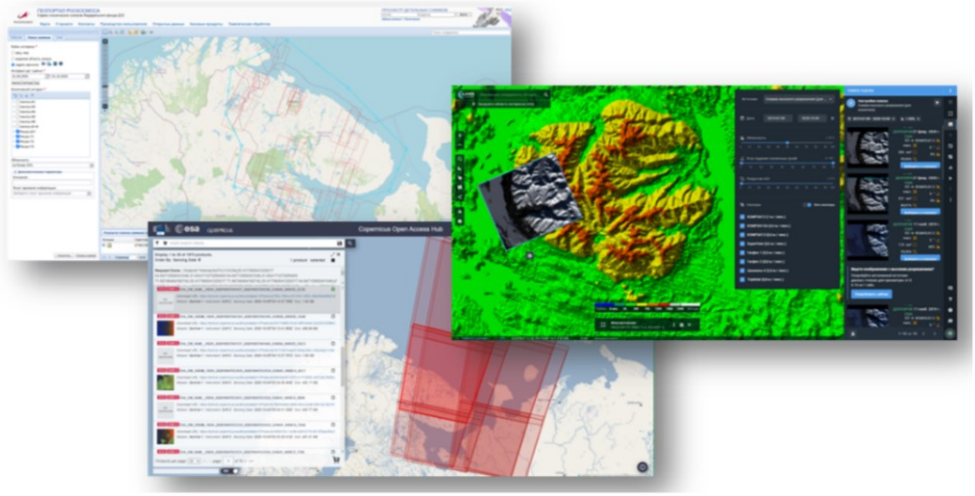


Рис. 2.39. Современное прикладное программное обеспечение в области ДЗЗ

В данной сфере широко используются следующее ПО: ArcGIS, QGIS, Map Viewer, ERDAS IMAGINE/ER Mapper, IMAGINE Photogrammetry (ранее — LPS), ImageStation, GeoMedia, GeoMedia Smart Client/WebMap, ERDAS APOLLO, Geospatial SDI, Mobile MapWorks, Google Earth Pro/Timelapse, ESA SNAP/Sentinel Hub EO Browser и др. Например, программный комплекс QGIS [136] представляет собой свободную геоинформационную систему с открытым доступом для работы с пространственными данными для создания тематической информационной продукции. QGIS позволяет создавать, анализировать и управлять объемной геопространственной информацией с поддержкой векторных и растровых форматов, а также использовать различные инструменты анализа, выборки, геопроцессинга, управления геометрией и большими БД. ПО Google Earth Pro [137] представляет собой бесплатную программу с расширенным набором инструментов, которая позволяет импортировать и экспортировать данные ГИС, а также найти архивные БД космоснимков. Новая концепция развития геоинформационных платформ (рис. 2.40) предполагает, что ДДЗЗ посредством прикладных сервисов и приложений будут генерироваться в единой информационной системе, используемой при обновлении и распределении геоинформации в едином цифровом пространстве на горном предприятии, а также в системы наблюдений и контроля через стационарные или мобильные технические устройства (ПК, планшеты, смартфоны, VR-гаджеты и т. д.).

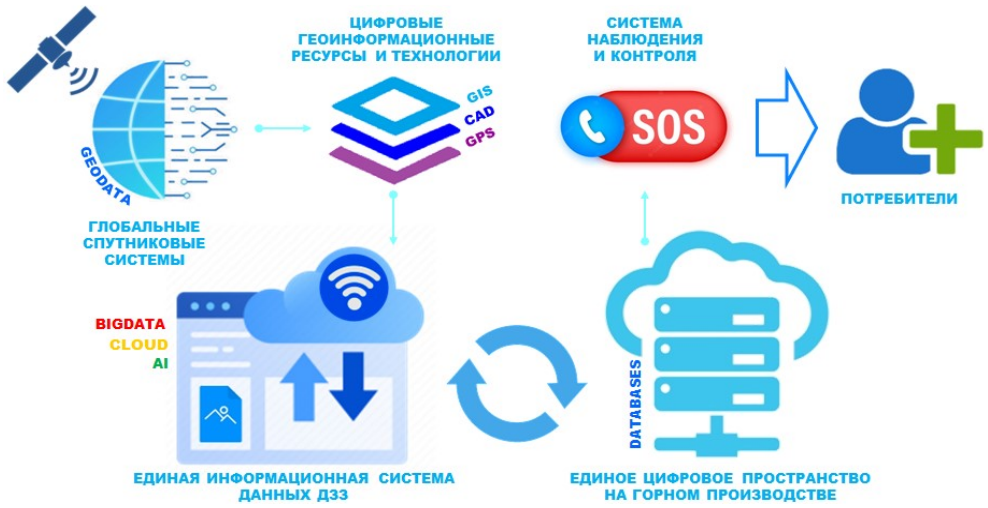


Рис. 2.40. Концептуальная модель геоинформационного космического мониторинга на горном производстве [131]

Дистанционный мультиплощадный мониторинг горнопромышленных объектов и территорий может осуществляться с использованием КА, оснащенных оптической, инфракрасной или радиолокационной аппаратурой. ДДЗЗ, как правило, содержат в себе набор необходимых метаданных, описывающий сенсор и условия получения изображения: время съемки, координаты, углы наклона съемочной аппаратуры, размер пикселя, фазы смещений и т. д. Современные геоинформационные ресурсы предоставляют удаленный доступ в сети интернет к ДДЗЗ. Материалы съемок систематизируются по уровням обработки данных и хранятся на открытых облачных серверах. Удаленный доступ к БД ДЗЗ предоставляется на разных уровнях обработки и хранения информации. В данной постановке задачи широко применяются цифровые платформы на базе интегрированных программно-вычислительных ГИС и веб-сервисов для работы с ДДЗЗ с возможностью оперативной генерации и трансформации продукции в едином виртуальном пространстве. Прикладное ПО имеет встроенный пакет модулей и аналитического инструментария для решения задач ГИС на базе

передовых IT-технологий (BIG DATA, CLOUD, AI и др.). Импорт БД ДЗЗ производится в виде сплошных панхроматических или многоспектральных изображений со встроенным единым набором метаданных. Дешифрование космоснимков выполняется визуальными и автоматизированными методами обработки данных. Экспорт результатов спутниковой съемки осуществляется в виде тематических или пространственно-аналитических геоинформационных продуктов. Готовая цифровая геоинформационная продукция предоставляются в виде визуализированных графических или аналитических данных стандартизованных форматов: картографии и топографии, 2/3D-моделей рельефа местности или наземной инфраструктуры, спутниковой интерферометрии, фото- или индексных изображений, графиков, таблиц и др. (табл. 2.7).

Таблица 2.7

Основные виды цифровых продуктов космической съемки
в задачах геоинформационного сопровождения горных работ [131]

Наименование	*Режимы съемки КА			
	UV	V	IR	R
Фотоснимки		●		
Топо- и картографические материалы		●	●	●
Цифровые модели рельефа и наземной инфраструктуры		●		●
Тематические индексные изображения	●		●	
Пространственно-аналитические и графические числовые геоданные	●	●	●	●

* Режимы спутниковой съемки космическими аппаратами (КА), где UV — ультрафиолетовый, V — видимый, IR — инфракрасный, R — радарный диапазоны электромагнитного спектра съемочной аппаратуры соответственно.

Действующие спутниковые системы предоставляют комплексную всестороннюю информацию о состоянии горнопромышленных природно-технических систем (рис. 2.41). На горном производстве объектами космического мониторинга являются породный массив, промплощадка, капитальные или линейные сооружения, горная техника и особо охраняемые природные территории. Область применения КА в решении проблем промышленного и экологического мониторинга приведена в табл. 2.8. Допуск к пространственным данным обеспечивается на разных уровнях хранения информации (локальном, районном, региональном, национальном или международном). Материалы съемок за счет использования стандартизованного навигационного инструментария могут быть автоматически консолидированы и верифицированы в едином цифровом пространстве, формирующем совокупность хранилища информации (проектной, аналитической, экспертной, прогнозной, управленческой и т. д.), баз данных, вычислительных ресурсов и других сервисов. Работоспособность спутниковых систем в определенной степени зависит от географического местоположения объекта и условий его эксплуатации. Оптико-электронные системы наиболее эффективны при благоприятных метеоусловиях, а радиолокационные системы обеспечивают непрерывную всесезонную съемку. В условиях сложного рельефа возможно образование зон плохой видимости в зависимости от положения и углов наклона съемочной аппаратуры. В целом обе системы в условиях Северо-Западной части Российской Арктики обладают надежностью и могут эксплуатироваться круглогодично. Достоверность ДДЗЗ достигается за счет синхронизации средств измерений и других видов инструментальных съемок, применения специальных программных алгоритмов и методов коррекции данных, а также поверочных тестов отдельных характеристик (пространственно-частотных, спектрорадиометрических, координатно-измерительных и др.). Космоснимки подлежат соответствующей сертификации и предоставляются на открытой или коммерческой основе.

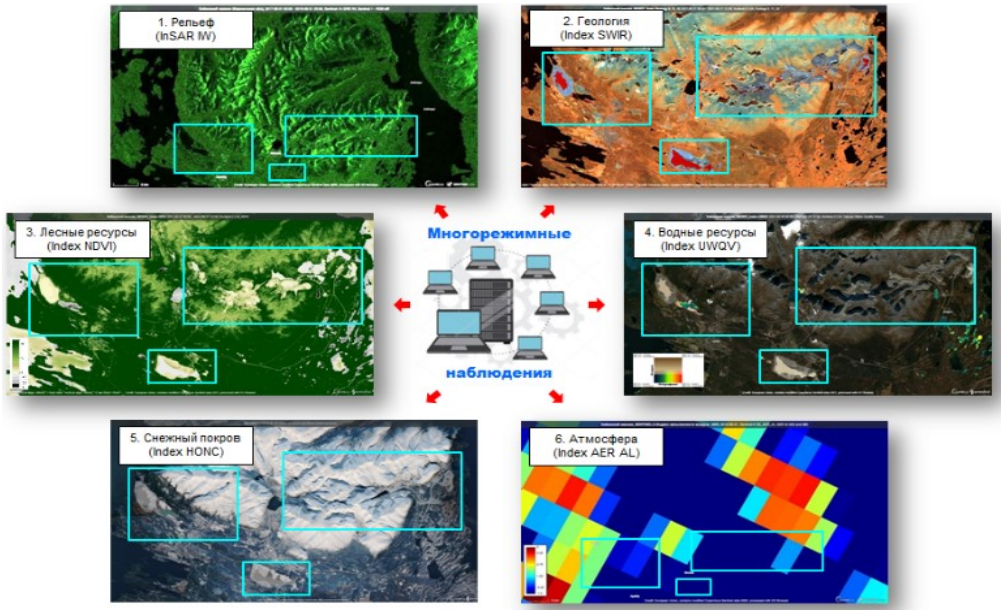


Рис. 2.41. Комплексный многорежимный космический мониторинг горных предприятий в районе Хибинского массива на базе спутниковой системы ESA Sentinel [131]: *1* — радарный, *2–5* — инфракрасный, *6* — ультрафиолетовый спутниковые снимки, соответственно; ▭ — районы местоположения горных предприятий

Таблица 2.8

Приложение космических и цифровых технологий в горной промышленности в задачах управления рисками аварий [131]

Виды аварий	*Условный уровень риска	**Режимы съемки КА			
		UV	V	IR	R
I. Аварии, связанные с нарушениями локальных технологических инструкций и нормативно-технической документации, приводящие к лишению лицензии на разработку месторождения	Высокий		●		
II. Аварии, связанные с проявлениями опасных геологических процессов в горном массиве	Высокий		●	●	●
III. Аварии, связанные с промышленными загрязнениями территории охраняемых природных ресурсов и атмосферы	Высокий	●	●	●	
IV. Аварии, связанные с нарушением функциональной надежности или безопасностью отдельных капитальных инженерных сооружений и целостности линейных объектов	Средний		●	●	●
V. Аварии, связанные с выбросами газов и возгораниями отдельных инженерных сооружений или горючих материалов		●	●	●	
VI. Аварии, связанные с неблагоприятными погодными или климатическими явлениями	Низкий	●	●	●	●

* Условный уровень риска приведен по степени потенциального ущерба (т. е. к высокому уровню риска отнесены группы I–III, которые могут привести к значительным экономическим затратам на незапланированную консервацию горных объектов или ликвидацию последствий крупных аварий, IV–V — относительно средним издержкам на ликвидацию небольших аварий и VI — незначительным плановым расходам).

** Выбор режимов спутниковой съемки космическими аппаратами, где UV — ультрафиолетовый; V — видимый; IR — инфракрасный; R — радарный диапазоны электромагнитного спектра съемочной аппаратуры соответственно.

В задачах управления природно-техногенными рисками методами ДЗЗ осуществляется виртуальное отслеживание зон развития опасных процессов на земной поверхности посредством ретроспективного пространственно-аналитического

или геостатистического анализа. При оценке потенциальных рисков актуализируется исходная картографическая информация или выполняется построение многослойных пространственных моделей, на основе которых осуществляется прогнозное моделирование явлений. Геоинформационный анализ включает в себя визуализацию и автоматизированное районирование территории, определение конфигурации объектов во времени, а также локализацию опасных процессов посредством интерпретации данных динамических измерений на виртуально закладываемых наблюдательных полигонах или в пределах отведенных границ. Данные со спутников позволяют оптимизировать местоположение промышленных систем мониторинга в исполнении надзора и контроля строительства наземной инфраструктуры. В процессе спутниковой съемки на регулярной основе возможно создание цифровых баз данных техногенно нарушенных земель по группе месторождений или карт потенциальных рисков.

Анализ мирового опыта [68, 138–148] показывает, что внедрение космических и цифровых технологий в горном деле способствует решению следующих задач:

- архивный поиск и актуализация геоинформационных продуктов;
- подготовка площадок и надзор строительства наземной инфраструктуры;
- геолого- и геофизическая разведка;
- промышленный и экологический мониторинг;
- информирование о чрезвычайных ситуациях и авариях;
- контроль рекультивации нарушенных земель.

2.3.2. Методический подход к дистанционному мультимасштабному мониторингу горнотехнических объектов

В Горном институте КНЦ РАН в рамках фундаментальных исследований осуществляется разработка теоретических и практических основ к применению космических и цифровых технологий в задачах геоинформационного сопровождения на объектах складирования и хранения отходов горного производства [149].

Разработан новый подход (рис. 2.42) к мультиплощадному мониторингу горнопромышленных комплексов в Северо-Западной Арктической зоне РФ на основе комбинирования оптико-электронных и радиолокационных методов ДЗЗ посредством визуализированного и автоматизированного индексного геопространственного анализа природно-технических систем с помощью прикладных ГИС- и веб-геосервисов.



Рис. 2.42. Архитектура системы дистанционного мультиплощадного мониторинга хранилищ горных отходов на основе космических и цифровых технологий [149]

Задача реализуется с помощью цифровых платформ: Google Earth, QGIS, ESA SNAP/Sentinel Hub EO Browser, геопортала «Роскосмос» и др. В качестве основных спутниковых систем используются: «Ресурс-П»/«Канопус-В» (Россия) и Sentinel-1, 2 (Европейский союз) с пространственным разрешением 0,55/2,1/1–20 м. В условиях северных широт космическая съемка с целью наилучшей детализации и информативности

геоданных производится в комбинированном видимом, ближнем инфракрасном (VNIR) и коротковолновом инфракрасном диапазоне (SWIR), состоящем из 13 спектральных каналов, а также радиолокационном С-диапазоне (режим IW) электромагнитного спектра. Выбранный комплекс съемочной аппаратуры и программного обеспечения в целом обеспечивает получение качественной и количественной информации при некоторых ограничениях в ее поступлении в отдельные сезонные периоды года.

Действующие спутниковые системы отличаются широким набором съемочного и программно-вычислительного инструментария, который позволяет вести комплексный мониторинг и исследования состояния объектов и территорий размещения горных отходов, а также своевременно выявлять потенциальные риски и принимать меры по их снижению.

Методы ДЗЗ применяется для решения следующих задач:

- определение местоположения и геометризация хвостохранилищ, отвалов и других сооружений;
- расчет площади и объемов накопленных отходов с учетом данных о высоте и рельефе местности;
- актуализация цифровых 3D-моделей рельефа и наземной инфраструктуры;
- профилирование и определение фактических углов откосов сооружений при оценке их надежности и устойчивости;
- определение наличия и размеров водных поверхностей на гидротехнических сооружениях;
- анализ состояния дренажных каналов и водоотводов;
- оценка техногенного воздействия;
- определение динамики изменения параметров хвостохранилищ или отвалов в процессе их строительства;
- обнаружение опасных деформаций и подвижек грунтов в зоне размещения дамб, плотин или отвалов;
- анализ текстуры и состояния земной поверхности хвостохранилищ и отвалов, в том числе выявление крупных структурных элементов и зон развития эрозии.

На практике методы ДЗЗ позволяют удаленно определять и измерять отдельные контрольные параметры и характеристики объектов размещения отходов горного производства (рис. 2.43). Основные технические характеристики современных КА приведены в табл. 2.9.



Рис. 2.43. Классификация наблюдаемых контролируемых параметров и характеристик (геоиндикаторов) объектов размещения отходов горного производства на основе методов ДЗЗ [149]

Таблица 2.9

Основные технические характеристики современных КА [149]

Наименование	КА				
	«Ресурс-П»/«Канопус-В» (Россия)	Landsat/World View (США)	Sentinel 1/2 (Европа)	Jilin/Gaofen/Super View (Китай)	Cartosat (Индия)
Тип орбиты	Солнечно-синхронная				
Интервал повторения	3/4–16 дн.	16/1–5 дн.	1–3/5–10 дн.	3,3/1,5–5/2–4 дн.	4–5 дн.
Инструменты	ОЭК, ГСА, ШМСА-ВР и СР/ПСС, МСС, RPC	OLI, TIRS/GIS	C-SAR (PJIC)/MSI (TCA)	MSI/PMS, SAR/MSI, SAR	PAN, MSI (TCA), MWIR
Пространственное разрешение (П и М*)	0,55 и 3–120/2,1 и 10,5 м	15 и 30–100/0,31 и 1,24 м	1–100/10–60 м	0,72 и 2,88/0,8 и 3,2/0,3 и 1,2 м	0,25–12 м
Полоса обзора	950/920 км	185/13,2 км	250/290 км	11,6/48/12км	16 км

*Панхроматический и многоспектральный (мульти- и гиперспектральный) режимы съемки соответственно.

Внедрение и организацию спутниковой системы в условиях одного или группы горных предприятий целесообразно планировать в составе комплексной системы наблюдений за состоянием промышленных объектов и окружающей среды. Такой подход способствует достижению требуемого уровня достоверности пространственных данных, обеспечению непрерывного сбора и оперативного обмена полным набором контролируемых параметров (геоиндикаторов) для своевременной оценки и прогноза устойчивого и безопасного состояния производственных комплексов. Новейшие методы, основанные на полевых измерениях (геодезия, гидрогеология, гидротехника и т. д.), имеют наиболее точный измерительный инструментарий, а удаленные (аэро- и космосъемка, геоинформатика и т. д.) — наибольшую информативность и площадь покрытия. Совместное применение вышеперечисленных методов в целом способствует повышению эффективности и работоспособности типовой системы мониторинга. ДДЗЗ могут использоваться в прикладных задачах геодезии, геотехники, геоэкологии и т. д.

2.3.3. Реализация дистанционного мультимасштабного мониторинга горнотехнических объектов

Прикладное применение методов ДЗЗ в задачах мультимасштабной съемки хранилищ горных отходов реализуется путем комплексных наблюдений и исследований, а также сбора больших данных и их управления (рис. 2.44). При этом были проанализированы технические возможности современных спутниковых систем и адаптированы подходы к планированию периодических измерений в местных условиях. Удаленный мониторинг включает в себя режимные наблюдения за отдельными производственными процессами, а также контроль соблюдения принятых решений и рисков, связанных с обеспечением промышленной и экологической безопасности окружающей среды. На основе ДДЗЗ осуществляется воспроизводство визуализированной и тематической информации, а также выполняется мониторинг за состоянием горнотехнических объектов и особо охраняемых природных территорий. Дополнительно методы ДЗЗ применяются в качестве инструмента ситуационной оценки и прогноза техногенного воздействия, прежде всего в чрезвычайных ситуациях, при установлении истинных причин и масштабов промышленных аварий. Ниже представлены опыт и результаты ДЗЗ действующих горных предприятий (АО «Апатит», АО «Ковдорский ГОК», АО «Кольская ГМК» и др.) на территории Мурманской области.

Дистанционная мультимасштабная съемка горнотехнических объектов и территорий производится в видимом, радиолокационном или коротковолновом инфракрасном композитном (RGB-сигнал) диапазоне электромагнитного спектра с использованием стандартизованных индексов (SWIR, NDWI, NDVI, NDSI и др.). Максимальную точность измерений обеспечивают оптические и радиолокационные спутниковые системы с разрешением 0,15–0,3 и 1–10 м соответственно, а инфракрасные системы — высокую информативность и возможность получения широкого набора тематических данных с учетом спектральных характеристик. В сущности, дистанционная съемка производится с помощью комплекса спутниковых систем и использованием нескольких КА для повышения ее эффективности и надежности.

Процесс космического мониторинга заключается в проведении маршрутной съемки КА с заданными съемочными параметрами и передаче ДДЗЗ на наземные станции для последующего анализа и хранения. Предварительная обработка геоданных включает в себя калибровку

(корректировку радиометрических и геометрических искажений), а также орторектификацию (приведение снимков к точной пространственной ориентации с учетом рельефа местности). Погрешность измерений обычно составляет от сантиметров до первых метров в зависимости от технических характеристик, используемых КА, и местных условий.

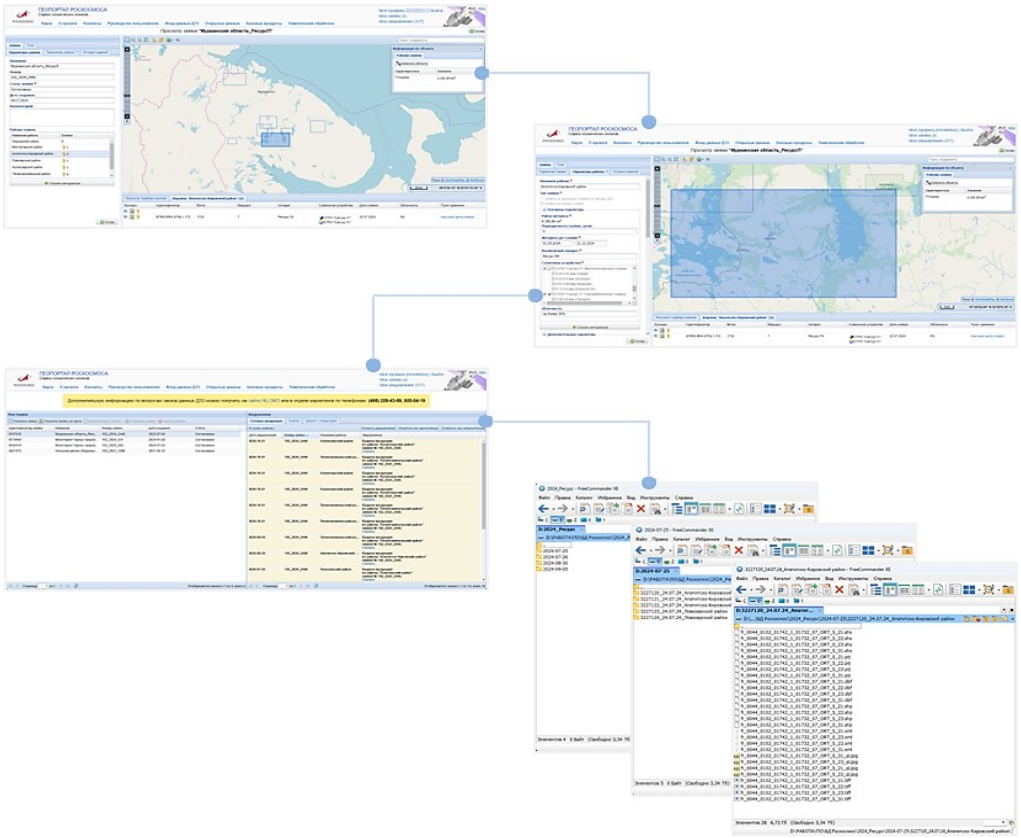


Рис. 2.44. Сбор и создание БД космоснимков горнопромышленных территорий на примере спутниковых систем «Ресурс-П»/«Канопус-В» (Госкорпорация «Роскосмос»)

Геопространственный анализ ДДЗЗ производится посредством совмещения визуальных изображений и изображений, полученных на основе индексной классификации, для выделения различных типов объектов и ландшафтов с созданием тематических карт. При наличии данных наземных измерений (GPS/GNSS) и других источников информации выполняется интеграция и верификация ДДЗЗ для повышения точности и полноты геопространственного анализа. К особенностям мультиплощадной съемки объектов размещения горных отходов с помощью ДЗЗ можно отнести: полный обзор, относительную точность и достаточную периодичность измерений с возможностью автоматизации пространственно-вычислительных процессов.

На практике методы ДЗЗ целесообразно применять при дистанционной съемке всей территории горного предприятия, в том числе локальных зон, где по какой-либо причине не проводится детальная съемка с использованием традиционных высокоточных средств наблюдений. В отдельных регионах могут

существовать некоторые ограничения, связанные с наличием и доступом к БД ДЗЗ, а также со снижением эффективности работы спутниковых систем по отслеживанию контрольных параметров (геоиндикаторов) в сложных метео- и климатических условиях.

На показанном примере АО «Ковдорский ГОК» (рис. 2.45) дистанционная мультиплощадная съемка хранилищ горных отходов проводилась с применением комплекса оптических, инфракрасных и радиолокационных спутниковых систем «Ресурс-П»/CNES Airbus и Sentinel-1, 2 с разрешением 0,55/0,5–2 и 10–20 м соответственно. Обработка изображений выполнялась с помощью Google Earth/QGIS и Sentinel Hub EO Browser. ДДЗЗ получены посредством комбинирования изображений в видимом и коротковолновом инфракрасном композитном (RGB-сигнал) каналах с использованием стандартизованного индекса SWIR. Районирование отдельных объектов выполнено с учетом их положения на генеральном плане и данных производственного контроля. По результатам ДЗЗ оконтурены границы и вычислены с приемлемой погрешностью фактические площади объектов размещения отходов горного производства.



Рис. 2.45. Дистанционная площадная съемка и геопространственный анализ на основе космических и цифровых технологий (V, IR и R — оптическая, инфракрасная и радиолокационная съемка соответственно) [149]

Мультиплощадный мониторинг в решении задач в сфере надзора и контроля строительства горнотехнических объектов производится путем геопространственного анализа временных рядов с сопоставлением текущих и архивных изображений. ДДЗЗ содержат в себе необходимую информацию о реальном положении и динамике изменения размеров объектов и территорий, а также наличии и нахождении горной техники в ходе их строительства в определенный период времени. На примере ООО «Ковдорслюда» (рис. 2.46) выполнен ретроспективный анализ динамики

изменения наземной инфраструктуры для выявления фактов незаконной добычи и размещения отходов в процессе эксплуатации и консервации техногенных месторождений. Проведен сбор архивных оптических спутниковых снимков за период 1985–2020 гг. на базе спутниковых систем Maxar Technologies, CNES Airbus и Landsat с разрешением 0,15–0,3, 0,5–2 и 15–30 м соответственно. Интерпретация изображений произведена с помощью Google Earth. В период 2006–2014 гг. на основе изучения ДДЗЗ посредством совмещения контуров и оценки динамики изменения площади территорий были подтверждены признаки возможного нарушения условий лицензирования горной деятельности. Результаты ДЗЗ выявили относительные изменения границ, формы и площади на объекте и территории, предназначенной для размещения минерального сырья в породных отвалах.

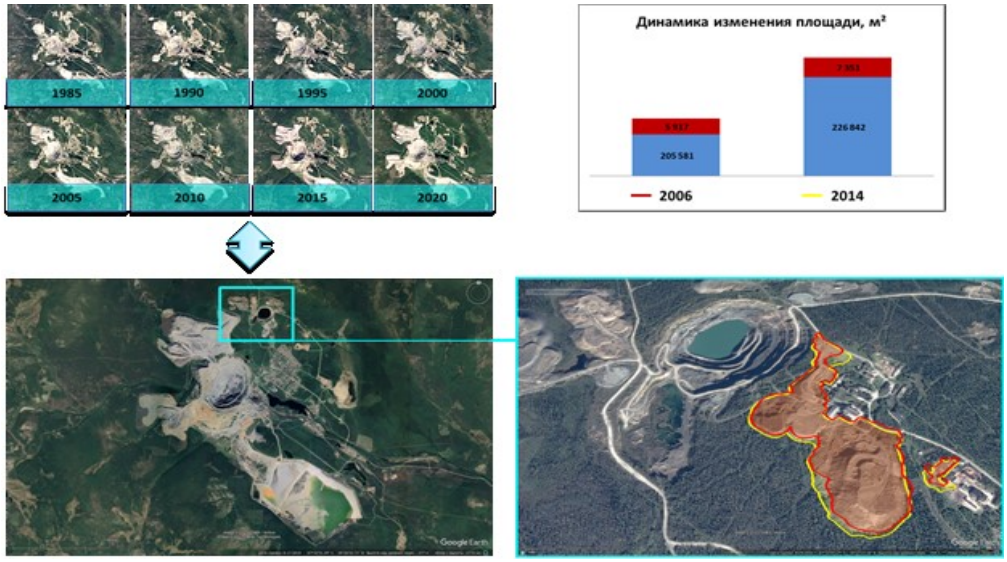


Рис. 2.46. Надзор и контроль строительства горных объектов и территорий на основе космических и цифровых технологий [149]

2.3.4. Создание региональной базы данных горнотехнических объектов Евро-Арктического региона

Дистанционная мультиплощадная съемка одного или нескольких горных предприятий методами ДЗЗ сводится к созданию и управлению большими БД. На практике данная задача реализуется с помощью комплекса систем и разностороннего программного обеспечения.

На примере горнопромышленных предприятий в Мурманской области проведена спутниковая съемка с использованием КА «Ресурс-П», Maxar Technologies и CNES Airbus с пространственным разрешением 0,55–0,7, 0,15–0,3 и 0,5–2 м соответственно. Геопространственный анализ космоснимков выполнен с помощью программных комплексов: Google Earth и Sentinel Hub EO Browser.

По результатам дистанционной мультиплощадной съемки на основе разработанного методического подхода была актуализирована региональная БД (рис. 2.47–2.49) с использованием одной из вышеперечисленных облачных платформ. Созданная БД содержит в себе пространственную аналитику о местоположении, границах и площади хранилищ отходов горного производства (табл. 2.10).

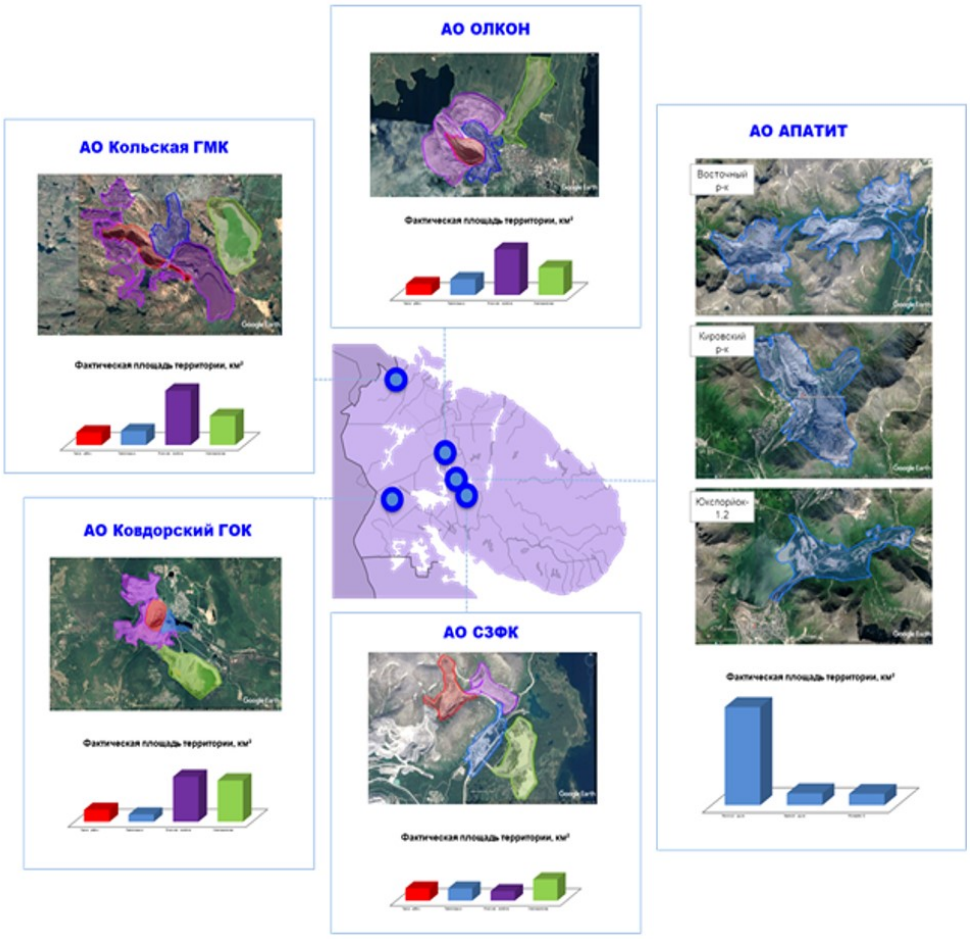


Рис. 2.47. БД площади горных объектов и территорий на основе космических и цифровых технологий [149]

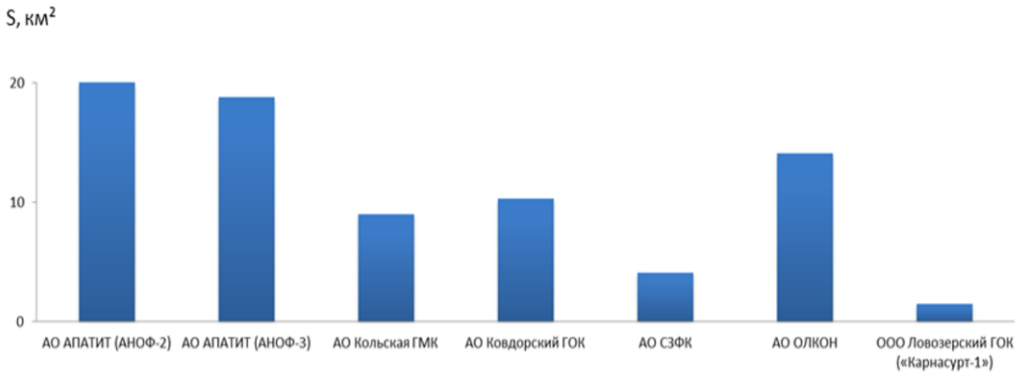
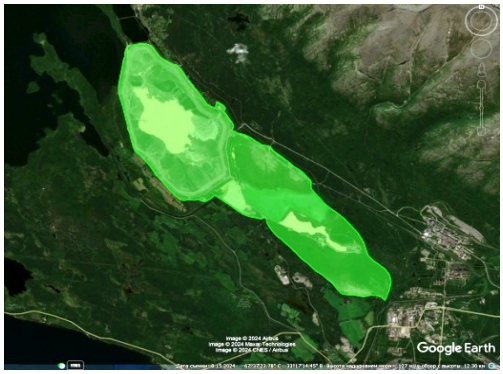
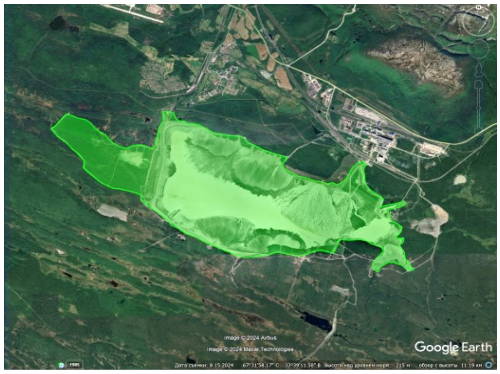


Рис. 2.48. БД хранилищ отходов обогащения горного производства на территории Мурманской области на основе космических и цифровых технологий



АО «Апатит» АНОФ-2



АО «Апатит» АНОФ-3



АО «Ковдорский ГОК»



АО «Кольская ГМК»



АО «СЗФК»



АО «Олкон»



ООО «Ловозерский ГОК» («Карнасурт-1»)

Рис. 2.49. Результаты геометризации объектов размещения минеральных отходов горного производства на территории Мурманской области на основе космических и цифровых технологий

Таблица 2.10

БД площади объектов размещения горных отходов
на территории Мурманской области на основе ДДЗЗ

Горное предприятие	Площадь территории, км²					
	хвосто-хранилище в целом	секция № 1	секция № 2	секция № 3	пруд-отстойник № 1	пруд-отстойник № 2
АО «Апатит» (АНОФ-3)	15,8	12,8	1,96	–	0,27	0,63
АО «Ковдорский ГОК»	10,3	2,31	3,1	*4,32	0,26	–
АО «Кольская ГМК» («Печенганикель»)	8,91	*8,62	–	–	0,29	–
АО «Олкон»	12	9,52	–	–	2	0,2
АО «СЗФК»	3,75	0,53	*2,1	–	*1,1	–
ООО «Ловозерский ГОК»	1,21	0,41	0,77	–	0,03	–
ВСЕГО	51,97					

* Объект находится на этапе строительства/реконструкции.

2.4. Аэрофотосъемки горнотехнических объектов с применением БПЛА

Авторами в исследованиях применялся беспилотный летательный аппарат GeoScan 101 (рис. 2.50). БПЛА GeoScan 101 предназначен для автоматического выполнения аэрофотосъемочных работ и автоматической обработки данных аэрофотосъемки с помощью фотограмметрического программного обеспечения Agisoft Metashape Professional. По данным аэрофотосъемки и данным привязки (телеметрия полета, наземные опорные точки) создается облако точек, по качеству соответствующее лазерному сканированию, текстурированная 3D-модель местности на основе исходных изображений, матрица высот и ортофотоплан различных масштабов, в том числе 1:2000 и 1:500 (технология сертифицирована). Полученные данные могут быть использованы для дальнейшей обработки в другом программном обеспечении.



Рис. 2.50. БПЛА Geoscan 101

Комплекс оснащен системой автоматического управления (автопилотом), инерциальной навигационной системой, контроллером управления полезными нагрузками, цифровым каналом связи для передачи командно-телеметрической информации.

Наземная станция управления предназначена для подготовки полетного задания (рис. 2.51), контроля и управления беспилотным воздушным судном и отображения телеметрической информации, поступающей от БПЛА. БПЛА выполняет взлет, полетное задание и посадку в автоматическом режиме, оператор имеет

возможность оперативно изменить полетное задание. Технические характеристики комплекса представлены в табл. 2.11.

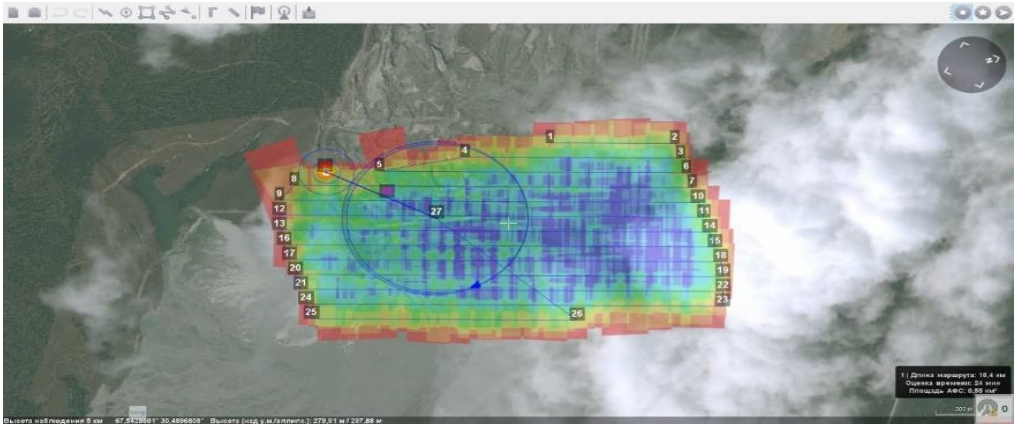


Рис. 2.51. Схема полетного задания

Таблица 2.11

Технические характеристики Geoscan 101

Тип БПЛА	Самолетный
Взлет/посадка	С катапульты / на парашюте, в автоматическом режиме
Тип двигателя	Электрический
Продолжительность полета	1 ч
Максимальная протяженность маршрута	60 км
Площадь участка фотосъемки за 1 полет (зависит от требуемого масштаба съемки)	3–8 км^2
Рекомендуемая допустимая скорость ветра	До 10 м/с
Максимально допустимая скорость ветра	До 15 м/с
Скорость полета	64–130 км/ч
Максимальная взлетная масса	3,1 кг
Масса полезной нагрузки	До 0,8 кг
Размах крыльев	1,3 м
Минимально безопасная высота полета	100 м
Максимальная абсолютная высота полета	4000 м
Время подготовки к взлету	10 мин
Температура эксплуатации	От –20 до +40 °С (расширенный диапазон: –40 до +50 °С)
Защитный транспортировочный кейс IP67 для БЛА и НСУ	Размер: 80×52×31 см, вес брутто: 20,5 кг
Чехол со складной катапультой	Размер: 115×19×16 см, вес брутто: 7 кг

Основные задачи, которые решались при помощи программы Metashape: восстановление 3D-поверхности, построение ортофотоплана и ЦММ. Работа с проектом осуществляется в четыре этапа.

1. Определение параметров внешнего и внутреннего ориентирования камер. На первом этапе Metashape находит общие точки фотографий и по ним определяет все параметры камер: положение, ориентацию, внутреннюю геометрию (фокусное расстояние, параметры дисторсии и т. п.). Результатами являются разреженное облако общих точек в 3D-пространстве модели и данные о положении и ориентации камер.

2. Построение плотного облака точек. На втором этапе Metashape выполняет построение плотного облака точек на основании положений камер, рассчитанных на первом этапе обработки, и используемых фотографий. Перед переходом на следующий этап создания 3D-модели или перед экспортом модели плотное облако точек может быть отредактировано и классифицировано.

3. На третьем этапе Metashape строит трехмерную поверхность: полигональную модель и/или карту высот (рис. 2.52). Трехмерная полигональная модель описывает форму объекта на основании плотного облака точек. Также возможно быстрое построение модели на основании только разреженного облака точек. Поскольку она часто бывает излишней, Metashape позволяет сразу перейти к построению карты высот, отказавшись от построения полигональной модели. Возможно выбрать проекцию для построения карты высот из следующих вариантов: географическая, цилиндрическая и проекция на плоскость. Кроме того, Metashape позволяет указать классы точек, для которых будет строиться карта высот (если плотное облако было классифицировано на предыдущем этапе).

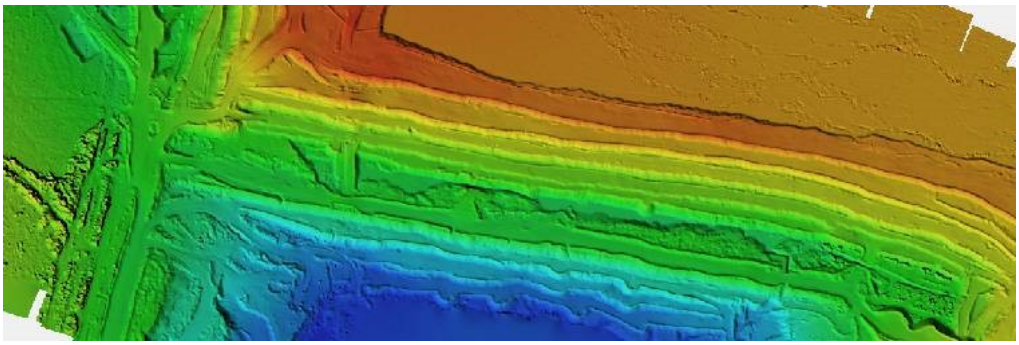


Рис. 2.52. Карта высот ограждающей дамбы хвостохранилища

4. На финальном этапе в Metashape доступно построение текстуры для полигональной модели (если она была построена), а также построение ортофотоплана (рис. 2.53). Ортофотоплан проецируется на поверхность, указанную пользователем, это может быть карта высот или полигональная модель.



Рис. 2.53. Ортофотоплан ограждающей дамбы хвостохранилища

В результате проведенных аэрофотосъемок были получены более 2 тыс. фотографий, покрывающих площадь в более чем 1,5 км^2. При обработке данных полета в специализированном программном продукте Agisoft Metashape Professional были определены положения и ориентация камеры для каждого кадра и построено разреженное облако точек. Основываясь на рассчитанных положениях камер, программа обработки вычислила карты глубин для каждой камеры и на их основе построила плотное облако точек. На основании плотного облака точек была рассчитана карта высот, что позволяет получить наиболее точные результаты.

Необходимым результатом обработки аэрофотосъемки является ортофотоплан, который строится на основании исходных снимков и реконструированной цифровой модели дневной поверхности, что позволяет создавать результирующее изображение высокого разрешения.

2.5. Создание геофильтрационных и гидрогеомеханических моделей горнотехнических объектов

Компьютерное геофильтрационное 3D-моделирование заключалось в воспроизведении цифрового двойника ГТС хвостохранилища на основе интерпретации различных механизмов развития процессов фильтрации грунтовых вод и связанных с ними явлений для обеспечения наиболее эффективного решения гидрогеологических задач [34, 38, 150–153]. В исследованиях применено численное моделирование развития фильтрационно-деформационных процессов с использованием конечно-элементного и конечно-разностного методов решения дифференциальных уравнений с сеточной разбивкой моделей [40, 154–156]. Гидростатический напор и коэффициенты фильтрации использованы в качестве основных исходных гидродинамических параметров данных уравнений. При этом количество уравнений соответствовало числу блоков сеточной разбивки. Непосредственно численное моделирование осуществлялось посредством решения уравнений фильтрации с учетом заданных граничных условий и структуры фильтрационного поля [157–160].

При исследовании хвостохранилища вначале выполнялось построение геофильтрационной 3D-модели объекта и вмещающего массива в пределах горного отвода. Затем создавалась гидрогеомеханическая 3D-модель наиболее характерного участка хвостохранилища с формирующимися фильтрационно-деформационными процессами. Как геофильтрационная 3D-, так и гидрогеомеханическая 3D-модели хвостохранилища создавались с учетом реальных геометрических, инженерно-геологических и гидрологических условий [40, 154, 161–164].

В данных исследованиях отличительной особенностью подхода к построению гидрогеомеханической 3D-модели является возможность реализации совместных фильтрационно-деформационных расчетов, в которых учитываются гидростатические (степень водонасыщения грунтов, разность напоров), гидродинамические (образование водотоков, скорость и давление потока) и геомеханические (деформации и смещения грунтов под действием силы тяжести, а также вследствие гидростатического и динамического давления воды) условия и нагрузки [34, 40, 154].

В качестве примера выполнено построение геофильтрационной 3D-модели хвостохранилища АНОФ-3 КФ АО «Апатит» (рис. 2.54) с помощью программного комплекса Processing Modflow 8 на основе данных инженерно-геологических, гидрологических, геофизических и геодезических исследований объекта. Модель имитирует хвостохранилище как открытую природно-техническую систему,

подверженную эндо- и экзонагрузкам, и позволяет выявлять наиболее характерные особенности изменения ее гидрогеологического режима.

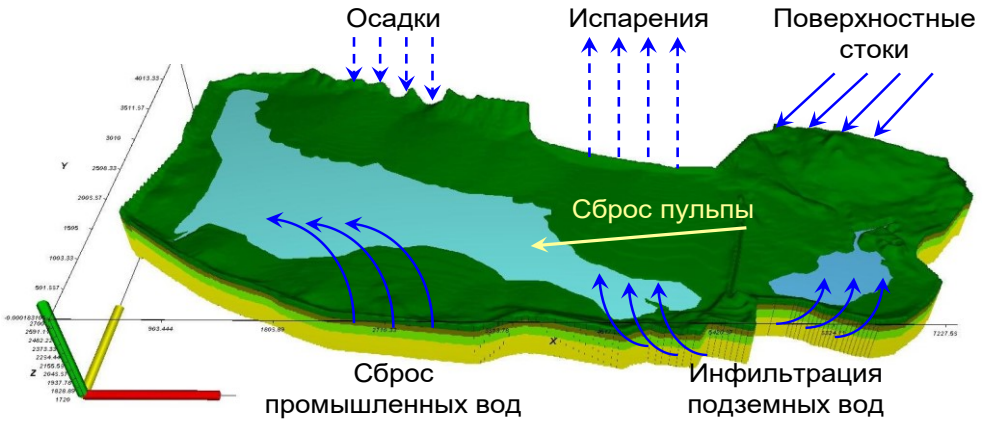


Рис. 2.54. Геофильтрационная 3D-модель хвостохранилища АНОФ-3 КФ АО «Апатит» как открытой природно-технической системы

Программа Processing Modflow 8 использует блочно-центрированный балансовый метод конечных разностей для расчета трехмерного и неоднородного по фильтрационным свойствам водного потока. В решении задачи выбран итерационный метод сопряженных градиентов. Расчетная геофильтрационная 3D-модель тела и основания ограждающей дамбы хвостохранилища разработана на основе обобщения и схематизации исходных данных. Размеры моделируемой области: 4515×8131 м. 3D-модель хвостохранилища включает: 300 строк, 500 столбцов и 4 слоя. Коэффициент фильтрации определяется для каждого инженерно-геологического слоя в отдельности. Режим фильтрации структурных слоев принимается напорно-безнапорным в зависимости от расчетного положения уровня воды в конкретной ячейке. При моделировании ведется подсчет грунтовых вод, а положение поверхности вод определяется с учетом суммарного значения их уровней. Задача решается в стационарной постановке. Трехмерная визуализация результатов моделирования производилась с помощью программы 3D Groundwater Explorer. При калибровке 3D-модели использованы данные рекогносцировочного и визуального обследования, а также инженерно-геологические, гидрологические и геофизические данные. Результаты геофильтрационного 3D-моделирования позволяют визуализировать положение уровней воды при оценке реального технического состояния объекта, а также прогнозировать формирование локальных зон повышенного гидростатического напора и фильтрации в сопряженных природно-технических водных средах.

На базе геофильтрационной 3D-модели разработана гидрогеомеханическая 3D-модель фрагмента хвостохранилища с использованием локализованной версии программного комплекса Plaxis 3D (рис. 2.55).

Принимая во внимание, что ГТС хвостохранилища обогатительной фабрики горнодобывающего предприятия представляет собой огромную природно-техническую систему площадью сотни миллионов квадратных метров и протяженностью ограждающих дамб десятки километров, построение ее 3D-модели базировалось на методических подходах к моделированию таких

объектов, оконтуренных линейными протяженными сооружениями (см. рис. 2.55). В случае с ГТС хвостохранилища такими линейными протяженными сооружениями являются ограждающие дамбы [34, 40, 154, 165].

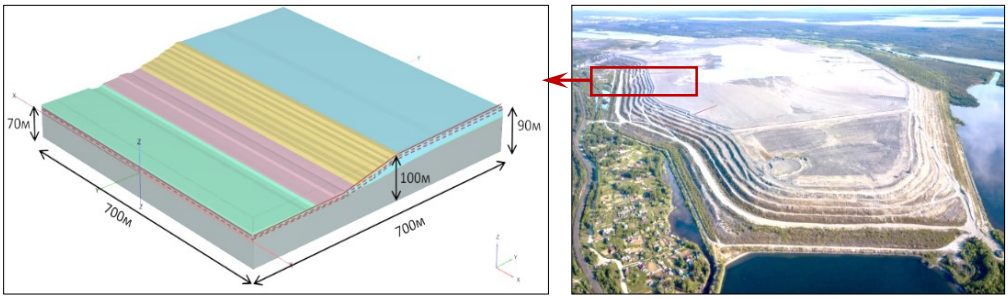


Рис. 2.55. Методический подход к построению гидрогеомеханической 3D-модели наиболее характерного фрагмента ГТС хвостохранилища АНОФ-3 КФ АО «Апатит»

Построение гидрогеомеханической 3D-модели выполняется в следующей последовательности:

- определение геометрии выбранного фрагмента ГТС хвостохранилища;
- построение дифференцированных моделей инженерно-геологического строения основания, намывных хвостовых отложений и насыпных грунтов дамбы;
- задание свойств грунтов и пород (параметры деформационных, прочностных и фильтрационных свойств);
- задание граничных условий и нагрузок от веса грунтов и воды;
- задание дифференцированной для различных слоев грунтов конечно-элементной сетки;
- проведение тестовых расчетов;
- обработка полученных тестовых результатов с возможностью сравнительного анализа с натурными данными;
- калибровка модели по данным натурных наблюдений;
- подтверждение адекватности созданной модели натурному объекту.

Для калибровки гидрогеомеханической 3D-модели используются данные рекогносцировочного и визуального обследования, геологические данные, результаты инженерно-геологических, гидрологических и геофизических изысканий, выполненных на хвостохранилище [34, 40, 165, 166].

При гидрогеомеханическом 3D-моделировании были использованы следующие модели поведения грунтов под нагрузкой: для пород основания — MohrCoulomb, для намывных отложений — HardeningSoilSmall, для остальных грунтов — HardeningSoil. Тип дренирования для всех грунтов и пород задавался Drained [157].

Хвостохранилище горнодобывающего предприятия представляет собой сложную гидротехническую систему, промышленная и экологическая безопасность которой в значительной степени определяется не только состоянием намывных отложений, но и степенью наполнения емкости хвостохранилища водой. Вода в хвостохранилище должна быть в текущих проектных значениях (прудок-отстойник) с формированием намывных пляжей у ограждающих дамб. Вместе с тем, в силу природных (ливни, паводки) и технических (сбросы промышленных вод) причин, наполнение водой емкости хвостохранилища может достигать, а иногда и превышать, максимальное

проектное значение. В таких случаях наблюдается сокращение длин намывных пляжей, иногда вплоть до их исчезновения. Отмечены случаи, когда вода достигала подошвы и верхового склона насыпных ограждающих дамб.

В этой связи необходимо отметить ряд современных исследований состояния хвостохранилищ горнодобывающих предприятий и фильтрационно-деформационной устойчивости ограждающих их дамб. В качестве превалирующей задачи при этом является оценка степени фильтрации воды сквозь ее тело при различных положениях депрессионной поверхности грунтовых вод в ГТС хвостохранилища. Результатами исследований подтверждается, что формирующаяся в намывных отложениях и в грунтах насыпных дамб депрессионная поверхность напрямую связана с положением уреза и объемом воды или степенью заполнения емкости хвостохранилища водой.

Вследствие природных (продолжительные дожди, ливни, обильное снеготаяние, паводки, интенсивные стоки с прилегающих горных склонов) и технических (плановые и аварийные сбросы промышленных вод) причин емкость хвостохранилища может быстро заполниться до максимального проектного значения, а в некоторых случаях и превысить его. Это может привести как к разрушению ограждающей дамбы, так и к переливу воды через ее гребень.

Поэтому гидрогеомеханическое 3D-моделирование на базовой основе выполняется для трех нормируемых расчетных случаев для низового откоса ограждающей дамбы согласно СП-39.13330.2012 «Плотины из грунтовых материалов» [167] (рис. 2.56):

- первый: в верхнем бьефе — нормальный подпорный уровень (H_1), между урезом и дамбой — намывной пляж, в теле дамбы — установившаяся фильтрация;

- второй: в верхнем бьефе — высокий подпорный уровень (H_2), между урезом и дамбой практически нет намывного пляжа, в теле дамбы — повышенная фильтрация воды с возможным выходом на низовом откосе;

- третий (особый): в верхнем бьефе — форсированный подпорный уровень воды (H_3), урез на верховом откосе дамбы, в теле дамбы — высокая фильтрация воды с интенсивным выходом на низовом откосе.

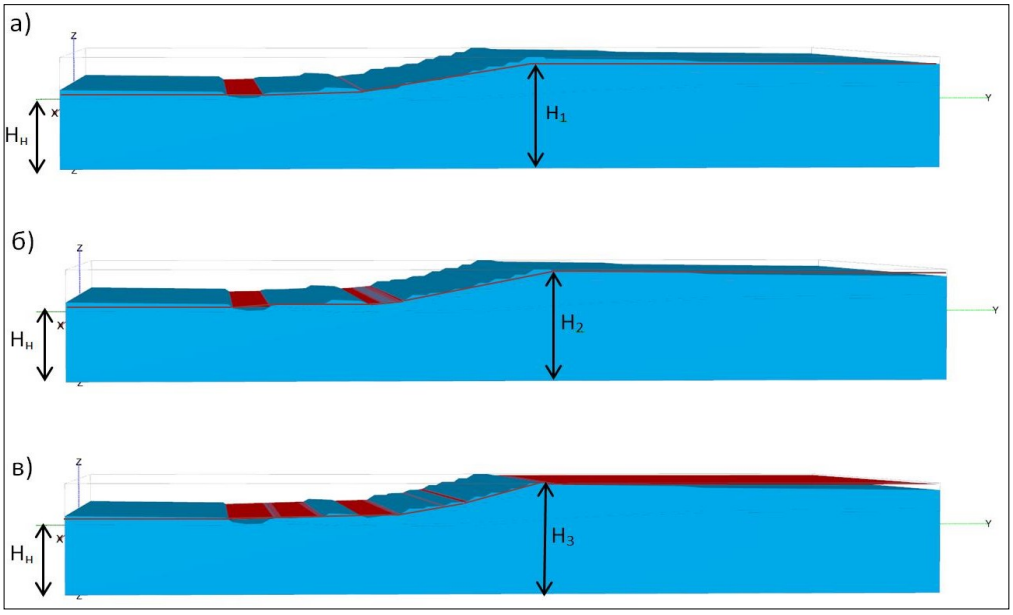


Рис. 2.56. Моделируемые расчетные случаи водонасыщенности ГТС хвостохранилища: *а* — первый; *б* — второй; *в* — третий (особый) (красным цветом показаны поверхности воды как в емкости хвостохранилища, так и на низовом откосе ограждающей дамбы)

Для всех расчетных случаев уровень грунтовых вод принимается одинаковым $H_н$.

Следует отметить, что для первого расчетного случая (рис. 2.56 *а*) вода на дневной поверхности находится в оконтуривающей хвостохранилище канаве, что соответствует фактическому состоянию. Для второго (рис. 2.56 *б*) и третьего (рис. 2.56 *в*) случаев происходит дополнительное дренирование фильтрующейся воды на ярусы низового откоса ограждающей дамбы.

Для гидрогеомеханической 3D-модели используется два режима разбивки сетки конечных элементов: Fine (Мелкая) и Veryfine (Очень мелкая). Общее количество элементов и количество узлов достигает десятки тысяч; при этом средний размер элементов составляет десятки сантиметров и первые метры при максимальном 30 м и минимальном 0,2 м на различных участках модели.

В результате 3D-моделирования получаются расчетные значения, характеризующие гидрогеомеханическое состояние исследуемого хвостохранилища для рассматриваемых сочетаний нагрузок и условий работы. В частности, на рис. 2.57 приведены картины степени фильтрации (Saturation) (слева) и общих перемещений грунтов (справа) для моделируемых расчетных случаев.

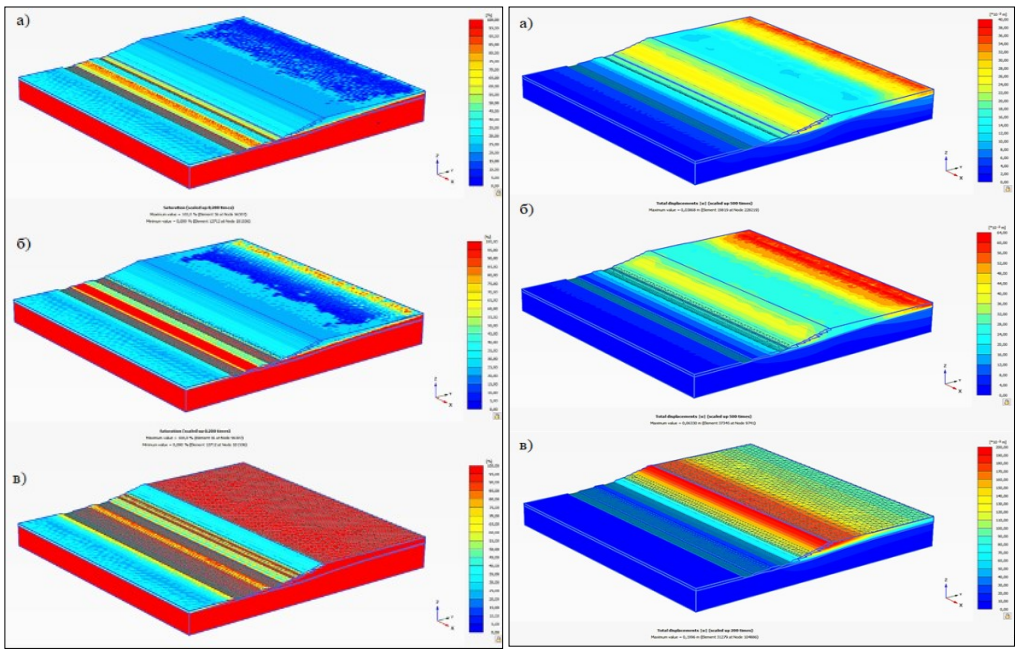


Рис. 2.57. Картины распределения степени фильтрации (слева) и общих перемещений (справа) грунтов для моделируемых расчетных случаев наполнения емкости хвостохранилища водой: *а* — первый; *б* — второй; *в* — третий (особый)

Для рассматриваемого примера по результатам выполненных расчетов для первого случая определено, что усредненная скорость фильтрации воды сквозь тело ограждающей дамбы составит 8,9 м/сут, для второго — 21,8 м/сут, для третьего (особого) — 62 м/сут. Анализ картин распределения общих перемещений ($U_{общ.}$) грунтов позволяет прийти к выводам, что для первого (рис. 2.57 *а*) и второго (рис. 2.57 *б*) расчетных случаев перемещения грунтов незначительны. Для третьего расчетного случая, в котором емкость хвостохранилища моделируется заполненной водой полностью, грунты гребня и верхних ярусов низового откоса ограждающей дамбы

подвержены значительным смещениям (соответствуют красному цвету на рис. 2.57 *в*). По результатам выполненных расчетов для первого случая определено, что усредненные значения общих перемещений ($U_{общ.}$) составляют 0,045 м, для второго — 0,065 м, для третьего — возрастают кратно и могут достигать 0,20 м.

Зависимость значений скорости фильтрации воды от положения водной поверхности в емкости хвостохранилища для расчетных случаев приведена на рис. 2.58. Обозначения положения водной поверхности для каждого расчетного случая приняты в соответствии с задаваемыми уровнями.

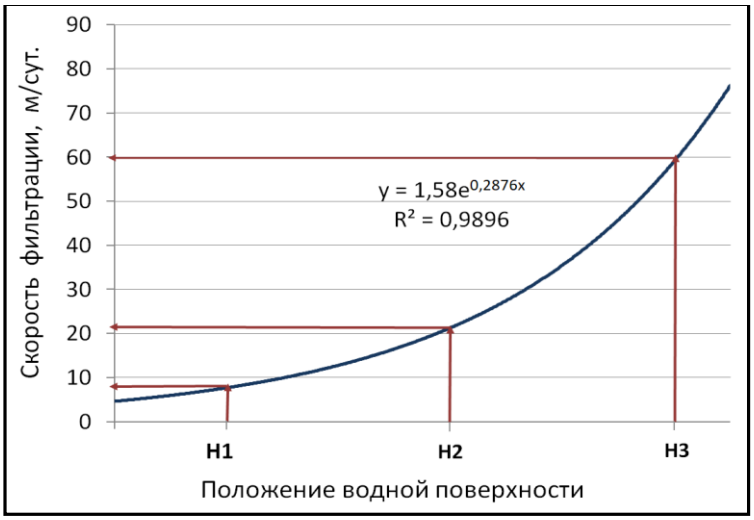


Рис. 2.58. Зависимость скорости фильтрации воды сквозь тело ограждающей дамбы от положения поверхности воды в емкости хвостохранилища для расчетных случаев: H_1, H_2 и H_3

Как следует из рис. 2.58, повышение водной поверхности в хвостохранилище от фактического состояния (первый расчетный случай) до предельного по проекту (второй расчетный случай) приведет к увеличению значений скорости фильтрации практически в 3 раза (от 8 до 23 м/сут). Максимальное положение поверхности воды в емкости хвостохранилища (третий расчетный случай) приведет к резкому возрастанию значений скорости фильтрации (почти в 8 раз) в сравнении с фактическим, что обусловит существенное ухудшение гидрогеомеханического состояния грунтов дамбы.

Выполненными исследованиями установлено, что положение поверхности воды в емкости хвостохранилища оказывает определяющее значение на гидрогеомеханическое состояние ограждающей дамбы. Для рассмотренного примера показано, что при подъеме уровня воды до повышенного и далее до максимального скорость фильтрации воды сквозь грунты дамбы возрастает от 8 до более 60 м/сут по экспоненциальной зависимости $y = 1{,}58e^{0{,}2876x}$ с высокой степенью достоверности ($R^2 = 0{,}9896$).

Это предоставляет научно-техническую основу для получения значений скорости фильтрующейся воды сквозь тело ограждающей дамбы как по построенному графику, так и посредством расчетов по полученной аналитической зависимости. Исходной для этого будет положение водной поверхности в емкости хвостохранилища относительно высоты гребня ограждающей дамбы.

Согласно СП-39.13330.2012 «Плотины из грунтовых материалов» [167], для различных сочетаний нагрузок, условий работы, надежности по ответственности сооружения должен определяться коэффициент надежности ($K_{над.}$).

В настоящих исследованиях выполнено определение значений коэффициента надежности низового откоса ограждающей дамбы для моделируемых расчетных

случаев как интегрированного показателя геомеханических и гидравлических нагрузок и условий работы ГТС хвостохранилища (рис. 2.59).

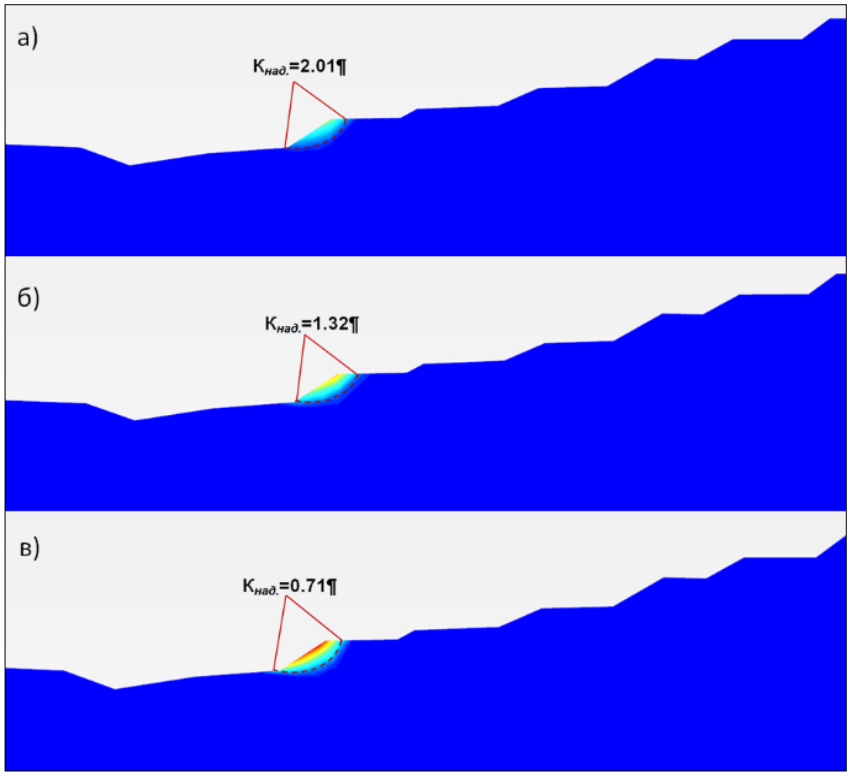


Рис. 2.59. Коэффициент надежности низового откоса ограждающей дамбы для расчетных случаев: *а* — первый; *б* — второй; *в* — третий (особый)

Как следует из рис. 2.59, повышение поверхности воды (водонасыщенности) в емкости хвостохранилища от фактического (первый расчетный случай) к повышенному (второй расчетный случай) приводит к снижению $K_{\text{над.}}$ от 2,01 до 1,32. Максимальный подъем поверхности воды (третий (особый) расчетный случай) приведет к крайне низкому значению $K_{\text{над.}} = 0{,}71$.

Следует заметить, что скорость фильтрации воды сквозь тело ограждающей дамбы в значительной степени определяет состояние и перемещение ее грунтов, и тем самым их фильтрационно-деформационную устойчивость. Интегрированный показатель условий работы и функциональности ограждающей дамбы, представленный в виде коэффициента надежности $K_{\text{над.}}$, резко снижается от 2,01 (фактическое состояние) до 1,32 (повышенный уровень воды) и к крайне низкому значению $K_{\text{над.}} = 0{,}71$ (максимальный уровень воды). То есть в случае максимального заполнения водой емкости хвостохранилища за счет внеплановых сбросов промышленных вод, ливневых осадков и паводков произойдет резкое возрастание скорости фильтрации сквозь тело ограждающей дамбы и, как следствие, изменение состояния, перемещение и разуплотнение слагающих дамбу грунтов.

Принятый методический подход дает основания прогнозировать формирование гидрогеомеханического состояния, при котором ограждающая дамба может утратить фильтрационно-деформационную устойчивость.

3. МУЛЬТИМАСШТАБНЫЙ МОНИТОРИНГ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ КОЛЬСКОГО РЕГИОНА

3.1. Хвостохранилище горнодобывающего предприятия (на примере АО «СЗФК»)

3.1.1. Применяемые методы и подходы

Применяемые методы и подходы включали в себя:

- оценку состояния ограждающих дамб регулярными визуальными обследованиями и фотооптическим документированием;
- контроль ограждающих дамб геотехническими и гидрогеомеханическими методами в целях своевременного выявления формирования процессов механической суффозии;
- проведение режимных георадарных исследований по гребню и уступам дамб;
- контроль устойчивости ограждающих дамб посредством нивелирных, тахеометрических и GPS-съемок по контрольно-наблюдательным полигонам;
- анализ комплексных наблюдений за уровнем воды в отстойниках хвостохранилища, а также за положением депрессионной плоскости в теле ограждающих дамб;
- создание объемных параметрических моделей хвостохранилища и компьютерное моделирование условий деформирования ограждающих дамб в целях выявления геоиндикаторов опасных фильтрационно-деформационных процессов и критериев устойчивости дамбы;
- разработку и обоснование инженерных защитных и укрепляющих мер для обеспечения устойчивости дамб и необходимого функционирования хвостохранилища (при необходимости).

При визуальном обследовании и фотооптическом документировании применялась цифровая фотокамера Fujifilm FinePix HS30EXR с 30-кратным увеличением. Для привязки выделенных зон и участков использовались кассетные геодезические рулетки 50 м и лазерная рулетка (до 200 м).

При проведении полевых измерений исполнителями работ использовался георадарный комплекс Ramac с экранированной антенной 100 МГц (глубина зондирования до 30 м). Компьютерная обработка георадарных данных выполнялась с применением специальной программы Rad Explorer V1.4 (производство ООО «Деко-геофизика»).

Геодезические измерения производились электронным тахеометром Leica TS16 и электронным нивелиром Leica LS15. Обработка данных выполнена в программных комплексах Topcon Topsurv Robotic Station, Credo DAT.

Компьютерное моделирование деформационных и фильтрационных процессов в ограждающих дамбах хвостохранилища выполнялось с использованием лицензионного программного комплекса Plaxis 3D (Сертификат соответствия № РОСС RU.СП09.Н00146). Исходными данными для построения компьютерных моделей, тарировки и интерпретации георадарных определений являлись данные инженерно-геологических изысканий. В качестве опорных использовались данные пьезометрических измерений.

3.1.2. Фотооптические и визуальные наблюдения

В 2022–2024 гг. в рамках проведения мониторинга фильтрационной устойчивости ограждающих дамб хвостохранилища производились их визуальные обследования с целью выявления негативных фильтрационных и деформационных явлений и их фотофиксация с геометрической привязкой.

В результате наблюдений на низовой дамбе был определен проблемный участок размером 400×15 м, находящийся у основания дамбы. На этом участке

наблюдалось наибольшее количество проявлений фильтрационных процессов вследствие локальных нарушений фильтрационной устойчивости и структуры дамбы.

Регулярными наблюдениями было выявлено, что на проблемном участке низовой дамбы хвостохранилища имеются выходы воды, неравномерно распределенные вдоль подошвы дамбы (рис. 3.1). Наибольшая часть протечек наблюдалась в нижнем бьефе на участке 14-15 ПК низовой дамбы. Ручьи стекались к подошве дамбы, собирались в более крупные потоки, текли вдоль дамбы и соединялись с основным искусственным водоемом вторичного отстойника.



Рис. 3.1. Схема низовой дамбы с зонами протечек на проблемном участке

Проводимыми регулярными наблюдениями было установлено, что характер выхода фильтрующихся вод изменяется. В начале фильтрующиеся воды выходили на поверхность дамб сконцентрировано очагами, отстоящими друг от друга на расстояние от нескольких метров до нескольких десятков метров. Затем наблюдался более рассредоточенный выход вод (рис. 3.2).

В целом, основываясь на данных визуального обследования и фотодокументирования участка ГТС, наблюдаемые на низовой дамбе процессы носят относительно стабильный характер. Негативного развития фильтрационных и деформационных процессов согласно данным визуальных наблюдений за период 2022–2024 гг. не наблюдается.

По результатам последующих наблюдений низовой дамбы водопритоки сохранились, но деформаций не выявлено (рис. 3.3).

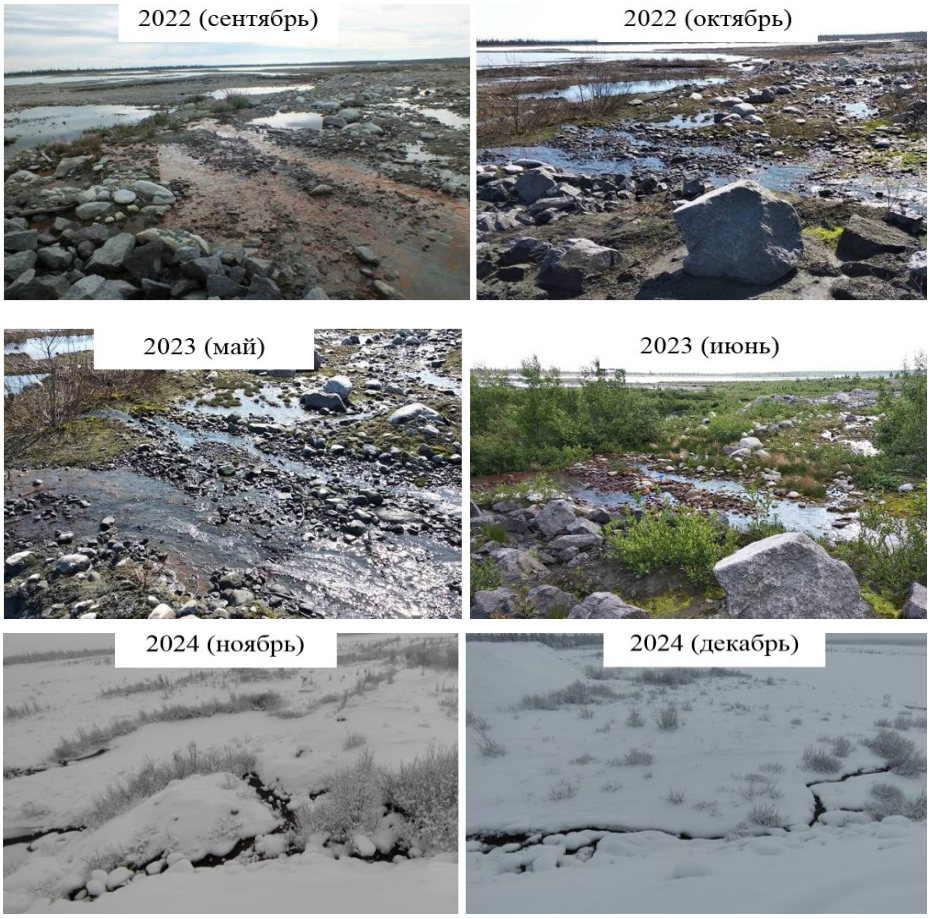


Рис. 3.2. Выход фильтрующихся вод на проблемном участке низовой дамбы

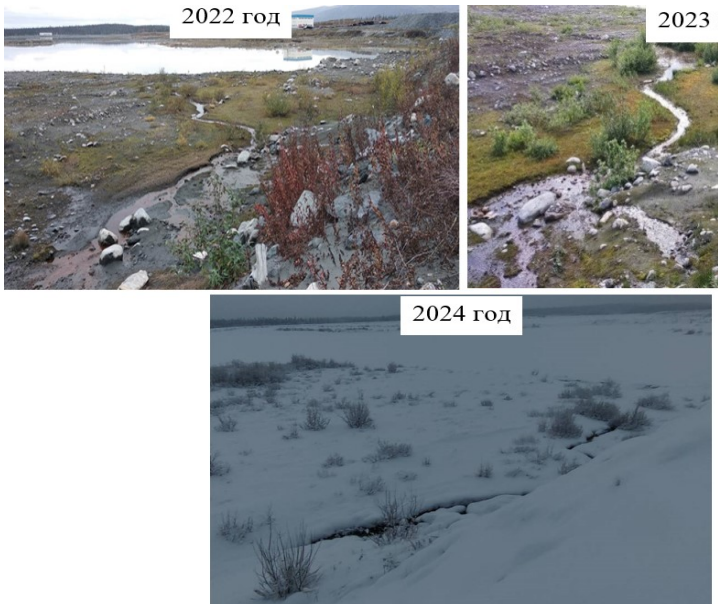


Рис. 3.3. Выход вод у подошвы низовой дамбы

3.1.3. Георадарное зондирование ограждающих дамб

В соответствии с поставленными целями были проведены георадарные обследования низовой дамбы хвостохранилища. Работы были выполнены по уступам +185, +193,5, +199,5.

По уступу +185 продольные георадарные профили проходились на расстоянии 4,5 м от места предыдущего расположения пульповода, на остальных уступах обследования проводились посередине их ширины. Для целей контроля выявленных зон протечек дополнительно выполнялись поперечные профили в привязке к пьезометрическим створам. На уступе +185 профиль проходил на участке между ПК-13 и ПК-22, на уступе +193,5 — между пикетами 7 и 24, при обследовании уступа +199,5 профиль располагался на участке от ПК-4 до ПК-26. Схема расположения георадарных профилей представлена на рис. 3.4. Результаты георадарного зондирования низовой ограждающей дамбы представлены на рис. 3.5–3.14.



Рис. 3.4. Схема георадарных обследований низовой дамбы хвостохранилища (красные пунктирные линии)

Анализ и интерпретация радарограмм обследования уступа +185 позволил выявить следующие структурные особенности его строения. Приповерхностная

зона до глубины 2 м представляет собой равномерную волновую картину, которая свидетельствует о наличии плотных грунтов без наличия каких-либо аномалий. На профиле выделяются три зоны (*2*) возможного водонасыщения 160–260 м (мощностью 1–1,5 м), 545–595 м (мощностью 2,5–3,5 м) и 600–740 м (мощностью 1–1,5 м), которые характеризуются высокой контрастностью и могут свидетельствовать о возможном водонасыщении вмещающих пород. На протяжении всего профиля четко идентифицируется граница на глубине 6 м в начале профиля (ПК-13), уходящая на глубину 14 м (интервал ПК-14+80 – ПК-20) и выходящая на 7 м в конце профиля (ПК-22), которая идентифицируется как граница уплотненных грунтов, представляющих из себя песчаный грунт (*3*) с характерной волновой картиной. Определено, что уровень грунтовых вод (*1*) колеблется в интервале глубин от 4,2 м в начале профиля (метка ПК-13) до 4,6 м в конце, на метке ПК-22, и в окрестности пьезометров соответствует значениям показаний измерения уровня воды в них.

Анализ и интерпретация радарограмм обследования дамбы на уступе +193,5 позволил выявить следующие особенности. Уровень грунтовых вод (*1*) колеблется в интервале от 7 м в начале профиля ПК-07 с последующим понижением до отметки 11,8 м ПК-16+80 и дальнейшим подъемом к поверхности до 7,2 м на отметке ПК-24. В ключевых точках в окрестности пьезометров соответствует их показаниям. Приповерхностная зона до глубины 2 м представляет собой равномерную волновую картину, которая свидетельствует о наличии плотных грунтов без наличия каких-либо аномалий. На профиле выделяются три зоны (*2*) возможного водонасыщения 785–855, 895–990 и 1000–1090 м мощностью 1,5–2 м соответственно, которые характеризуются высокой контрастностью и могут свидетельствовать о возможном водонасыщении вмещающих пород. Выделенные зоны находятся на границе грунтов, которые отличаются своими электрофизическими свойствами (*4*) ПК-13+40 – ПК-21+10. На протяжении всего профиля четко идентифицируется граница на глубине 3,8–5 м, которая идентифицируется как возможная граница насыпного слоистого техногенного грунта (*3*).

Анализ и интерпретация радарограмм обследования уступа +199,5 позволил выявить следующие структурные особенности строения бермы +199,5 м. Уровень грунтовых вод не идентифицируется по всей длине профиля ввиду отсутствия четких границ. Волновая картина профиля насыщена большим количеством высокочастотных и низкочастотных помех. Приповерхностная зона до глубины 2,5–3,5 м представляет собой равномерную волновую картину, которая свидетельствует о наличии плотных грунтов без наличия каких-либо аномалий (*3*). Детальный анализ волнового поля позволил выделить 6 аномальных зон (*2*) на профиле: 40–210, 270–400, 670–700, 885–915, 1165–1230 и 1300–1350 м мощностью до 4 м, которые характеризуются наличием сильных низкочастотных помех и опосредованно могут быть связаны с водонасыщенностью вмещающих пород, что, в свою очередь, свидетельствует об их возможном водонасыщении.

В целом по результатам георадарного обследования дамба находится в удовлетворительном состоянии, опасных фильтрационно-деформационных процессов не выявлено.



Рис. 3.5. Легенда для радарограмм, выполненных георадаром Ramac, оснащенным экранированным антенным блоком

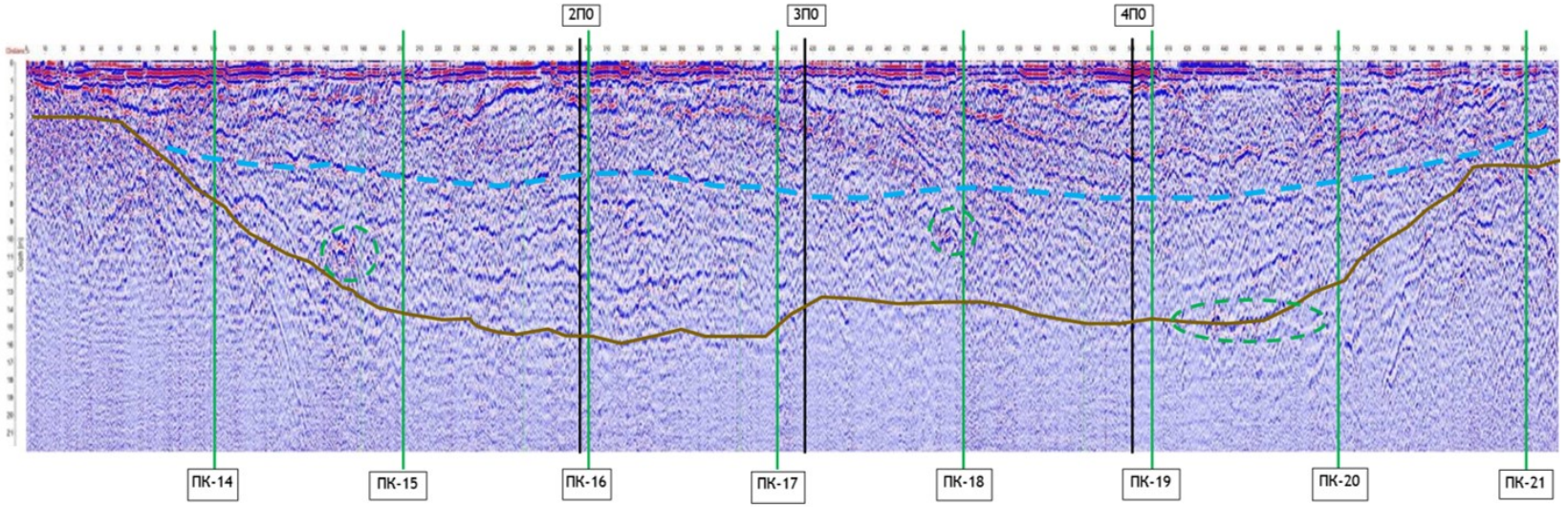


Рис. 3.6. Георадарный профиль по уступу +185, экранированный антенный блок

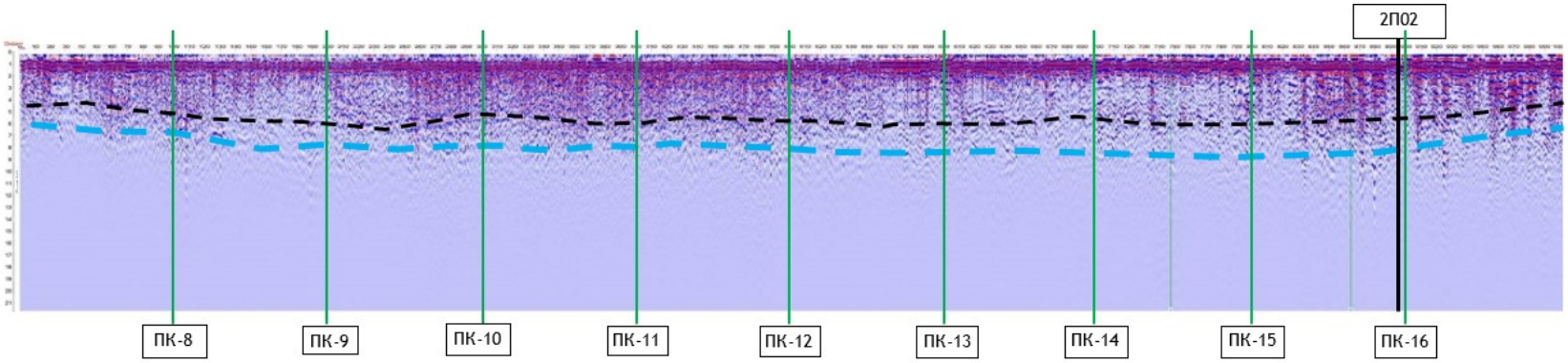


Рис. 3.7. Фрагмент георадарного профиля по уступу +193,5 ПК-7–ПК-17, экранированный антенный блок

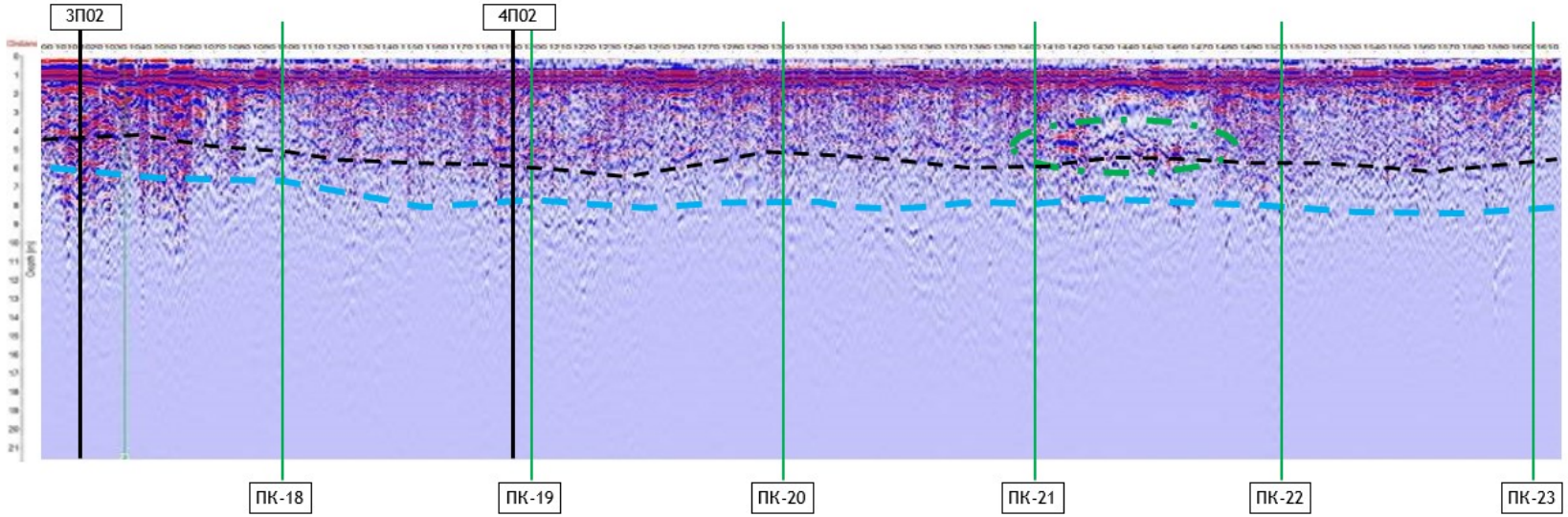


Рис. 3.8. Фрагмент георадарного профиля по уступу +193,5 ПК-17–ПК-23, экранированный антенный блок

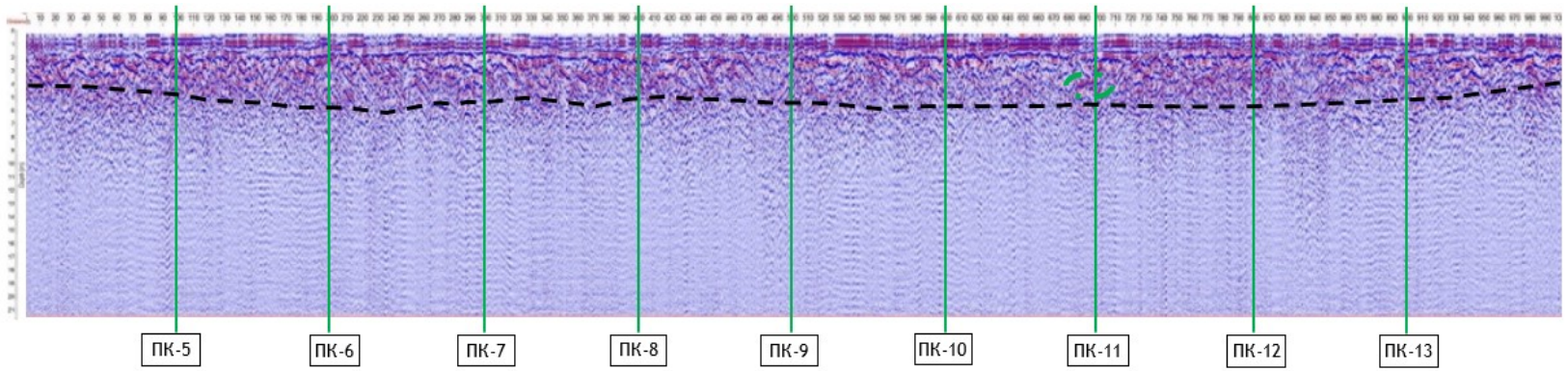


Рис. 3.9. Фрагмент георадарного профиля по уступу +199,5 ПК-4–ПК-14, экранированный антенный блок

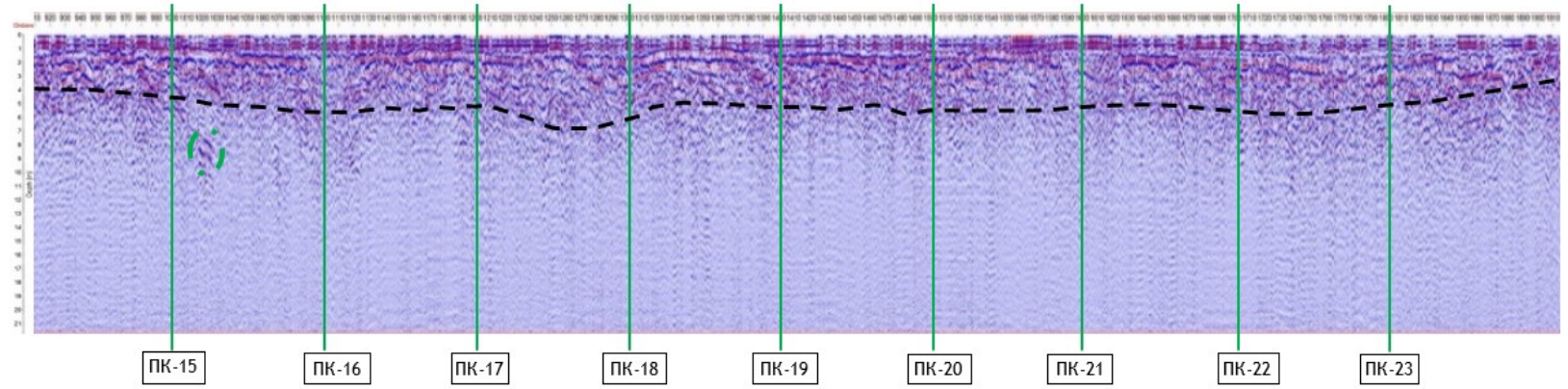


Рис. 3.10. Фрагмент георадарного профиля по уступу +199,5 ПК-14–ПК-24, экранированный антенный блок

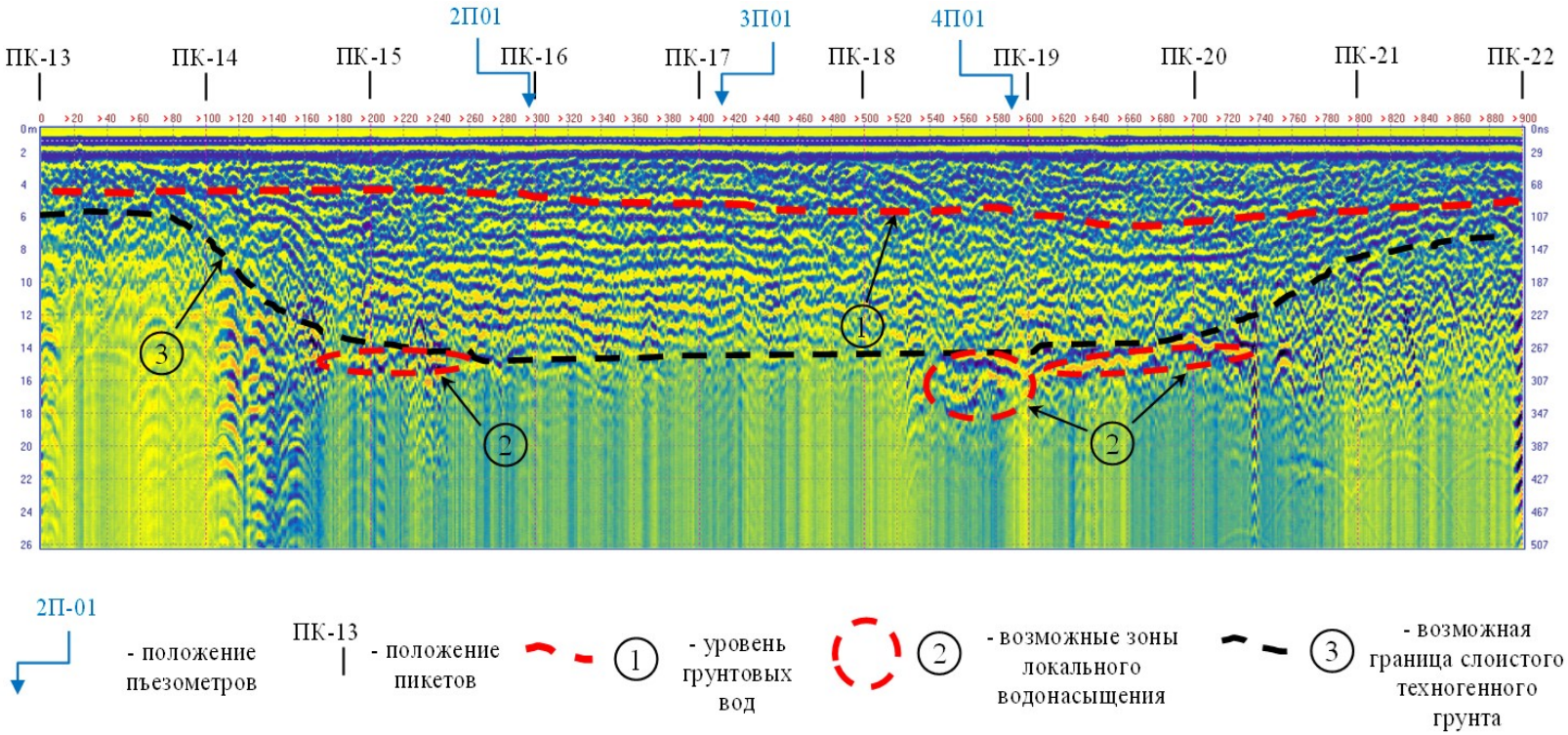


Рис. 3.11. Георадарный профиль по уступу +185, неэкранированный антенный блок

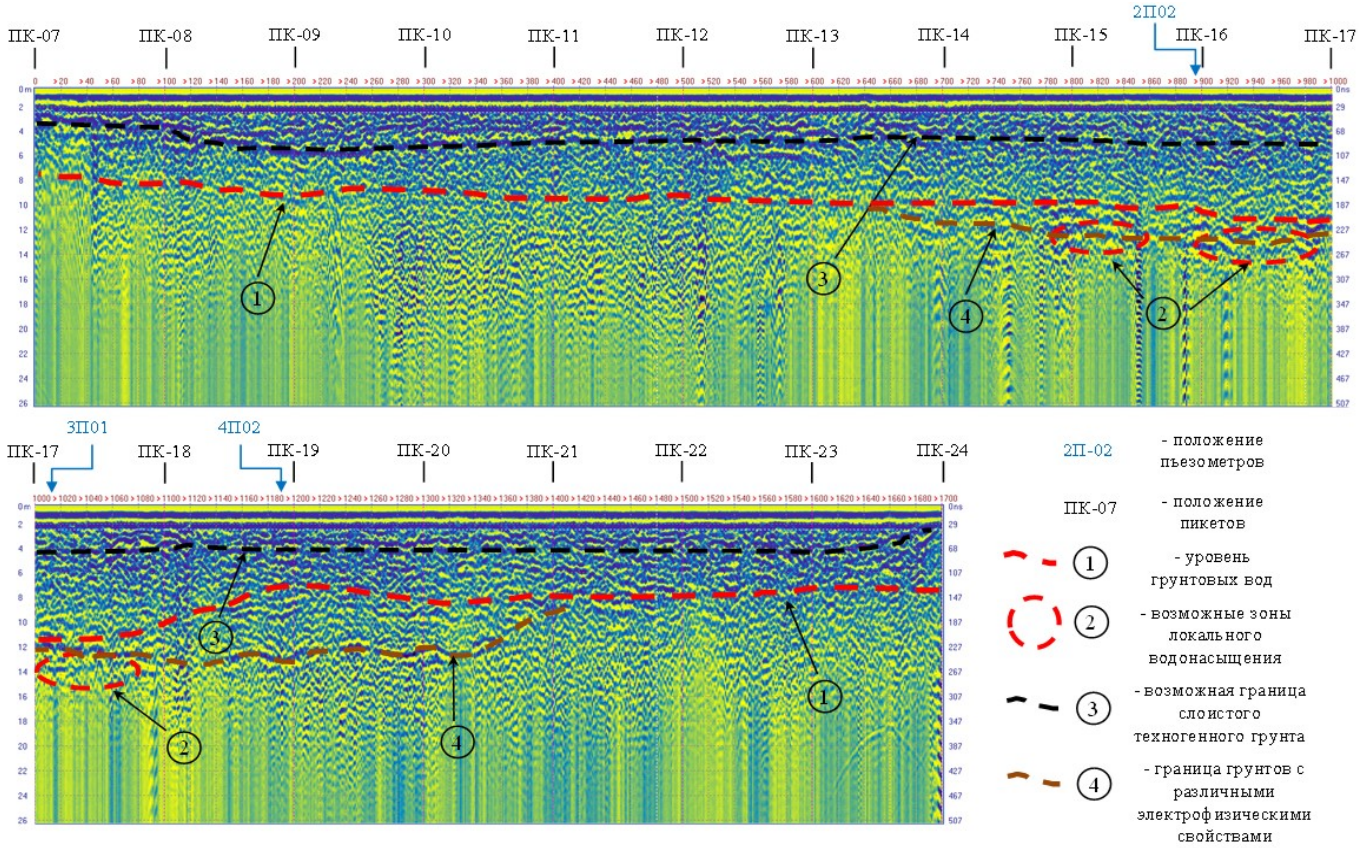


Рис. 3.12. Георадарный профиль по уступу +193,5, неэкранированный антенный блок

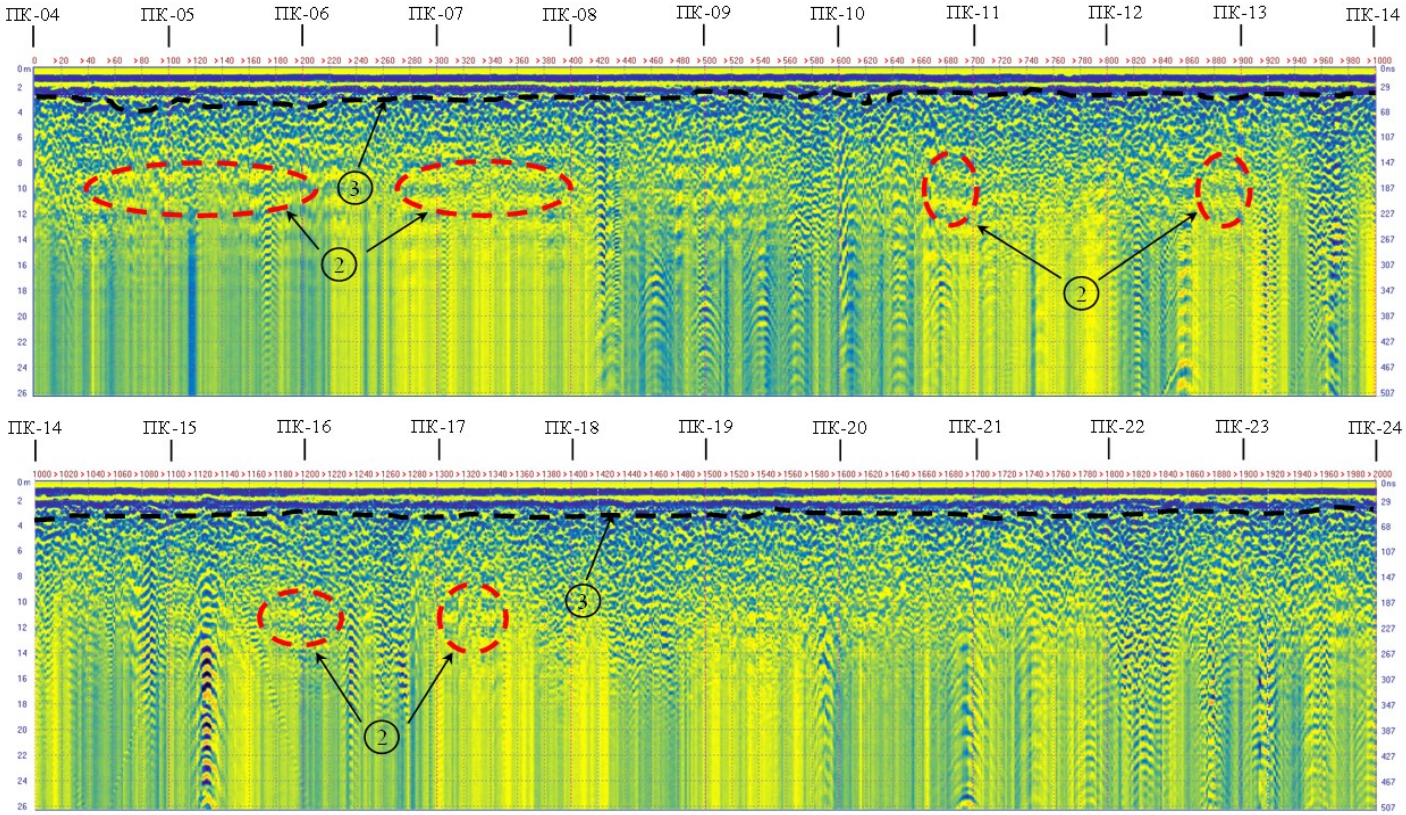


Рис. 3.13. Фрагмент георадарного профиля по уступу +199,5 ПК-4–ПК24, неэкранированный антенный блок

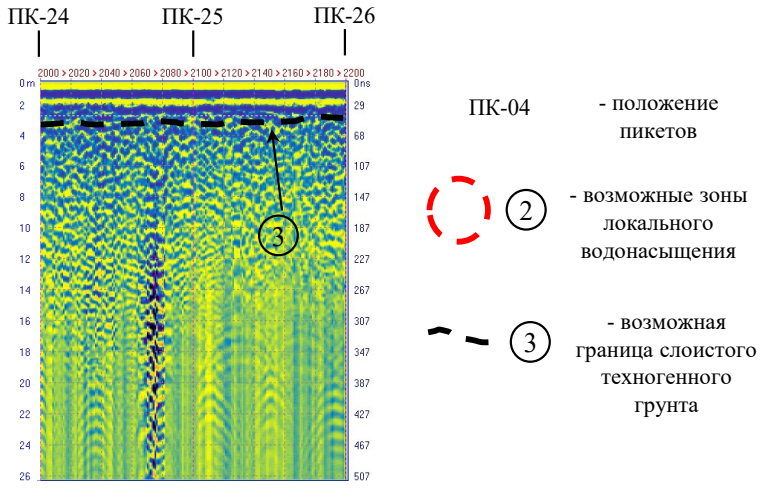


Рис. 3.14. Фрагмент георадарного профиля по уступу +199,5 ПК-24–ПК-26, неэкранированный антенный блок

3.1.4. Геодезические наблюдения по контрольно-наблюдательным реперам

Для контроля механического состояния и устойчивости ограждающих дамб хвостохранилища ГОК «Олений ручей» в 2012 г. был заложен геодезический полигон, представляющий собой несколько обособленных линий универсальных реперов по дамбам с привязкой к местной маркшейдерской сети.

Используются три конструкции универсальных реперов (с возможностью закрепления на головках тахеометрических светоотражателей и приемников GPS): установленные на опорах пульповода (рис. 3.15 *а*); установленные в грунтах, приповерхностные (рис. 3.15 *б*); установленные в грунтах, глубинные (более глубины промерзания) (рис. 3.15 *в*).

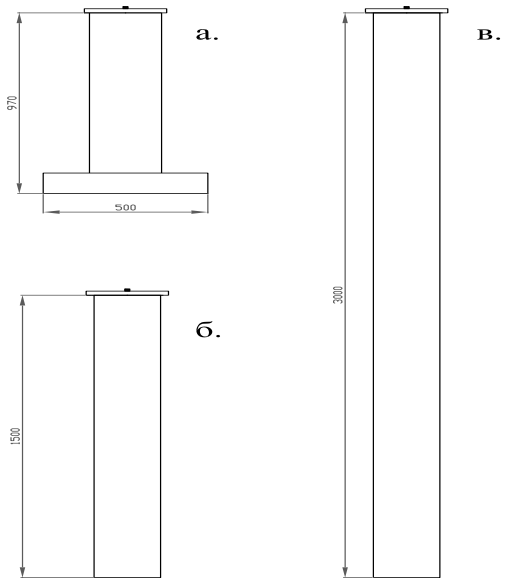


Рис. 3.15. Конструкции реперов

На низовой дамбе (1-й участок полигона) заложено 2 линии реперов — линия грунтовых глубинных реперов (Р6.2, Р7.2 и Р8.2) и линия реперов, установленных на опорах пульповода (Р9.1, Р10.1, Р11.1 и Р12.1). На дамбе вторичного отстойника (2-й участок) заложен 1 грунтовый глубинный репер (Р3.2) и 4 грунтовых приповерхностных репера (Р1.3, Р2.3, Р4.3 и Р5.3). На верховой дамбе (3-й участок) линия включает 3 репера — 1 грунтовый (Р15.2) и 2 приповерхностных (Р14.3 и Р16.3). Кроме этих реперов, но вне дамб на опоре пульповода, был заложен репер Р13.1, который предполагался как исходный для выполнения дальнейших измерений, однако в период наращивания дамб репер был сработан. Схема расположения реперов на дамбах приведена на рис. 3.16.

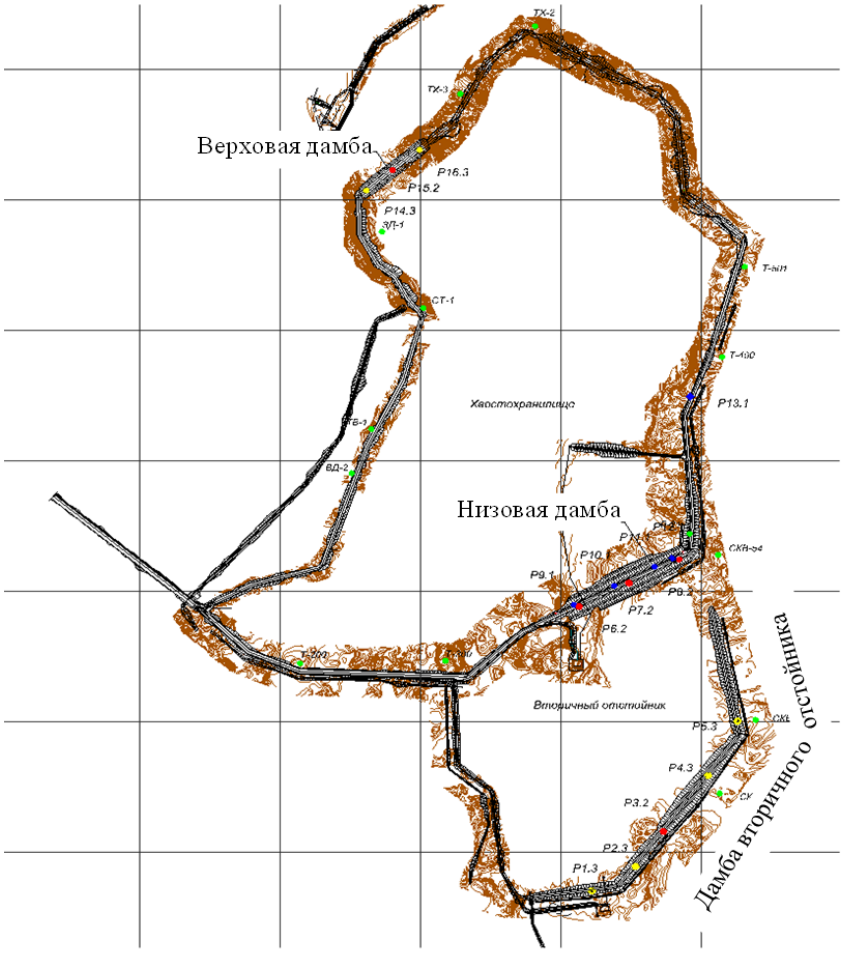


Рис. 3.16. Схема расположения реперов на ограждающих дамбах хвостохранилища ГОК «Олений ручей» [13]

Режимные геодезические наблюдения должны обеспечивать сравнение измеренных и расчетных (прогнозируемых) деформаций, выявление причин деформаций, принятие, в случае необходимости, мер по устранению нежелательных процессов.

В качестве деформационных характеристик рассматриваются вертикальная (осадка дамбы) и горизонтальная (смещение) составляющие, определение которых

выполнено геодезическими методами. Точность и методика проведения наблюдений определена проектом производства работ, а также использованы рекомендации по проведению натурных наблюдений за осадками грунтовых плотин.

За период наблюдений по контрольным реперам ограждающих дамб проложены система ходов полигонометрии 1 разряда и нивелирование III класса. Схемы проведения нивелирных ходов и ходов полигонометрии представлены на рис. 3.17.

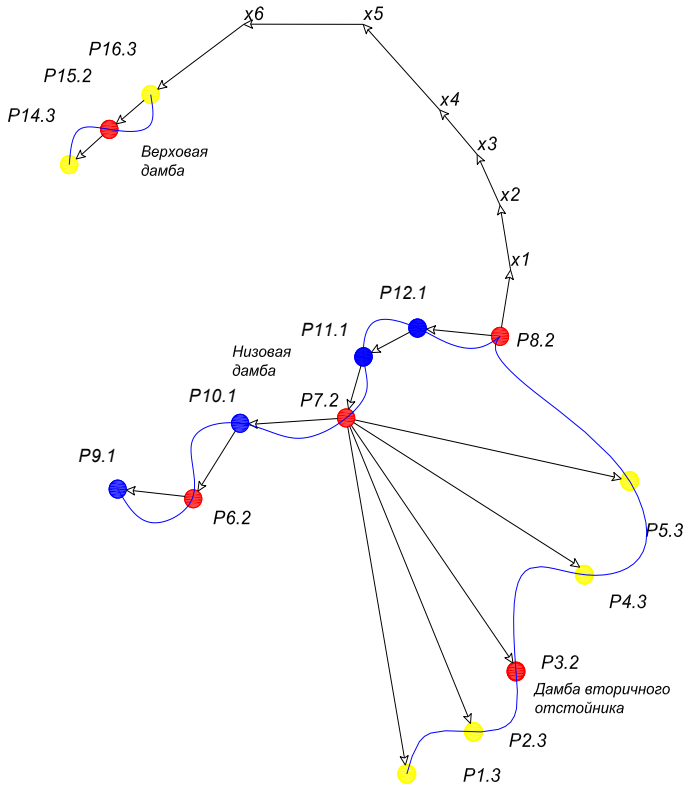


Рис. 3.17. Схема ходов полигонометрии и нивелирных ходов [13]

Вертикальные смещения определялись геометрическим нивелированием III класса. Для нивелирования использовались высокоточный цифровой нивелир Leica LS15 (средняя квадратическая погрешность инструмента на 1 км двойного хода — ±0,3 мм) и штрих-кодовая инварная рейка.

При вычислении высотных отметок в качестве исходных был принят репер РП8.2 для низовой дамбы и дамбы вторичного отстойника, а для верховой дамбы — репер РП16.3.

Нивелирный ход выполнялся в прямом и обратном направлениях в соответствии с требованиями, изложенными в инструкции. Расстояния от инструмента до реек выдерживались равными плечами. Разность не превышала 2 м, накопление неравенств на секции не превышало 5 м. Длина визирного луча — не более 75 м. Данные нивелирования записывались в полевой журнал измерений. При обработке данные оцифровывались в таблицы Excel для дальнейших расчетов.

В процессе нивелирования никаких дефектов у нивелира и реек, которые могли бы повлиять на качество нивелирования, не обнаружено. Все наблюдения проводились при благоприятных условиях видимости. Оценка качества выполненных работ

производилась путем сравнения полученных невязок с допустимыми невязками $m_{доп.} = \pm 10$ мм $\sqrt{L}$, где L — длина хода в км (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Сравнение фактических невязок с допустимыми

Полигон	Параметры. Нивелирование III класса	
	фактическая невязка, мм	допустимая невязка, мм
РП8.2-РП9.1	–5,0	±6,29
РП8.2-РП1.3	3,0	±9,15
РП16.3-РП14.3	–4,0	±6,75

Полученные значения позволяют сделать заключение, что невязки в полигонах не превышают допустимых величин и соответствуют требованиям III класса.

Горизонтальные смещения в натуре определялись методом прокладки хода полигонометрии 1 разряда.

При вычислении плановых координат в качестве исходных был принят репер РП8.2 с исходным направлением на репер РП12.1.

Измерение углов и расстояний производилось по трехштативной системе роботизированным тахеометром Leica TS16 (№ ГСИ024442), поверенным ООО «Геостройизыскания».

Точность измерения горизонтальных углов составляет 1" или 0,3 mgrad. Точность измерения расстояний составляет ±(1 mm + 1,5 ppm). Наблюдения заключаются в измерении углов между направлениями и расстояний до определяемых пунктов.

Измерение горизонтальных углов и направлений производилось двумя полными приемами при двух положениях круга для уменьшения коллимационной ошибки. При измерении углов выдерживались допуски, предусмотренные инструкциями.

Измерение расстояний производилось на отражателе в прямом и обратном направлении. Результат измерения расстояния между двумя направлениями получен как среднее арифметическое из пытикратных повторений в прямом и обратном направлениях. Все измерения записывались в полевой журнал и фиксировались в памяти инструмента. При измерении линий в точке стояния прибора измерялись температура воздуха и давление, поправки за их влияние в приборе вводились в линии автоматически. Наблюдения проводились при благоприятных условиях видимости.

Камеральная обработка инженерно-геодезических работ, вычисление плановых координат и высотных отметок наблюдательных пунктов, уравнивание и оценка точности производилась на ПК с использованием программного комплекса Topcon Topsurv Robotic Station.

Данные с электронных носителей тахеометра экспортировались в персональный компьютер с созданием базы данных для последующих вычислений. Одновременно выполнялось сравнение данных электронного носителя с данными полевого журнала.

Данные нивелирования, записанные в полевой журнал измерений, проверялись методом «в две руки» и затем оцифровывались в таблицы Excel для дальнейших расчетов.

В итоге, были составлены ведомости координат и высотных отметок наблюдательных реперов на ограждающих дамбах хвостохранилища по данным наблюдений.

Для анализа и оценки состояния объекта наблюдения были вычислены деформационные значения каждого наблюдательного пункта. Были вычислены абсолютные значения осадок наблюдательных пунктов как разность между полученными значениями в текущем цикле и первом (начальном) цикле по формуле:

$$S_n = H_n - H_1, \tag{3.1}$$

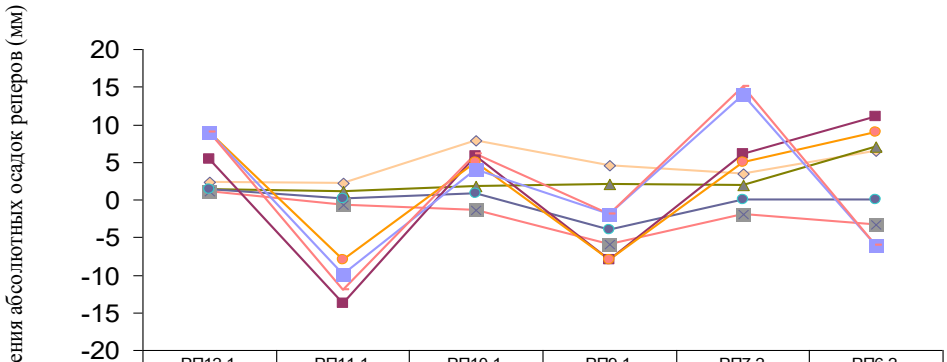
где H_n, H_1 — высотные отметки наблюдательных пунктов, полученные в первом и последующих циклах.

По результатам вычислений полигонометрии 1 разряда, используя координаты контрольных реперов, полученные в первом и текущем циклах, определены плановые смещения наблюдательных пунктов:

$$C_x = X_n - X_1;\ C_y = Y_n - Y_1, \qquad (3.2)$$

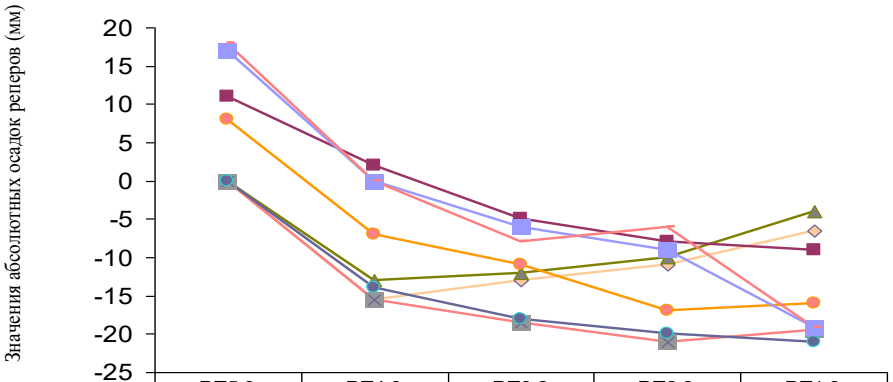
где C_x, C_y — смещения по осям X и Y; X_1, Y_1, X_n, Y_n — координаты первого и последующего циклов.

Все результаты вычисления сведены в таблицы, по полученным данным построены графики (рис. 3.18–3.20).



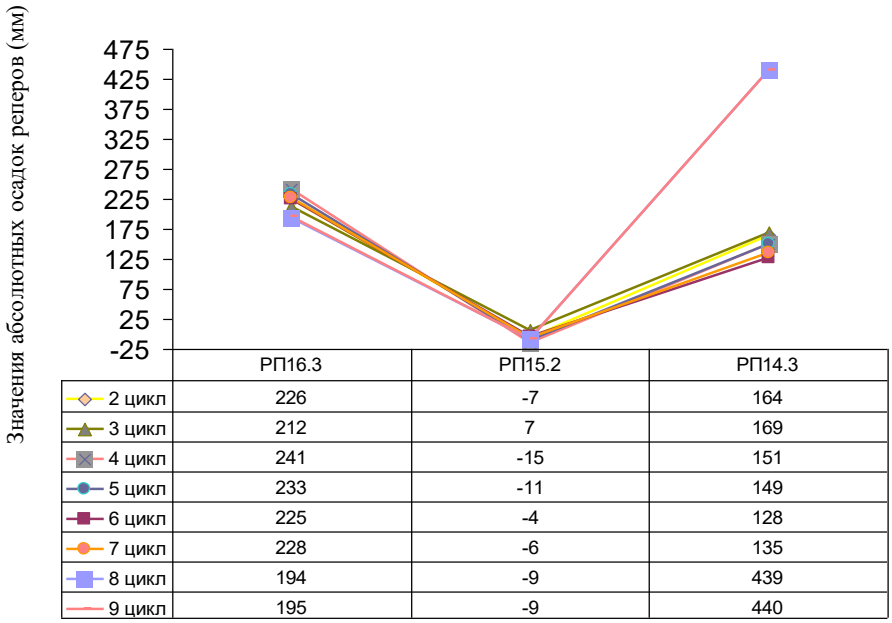
	РП12.1	РП11.1	РП10.1	РП9.1	РП7.2	РП6.2
2 цикл	2	2	8	4	3	6
3 цикл	1	1	2	2	2	7
4 цикл	1	-1	-1	-6	-2	-3
5 цикл	1	0	1	-4	0	0
6 цикл	5	-14	6	-8	6	11
7 цикл	9	-8	5	-8	5	9
8 цикл	9	-10	4	-2	14	-6
9 цикл	9	-12	6	-2	15	-6

Рис. 3.18. Абсолютные осадки наблюдательных пунктов на низовой дамбе



	РП5.3	РП4.3	РП3.2	РП2.3	РП1.3
2 цикл	0	-15	-13	-11	-6
3 цикл	0	-13	-12	-10	-4
4 цикл	0	-15	-19	-21	-20
5 цикл	0	-14	-18	-20	-21
6 цикл	11	2	-5	-8	-9
7 цикл	8	-7	-11	-17	-16
8 цикл	17	0	-6	-9	-19
9 цикл	18	0	-8	-6	-19

Рис. 3.19. Абсолютные осадки наблюдательных пунктов на дамбе вторичного отстойника



	РП16.3	РП15.2	РП14.3
2 цикл	226	-7	164
3 цикл	212	7	169
4 цикл	241	-15	151
5 цикл	233	-11	149
6 цикл	225	-4	128
7 цикл	228	-6	135
8 цикл	194	-9	439
9 цикл	195	-9	440

Рис. 3.20. Абсолютные осадки наблюдательных пунктов на верховой дамбе

Анализ полученных результатов выполнен по данным за весь период наблюдений, что позволяет, в том числе с использованием визуального сравнения, с большей достоверностью проследить за всеми изменениями в характере осадки и планового смещения начиная с начала наблюдений.

Основным положением анализа результатов геодезических наблюдений следует считать установление закономерностей процессов осадки дамбы во времени.

После обработки результатов было выявлено, что на графике осадок наблюдательных пунктов на верховой дамбе заметны нарушения плавности хода осадки дамбы. В 2019 г. произошло резкое поднятие наблюдательных пунктов РП16.3 и РП14.3 (226 мм и 164 мм соответственно), кроме наблюдательного пункта РП15.3, его значения стабильны. Ход осадки наблюдательных пунктов имел аномальный характер. Аномальный ход осадки характеризуется, как правило, одним или несколькими нарушениями закономерности ее развития. К числу причин аномальных отклонений хода осадки можно отнести: интенсивное замачивание грунта дамбы при быстром наполнении хвостохранилища; набухание глинистых грунтов в дамбе, геологической среде основания или откосов при их водонасыщении; морозное пучение грунтов; динамические сотрясения от взрывов, транспорта и др.; выпор слабых грунтов из основания; суффозионные процессы и другие факторы.

Поднятие контрольных реперов продолжается, но значения абсолютных осадок незначительны. При анализе данных наблюдений рекомендуется учитывать, что аномальный ход осадки плотины по указанным выше и другим причинам не всегда является признаком неблагополучной работы плотины и основания или нарушения их целостности, т. к. с прекращением воздействия факторов, нарушающих нормальное развитие осадки (например, замачивание грунта тела плотины водой, небольшие сотрясения взрывами, таяние находившегося в грунте льда и т. д.), дальнейший процесс ее развития приобретает вполне закономерный характер.

Установлено, что значения абсолютных осадок наблюдательных пунктов РП16.3 и РП15.3 стабильны, кроме наблюдательного пункта РП14.3, было выявлено

резкое поднятие. По сравнению с предыдущими измерениями, значения достигают 305 мм. В грунтовом сооружении, его основании или на уступах деформации набухания возможны после начала фильтрации. Такие деформации накладываются (с обратным знаком) на осадку, обусловленную уплотнением тела дамбы и основания от собственного веса грунта. Процесс набухания может длиться достаточно долго из-за малой водопроницаемости грунта, а величина деформаций набухания в значительной мере будет зависеть от размеров высоты дамбы.

Анализ результатов измерений на низовой дамбе и дамбе вторичного отстойника показал, что значения абсолютных осадок контрольных реперов незначительны и находятся в пределах точности измерений.

Анализ плановых смещений наблюдательных пунктов РП16.3 и РП14.3 показал, что значения плановых смещений увеличились по сравнению с предыдущими измерениями почти в два раза по оси *X* — от –260 и –275 мм соответственно, по оси *Y* значения стабильны. Просматривается общая устойчивая тенденция развития сдвижения наблюдательных пунктов, также наблюдается согласованное направление векторов сдвижения. Горизонтальные значения смещений наблюдательных пунктов говорят об их перемещении в сторону чаши хвостохранилища, за исключением наблюдательного пунктов РП14.3.

В целом состояние дамб можно охарактеризовать как удовлетворительное.

При анализе состояния и работы плотины, основания и откосов по данным геодезических наблюдений за их деформациями необходимо учесть и соответствующие результаты визуальных наблюдений. Отсутствие на плотине и других объектах наблюдений видимых проявлений просадок грунта, оползней, трещин, вспучиваний, очагов фильтрации свидетельствует об удовлетворительном состоянии сооружения, его основания и откосов.

3.1.5. Компьютерное 3D-моделирование фильтрационно-деформационных процессов в ограждающей дамбе

Целью работы являлось создание объемной параметрической модели проблемного участка низовой дамбы хвостохранилища и компьютерное гидрогеомеханическое моделирование условий его деформирования в целях выявления опасных фильтрационно-деформационных процессов и критериев устойчивости дамбы. Рассматривалась ограждающая низовая дамба, возведенная до отметки 205,0 м для обеспечения безопасной эксплуатации хвостохранилища с учетом положения уровня воды в пьезометрах по состоянию на 2023 г. и уровнях воды в водохранилище на отметках +194,0, +196,0, +199,0 и 201,3 м.

При обосновании расчетных характеристик физико-механических свойств техногенных грунтов дамб и отложений естественного основания учтены результаты лабораторных исследований, выполненных ООО «СвязьСтройИнженеринг» (Нижний Новгород). Прогноз фактического состояния устойчивости откосов и фильтрационного режима хвостохранилища выполнен по поперечному профилю низовой дамбы с учетом наращивания дамбы до отметки +205,0 м (рис. 3.21).

Задача по прогнозу устойчивости низовой дамбы при совместном рассмотрении фильтрационного режима хвостохранилища выполнена с использованием специализированной лицензионной программы Plaxis 3D. По результатам расчетов оценивалась возможность проявления неблагоприятных фильтрационных деформаций на низовых откосах дамбы (нарушение фильтрационной устойчивости, выход воды на откосы, размыв грунтов дамб).

Построение расчетной модели выполнялось в следующей последовательности: создание геометрии фрагментов хвостохранилища, построение расчетных

моделей инженерно-геологического строения, задание свойств грунтов (параметры деформационных, прочностных и фильтрационных свойств), задание граничных условий и нагрузок, разбивка геометрических моделей на конечные элементы, проведение компьютерного моделирования (расчетов), обработка полученных результатов с возможностью получения коэффициента запаса (устойчивости) и/или показателя надежности.

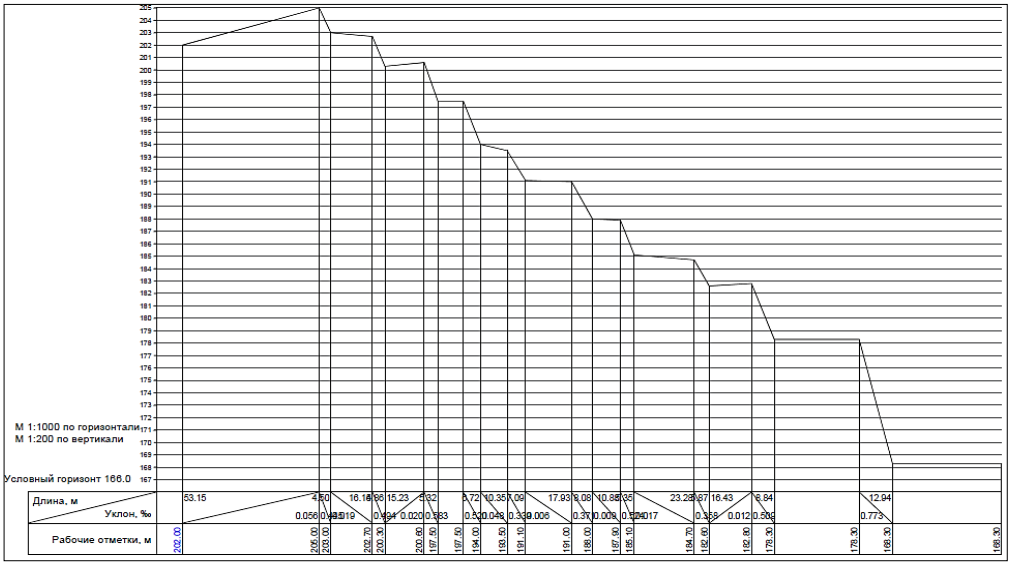


Рис. 3.21. Поперечный профиль по низовой дамбе

При обосновании расчетных характеристик физико-механических свойств техногенных грунтов дамбы и отложений естественного основания приняты во внимание результаты геологического бурения и фильтрационных испытаний, выполненные Горным институтом в июне 2020 г. (обработка данных фильтрационных испытаний выполнена «Проектводстроем») (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Параметры физико-механических характеристик грунтов, принятые в объемной параметрической модели

Параметры	Хвосты (намывной грунт)	Грунты тела дамбы	Нерасчле-ненные ледни-ковые отложения	Суглинок легкий пылеватый	Супесь песчаная	Гравийный грунт
Тип модели	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb	Mohr Coulomb
Тип поведения материала	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained
γ_{unsat} (уд. вес грунта), kN/m³	17,0	19,0	19,4	15,2	16,2	21,8
γ_{sat} (уд. вес насыщ. грунта), kN/m³	20,6	22,0	21,3	19,3	18,4	22,2
k_x (коэф. фильтрации), m/day	1,3	0,4	0,14	0,001	0,35	9
k_y (коэф. фильтрации), m/day	1,3	0,4	0,14	0,001	0,35	9
k_z (коэф. фильтрации), m/day	0,13	0,04	0,14	0,001	0,35	9
E (модуль деформ.), kN/m²	30000	50000	50000	1000	16700	34000
ν (коэф. Пуассона)	0,32	0,30	0,35	0,3	0,3	0,3
c_{ref} (сцепление), kN/m²	2,0	5,0	2	4,5	15	2,5
φ (угол внутр. трения), °	33,0	43,0	40	17,5	27,5	37
ψ (угол дилатансии), °	3	13	10	0	0	7

Компьютерное моделирование дамбы выполнялось в объемной постановке. Для этого была разработана новая 3D-модель фрагмента системы «хвостохранилище – низовая дамба – геологическое основание», созданная на основе данных буровых колонок и результатах инженерно-геологических изысканий (рис. 3.22–3.24). На следующем этапе создавались геометрические схемы с выделением основных слоев грунтов, прежде всего в основании дамбы, и задавались для них параметры физико-механических свойств.

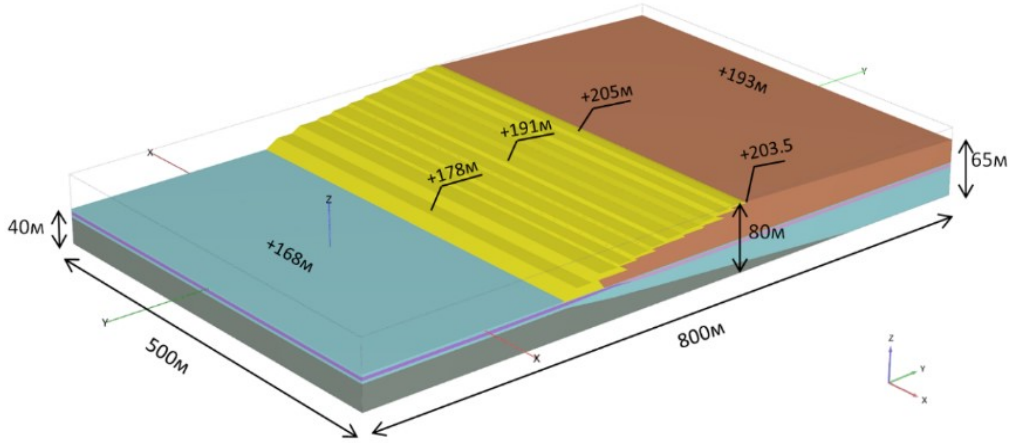


Рис. 3.22. Геометрическая схема фрагмента хвостохранилища, выполненная по поперечному профилю низовой дамбы

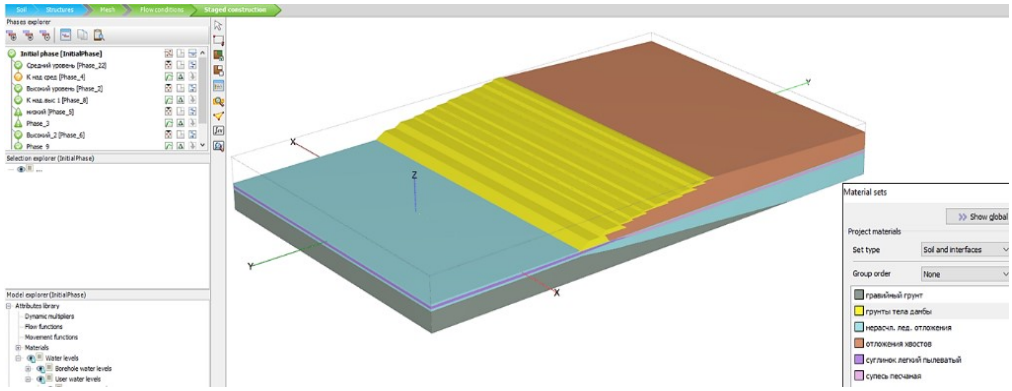


Рис. 3.23. Геометрическая схема и параметры заданных физико-механических свойств грунтов дамбы, основания и отложений хвостов

Для проведения расчетов методом конечных элементов смоделированная геометрическая модель была разбита на отдельные элементы. Программа Plaxis 3D позволяет учитывать напластование грунта, а также все конструктивные объекты, нагрузки и граничные условия. Следует отметить, что для данной модели использовалось два режима разбивки сетки конечных элементов Fine (Мелкая) и Veryfine (Очень мелкая). Режим Veryfine был применен для локального измельчения непосредственно для тела самой дамбы, где можно было

ожидать высокую концентрацию напряжений или значительные градиенты деформации, в остальных местах геометрической модели был применен режим Fine (рис. 3.25).

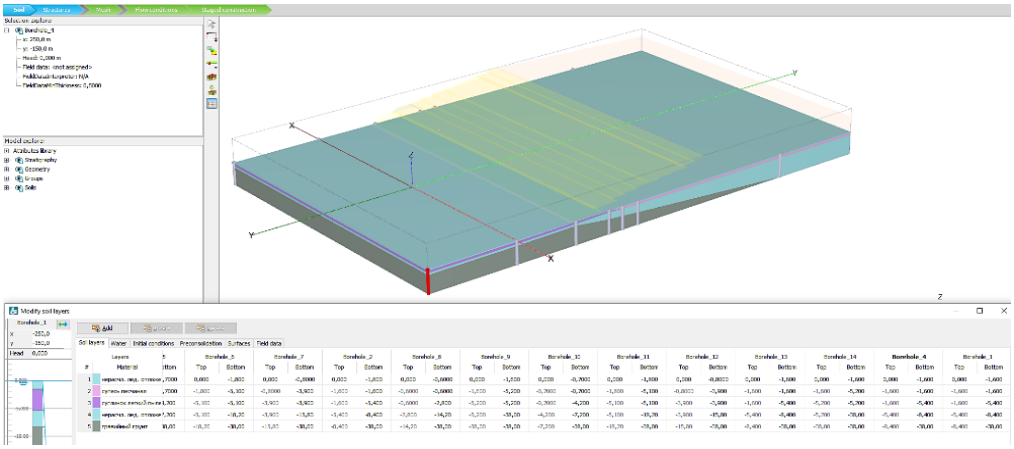


Рис. 3.24. Задание стратиграфического разреза грунтов по геологическим колонкам

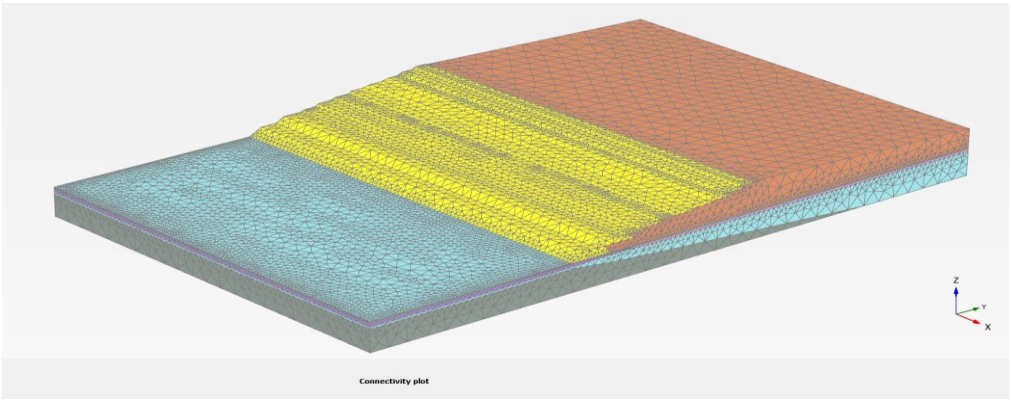


Рис. 3.25. Расчетная конечно-элементная модель фрагмента хвостохранилища

Основные параметры трехмерной сетки конечных элементов приведены на рис. 3.26, где указано количество элементов, количество узлов, средний размер элементов, а также их максимальные и минимальные размеры.

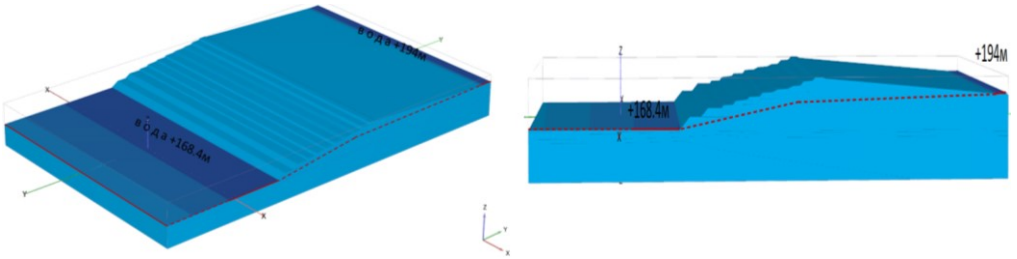
General	
Model	PLAXIS 3D
Elements	10-Noded
Acceleration	
Gravity	1.0 G (-Z direction)
Earth gravity	9,810 m/s²
Mesh	
Nr of soil elements	206719
Nr of nodes	294709
Average element size	9,050 m
Maximum element size	43,87 m
Minimum element size	0,02544 m
Comments	

Рис. 3.26. Характеристика сетки конечных элементов разработанной модели

Исследование модели предусматривает два вида задания граничных условий (нагружения): гравитационное — учет веса грунта и пород, без воды и совместное деформационно-фильтрационное — учет веса грунтов и пород, гидравлические условия.

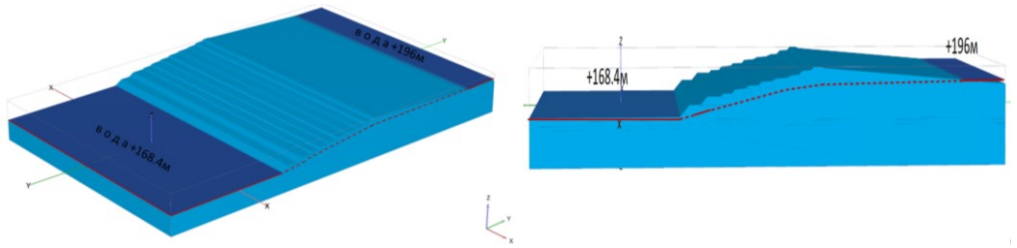
На актуализированной геометрической 3D-модели были выделены основные слои слагающих грунтов и пород (рис. 3.25), для которых задавались параметры физико-механических свойств (табл. 3.2).

Для генерации порового давления в слоях грунта и внешнего давления воды были заданы гидравлические условия. Для этого были созданы моделируемые уровни воды (на основе данных гидрогеологической службы) и присвоены гидравлические условия объемным кластерам грунта (рис. 3.27–3.30).



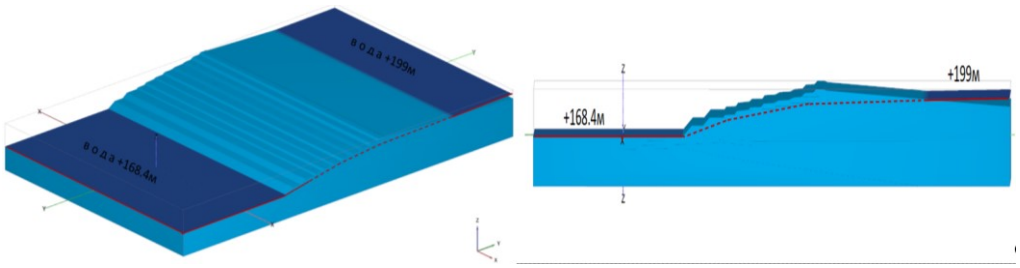
а *б*

Рис. 3.27. Созданный и смоделированный уровень воды в прудке хвостохранилища на отметке +194,0 м: *а* — изометрия; *б* — поперечный разрез



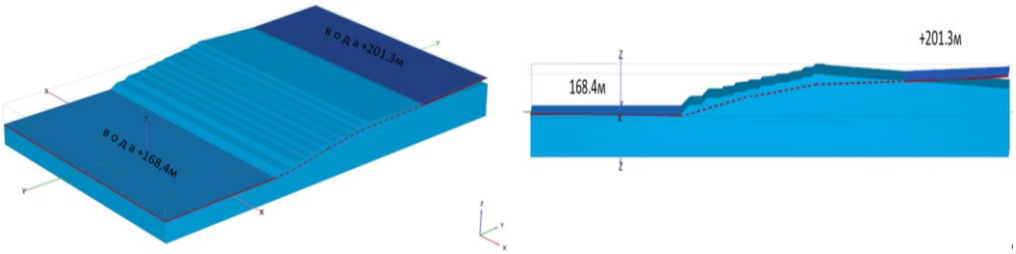
а *б*

Рис. 3.28. Созданный и смоделированный уровень воды в прудке хвостохранилища на отметке +196,0 м: *а* — изометрия; *б* — поперечный разрез



а *б*

Рис. 3.29. Созданный и смоделированный уровень воды в прудке хвостохранилища на отметке +199,0 м: *а* — изометрия; *б* — поперечный разрез



а *б*

Рис. 3.30. Созданный и смоделированный уровень воды в прудке хвостохранилища на отметке +201,3 м: *а* — изометрия; *б* — поперечный разрез

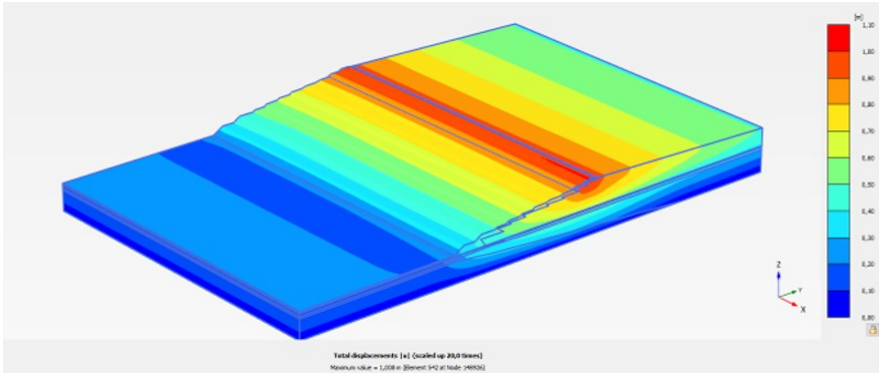
В табл. 3.3 представлены типы расчета и параметрические данные для 3D-моделирования по вариантам уровня воды в прудке хвостохранилища

Таблица 3.3

Параметрическое компьютерное 3D-моделирование
по вариантам уровня воды в прудке хвостохранилища

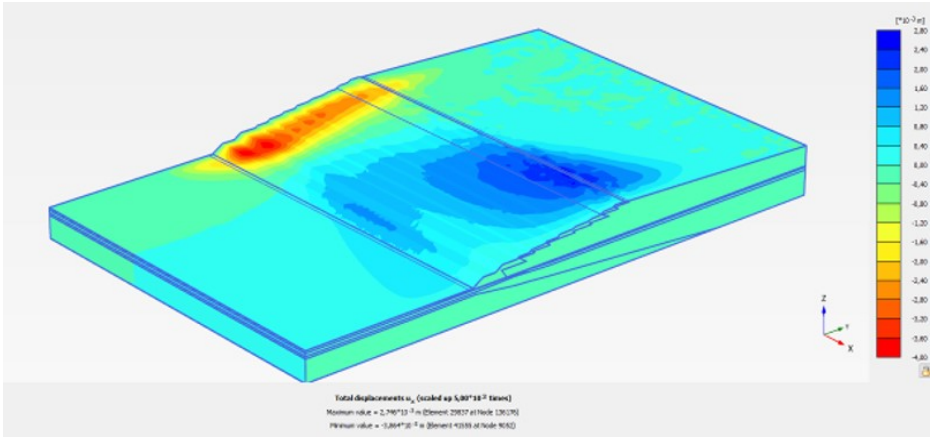
№ варианта расчета	Тип расчета	Параметрические данные
1	Базовый-гравитационное нагружение	Вес грунтов (без учета воды в хвостохранилище)
2	Упругопластический (упругопластические деформации)	Уровень воды в хвостохранилище на отметке +194,0 м
3	Упругопластический (упругопластические деформации)	Уровень воды в хвостохранилище на отметке +196,0 м
4	Упругопластический (упругопластические деформации)	Уровень воды в хвостохранилище на отметке +199 м
5	Упругопластический (упруго-пластические деформации)	Уровень воды в хвостохранилище на отметке +201,3 м

Для прогноза фильтрационного режима и статической устойчивости грунтов тела и основания ограждающей дамбы при отметке гребня +205,0 м выполнены расчеты численного моделирования (геомеханические расчеты: гравитационное нагружение и вес грунтов) с использованием программного комплекса Plaxis 3D. Результаты компьтерного моделирования представлены на рис. 3.31–3.35.

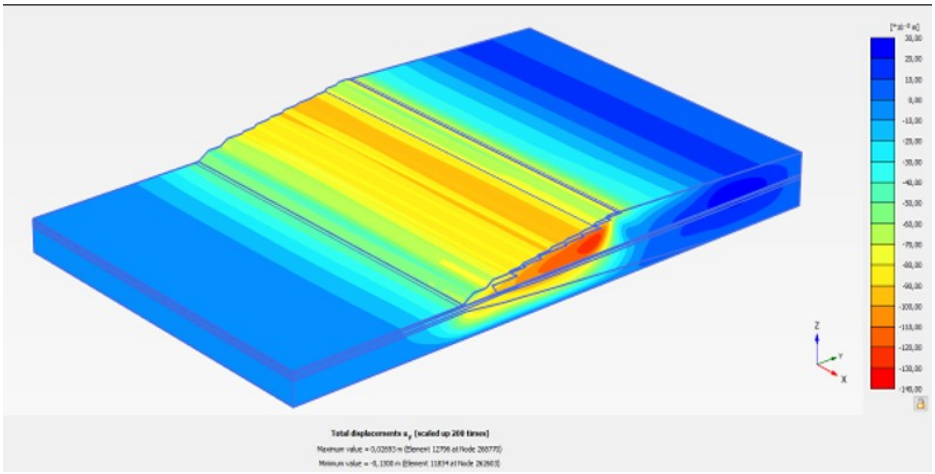


а

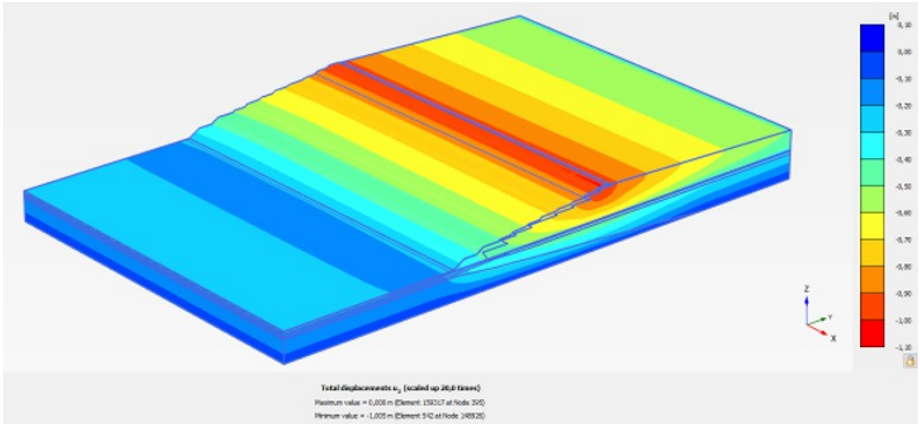
Рис. 3.31. Картины распределения смещений грунтов дамбы при гравитационном нагружении (базовый вариант) (начало): *а* — полные (общие) $U_{общ.}$



б

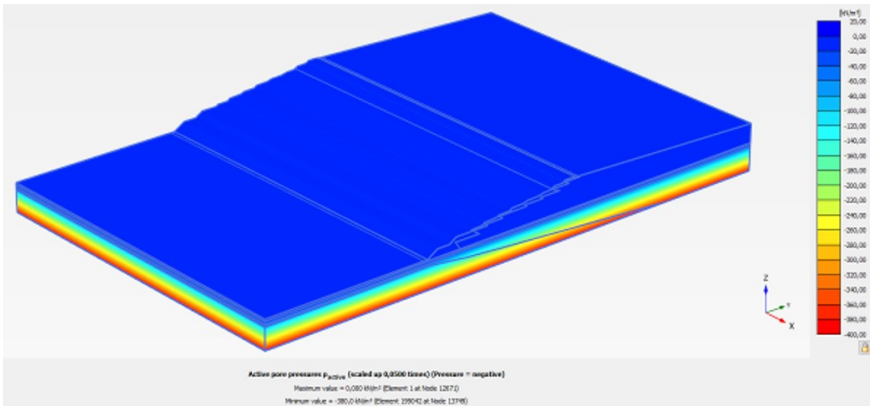


в



г

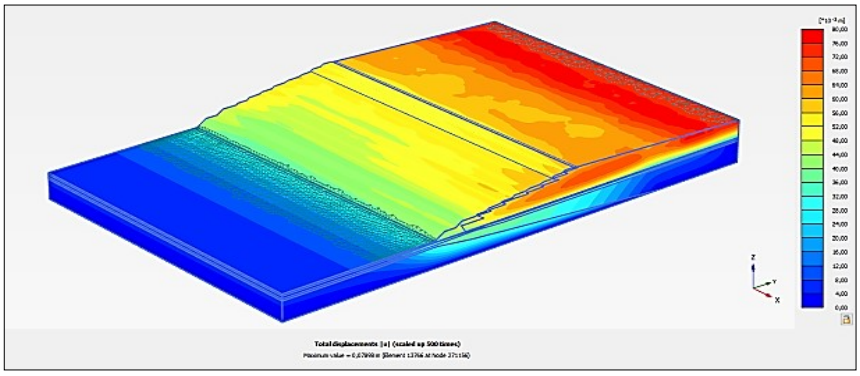
Рис. 3.31. Картины распределения смещений грунтов дамбы при гравитационном нагружении (базовый вариант) (продолжение): *б* — субгоризонтальные (вдоль длинной оси) U_x; *в* — субгоризонтальные (вкрест длинной оси) U_y; *г* — вертикальные U_z



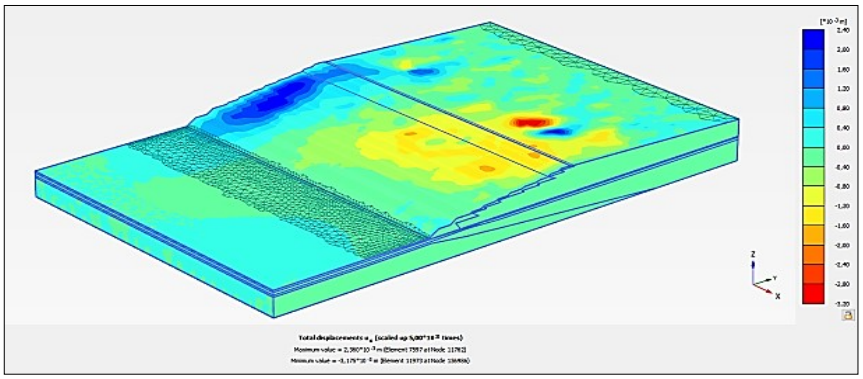
д

Рис. 3.31. Картины распределения смещений грунтов дамбы при гравитационном нагружении (базовый вариант) (окончание): *д* — активное поровое давление Pactive

Картины перемещений и гидравлических показателей при уровне воды в прудке хвостохранилища +194 м.

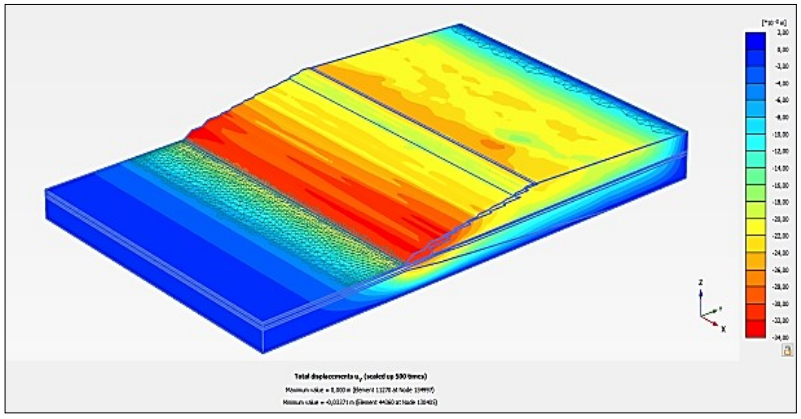


а

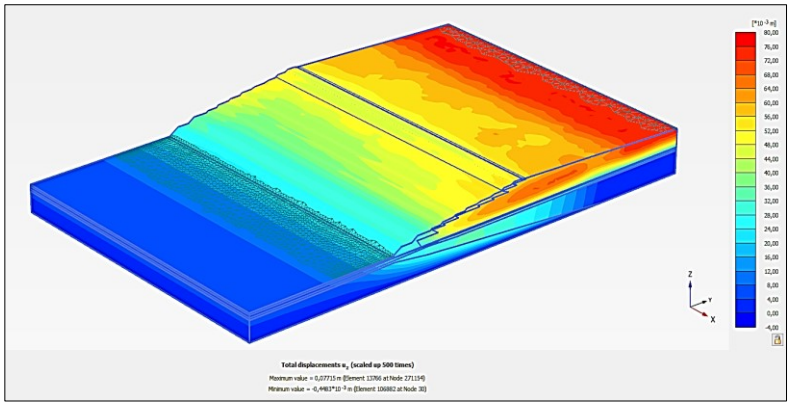


б

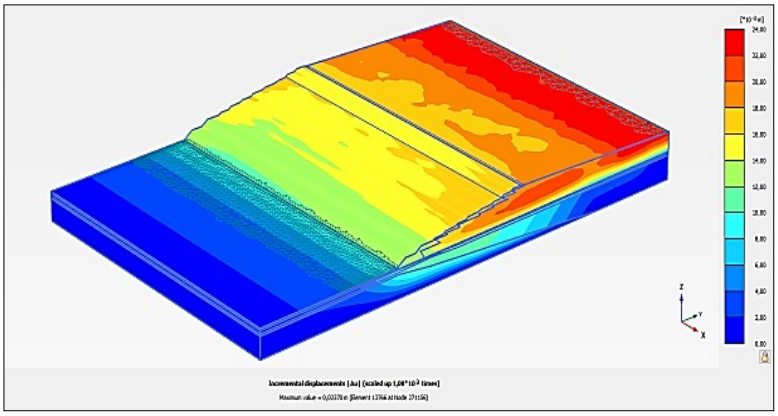
Рис. 3.32. Картины распределения перемещений грунтов дамбы при уровне воды в прудке хвостохранилища на отметке +194 м (начало): *а* — общие $U_{общ.}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

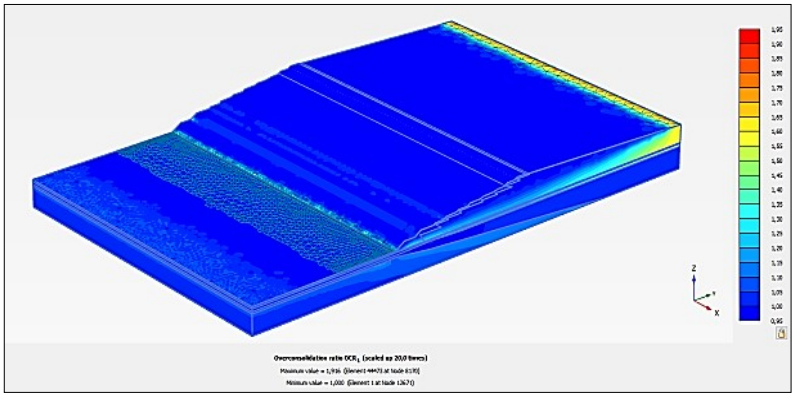


г

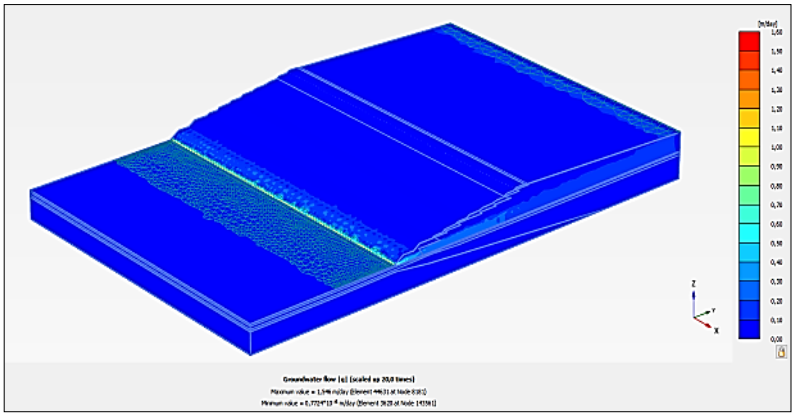


д

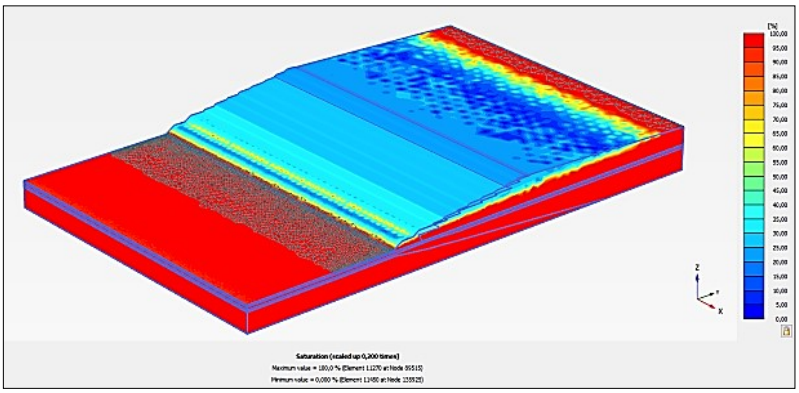
Рис. 3.32. Картины распределения перемещений грунтов дамбы при уровне воды в прудке хвостохранилища на отметке +194 м (продолжение): *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /Δ*U*/



е



ж



з

Рис. 3.32. Картины распределения перемещений грунтов дамбы при уровне воды в прудке хвостохранилища на отметке +194 м (продолжение): *е* — коэффициент переуплотнения OCR; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через дамбу Craund water flow /*q*/; *з* — водопроницаемость Saturation; *и* — активное поровое давление Pactive

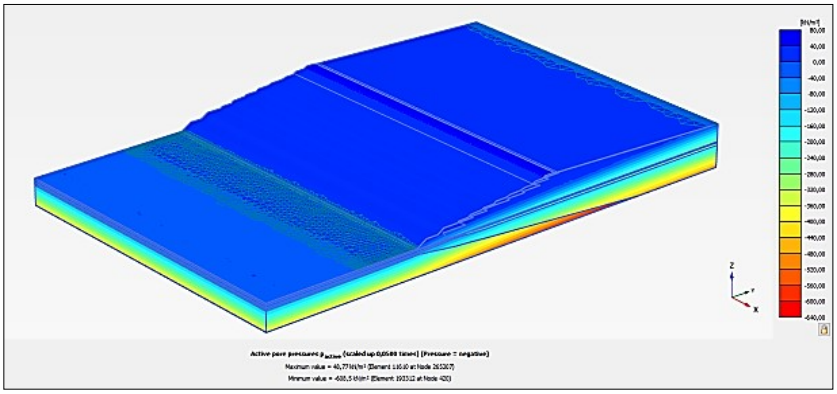
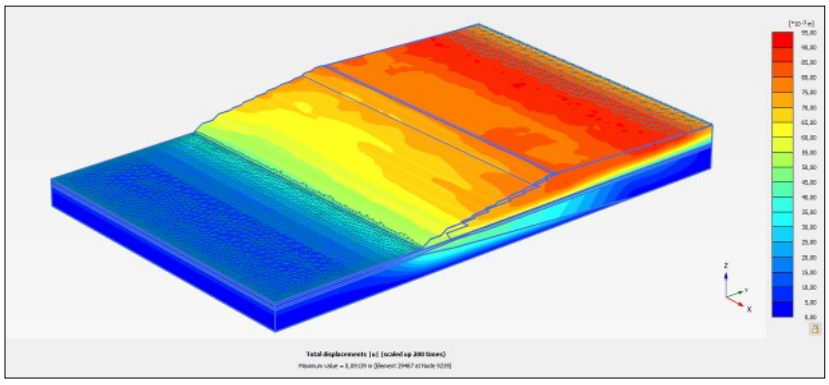
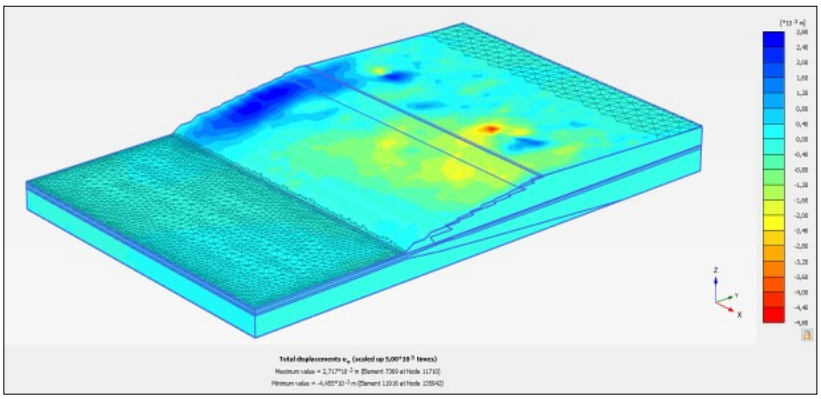


Рис. 3.32. Картины распределения перемещений грунтов дамбы при уровне воды в прудке хвостохранилища на отметке +194 м (окончание): *и* — активное поровое давление Pactive

Картины перемещений грунтов и гидравлических показателей при уровне воды в прудке хвостохранилища +196 м.

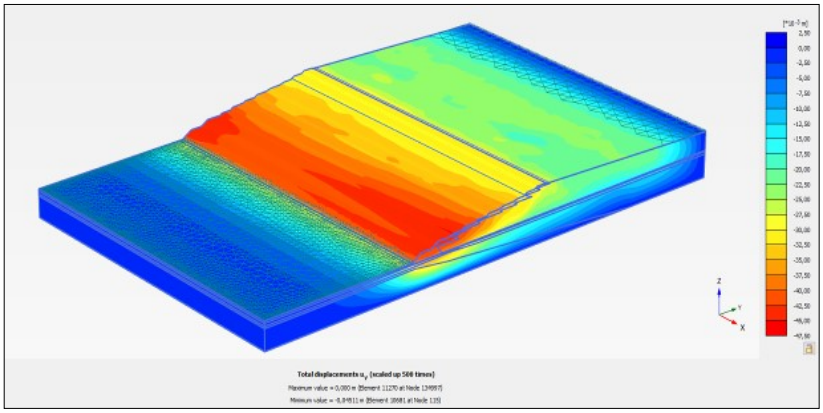


а

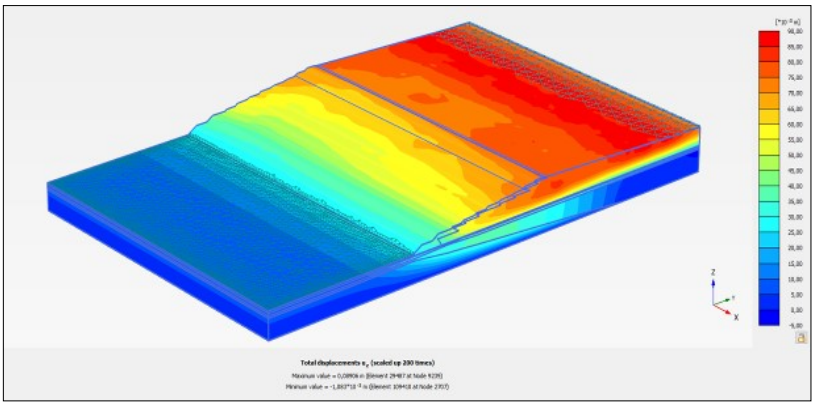


б

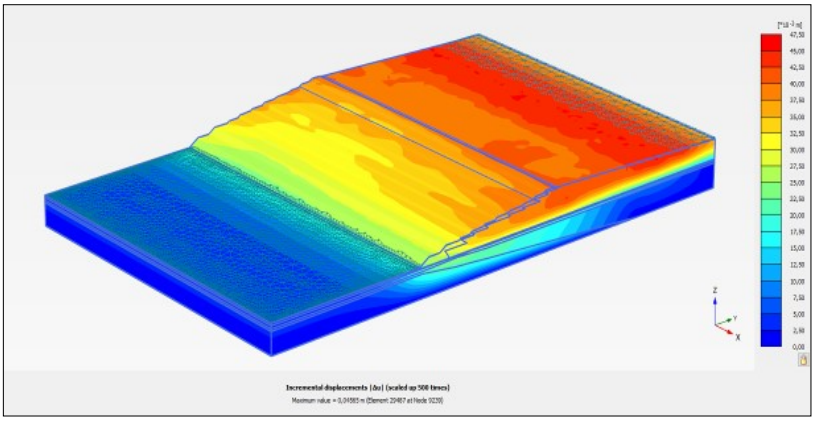
Рис. 3.33. Картины распределения перемещений грунтов дамбы при уровне воды в прудке хвостохранилища на отметке +196 м (начало): *а* — общие $U_{общ.}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

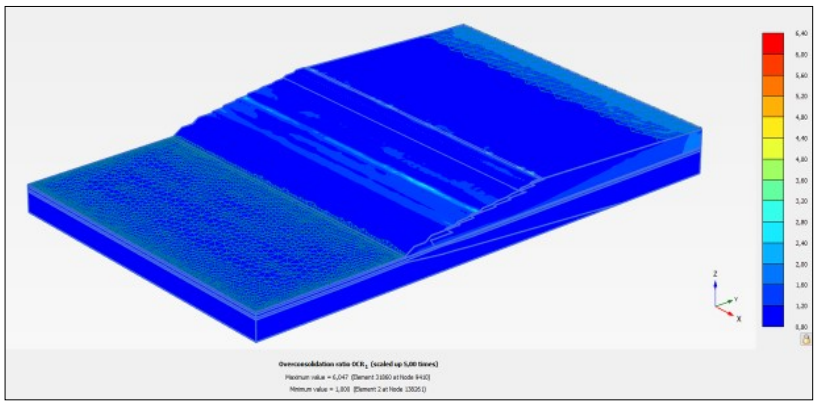


г

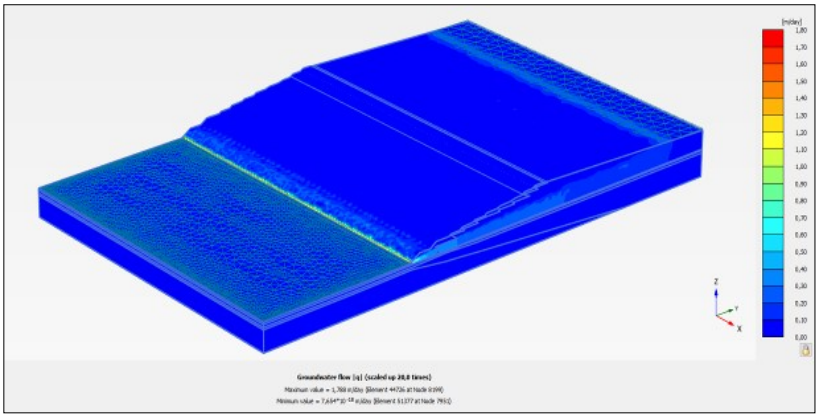


д

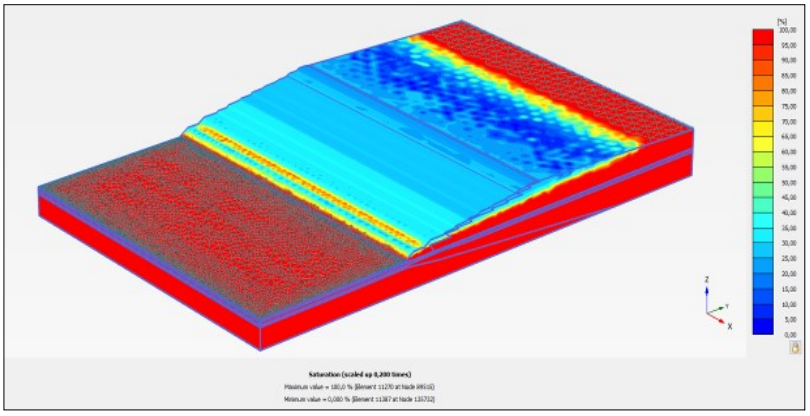
Рис. 3.33. Картины распределения перемещений грунтов дамбы при уровне воды в прудке хвостохранилища на отметке +196 м (продолжение): *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /Δ*U*/



е

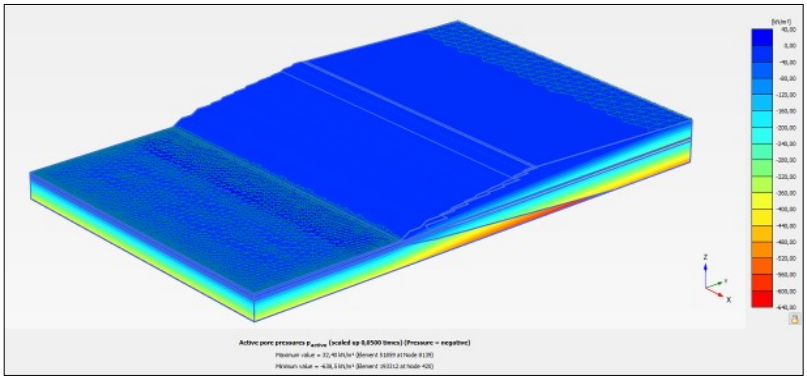


ж



з

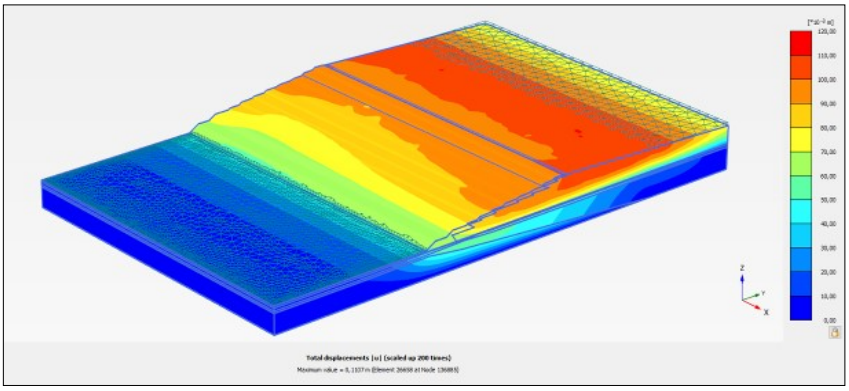
Рис. 3.33. Картины распределения перемещений грунтов дамбы при уровне воды в прудке хвостохранилища на отметке +196 м (продолжение): *е* — коэффициент переуплотнения OCR; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через дамбу Craund water flow /*q*/; *з* — водопроницаемость Saturation



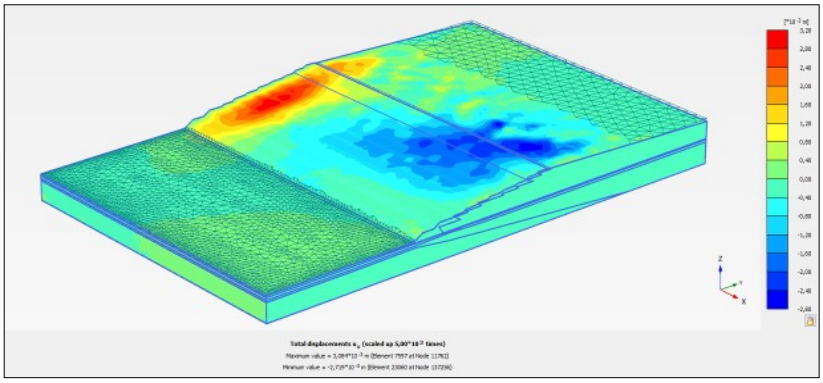
и

Рис. 3.33. Картины распределения перемещений грунтов дамбы при уровне воды в прудке хвостохранилища на отметке +196 м (окончание): *и* — активное поровое давление Pactive

Картины перемещений грунтов и гидравлических показателей при уровне воды в прудке хвостохранилища +199 м.

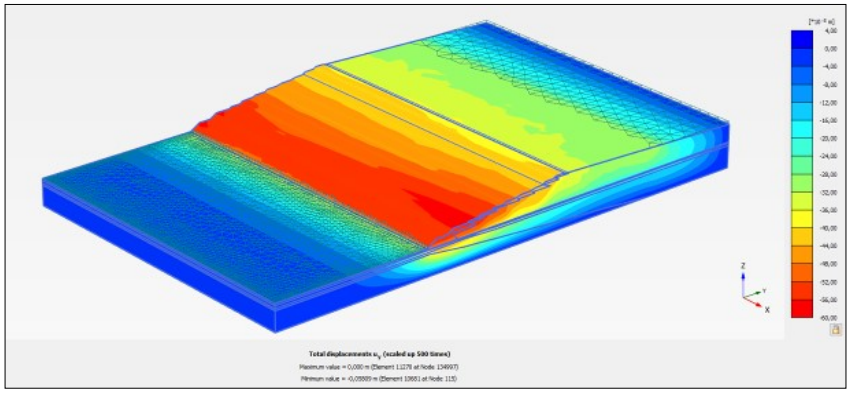


а

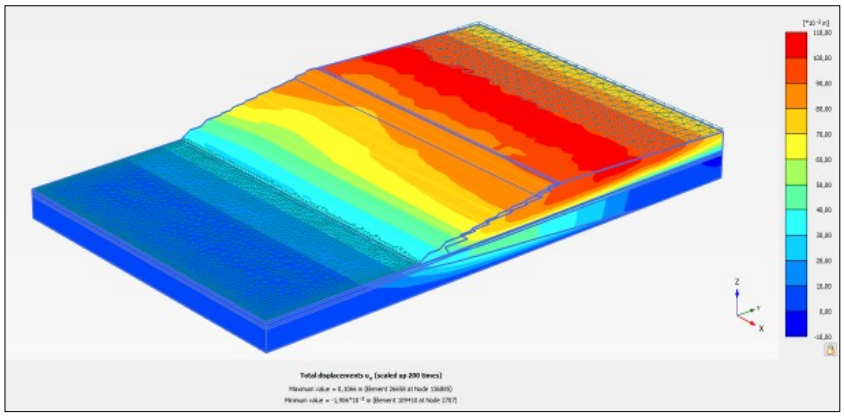


б

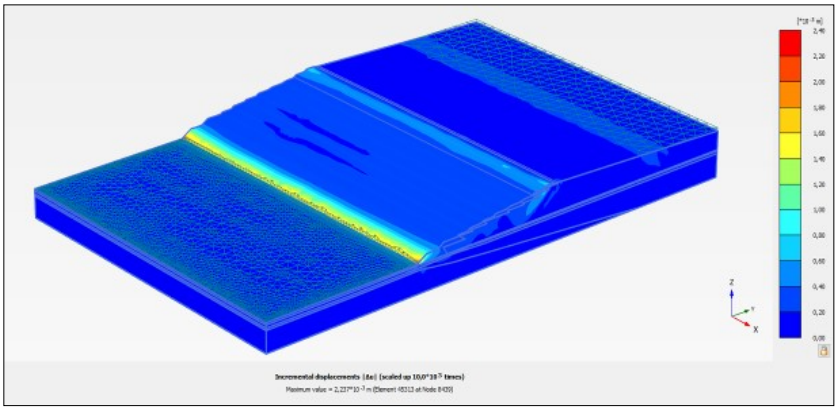
Рис. 3.34. Картины распределения перемещений грунтов дамбы при уровне воды в водохранилище на отметке +199 м (начало): *а* — общие $U_{общ}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

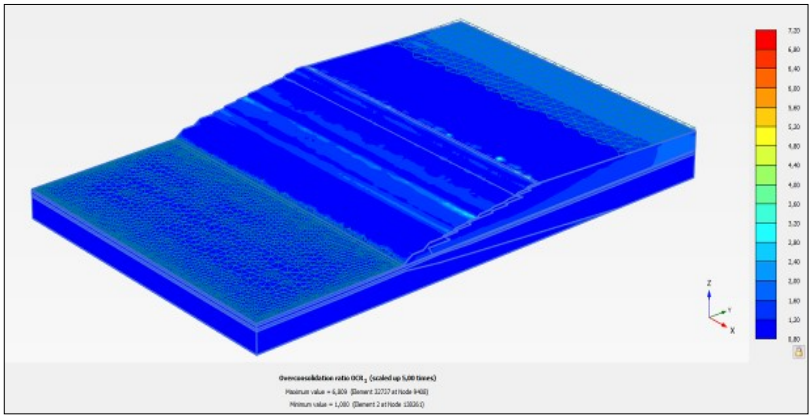


г

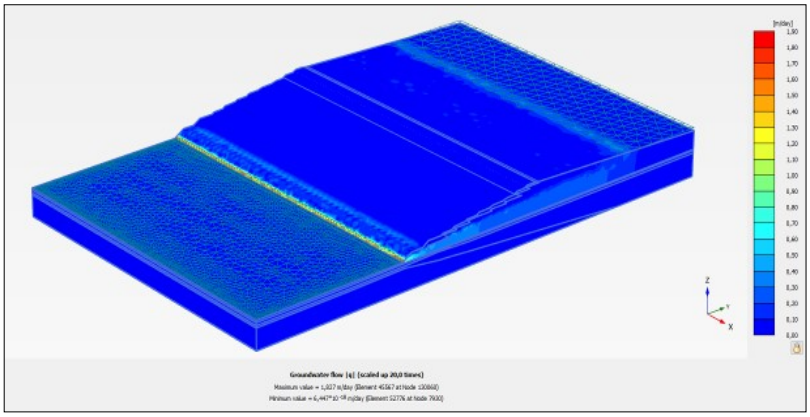


д

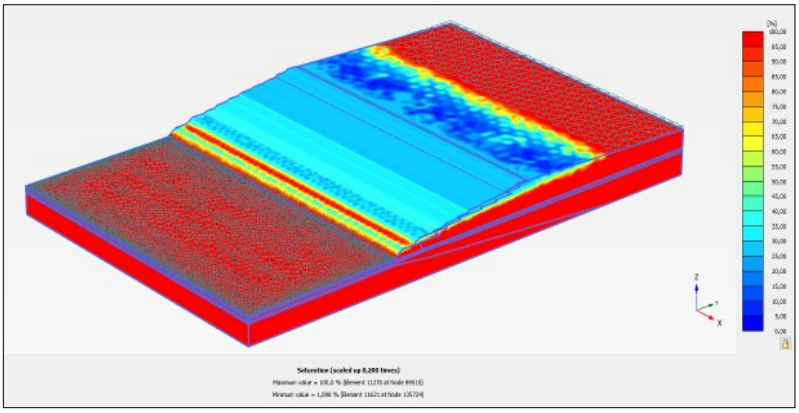
Рис. 3.34. Картины распределения перемещений грунтов дамбы при уровне воды в водохранилище на отметке +199 м (продолжение): *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /ΔU/



е

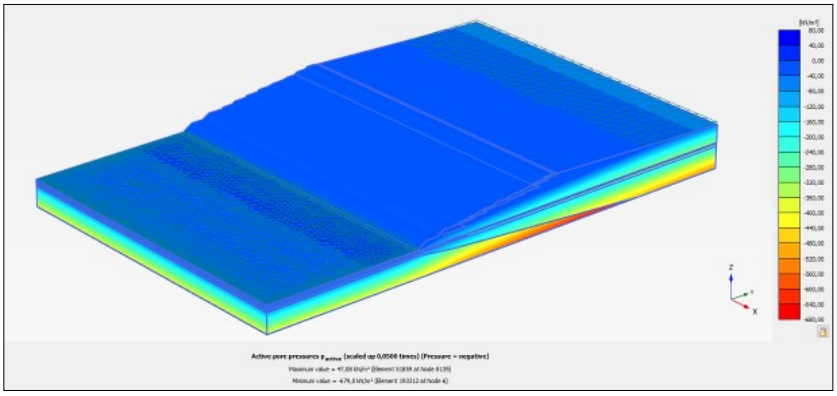


ж



з

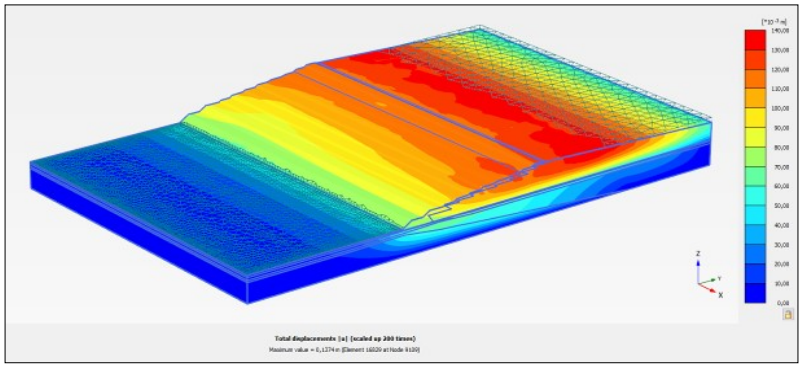
Рис. 3.34. Картины распределения перемещений грунтов дамбы при уровне воды в водохранилище на отметке +199 м (продолжение): *е* — коэффициент переуплотнения OCR; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через дамбу Craund water flow /*q*/; *з* — водопроницаемость Saturation



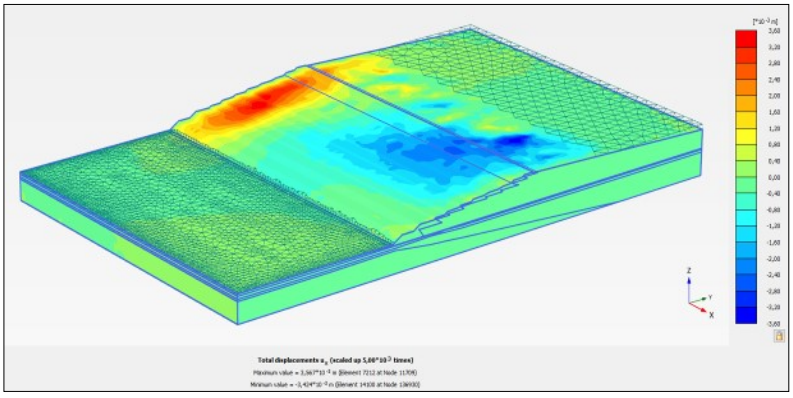
и

Рис. 3.34. Картины распределения перемещений грунтов дамбы при уровне воды в водохранилище на отметке +199 м (окончание): *и* — активное поровое давление Pactive

Картины перемещений грунтов и гидравлических показателей при уровне воды в водохранилище +201,3 м.

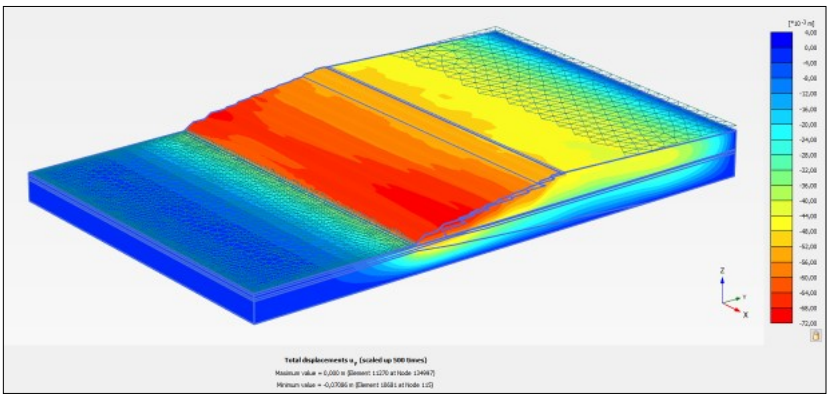


а

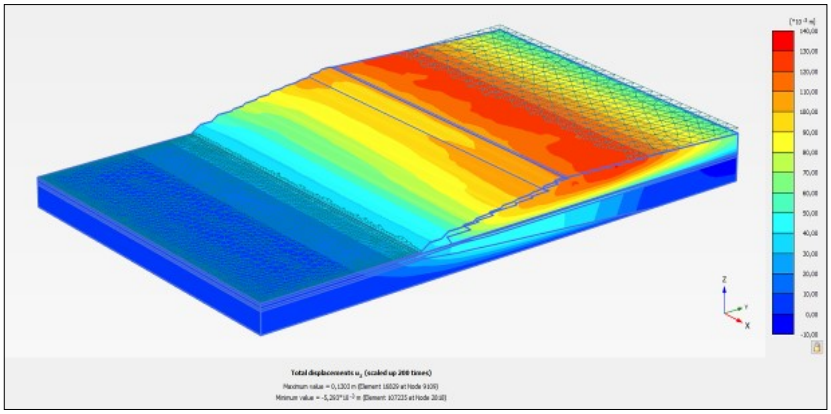


б

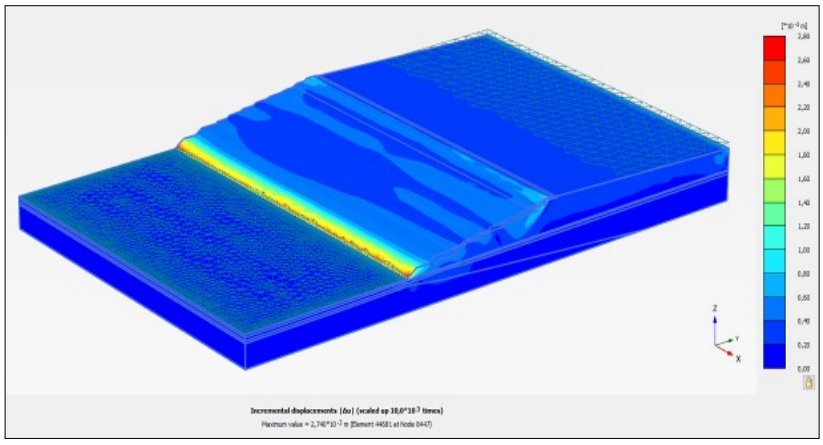
Рис. 3.35. Картины распределения перемещений грунтов дамбы при уровне воды в водохранилище на отметке +201,3 м (начало): *а* — общие $U_{общ.}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

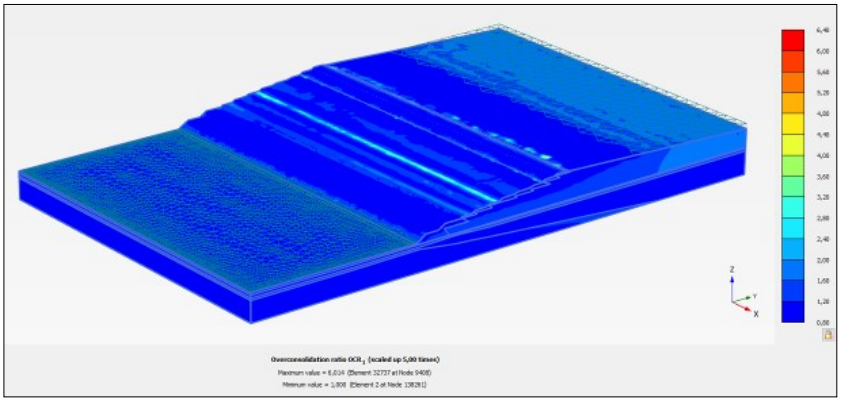


г

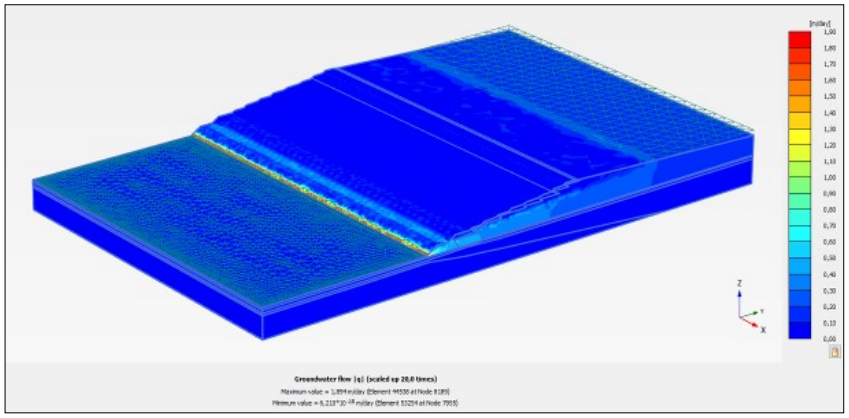


д

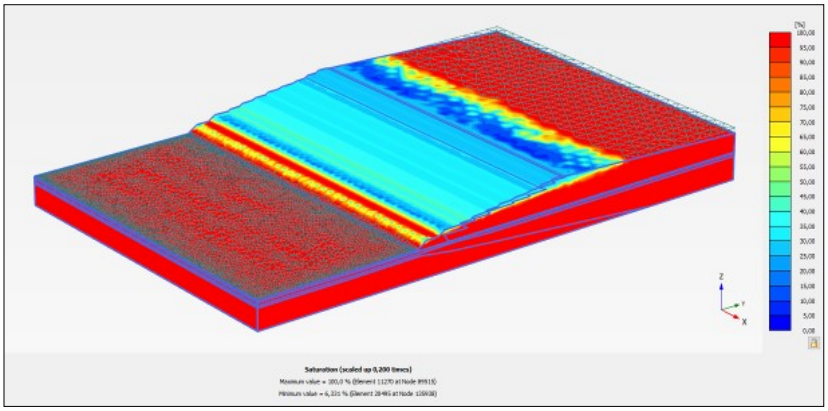
Рис. 3.35. Картины распределения перемещений грунтов дамбы при уровне воды в водохранилище на отметке +201,3 м (продолжение): *г* — вертикальные U_z; д — приращения перемещений /Δ*U*/



е

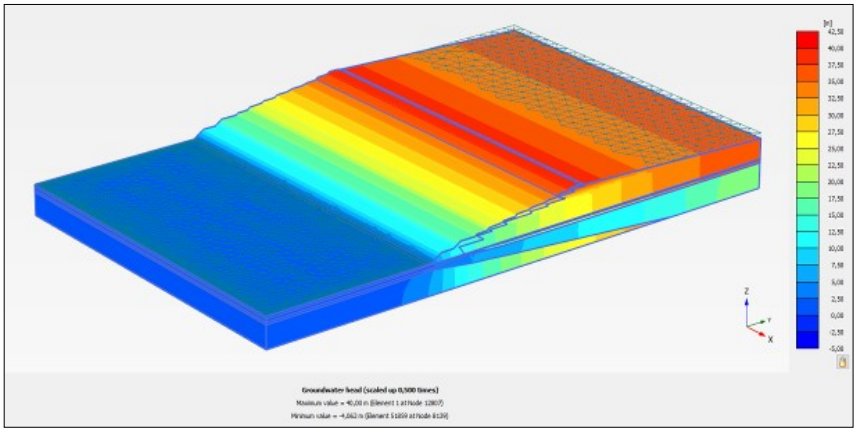


ж



з

Рис. 3.35. Картины распределения перемещений грунтов дамбы при уровне воды в водохранилище на отметке +201,3 м (продолжение): *е* — коэффициент переуплотнения OCR; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через дамбу Craund water flow /*q*/; *з* — водопроницаемость Saturation



и

Рис. 3.35. Картины распределения перемещений грунтов дамбы при уровне воды в водохранилище на отметке +201,3 м (окончание): *и* — активное поровое давление Pactive

Расчетные значения параметров депрессионной кривой приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Расчетные значения параметров депрессионной кривой

№ п/п	Отметка уровня воды в хвостохранилище, м	Отметка уровня воды на верховом склоне, м	Отметка уровня воды на низовом склоне, м	Гидростатический напор, м	Расстояние между отметками воды на склонах, м	Гидравлический уклон
1	+194,0	+194,0	+168,4	25,6	505	0,05
2	+196,0	+196,0	+168,4	27,6	480	0,06
3	+199,0	+199,0	+168,4	30,6	420	0,07
4	+201,3	+201,3	+168,4	32,9	370	0,09

Также в результате компьютерного моделирования были рассчитаны значения показателя надежности, в определенной степени отражающие коэффициент запаса (устойчивости) дамбы.

Известно, что коэффициент запаса (устойчивости) определяется как отношение разрушающей нагрузки к действующей нагрузке. Такое определение коэффициента применимо для фундаментов, скальных откосов и конструкций, но не применимо для насыпей. Для грунтовых конструкций более целесообразно использовать определение значений показателя надежности, которое дается в классической механике грунтов: устойчивость представляет собой отношение имеющейся сдвиговой прочности к минимальной сдвиговой прочности, необходимой для равновесия водонасыщенных и увлажненных грунтов.

Для определения значений коэффициента $K_{над}$ сооружения применен расчет Safety (безопасность, устойчивость, несущая способность), предусмотренный для определения общих значений показателя надежности. Для вычисления этого показателя использован метод phi-reduction (снижение параметров прочности грунта) — прочностные

характеристики грунта tan φ и c последовательно уменьшаются до тех пор, пока не происходит разрушение сооружения.

Полный показатель надежности $\sum Msf$ используется для определения параметров прочности грунта на текущем этапе расчета:

$$\sum Msf = \frac{\tan \varphi_{inpit}}{\tan \varphi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} = \frac{S_{u,\,input}}{S_{u,\,reduced}}. \qquad (3.3)$$

В приведенном выражении параметры прочности с индексом '*input*' относятся к свойствам, заданным в наборах данных по материалам, а параметры с индексом '*reduced*' — к сниженным значением параметров, используемым в расчетах.

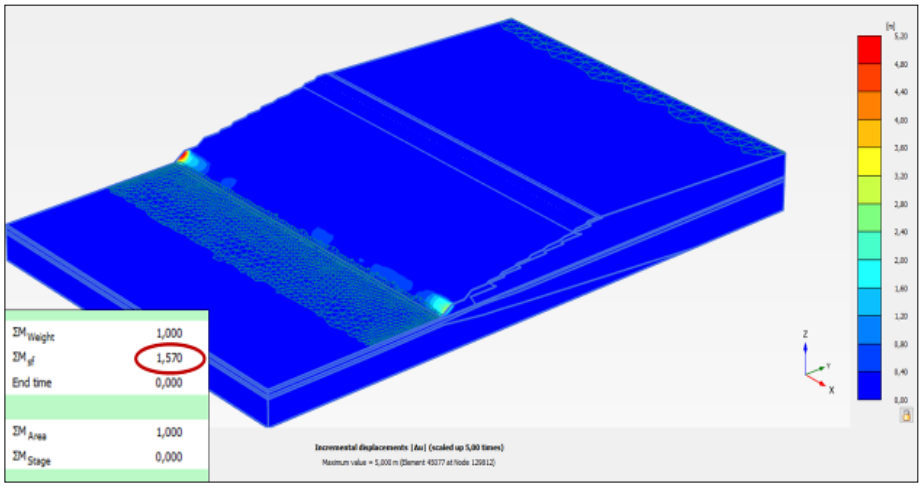
$$SF = \frac{существующ\ ая\ прочность}{прочность\ при\ разрушении} = \text{величина } \sum Msf \text{ при разрушении.} \qquad (3.4)$$

Коэффициент безопасности определяется как значение $\sum Msf$, при котором происходит разрушение.

Во время расчета коэффициента безопасности генерируются дополнительные перемещения. Полные перемещения не имеют физического смысла, однако приращения перемещений, полученные на последнем шаге (при наступлении разрушения) позволяют судить о возможном механизме разрушения.

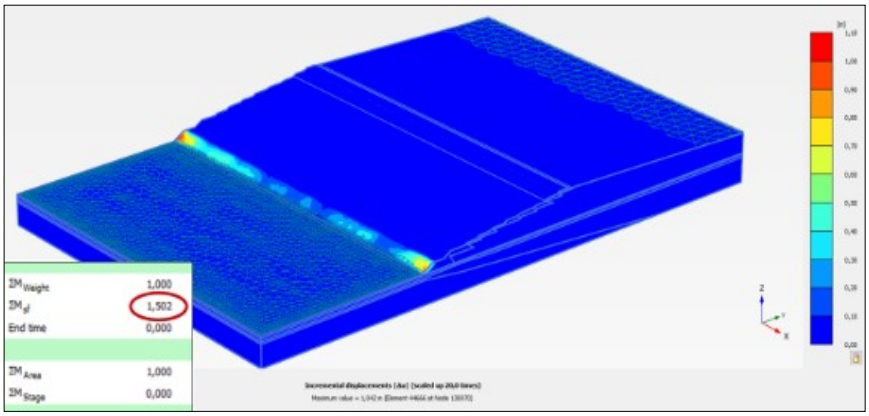
Картины приращения перемещений грунтов для вышеперечисленных вариантов расчета приведены на рис. 3.36.

Расчетные значения показателя надежности (устойчивости) низового склона дамбы приведены в табл. 3.5.

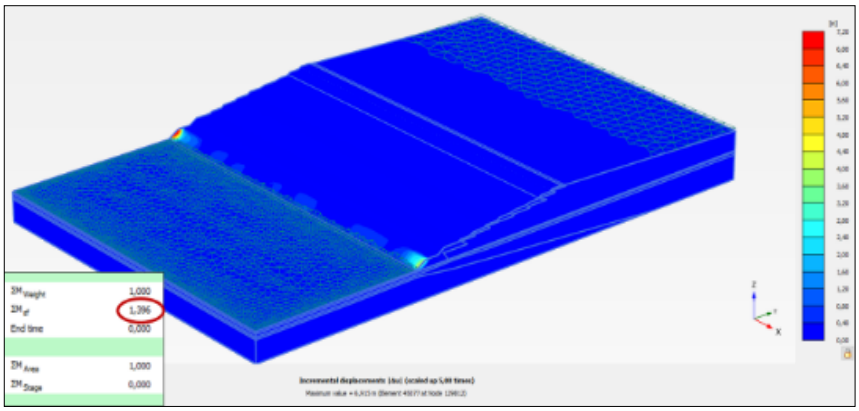


а

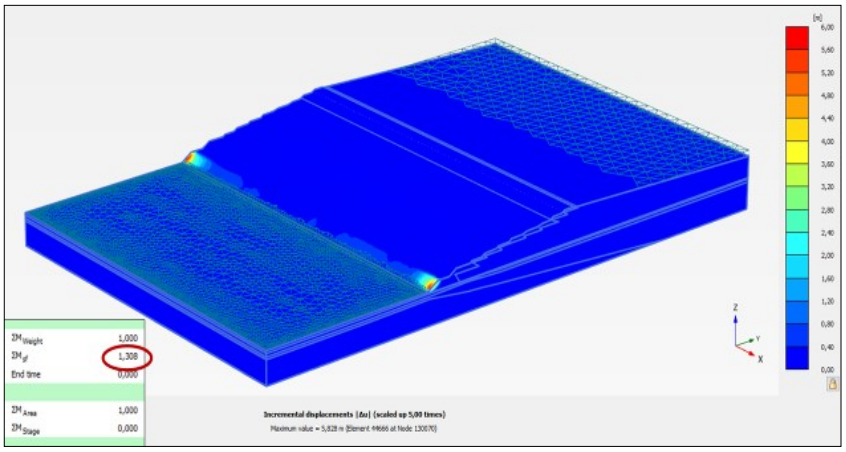
Рис. 3.36. Картины приращений перемещений при различных уровнях воды в водохранилище (начало): *а* — уровень воды +194 м



б



в



г

Рис. 3.36. Картины приращений перемещений при различных уровнях воды в водохранилище (окончание): *б* — уровень воды +196 м; *в* — уровень воды +199 м; *г* — уровень воды +201,3 м

Таблица 3.5

Расчетные значения показателя надежности (устойчивости) низового склона дамбы

Варианты компьютерного моделирования	Уровень воды в хвостохранилище, м	Значения показателя надежности, $K_{над.}$
1	+194,0	1,570
2	+196,0	1,502
3	+199,0	1,396
4	+201,3	1,308

Поскольку хвостохранилище ОФ ГОК «Олений ручей» является гидротехническим сооружением с категорией опасности II класса, по способу отсыпки относится к земляным насыпным плотинам, возведенным путем механического перемещения местных природных грунтов ледникового и водно-ледникового генезиса, то значение коэффициента устойчивости (запаса) не должно быть меньше нормативного значения согласно СП-39.13330.2012 «Плотины из грунтовых материалов» [167] (табл. 3.6).

Таблица 3.6

Нормативные значения коэффициентов устойчивости (СП-39.13330.2012 «Плотины из грунтовых материалов»)

Класс сооружения	I	II	III	IV
Значение $K_{уст.}$	1,25	1,20	1,15	1,10

Выполненные расчетные исследования устойчивости низовой дамбы хвостохранилища при возведении ее гребня до отметки 205,0 м показали, что коэффициент запаса (устойчивости, надежности) изменяется от 1,57 до 1,308 в зависимости от уровня воды в водохранилище.

Таким образом, можно сделать вывод, что при уровне воды в хвостохранилище до 201,3 м статическая устойчивость низовой дамбы в целом будет обеспечена.

При подъеме уровня воды в прудке хвостохранилища выше отметки 201,3 м статическая устойчивость низовой дамбы не будет обеспечена в полной мере, а при дополнительных динамических нагрузках может быть утрачена.

3.1.6. Особенности гидрогеомеханического состояния хвостохранилища по данным полевых наблюдений и компьютерного моделирования

На основании ранее выполненных исследований выявлены участки дамб, на которых локализованы зоны протечек.

Низовая дамба хвостохранилища имеет неравномерное распределение нарушений изолирующей способности. Наибольшая часть протечек наблюдается в западной части исследуемого участка дамбы.

Контроль этих участков базировался на детальном анализе георадарных определений, анализе изменений плановых координат и высотных отметок контрольных реперов на дамбах, анализе визуальных обследований и фотограмметрических съемках. Кроме того, для проблемных зон был выполнен прогноз изменения состояния дамбы на основе компьютерного моделирования. На рис. 3.37–3.39 представлены разрезы по низовой дамбе хвостохранилища в местах расположения пьезометрических створов, отражающих фактическое и прогнозное состояния дамбы.

В табл. 3.7 представлены интервалы по профилям, на которых были выделены зоны неоднородности.

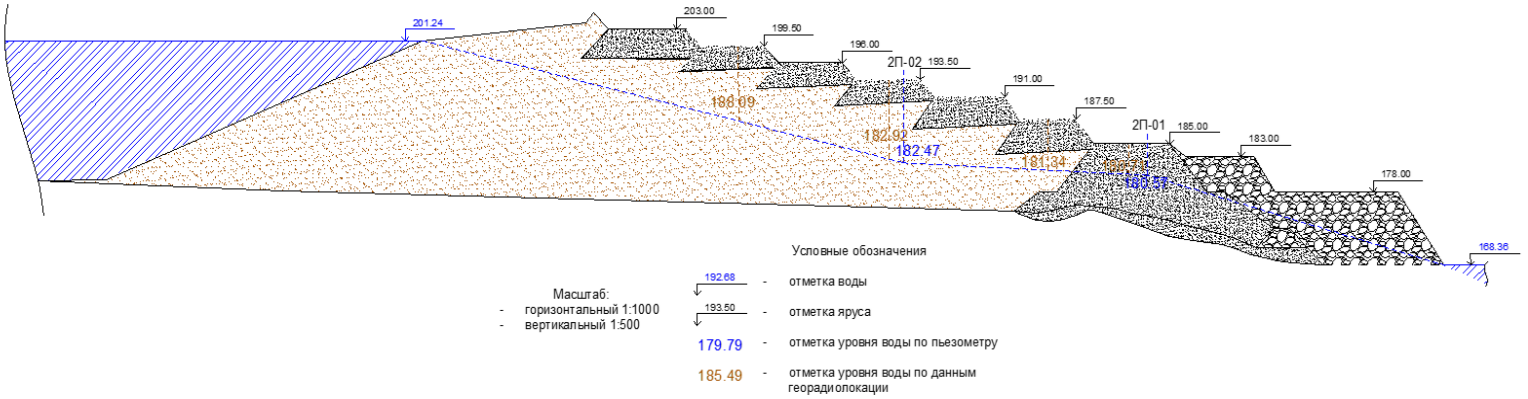


Рис. 3.37. Поперечный разрез по 2 створу (ПК-15+98) низовой дамбы с прорисованной депрессионной плоскостью по данным георадиолокации и данным гидрографических наблюдений

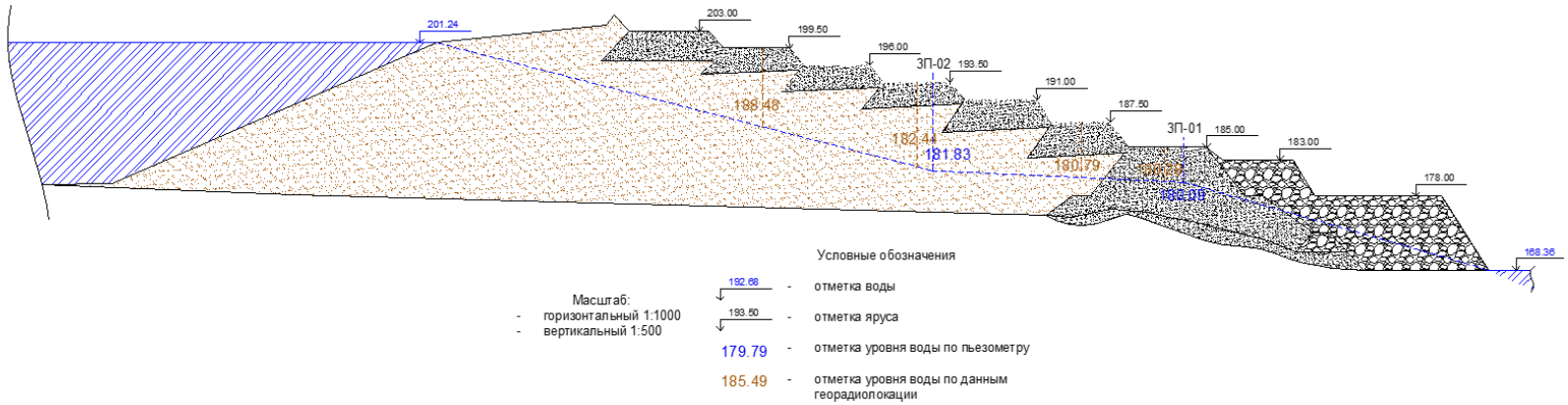


Рис. 3.38. Поперечный разрез по 3 створу (ПК-17+15) низовой дамбы с прорисованной депрессионной плоскостью по данным георадиолокации и данным гидрографических наблюдений

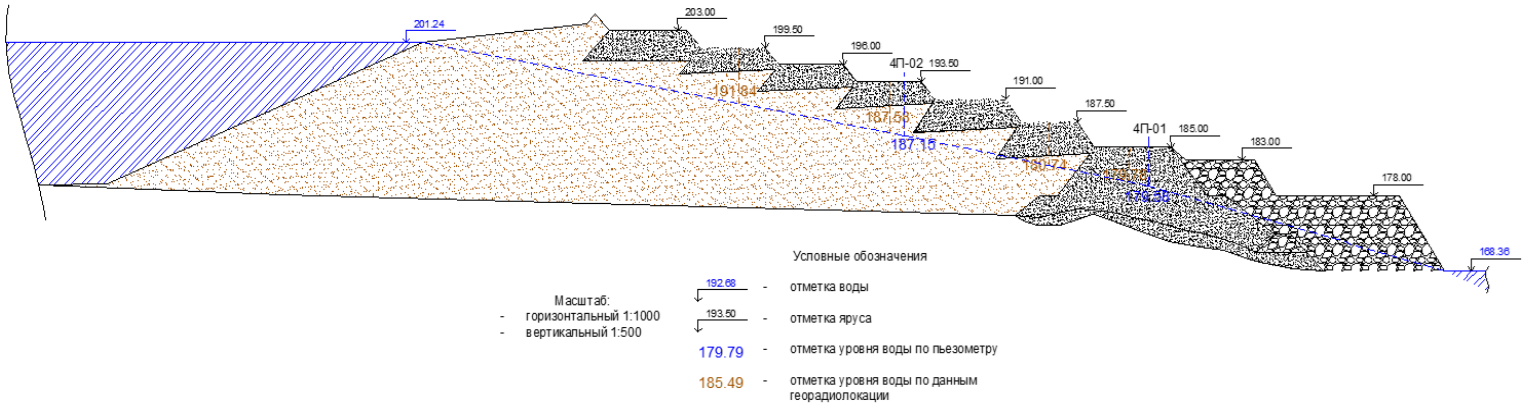


Рис. 3.39. Поперечный разрез по 4 створу (ПК-18+90) низовой дамбы с прорисованной депрессионной плоскостью по данным георадиолокации и данным гидрографических наблюдений

Таблица 3.7

Зоны неоднородности, выделенные на георадарных профилях

Горизонт	Интервалы по профилям с идентифицированными зонами неоднородности
+185,0	160–260, 480–510, 545–595
+193,5	785–855, 895–990, 1000–1090
+199,5	40–210, 270–400, 670–700, 885–915, 1165–1230, 1300–1350

3.2. Разделительная дамба хвостохранилища (на примере АНОФ-3 КФ АО «Апатит»)

3.2.1. Краткая характеристика

ГТС хвостохранилище АНОФ-3 АО «Апатит» введено в эксплуатацию в 1988 г. с целью захоронения хвостов флотации апатит-нефелиновых руд. Производительность ОФ — свыше 31 млн т по переработке руды и 9 млн т по выпуску концентрата в год. Проектный объем хвостохранилища — 720 млн м³. Площадь земельного отвода — 18 км². Тип размещения горных отходов — равнинный. Метод наращивания дамб — намывной: подпорные сооружения возводятся из складируемых хвостов в процессе их гидравлической укладки. Хвосты представлены мелким несвязным песком серого цвета с модулем крупности 1,1 ед. и значительным содержанием пылеватых фракций. Объемная плотность материала — 1,65 г/см³. Максимальная высота намывной дамбы — 56,4 м.

Контроль и надзор объекта регламентируется следующими федеральными законами и постановлениями правительства, отраслевыми нормами и правилами: ФЗ-117 [168], ГОСТ-55100 [169], СП-58.1333.2019 [48], СП-39.13330.2012 [167], РБ-078-12 [170] и др.

Первого августа 2014 г. ГТС внесено в Госреестр объектов размещения отходов (ОРО №51-00008-Х-00479-010814). Согласно ст. 7 ФЗ-117 комплекс относится к ГТС средней опасности. Хвосты обогащения отнесены к V классу опасности согласно протоколу испытаний лаборатории «ЦЛАТИ по Мурманской области» № 2273.БО.22 от 28.12.2022 г. Сооружение в соответствии с ФЗ-117 и ГОСТ-55100 подлежит обязательному декларированию безопасности. Заключение экспертной комиссии № 305 на декларацию безопасности выдано экспертной организацией ООО «ГТС Эксперт» (Санкт-Петербург) от 23.01.2023 г., согласно которой объект отнесен к I классу опасности. Уровень безопасности ГТС официально оценивается как нормальный (наивысший), т. е. соответствующий проекту, действующим нормам и правилам, значения критериев безопасности не превышают допустимых для работоспособности состояния сооружений и оснований, эксплуатация осуществляется без нарушений актов, норм и правил, а предписания органов госконтроля и надзора выполняются. Анализ негативного воздействия с учетом допустимого уровня риска аварий на сообщество и экосистему проведен в 2017 г. Вероятность возникновения техногенных аварий оценивается: наиболее вероятная — $8{,}73*10^{-6}$ и тяжелая — $3{,}46*10^{-8}$ 1/год. Ограждающие дамбы ГТС оснащены техническими средствами (стационарной наблюдательной сетью скважин и пьезометрами) в обеспечении постоянного контроля.

Географически объект расположен на Кольском полуострове в южной части Хибинского массива (географические координаты: 67°32'17.0"N, 33°35'40.0"E). Гидротехническое сооружение, представляющее собой хвостохранилище, огражденное капитальными дамбами, находится на территории АО «Апатит».

Гидрография представлена водоразделами верховий р. Жемчужной, р. Черной и руч. Безымянного, принадлежащим к водосборным площадям оз. Имандра и Умбозеро, и является зоной транзита и основной разгрузки подземных вод межгорных долин и впадин. В районе работ развиты порово-пластовые воды четвертичных отложений, трещинные воды верхней зоны трещиноватости кристаллических пород и трещинные воды, связанные с глубокими тектоническими разломами кристаллического фундамента. Наивысшие уровни на озерах и расходы на реках наблюдаются в весеннее половодье. Водные условия района характеризуются высокими показателями стока и неустойчивым, сезонно изменяющимся режимом поверхностных вод.

Рельеф местности можно охарактеризовать как природно-техногенный. Территория состоит из низовых откосов и ярусов (берм) пионерных дамб и дамб последующего обвалования, отсыпанных скальным и мореным грунтом и ограждающих массив хвостовых намывных отложений. Растительность характеризуется безлесьем. Имеется заболоченность. Максимальная глубина промерзания за многолетний период — 1,8 м.

3.2.2. Инженерные изыскания территории

Инженерно-геологические и гидрогеологические условия территории размещения ГТС отличаются высокой степенью изученности.

Инженерно-геологические изыскания

1978–1980 гг. Компанией «ЛенТИСИЗ» выполнены инженерно-геологические изыскания на этапе строительства обогатительной фабрики и площадки хвостохранилища АНОФ-3 АО «Апатит».

2002 г. Компанией АО «Ставрополь ТИСИЗ» выполнены инженерно-геологические изыскания на этапе реконструкции хвостохранилища АНОФ-3 АО «Апатит».

2003 г. Компанией АО «Мурманпромпроект» выполнены инженерно-геологические изыскания на этапе реконструкции хвостохранилища АНОФ-3 АО «Апатит».

2008 г. Компанией ЗАО «УССР» выполнены инженерно-геологические изыскания на этапе реконструкции хвостохранилища АНОФ-3 АО «Апатит».

2010–2011 гг. Компанией ООО «Русская Буровая Компания» выполнены инженерно-геологические изыскания на этапе реконструкции хвостохранилища АНОФ-3 АО «Апатит».

2015 г. Компанией ООО «Генератор» выполнены инженерно-геологические изыскания на этапе реконструкции хвостохранилища АНОФ-3 АО «Апатит» с целью разработки рабочей документации в рамках инвестиционного проекта «АНОФ-3. ФСПО. КФиС. Монтаж сушильных барабанов № 7 и № 8».

2017 г. Компанией ООО «Русская Буровая Компания» выполнены инженерно-геологические изыскания на этапе реконструкции хвостохранилища АНОФ-3 АО «Апатит» с целью реконструкция системы гидротранспорта и складирования отходов.

Гидрогеологические изыскания

1997–2000 гг. Компанией АО «Мурманская ГРЭ» выполнены работы по созданию наблюдательной сети мониторинга подземных вод.

2015–2017 гг. Компанией АО «Мурманская ГРЭ» выполнены работы по ведению мониторинга подземных и поверхностных вод.

За отчетный период выполнены комплексные инженерные изыскания по мониторингу и расчету безопасного режима эксплуатации разделительной дамбы хвостохранилища АНОФ-3 КФ АО «Апатит». Сбор исходных данных и аналитические исследования осуществлялись с 20 февраля 2022 г. по 15 декабря 2023 г. Полевые работы проводились с мая 2022 г. по ноябрь 2024 г. Камеральные работы производились с мая по декабрь 2024 г.

3.2.3. Параметры разделяющей дамбы

В 2019 г. компанией АО «Механобр-Инжиниринг» выполнено проектирование первичной разделительной дамбы ГТС хвостохранилища АНОФ-3 АО «Апатит» на основе отчетной документации о детальных инженерно-геологических изысканиях № 0082-17. ПД-ИГ ДИ. 11-20/04/2017 (ООО «РБК», 2017 г.).

Типовой план и разрез по профилю конструкции ПРД по состоянию на 2023 г. приведены на рис. 3.40.

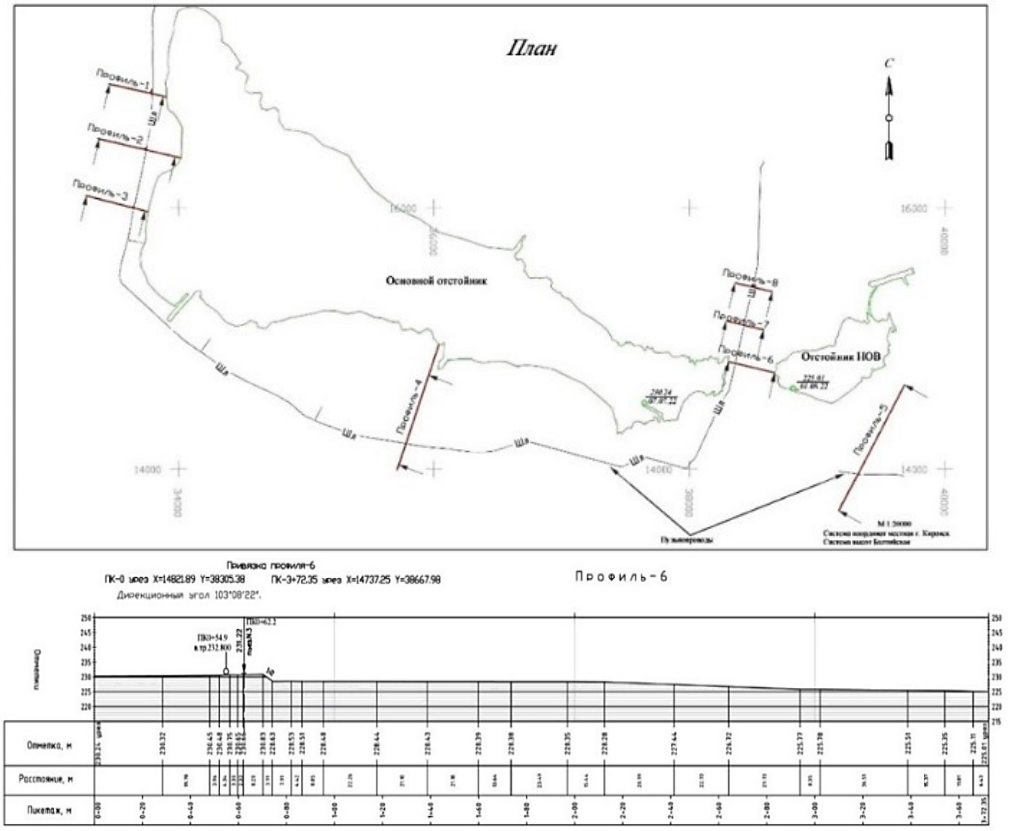


Рис. 3.40. Топографический план (М 1:20000) и разрез по профилю № 6 разделительной дамбы хвостохранилища АНОФ-3 АО «Апатит» по состоянию на 2023 г.

ПРД представляет собой инженерное сооружение неоднородной комбинированной конструкции, предназначенное для размещения распределительного пульповода и однопутевого транспортного автопроезда.

Технология строительства ПРД следующая.

1. ПРД. На начальном этапе с помощью строительных механизмов осуществлялась отсыпка с уплотнением скальных пород крупностью до 500 мм, затем производилась отсыпка переходного слоя из скальных пород крупностью 150–200 мм ($h_{сл.}$ = 0,5 м) до высотной отметки +230,8 м и последующая отсыпка выравнивающего слоя из щебня крупностью 20–40 мм до высотной отметки +231 м, а на завершающем этапе — отсыпка в виде мелкого рыхлого песка с фракцией зерен до 2 мм.

2. Последующие ярусы ПРД. Со стороны ПРД производился односторонний намыв в чашу хвостохранилища в виде мелкого рыхлого песка с фракцией зерен до 2 мм, из которого осуществлялось формирование новых ярусов. Проектная высота и ширина каждого яруса составляет 3 и 12 м соответственно. Намыв осуществлялся из распределительного пульповода ДУ 1220×12 мм с пульповыпусками ДУ 150 мм.

Реконструкция системы гидротранспорта и складирования хвостов условно делит ГТС на две карты разной площади: площади основного отстойника и отстойника НОВ хвостохранилища составляют 5,37 и 0,85 км² соответственно. Абсолютные высотные отметки земной поверхности на территории размещения ПРД и трассы пульпопровода составляют 225,0–260,0 м. Основные проектные параметры ПРД приведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8

Основные параметры разделительной дамбы хвостохранилища АНОФ-3 АО «Апатит»

Наименование	Значение
Тип конструкции ПРД	Намывной
Способ укладки техногенных грунтов	Двухэтапная укладка: отсыпка скальных пород и намыв мелкого песка с фракцией зерен до 2 мм
Абсолютные отметки поверхности территории ПРД и трассы пульпопровода	225,00–260,00 м
Протяженность ПРД (отм. ПК0÷ПК9+67,26)	967,26 м
Ширина ПРД по гребню	12 м
Высота ПРД	< 8 м
Углы откосов ПРД	1:1,5
Уклон автопроезда	20 ‰
Система гидротранспорта и укладки хвостов	Пульпонасосная станция с насосами ГрТ8000/71, магистральные и распределительные пульповоды
Диаметр пульповода (DN1200)	1200 мм
Шаг распределительного выпуска (DN150)	10 м
Расход пульпы	8200–9200 м³/ч
Консистенция Т:Ж (по весу)	1:7,6÷1:6,7
Сооружения по охране окружающей среды (на ГТС в целом)	Дренажные насосные станции ГрАТ 225/67 и 20А-18*1-1

На предприятии введена в эксплуатацию локальная система поверхностного водоотвода, частичного оборотного водоснабжения и гидромониторинга. На ГТС ведется регулярный гидрологический мониторинг за изменениями гидрохимического и гидродинамического режимов подземных и поверхностных вод в пределах земельных отводов. Система гидрологического мониторинга включает: стационарные режимные наблюдения, отбор проб подземных и поверхностных вод, а также лабораторный анализ.

Технические и эксплуатационные показатели ГТС за 2023 г. приведены в табл. 3.9 и 3.10.

Таблица 3.9

Данные по уровням воды в хвостохранилище АНОФ-3 АО «Апатит», отстойнике-прудке НОВ и по пьезометрам за 2023 г.

Месяц	Уровни воды на конец месяца		Дата замера	Створ 6, ПК-24'+90, ПЗ № 23	Створ 7, ПК-21'+90, ПЗ № 24	Створ 8, ПК-18'+80, ПЗ № 25
	прудок НОВ	основной пруд				
Январь	224,86	231,09	–	–	–	–
Февраль	224,74	231,07	–	–	–	–
Март	224,69	231,08	29.03.2023	227,99	229,05	230,00
Апрель	225,75	231,09	–	–	–	–
Май	224,92	231,69	–	–	–	–
Июнь	225,65	231,62	16.06.2023	228,15	229,43	230,21
Июль	224,59	231,68	–	–	–	–
Август	225,05	231,93	30.08.2023	228,24	229,08	229,81
Сентябрь	225,42	232,07	–	–	–	–
Октябрь	225,69	232,00	–	–	–	–
Ноябрь	224,91	232,01	–	–	–	–
Декабрь	–	–	04.12.2023	228,10	229,12	230,05

Таблица 3.10

Данные по объемам сбросов пульпы и промышленных вод в чашу хвостохранилища АНОФ-3 АО «Апатит» за 2023 г.

Месяц	Расход пульпы, поступающей в хвостохранилище		Сброс из хвостохранилища в авар. бассейн (дебалансные воды)		Дренажные стоки с промплощадки в прудок НОВ		Поступление воды в прудок НОВ (сифон, ВК-4 и фильтрация разделительной дамбы)	
	$м^3$/мес	$м^3$/ч	$м^3$/мес	$м^3$/ч	$м^3$/мес	$м^3$/ч	$м^3$/мес	$м^3$/ч
Январь	13443048	18069	3070062,0	4126,4	160889,5	268,2	10339192	13896,8
Февраль	11936636	17763	2483927,0	3696,3	141546,7	210,6	9127648	13582,8
Март	12681186	17045	2861785,0	3846,5	165846,5	222,9	9726214	13072,9
Апрель	12391296	17210	3040776,0	4223,3	166525,4	231,3	9570436	13292,3
Май	11613670	15610	3507044,9	4713,8	175235,5	235,5	8799732	11827,6
Июнь	12522000	17392	3670056,0	5097,3	159591,8	221,7	9749446	13540,9
Июль	12515309	16822	3532357,2	4747,8	167233,2	268,0	9398972	12633,0
Август	12391226	16655	2251004,6	3025,5	160759,4	216,1	9310023	12513,5
Сентябрь	13363905	18561	2773259,3	3851,7	165212,4	229,5	10367706	14399,6
Октябрь	13321382	17905	4230769,4	5686,5	162622,6	218,6	10188890	13694,7
Ноябрь	12685723	17619	2826980,2	3926,3	154774,1	215,0	9624860	13367,9
Декабрь	–	–	–	–	–	–	–	–
ВСЕГО	138865381	17332	34248021,6	4267,4	1780237,2	230,7	106203119	13256,5

Расчетные характеристики хвостохранилища АНОФ-3 АО «Апатит» приняты следующие:

- водосборная площадь территории составляет 14 250 тыс. $м^2$;
- водосборная площадь отстойника-пруда НОВ составляет 5 870 тыс. $м^2$.

3.2.4. Рекогносцировочное и визуальное обследования

На разделительной дамбе ГТС хвостохранилища выполнены регулярные рекогносцировочные и визуальные обследования. На основе этих обследований явных потенциально опасных фильтрационно-деформационных проявлений на поверхности разделительной дамбы не выявлено.

Ниже приведены наиболее характерные виды северной и южной сторон разделительной дамбы, а также процесс сброса вод, полученные с применением фотодокументирования (рис. 3.41–3.42).



а



б



в



г

Рис. 3.41. Северная сторона: *а* — май 2023 г.; *б* — июнь 2023 г.; *в* — сентябрь 2023 г.; *г* — ноябрь 2023 г.



а



б



в



г

Рис. 3.42. Южная сторона: *а* — май 2023 г.; *б* — июнь 2023 г. (нижний бьеф, сброс воды); *в* — сентябрь 2023 г.; *г* — ноябрь 2023 г.

3.2.5. Дистанционные исследования на основе анализа космоснимков

Дистанционными методами контроля хвостохранилища АНОФ-3 АО «Апатит» проведена оптико-электронная съемка с целью определения динамических изменений фактической площади водной поверхности в акватории чаши основного отстойника и отстойника НОВ, информация о которых необходима в задачах геотехнического сопровождения и численного 3D-моделирования разделительной дамбы ГТС. Обработанные космоснимки за период июнь – сентябрь месяцы представлены на рис. 3.43.

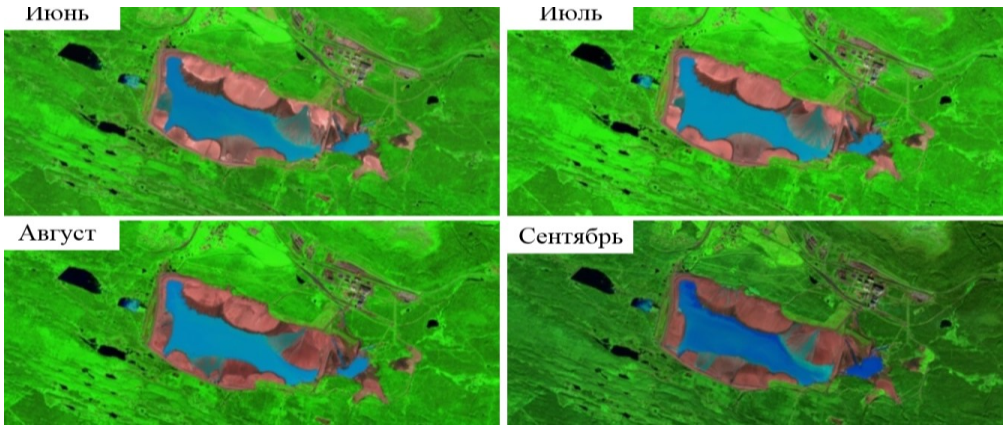


Рис. 3.43. Космоснимки хвостохранилища АНОФ-3 АО «Апатит» в 2023 г.

По результатам дистанционной оптико-электронной съемки в коротковолновом инфракрасном композитном диапазоне электромагнитного спектра (SWIR) поверхности акватории чаши основного отстойника и отстойника НОВ определено, что имелись явные признаки аккумуляции смешанных поверхностных вод в период май – октябрь. Максимальные значения площади водных акваторий наблюдались в июне (4,4 и 0,46 км²) и сентябре (4,6 и 0,55 км²). Воздействие внутренних вод на механическую устойчивость внутренней разделительной дамбы могло происходить в период апрель – ноябрь. В феврале – апреле внутренние воды в обоих отстойниках находились в смерзшем состоянии, что обусловлено зимним режимом эксплуатации ГТС.

Дополнительно проведена оптико-электронная съемка дистанционными методами хвостохранилища АНОФ-3 АО «Апатит» в осенне-зимний период с целью выявления степени и динамики водонасыщения намывных откосов и разделительной дамбы сооружения в обеспечении промышленной и экологической безопасности ГТС.

По результатам дистанционной оптико-электронной съемки в комбинированном ближнем инфракрасном (NIR) и коротковолновом инфракрасном (SWIR) диапазонах электромагнитного спектра установлены сезонные изменения состояния намывных откосов по степени водонасыщенности и выявлены локальные зоны повышенного стресса, склонные к развитию экзогенных процессов в виде пыления складируемых горных отходов. Сезонное обнажение намывных откосов происходило в период май – сентябрь. Интенсивное формирование крупных локальных зон повышенного стресса (не достаточно увлажненные зоны) наблюдалось в период июнь – сентябрь преимущественно в северо-восточном и южном секторе ГТС. Наиболее стрессовым (засушливым) являлся август месяц. Негативное влияние экзогенных процессов на близлежащие населенные пункты относилось к периоду июнь – август. Непосредственно степень водонасыщения внутренней разделительной дамбы ГТС имело средние значения по индексному показателю влажности NDMI и наблюдалось в период июнь – сентябрь. Наиболее стрессовыми (водообильными) оказались периоды апрель – май и октябрь – ноябрь. Обнаружены признаки водонасыщения нижней части откосов дамбы в указанные выше периоды времени. Результаты исследований также могут способствовать повышению эффективности

защитных мероприятий и рациональному использованию ресурсов в принятии управленческих решений на горном предприятии по борьбе с экзогенными процессами.

На основе данных дистанционного площадного мониторинга ГТС хвостохранилища АНОФ-3 АО «Апатит» на базе спутниковой системы ESA Sentinel-1 и 2 были сделаны следующие основные выводы:

- по результатам оптико-электронной съемки в коротковолновом инфракрасном композитном (SWIR) и комбинированном ближнем инфракрасном (NIR)/коротковолновом инфракрасном (SWIR) диапазонах электромагнитного спектра произведен сбор и обработка 102 и 53 космоснимков соответственно, на основе изучения которых установлена средняя степень водонасыщения поверхности внутренней разделительной дамбы ГТС в отдельные периоды времени. Локальных зон повышенной влажности на поверхности дамбы не выявлено, однако обнаружены признаки повышенного водонасыщения нижней части откосов сооружения;

- по результатам дистанционной радиолокационной съемки в радарном С-диапазоне (C-SAR) электромагнитного спектра произведен сбор и обработка 125 космоснимков, на основе анализа которых проведена оценка технического состояния (целостности конструкции) внутренней разделительной дамбы ГТС. Потенциально опасных зон механического разрушения дамбы в период эксплуатации не выявлено.

3.2.6. Георадарное обследование внутренней структуры и состояния разделительной дамбы

На разделительной дамбе хвостохранилища АНОФ-3 выполнено четыре цикла георадарных измерений с целью обследования внутренней структуры дамбы, выявления зон повышенной водонасыщенности грунтов и фильтрационных каналов. Первые три цикла были проведены в летний период по поверхности бермы +231 и +234 м, от ПК-27+50 до ПК-17. Четвертый цикл был проведен в зимний период и включал в себя георадарные обследования как по поверхностям берм +231, +234 м, так и на берме +237 м. Обследования выполнялись по длинной оси дамбы вдоль пульпопровода георадарными комплексами Ramac GPR/X3M с экранированным антенным блоком 100 МГц и «Лоза-1В» с неэкранированным антенным блоком 100 МГц. Всего выполнено 16 профилей общей протяженностью около 16800 м. Схема георадарного обследования разделительной дамбы представлена на рис. 3.44.

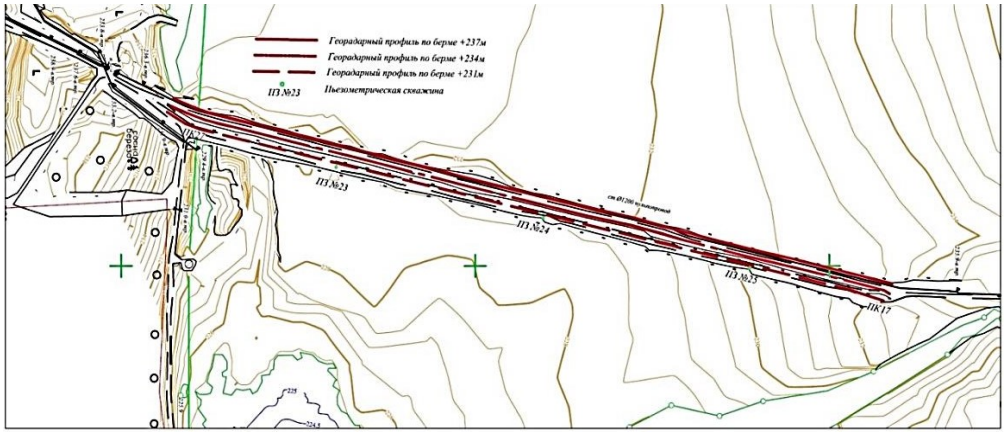


Рис. 3.44. Схема георадарного обследования разделительной дамбы

В специализированном программном обеспечении произведена камеральная обработка полученных данных, выполнена их интерпретация. На рис. 3.45–3.52 представлены радарограммы обследования бермы +231 м, на рис. 3.53–3.58 — радарограммы по берме +234 м, на рис. 3.59–3.60 — радарограммы по берме +237 м.

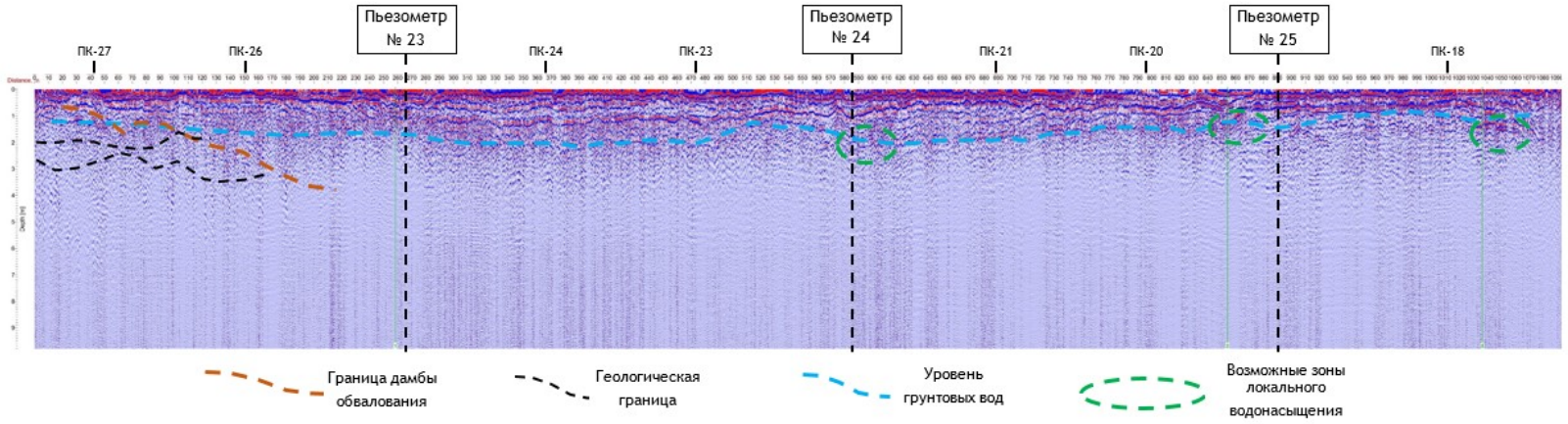


Рис. 3.45. Интерпретированная радарограмма по разделительной дамбе, берма +231 м (24.05.2023, экранированный антенный блок)

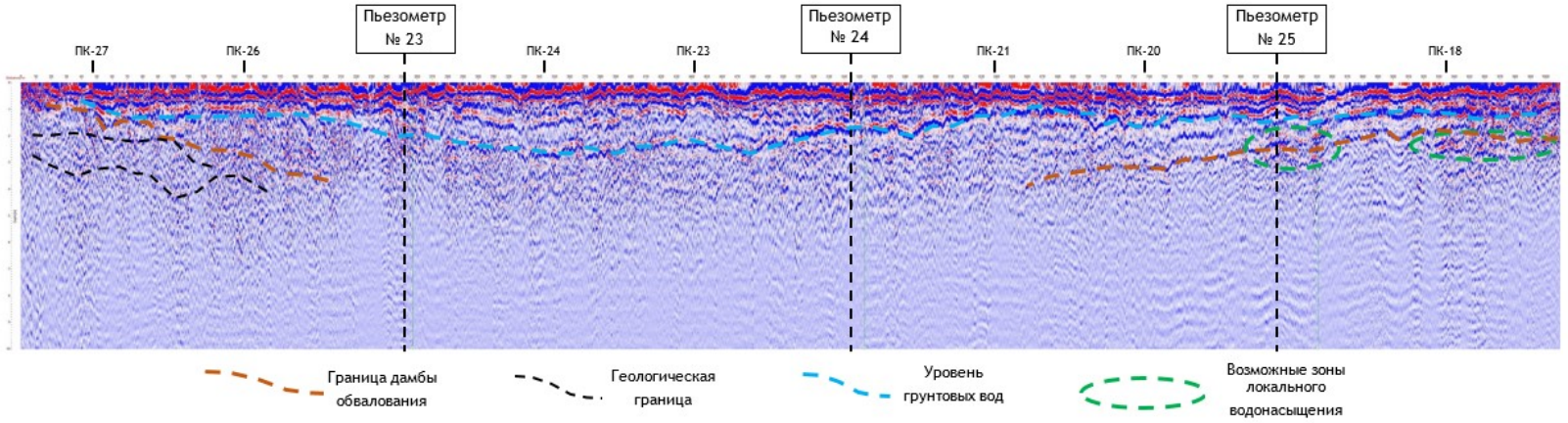


Рис. 3.46. Интерпретированная радарограмма по разделительной дамбе, берма +231 м (29.06.2023, экранированный антенный блок)

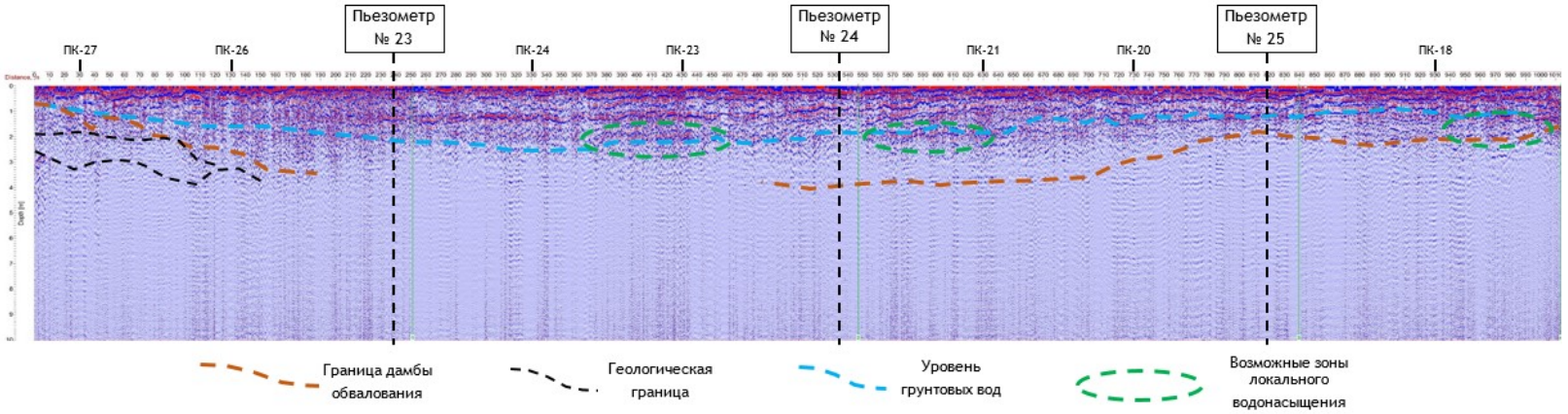


Рис. 3.47. Интерпретированная радарограмма по разделительной дамбе, берма +231 м (07.09.2023, экранированный антенный блок)

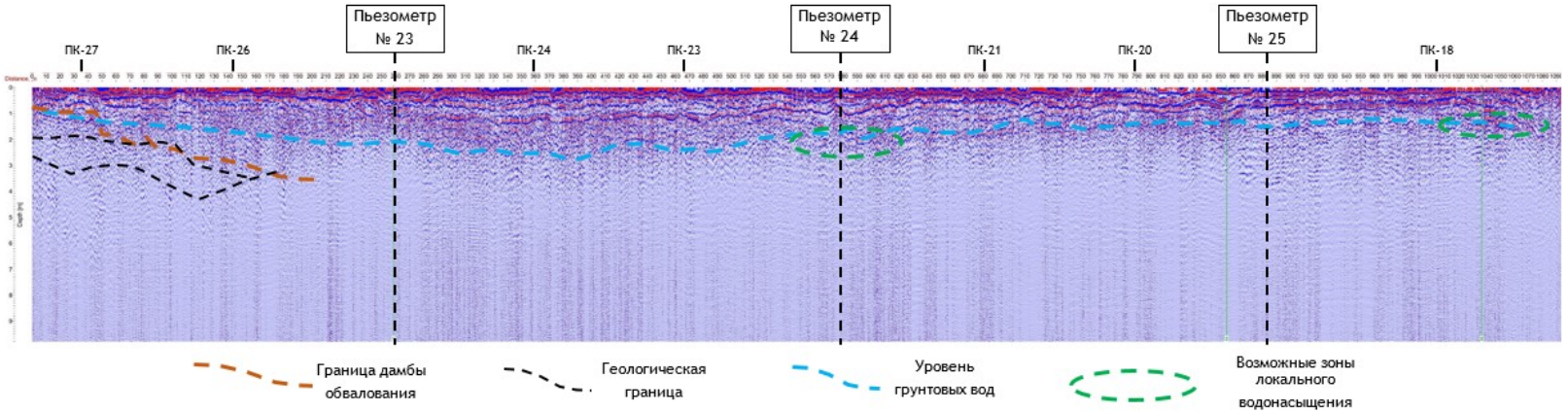


Рис. 3.48. Интерпретированная радарограмма по разделительной дамбе, берма +231 м (09.11.2023, экранированный антенный блок)

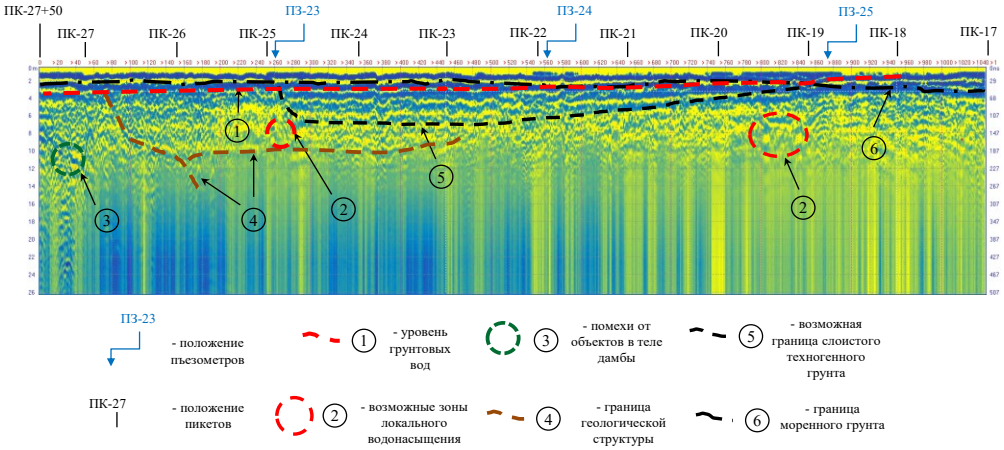


Рис. 3.49. Интерпретированная радарограмма по разделительной дамбе, берма +231 м (24.05.2023, неэкранированный антенный блок)

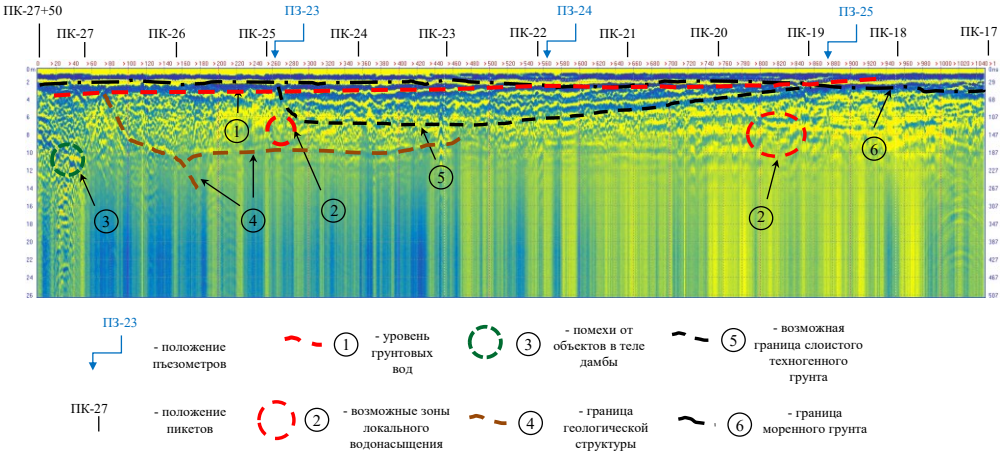


Рис. 3.50. Интерпретированная радарограмма по разделительной дамбе, берма +231 м (29.06.2023, неэкранированный антенный блок)

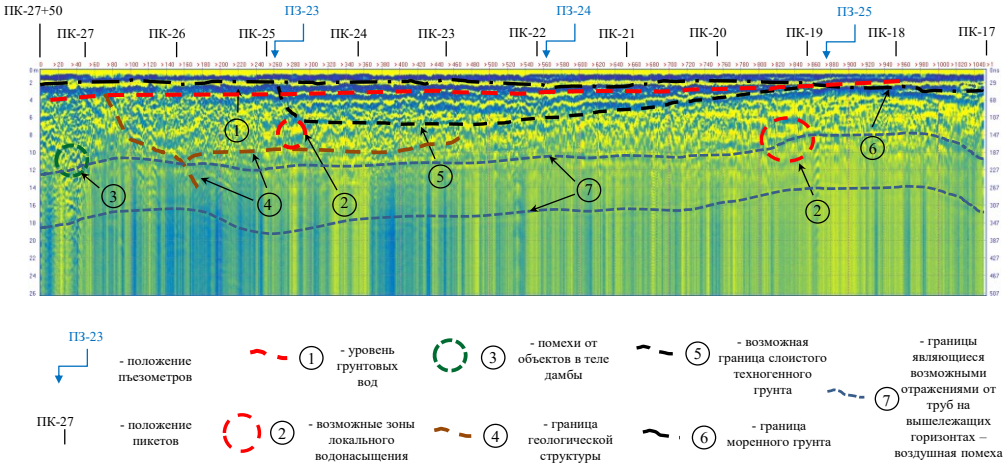


Рис. 3.51. Интерпретированная радарограмма по разделительной дамбе, берма +231 м (07.09.2023, неэкранированный антенный блок)

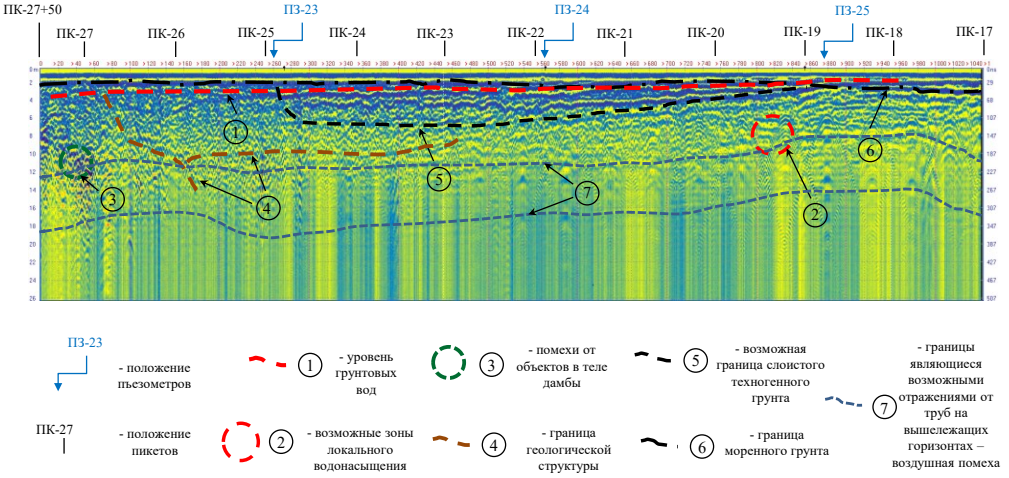


Рис. 3.52. Интерпретированная радарограмма по разделительной дамбе, берма +231 м (09.11.2023, неэкранированный антенный блок)

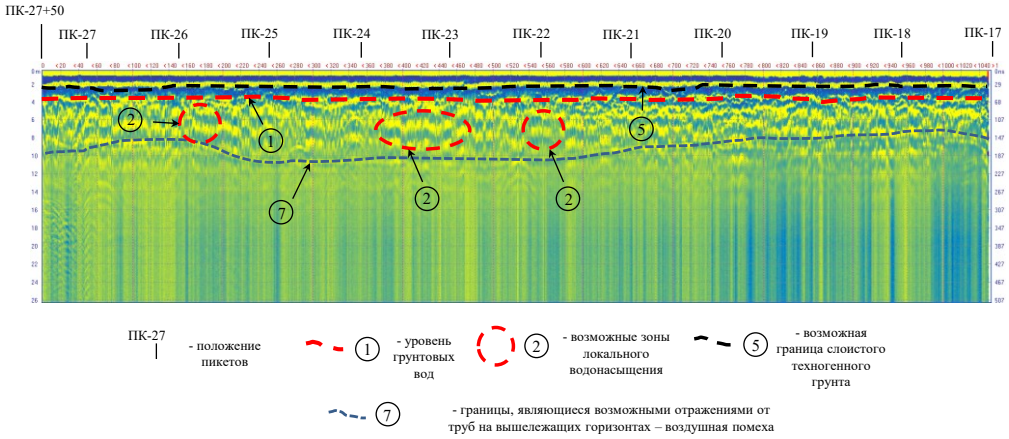


Рис. 3.53. Интерпретированная радарограмма по разделительной дамбе, берма +234 м (07.09.2023, неэкранированный антенный блок)

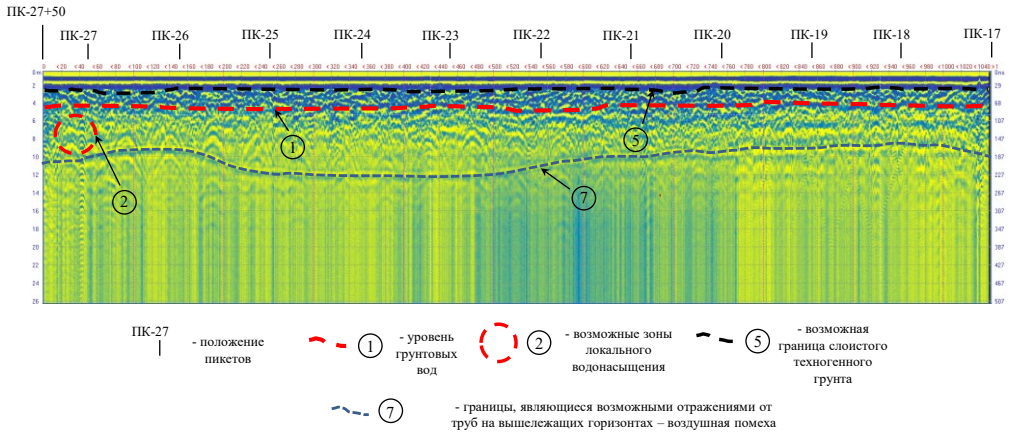


Рис. 3.54. Интерпретированная радарограмма по разделительной дамбе, берма +234 м (09.11.2023, неэкранированный антенный блок)

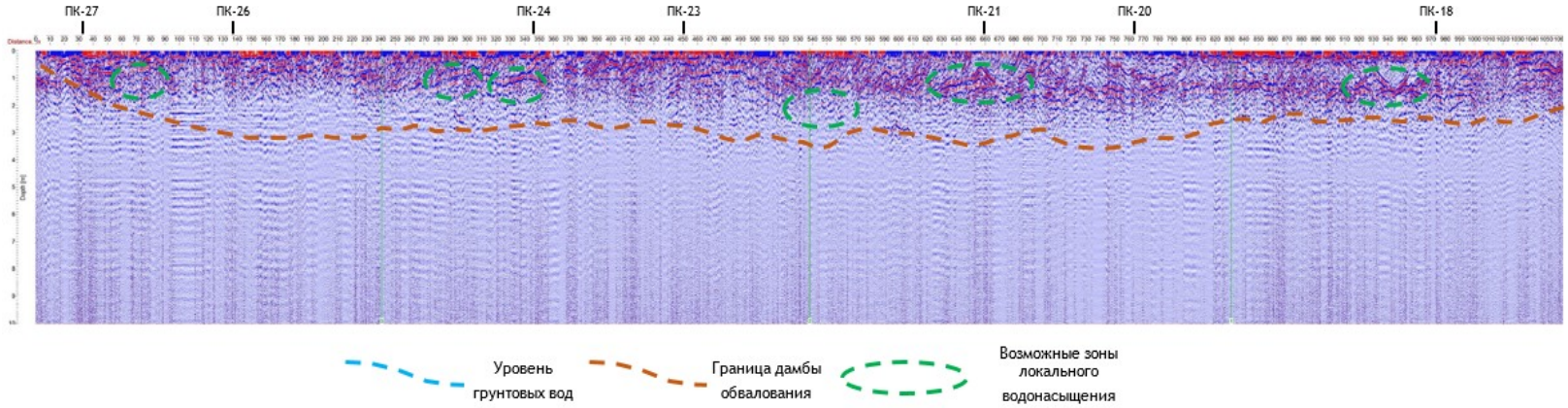


Рис. 3.55. Интерпретированная радарограмма по разделительной дамбе, берма +234 м (24.05.2023, экранированный антенный блок)

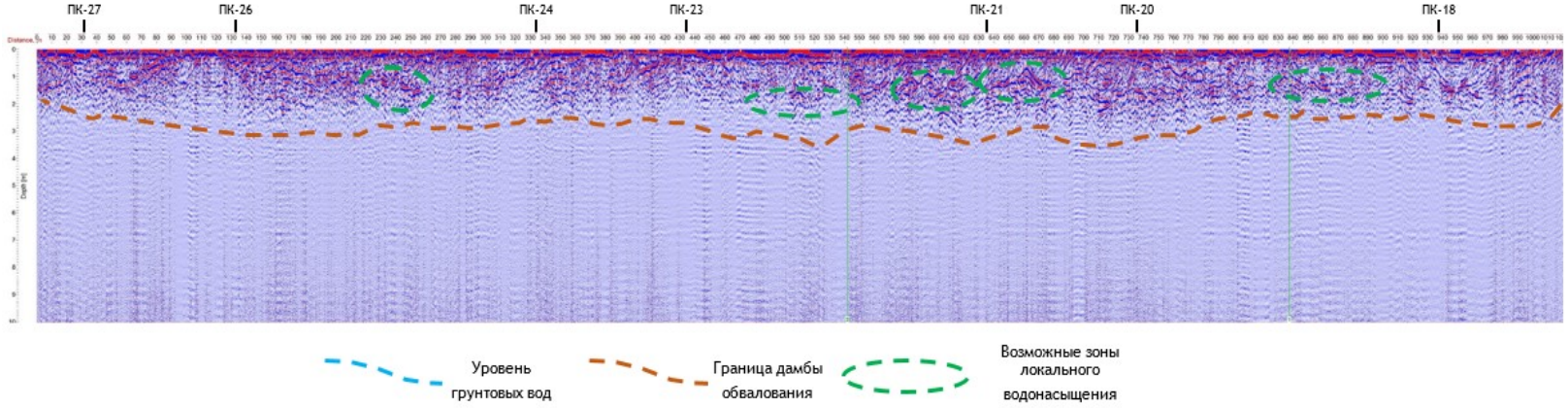


Рис. 3.56. Интерпретированная радарограмма по разделительной дамбе, берма +234 м (29.06.2023, экранированный антенный блок)

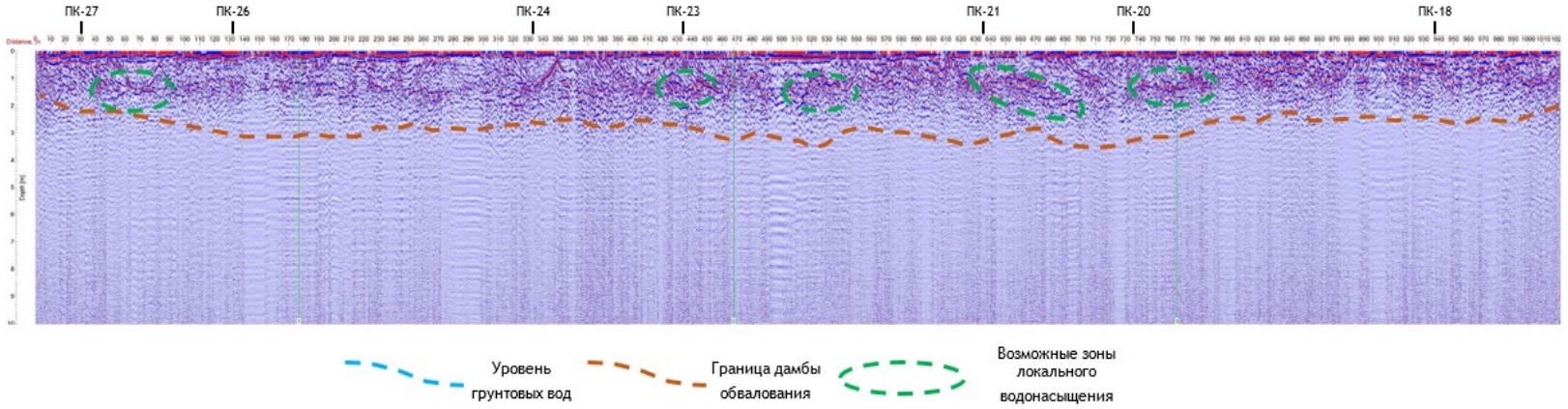


Рис. 3.57. Интерпретированная радарограмма по разделительной дамбе, берма +234 м (07.09.2023, экранированный антенный блок)

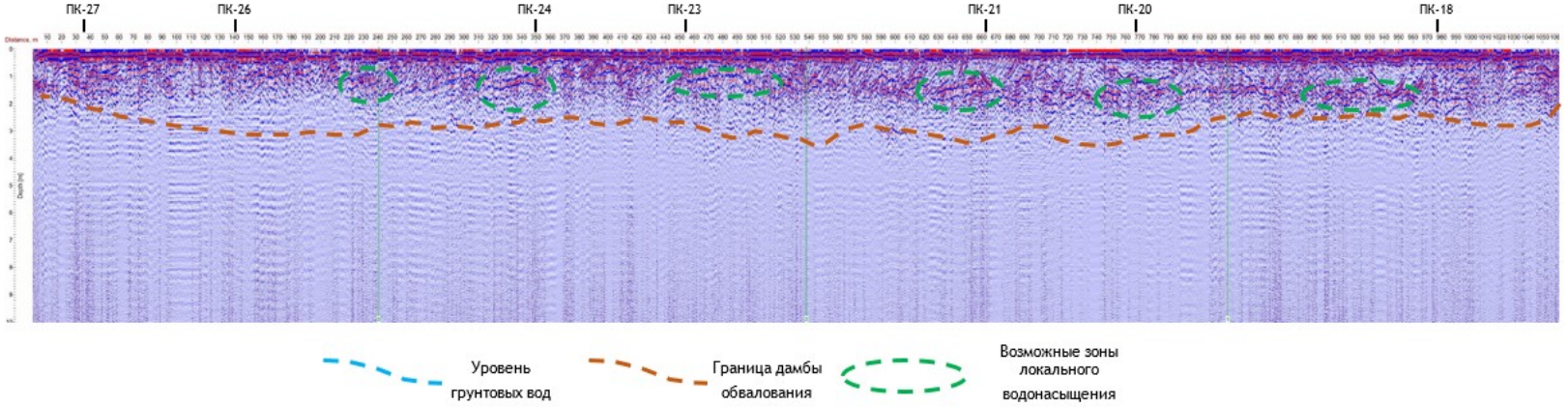


Рис. 3.58. Интерпретированная радарограмма по разделительной дамбе, берма +234 м (09.11.2023, экранированный антенный блок)

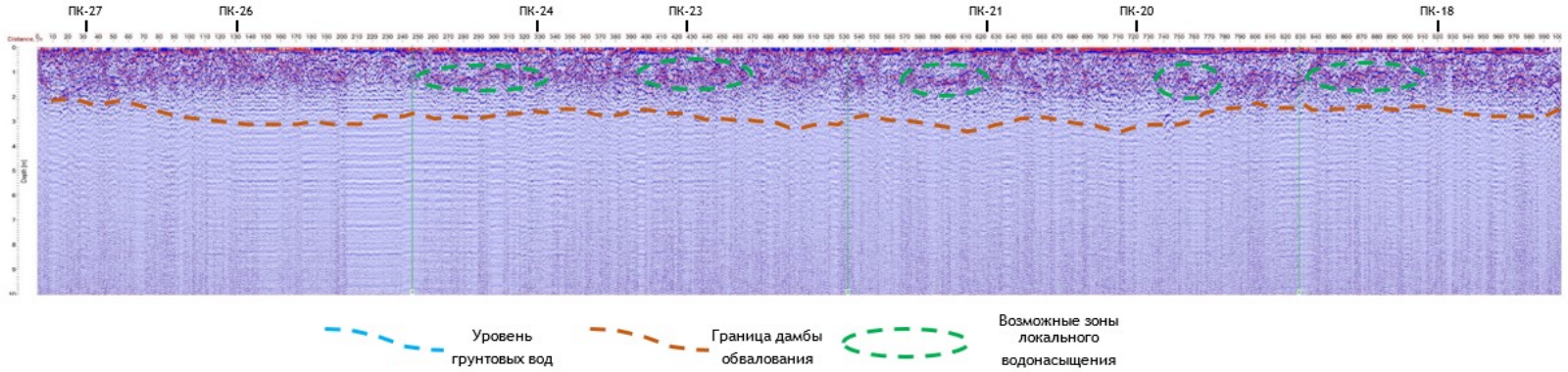


Рис. 3.59. Интерпретированная радарограмма по разделительно дамбе, берма +237 м (09.11.2023, экранированный антенный блок)

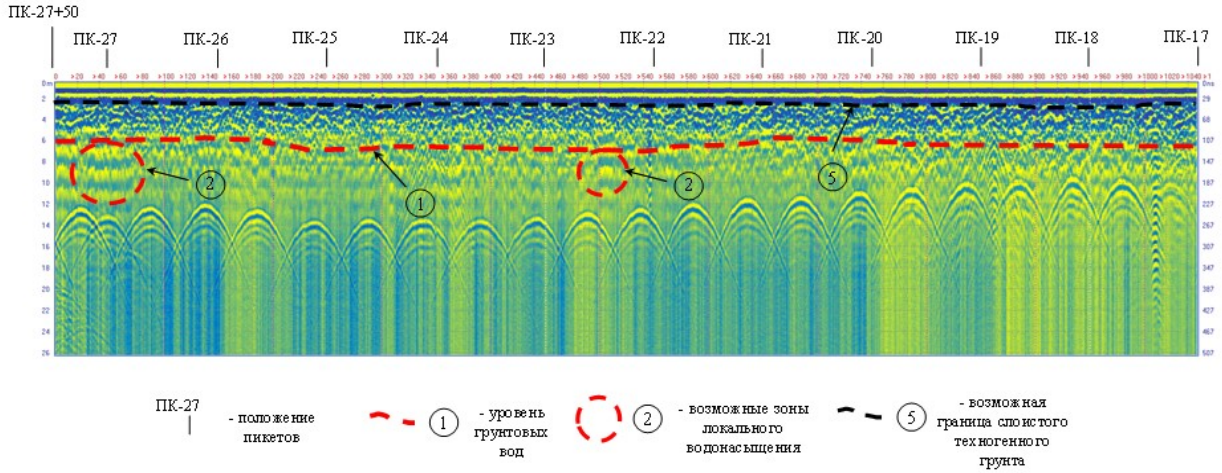


Рис. 3.60. Интерпретированная радарограмма по разделительной дамбе, берма +237 м (09.11.2023, неэкранированный антенный блок)

Рассматривая вопрос о возможных зонах водонасыщения или кривой депрессии грунтовых вод, необходимо отметить, что зона водонасыщенности пород воспринимается георадарным сигналом как переход в более высокую по диэлектрической проницаемости среду и отражается максимумом амплитуды сигнала [78, 171]. Однако границы зон водонасыщения не всегда являются резко выраженными, а плавно изменяются в зависимости от степени водонасыщения от естественного ненасыщенного водой состояния до определенного насыщения.

Берма +231 м. Первый цикл измерений 24.05.2023 (рис. 3.49). Уровень грунтовых вод (*1*) колеблется в интервале глубин от 3,8 м в начале профиля (метка ПК-27+50) до 1,4 м на метке ПК-18+10 и в окрестности пьезометров соответствует значениям измеренных показателей уровня воды в них. Приповерхностная зона до глубины 2 м представляет собой равномерную волновую картину, которая свидетельствует о наличии плотных грунтов без наличия каких-либо аномалий и представляет собой моренный грунт. На профиле выделяются две предположительные зоны (*2*) возможного водонасыщения 255–275 и 790–850 м, которые характеризуются наличием сильных низкочастотных помех, которые, как правило, напрямую связаны с водонасыщенностью вмещающих пород. В начале профиля ПК-27+25 на глубине 10 м выявлена контрастная локальная помеха (*3*), которая вызвана наличием трубы или металлическим мусором в теле дамбы. Выявлена возможная геологическая граница грунтов (*4*), отличающаяся по своим диэлектрическим свойствам. На протяжении всего профиля на глубине 2 м четко идентифицируется граница уплотненных грунтов, представляющих из себя моренные отложения (*6*). На интервале профиля 260–880 м выделяется область с типичным типом записи слоистых техногенных грунтов (*5*).

Второй цикл измерений 29.06.2023 (рис. 3.50). Уровень грунтовых вод (*1*) колеблется в интервале глубин от 3,9 м в начале профиля (метка ПК-27+50) до 1,5 м на метке ПК-18+10 и в окрестности пьезометров соответствует значениям измеренных показателей уровня воды в них. Приповерхностная зона до глубины 2 м представляет собой равномерную волновую картину, которая свидетельствует о наличии плотных грунтов без наличия каких-либо аномалий и представляет собой моренный грунт. На профиле выделяются две предположительные зоны (*2*) возможного водонасыщения 255–275 и 790–850 м, которые характеризуются наличием сильных низкочастотных помех, которые, как правило, напрямую связаны с водонасыщенностью вмещающих пород. В начале профиля ПК-27+25 на глубине 10 м выявлена контрастная локальная помеха (*3*), которая вызвана наличием трубы или металлическим мусором в теле дамбы. Выявлена возможная геологическая граница грунтов (*4*), отличающаяся по своим диэлектрическим свойствам. На протяжении всего профиля на глубине 2 м четко идентифицируется граница уплотненных грунтов, представляющих из себя моренные отложения (*6*). На интервале профиля 260–880 м выделяется область с типичной записью слоистых техногенных грунтов (*5*).

Третий цикл измерений 07.09.2023 (рис. 3.51). Уровень грунтовых вод (*1*) колеблется в интервале глубин от 4 м в начале профиля (метка ПК-27+50) до 1,9 м на метке ПК-18+10 и в окрестности пьезометров соответствует значениям измереных показателей уровня воды в них. Приповерхностная зона до глубины 2 м представляет собой равномерную волновую картину, которая свидетельствует о наличии плотных грунтов без наличия каких-либо аномалий и представляет собой моренный грунт. На профиле выделяются две предположительные зоны (*2*) возможного водонасыщения 260–285 и 800–850 м, которые характеризуются наличием сильных низкочастотных помех, которые, как правило, напрямую связаны с водонасыщенностью вмещающих пород. В начале профиля ПК-27+25 на глубине 10 м выявлена контрастная локальная помеха (*3*), которая вызвана наличием трубы или металлическим мусором в теле дамбы. Выявлена возможная геологическая граница грунтов (*4*), отличающаяся по своим

диэлектрическим свойствам. На протяжении всего профиля на глубине 2 м четко идентифицируется граница уплотненных грунтов, представляющих из себя моренные отложения (*6*). На интервале профиля 260–880 м выделяется область с типичной записью слоистых техногенных грунтов (*5*). На данном цикле измерений прослеживаются две практически параллельные границы (7), которые, вероятней всего, связаны с возможными отражениями от труб на вышележащих горизонтах и интерпретируются как воздушная помеха.

Четвертый цикл измерений 09.11.2023 (рис. 3.52). Уровень грунтовых вод (*1*) колеблется в интервале глубин от 3,9 м в начале профиля (метка ПК-27+50) до 1,8 м на метке ПК-18+10 и в окрестности пьезометров соответствует значениям измереных показателей уровня воды в них. Приповерхностная зона до глубины 2 м представляет собой равномерную волновую картину, которая свидетельствует о наличии плотных грунтов без наличия каких-либо аномалий и представляет собой моренный грунт. На профиле выделяется зона (*2*) возможного водонасыщения 800–840 м, которая характеризуются наличием сильных низкочастотных помех, которые, как правило, напрямую связаны с водонасыщенностью вмещающих пород. В начале профиля ПК-27+25 на глубине 10 м выявлена контрастная локальная помеха (*3*), которая вызвана наличием трубы или металлическим мусором в теле дамбы. Выявлена возможная геологическая граница грунтов (*4*), отличающаяся по своим диэлектрическим свойствам. На протяжении всего профиля на глубине 2 м четко идентифицируется граница уплотненных грунтов, представляющих из себя моренные отложения (*6*). На интервале профиля 260–880 м выделяется область с типичной записью слоистых техногенных грунтов (*5*). На данном цикле измерений прослеживаются две практически параллельные границы (*7*), которые, вероятней, всего связаны с возможными отражениями от труб на вышележащих горизонтах и интерпретируются как воздушная помеха.

Берма +234 м. Третий цикл измерений 07.09.2023 (рис. 3.53). Уровень грунтовых вод (*1*) колеблется в интервале от 3,9–4,1 м по всей длине профиля. Уровень грунтовых вод определен по косвенным признакам и не определяется контрастной границей на волновом поле. Приповерхностная зона до глубины 2 м представляет собой равномерную волновую картину, которая свидетельствует о наличии плотных грунтов без наличия каких-либо аномалий и представляет собой слоистый техногенный грунт (*5*). На профиле выделяются три зоны (*2*) возможного водонасыщения 155–190, 370–470 и 535–575 м, которые характеризуются наличием сильных низкочастотных помех, которые, как правило, напрямую связаны с водонасыщенностью вмещающих пород. В интервале глубины 8–11 м по всей длине профиля прослеживается четкая граница (*7*), которая, вероятней всего, связана с возможным отражением от труб на вышележащем горизонте и интерпретируется как воздушная помеха.

Четвертый цикл измерений 09.11.2023 (рис. 3.54). Уровень грунтовых вод (*1*) колеблется в интервале от 4,1 м в начале профиля ПК-27+50 до 4 м на отметке ПК-17. Уровень грунтовых вод определен по косвенным признакам и не определяется контрастной границей на волновом поле. Приповерхностная зона до глубины 2 м представляет собой равномерную волновую картину, которая свидетельствует о наличии плотных грунтов без наличия каких-либо аномалий и представляет собой слоистый техногенный грунт (*5*). На профиле выделяется зона (*2*) возможного водонасыщения 15–60 м, которая характеризуются наличием сильных низкочастотных помех, которые, как правило, напрямую связаны с водонасыщенностью вмещающих пород. В интервале глубины 9–11 м по всей длине профиля прослеживается четкая

граница (*7*), которая, вероятней всего, связана с возможным отражением от труб на вышележащем горизонте и интерпретируется как воздушная помеха.

Берма +237 м. Четвертый цикл измерений 09.11.2023 (рис. 3.60). Уровень грунтовых вод (*1*) колеблется в окрестности 6 м по всей длине профиля, его интерпретация выполнена по косвенным признакам и не определяется контрастной границей на волновом поле. Приповерхностная зона до глубины 2 м представляет собой равномерную волновую картину, которая свидетельствует о наличии плотных грунтов без наличия каких-либо аномалий и представляет собой слоистый техногенный грунт (*5*). На профиле выделяются две зоны (*2*) возможного водонасыщения 20–75 и 480–525 м, которые характеризуются наличием сильных низкочастотных помех, которые, как правило, напрямую связаны с водонасыщенностью вмещающих пород. По всей длине профиля, в интервале глубин 10–14 м, фиксируется большое количество гиперболических отражений, которые являются воздушной помехой от установленных столбов освещения.

3.2.7. Компьютерное гидрогеомеханическое 3D-моделирование состояния разделительной дамбы

Построение компьютерной гидрогеомеханической 3D-модели разделительной дамбы было выполнено на основе данных натурных исследований в 2024 г.: рекогносцировочное и визуальное обследования, фотофиксация, георадарные обследования, аэрофотосъемка, а также по фактическим геометрическим данным дамбы, уровням воды в прудке-отстойнике и в имеющихся пьезометрах и длине намывного пляжа.

В качестве исходных данных также были использованы предоставленные заказчиком проектные материалы, результаты инженерно-геологических изысканий на разделительной дамбе.

Принятые для создания модели геометрические размеры показаны на рис. 3.61. Модель включает фрагмент хвостохранилища с геологическим основанием общими размерами: длина — 967 м, ширина — 600 м, высота — 65 м. Размеры разделительной дамбы: длина — 967 м, максимальная ширина — 70 м, максимальная высота — 15 м. Абсолютные отметки: гребень разделительной дамбы — +240 м, пляж низового склона — +229 м, пляж верхового склона: от +236 до +231 м, уреза воды в отстойнике — +233 м.

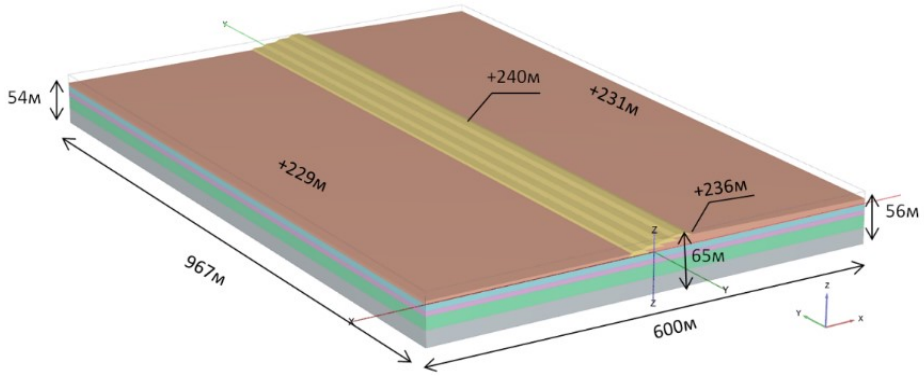


Рис. 3.61. Геометрическая 3D-модель разделительной дамбы и подстилающего геологического основания

Создание модели включало в себя построение стратиграфического разреза по данным имеющихся геологических колонок (рис. 3.62).

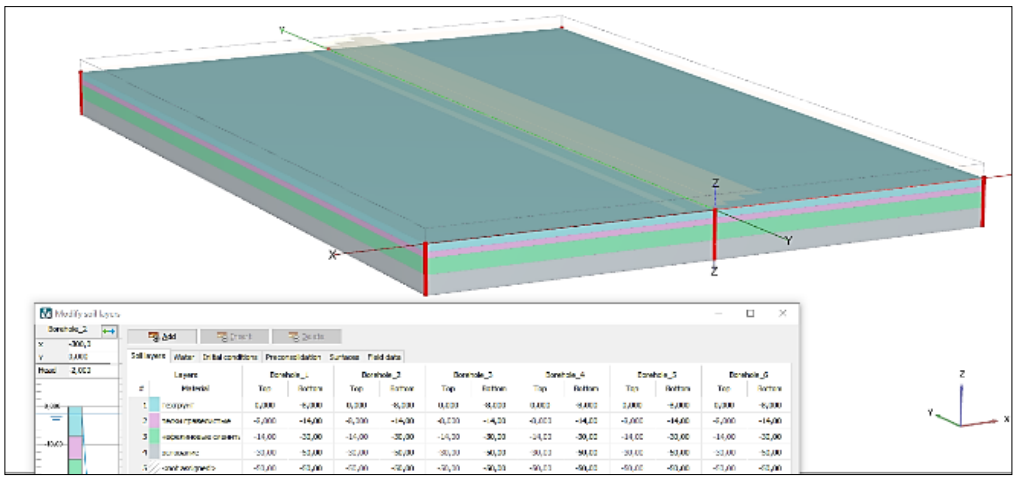


Рис. 3.62. Построение стратиграфического разреза по данным геологических колонок

Далее, с учетом геологического строения исследуемого участка, была построена компьютерная 3D-модель в ПО Plaxis 3D (рис. 2.63, 2.64).

Для проведения расчетов методом конечных элементов созданная геометрическая модель была разбита на отдельные элементы. Программа Plaxis 3D позволяет учитывать напластование грунта, а также все конструктивные объекты, нагрузки и граничные условия.

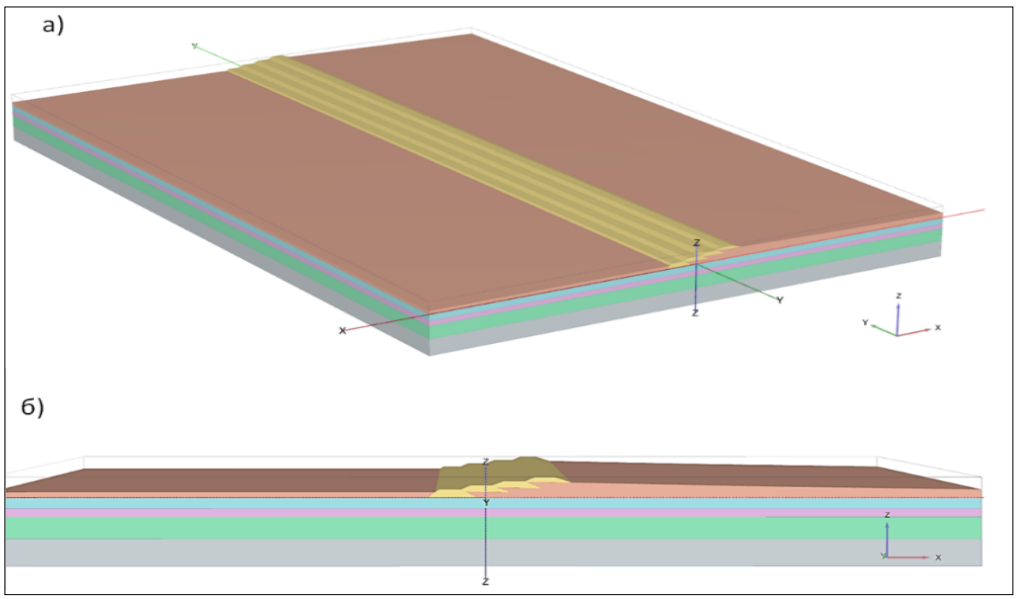


Рис. 3.63. Компьютерная 3D-модель разделительной дамбы и подстилающего геологического основания: *а* — общий вид (изометрия); *б* — разрез по створу 7-7

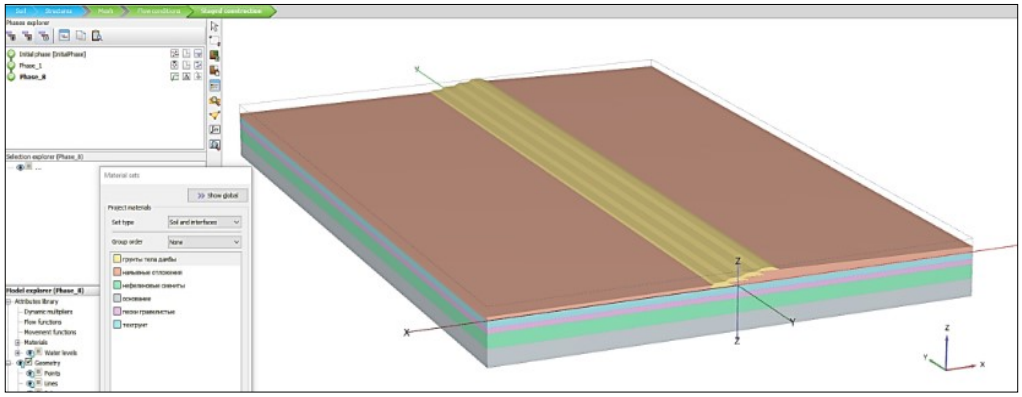


Рис. 3.64. Компьютерная 3D-модель разделительной дамбы и подстилающего геологического основания с указанием категорий грунтов и пород

Следует отметить, что для данной модели использовалось два режима разбивки сетки конечных элементов Fine (Мелкая) и Veryfine (Очень мелкая). Режим Veryfine был применен для локального измельчения непосредственно для тела самой дамбы, где можно было ожидать высокую концентрацию напряжений или значительные градиенты деформации, в остальных местах геометрической модели был применен режим Fine (рис. 3.65).

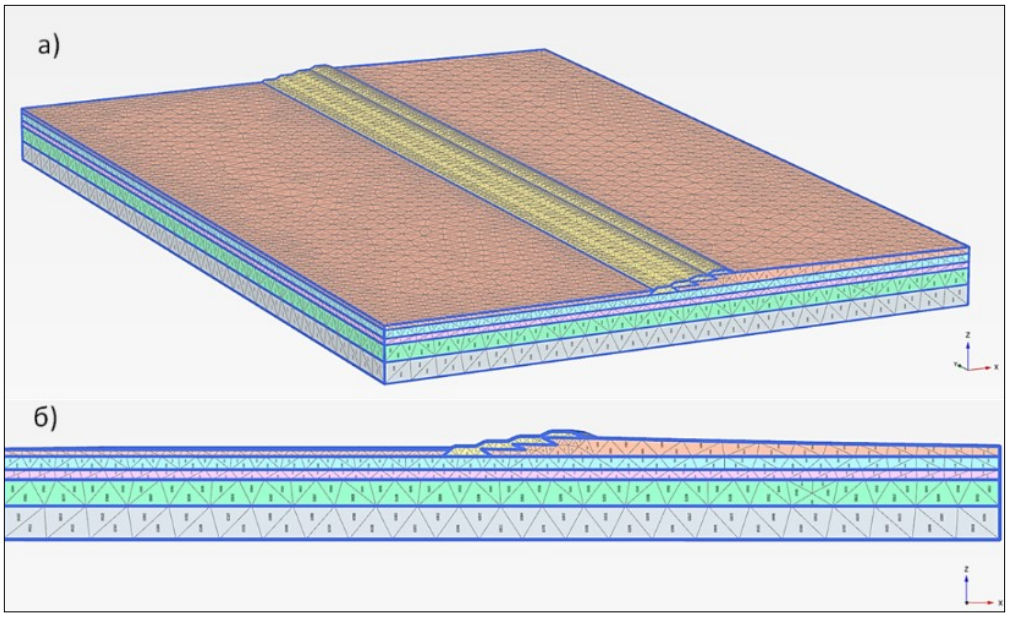


Рис. 3.65. Компьютерная расчетная схема «разделительная дамба – геологическое основание»: *а* — общий вид (изометрия); *б* — разрез по пьезометрическому створу 7-7

Основные параметры трехмерной сетки конечных элементов приведены на рис. 3.66, где указано количество элементов — 65140, количество узлов — 98359, средний размер элементов — 15,26 м, а также их максимальные — 41,56 м и минимальные — 1,118 м размеры.

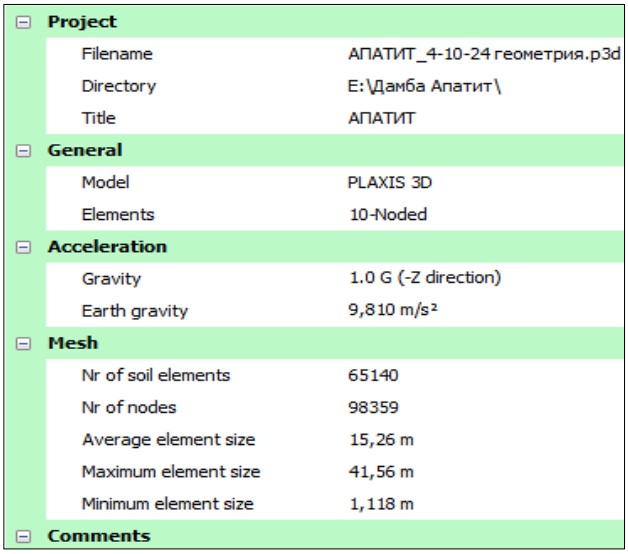


Рис. 3.66. Характеристика сетки конечных элементов разработанной модели

Исследование модели предусматривает два вида задания граничных условий (нагружения): гравитационное — учет веса грунта и пород, без воды и совместное деформационно-фильтрационное — учет веса грунтов и пород и гидравлические условия.

На актуализированной геометрической 3D-модели были выделены основные слои слагающих грунтов и пород (рис. 3.64), для которых задавались параметры физико-механических свойств (табл. 3.11).

Таблица 3.11

Параметры физико-механических характеристик намывных отложений, грунтов дамбы и подстилающих пород геологического основания, принятые для расчетов

Параметры	Грунты тела дамбы (насыпной грунт)	Техно-генные грунты	Намывные отложения	Пески гравелис-тые	Нефелиновые сиениты (скальные)	Основание (коренные породы)
Тип поведения	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained
γ_{unsat} (уд. вес грунта), kN/m³	23,2	18,2	18,0	21,7	26,7	27,7
γ_{sat} (уд. вес насыщ. грунта), kN/m³	25,0	19,8	19,0	24,11	27,2	28,2
k_x (коэф. фильтрации), m/day	0,05	0,25	0,25	3,7	0,5	0,05
k_y (коэф. фильтрации), m/day	0,05	0,25	0,25	3,7	0,5	0,05
k_z (коэф. фильтрации), m/day	0,05	0,25	0,25	3,7	0,5	0,05
E (модуль деформ.), kN/m²	42 300	7700	7700	57 100	50 000	100 000
ν (коэф. Пуассона)	0,3	0,33	0,33	0,3	0,25	0,22
c_{ref} (сцепление), kN/m²	2,0	2,0	2,0	5	5	5
φ (угол внутр. трения), °	36	29	30	37	30	35
ψ (угол дилатансии), °	6	0	0	7	0	5

Для генерации порового давления в слоях грунта и внешнего давления воды были заданы гидравлические условия [172–175]. Для этого был создан

уровень воды (на основе данных гидрогеологической службы комбината) и присвоены гидравлические условия объёмным кластерам грунтов и пород (рис. 3.67).

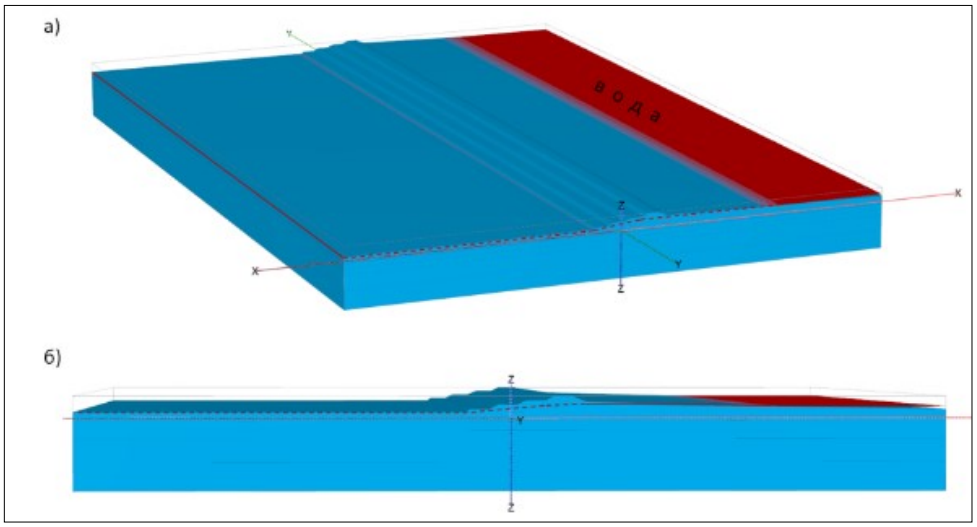


Рис. 3.67. Смоделированный уровень воды в актуализированной компьютерной 3D-модели при отметке уреза воды в прудке +232,9 м: *а* — общий вид; *б* — поперечный разрез по пьезометрическому створу 7-7

Результаты выполненного компьютерного гидрогеомеханического 3D-моделирования разделительной дамбы и фрагмента хвостохранилища в виде цветовых картин при гравитационном нагружении приведены на рис. 3.68–3.72.

Далее приведены результаты моделирования в виде картин перемещений грунтов и значений гидравлических показателей при отметке уровня воды в отстойнике +233 м (рис. 3.73–3.81).

Далее для определения значений показателя надежности дамбы $K_{\text{над.}}$ применен расчет Safety (безопасность, надежность, устойчивость, несущая способность). Для вычисления этого показателя использован метод phi-reduction (снижение параметров прочности грунта) — прочностные характеристики грунта tan φ и c последовательно уменьшаются до тех пор, пока не происходит разрушение сооружения.

Интегральное соотношение $\sum Msf$ используется для определения значений показателя надежности грунтового сооружения на текущем этапе расчета (формула (3.3), раздела 3.1.5).

Для определения значения показателя надежности сооружения (или его элемента) должно быть выполнено условие формулы (3.4) раздела 3.1.5.

Чем больше значение $\sum Msf$ как расчетного показателя надежности, тем меньше вероятность механического разрушения и потери фильтрационной устойчивости грунтового сооружения.

Во время расчета показателя надежности генерируются дополнительные перемещения. Полные перемещения не имеют физического смысла, однако приращения перемещений, полученные на последнем шаге (при наступлении разрушения), позволяют судить о возможном механизме разрушения.

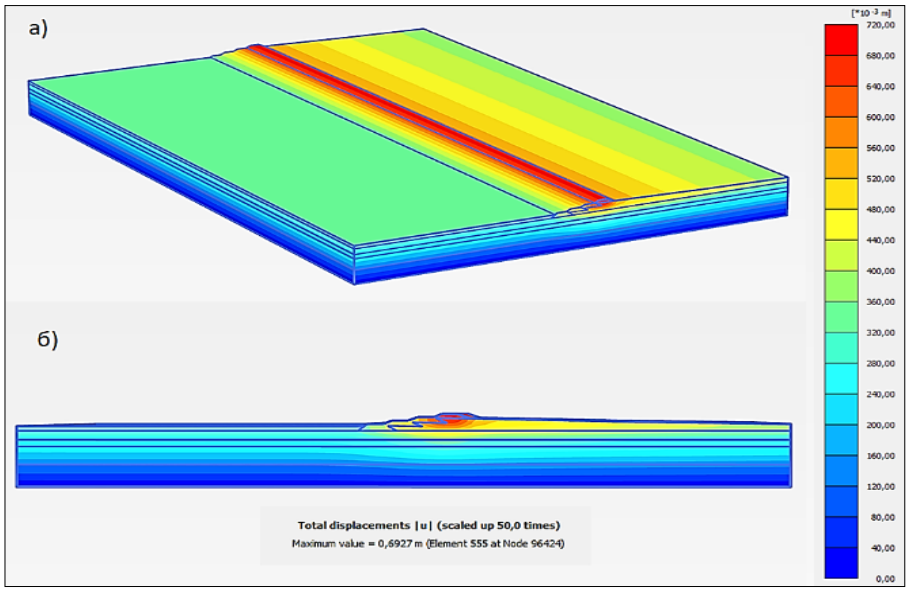


Рис. 3.68. Картины распределения общих перемещений $U_{общ.}$ грунтов дамбы, намывных отложений и подстилающего основания при исходных геомеханических условиях (гравитационное нагружение): *а* — общий вид; *б* — поперечный разрез по пьезометрическому створу 7-7

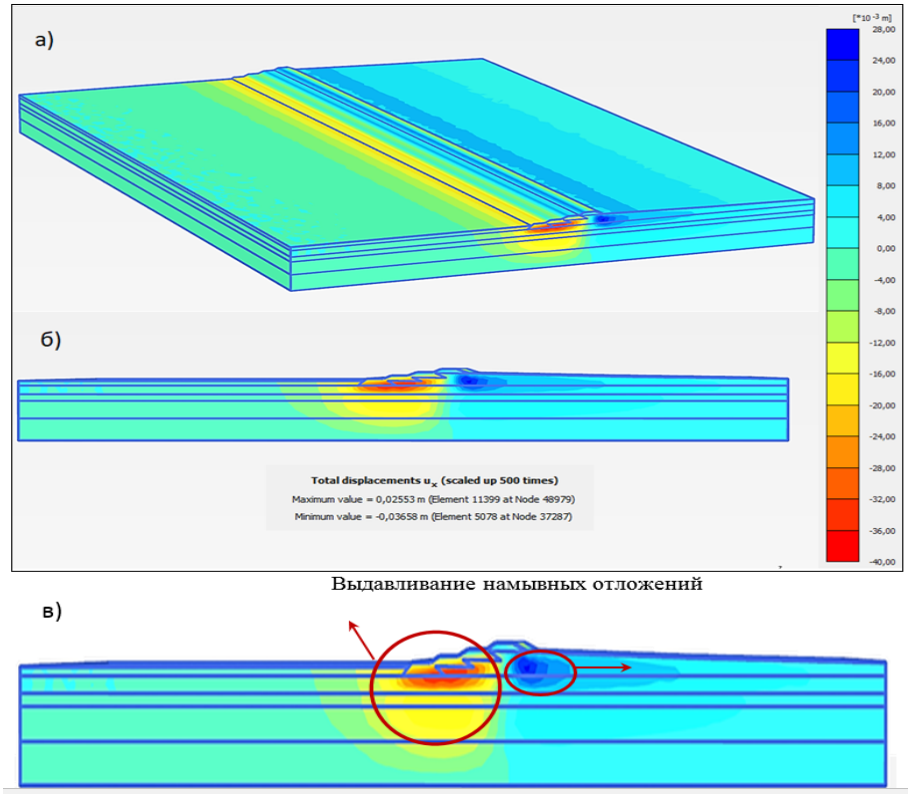


Рис. 3.69. Картины распределения субгоризонтальных перемещений U_x грунтов дамбы, намывных отложений и подстилающего основания при исходных геомеханических условиях (гравитационное нагружение): *а* — общий вид; *б* — поперечный разрез по пьезометрическому створу 7-7; *в* — локализация зон выдавливания намывных отложений

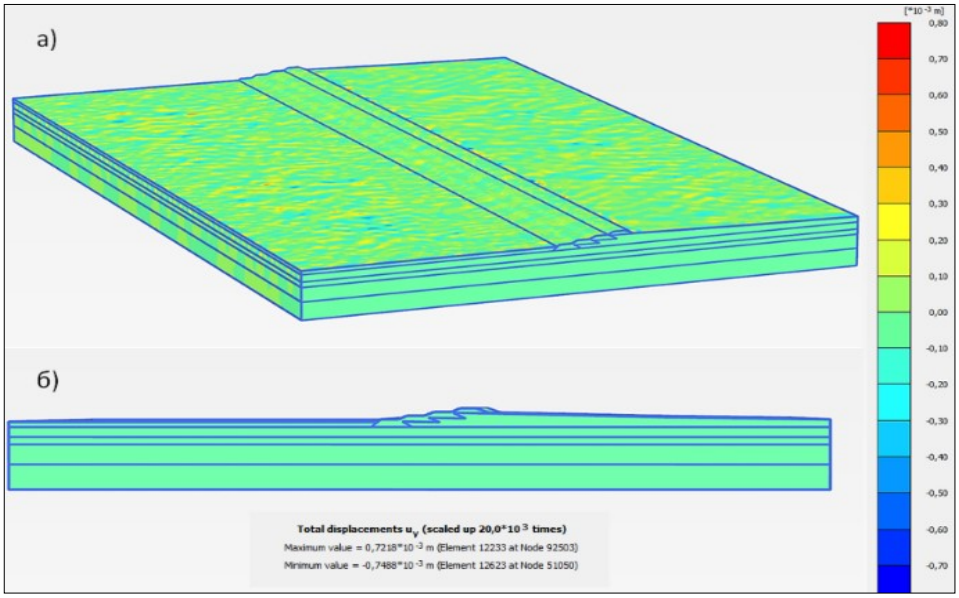


Рис. 3.70. Картины распределения субгоризонтальных U_y перемещений грунтов дамбы, намывных отложений и подстилающего основания при исходных геомеханических условиях (гравитационное нагружение): *а* — общий вид; *б* — поперечный разрез по пьезометрическому створу 7-7

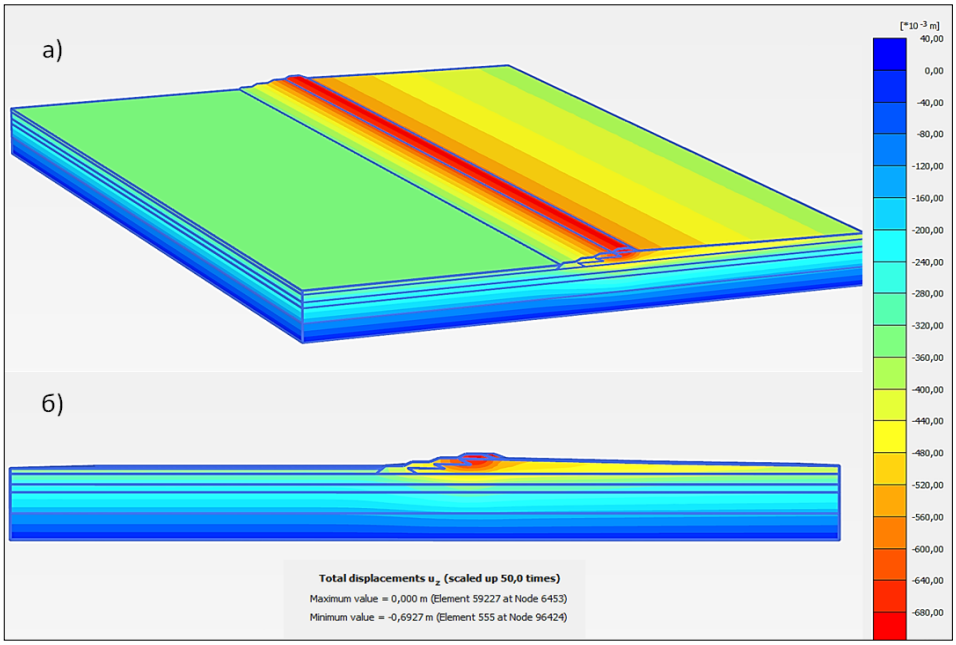


Рис. 3.71. Картины распределения вертикальных U_z перемещений грунтов дамбы намывных отложений и подстилающего основания при исходных геомеханических условиях (гравитационное нагружение): *а* — общий вид; *б* — поперечный разрез по пьезометрическому створу 7-7

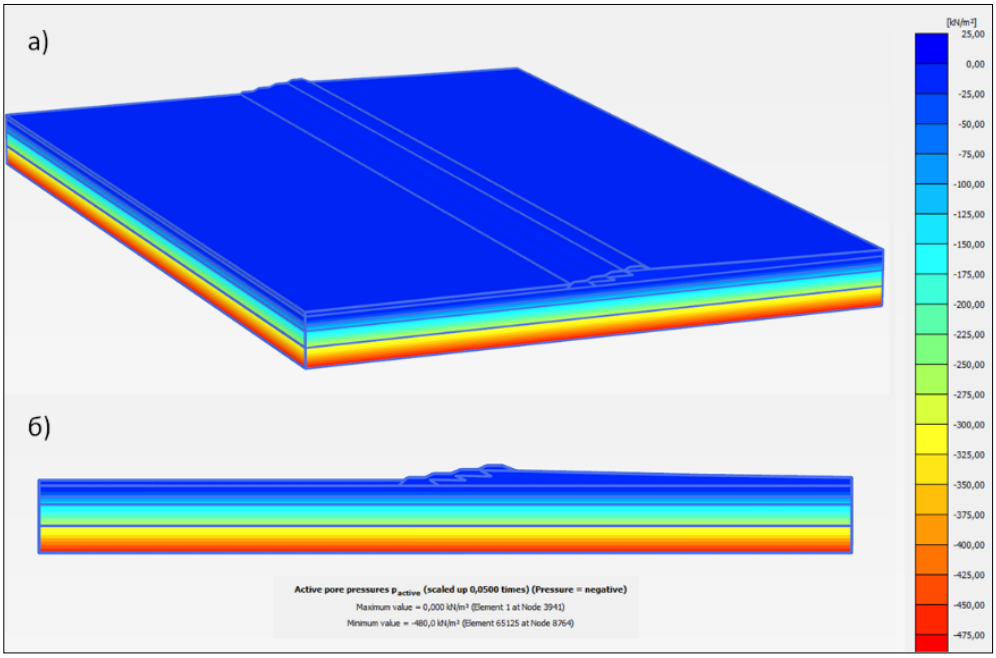


Рис. 3.72. Картины распределения активного порового давление P_{active} дамбы намывных отложений и подстилающего основания при исходных геомеханических условиях (гравитационное нагружение)*: а* — общий вид; *б* — поперечный разрез по пьезометрическому створу 7-7

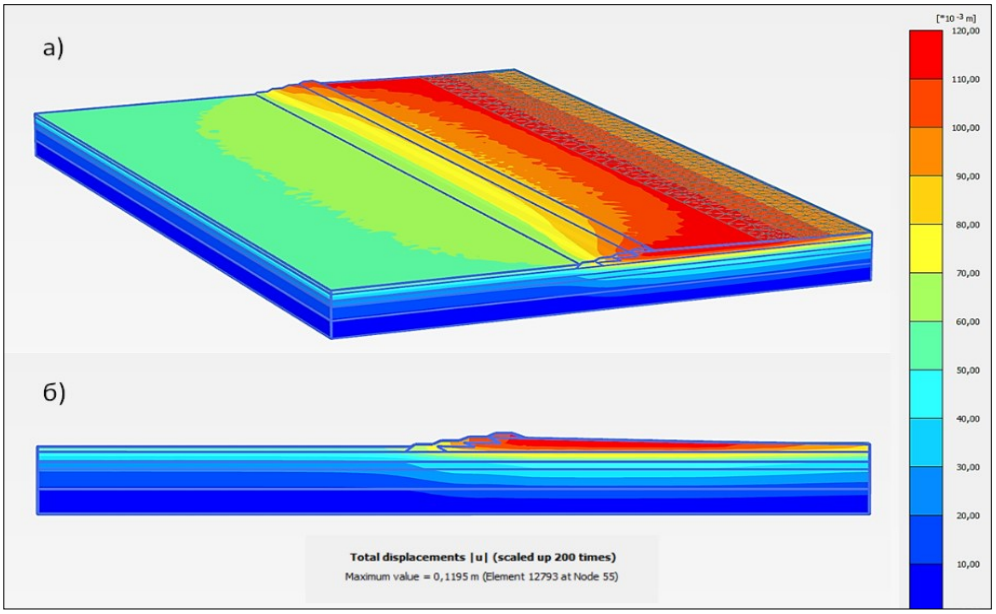


Рис. 3.73. Картины распределения общих перемещений $U_{общ.}$ грунтов дамбы, намывных отложений и подстилающего основания при уровне воды в отстойнике на отметке +233 м: *а* — общий вид; *б* — поперечный разрез по пьезометрическому створу 7-7

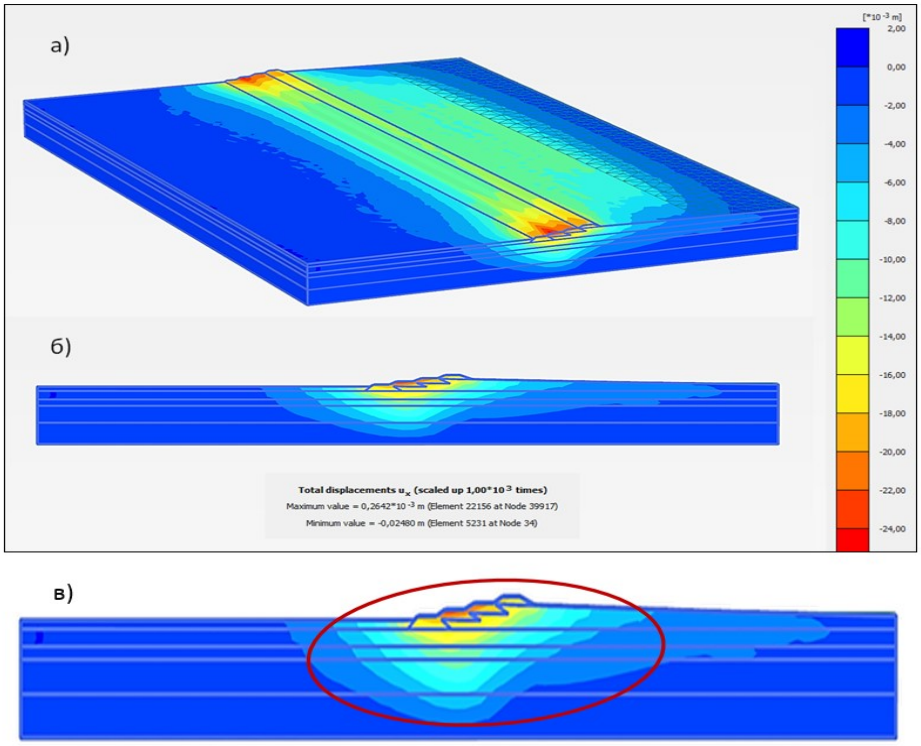


Рис. 3.74. Картины распределения субгоризонтальных перемещений U_x грунтов дамбы, намывных отложений и подстилающего основания при уровне воды в отстойнике на отметке +233 м: *а* — общий вид; *б* — поперечный разрез по пьезометрическому створу 7-7; *в* — локализация зоны влияния дамбы на перемещения намывных отложений и подстилающего основания

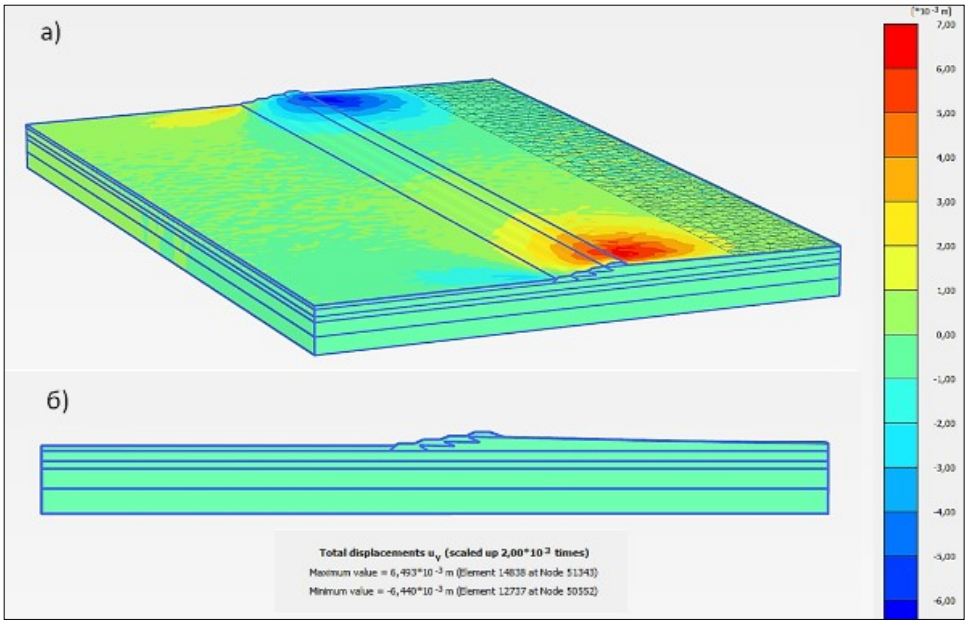


Рис. 3.75. Картины распределения субгоризонтальных перемещений U_y грунтов дамбы, намывных отложений и подстилающего основания при уровне воды в отстойнике на отметке +233 м: *а* — общий вид; *б* — поперечный разрез по пьезометрическому створу 7-7

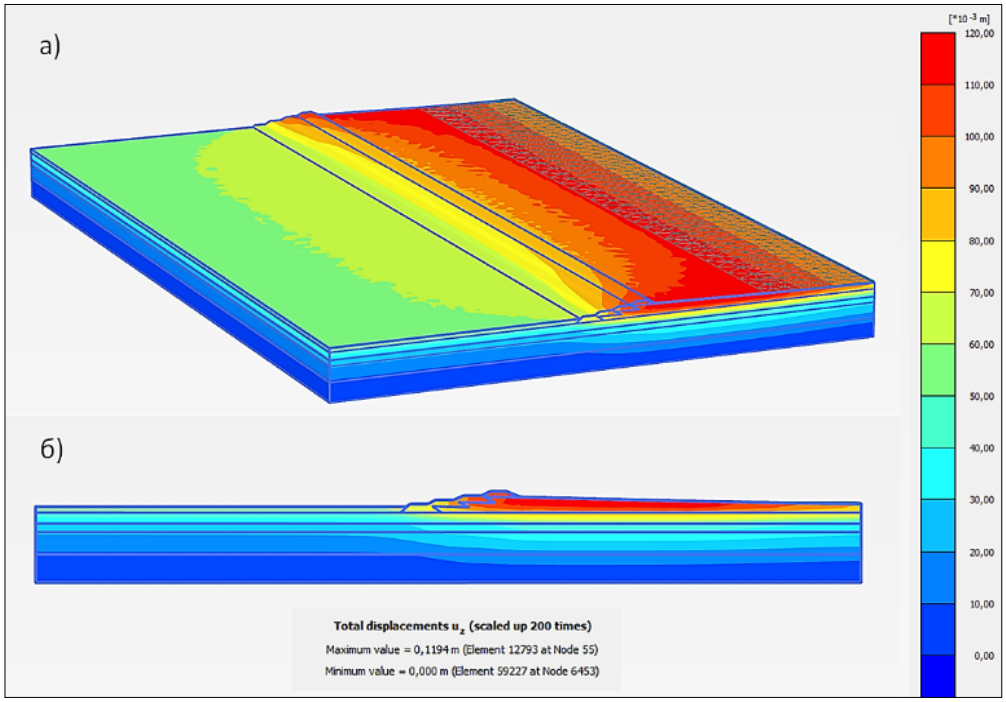


Рис. 3.76. Картины распределения вертикальных перемещений U_z грунтов дамбы, намывных отложений и подстилающего основания при уровне воды в отстойнике на отметке +233 м: *а* — общий вид; *б* — поперечный разрез по пьезометрическому створу 7-7

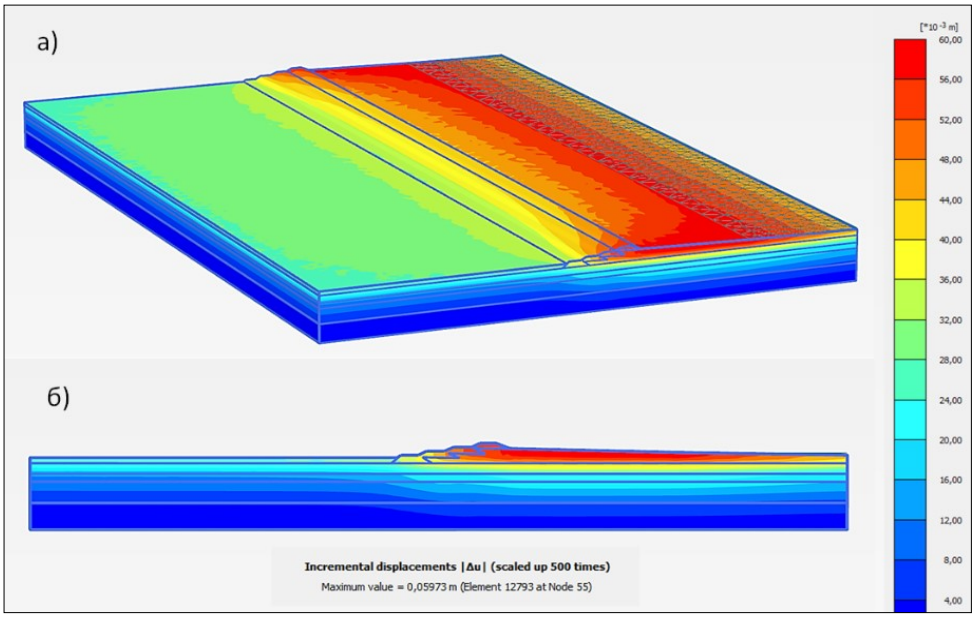


Рис. 3.77. Картины распределения приращений перемещений /Δ*U*/ грунтов дамбы, намывных отложений и подстилающего основания при уровне воды в отстойнике на отметке +233 м: *а* — общий вид; *б* — поперечный разрез по пьезометрическому створу 7-7

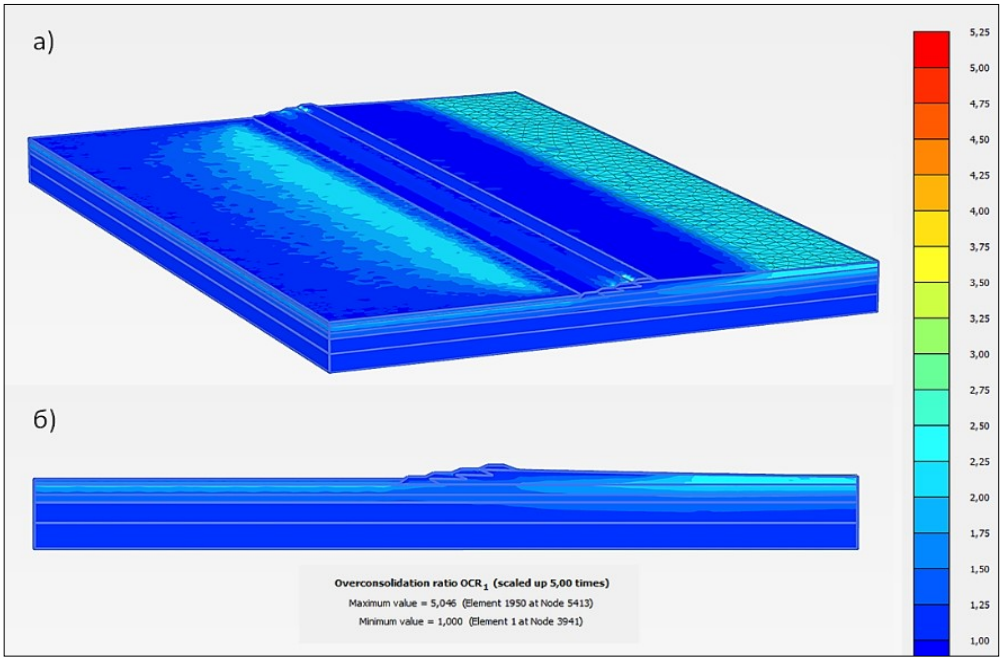


Рис. 3.78. Картины распределения коэффициента переуплотнения OCR грунтов дамбы, намывных отложений и подстилающего основания при уровне воды в отстойнике на отметке +233 м: *а* — общий вид; *б* — поперечный разрез по пьезометрическому створу 7-7

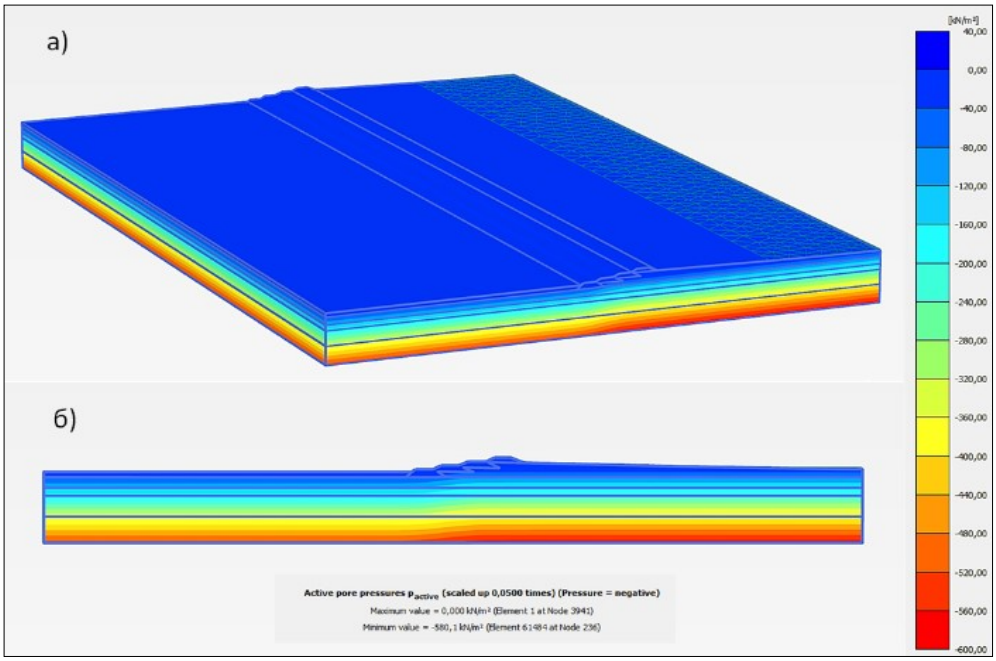


Рис. 3.79. Картины распределения активного порового давление P_{active} грунтов дамбы, намывных отложений и подстилающего основания при уровне воды в отстойнике на отметке +233 м: *а* — общий вид; *б* — поперечный разрез по пьезометрическому створу 7-7

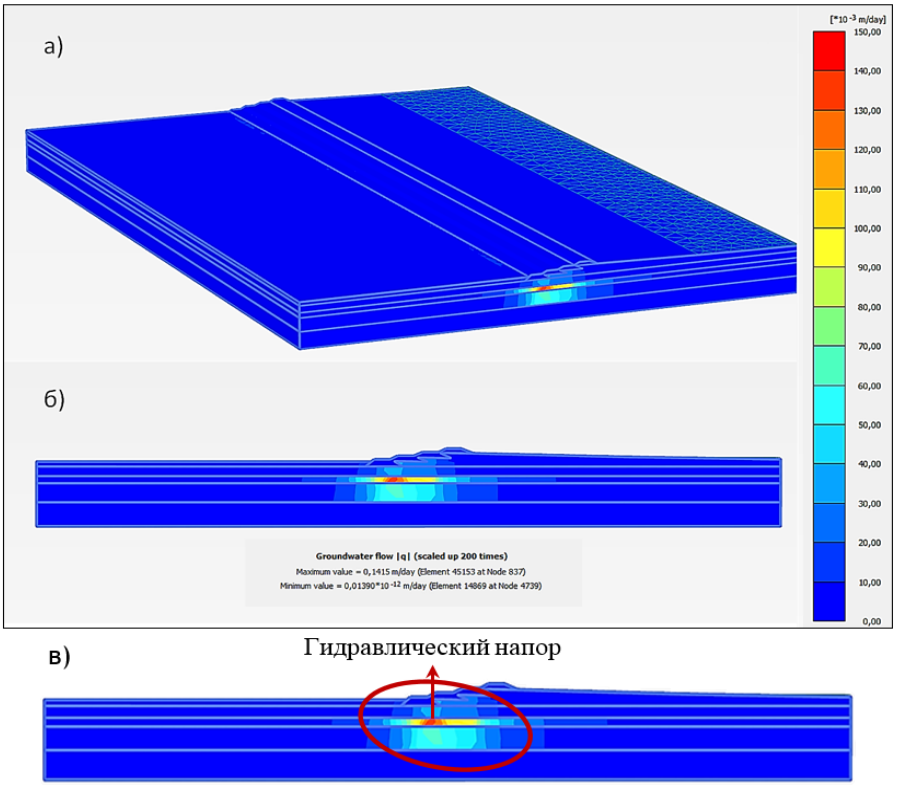


Рис. 3.80. Картины скорости фильтрации грунтовых вод через дамбу Craund water flow /*q*/ при уровне воды в отстойнике на отметке +233 м: *а* — общий вид; *б* — поперечный разрез по пьезометрическому створу 7-7; *в* — локализация зоны аномального изменения гидравлических условий под дамбой

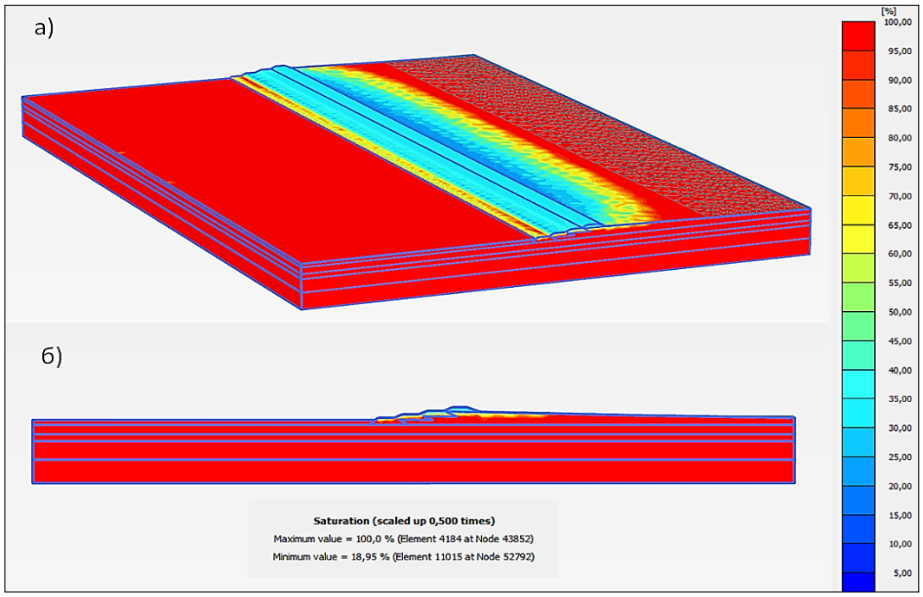
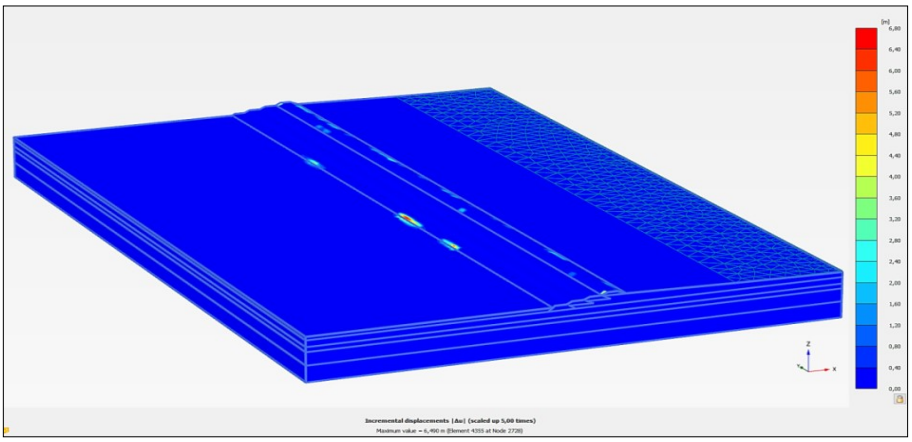
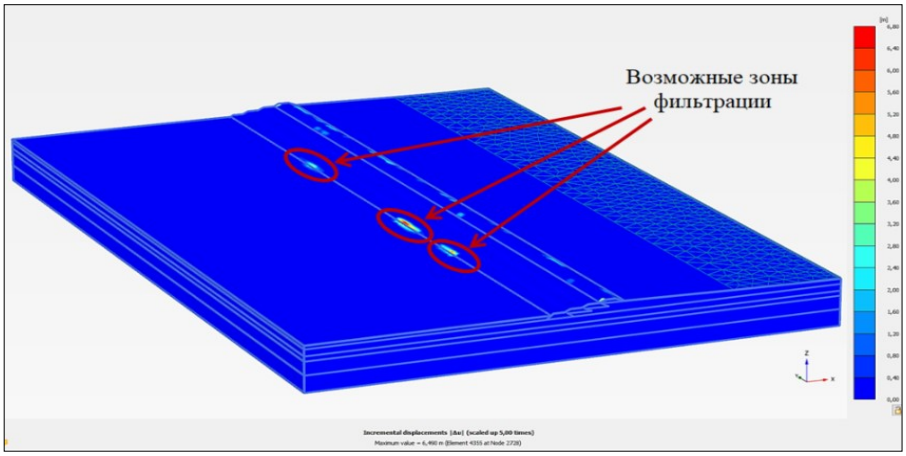


Рис. 3.81. Картины водопроницаемости (Saturation) грунтов дамбы при уровне воды в отстойнике на отметке +233 м: *а* — общий вид; *б* — поперечный разрез по пьезометрическому створу 7-7

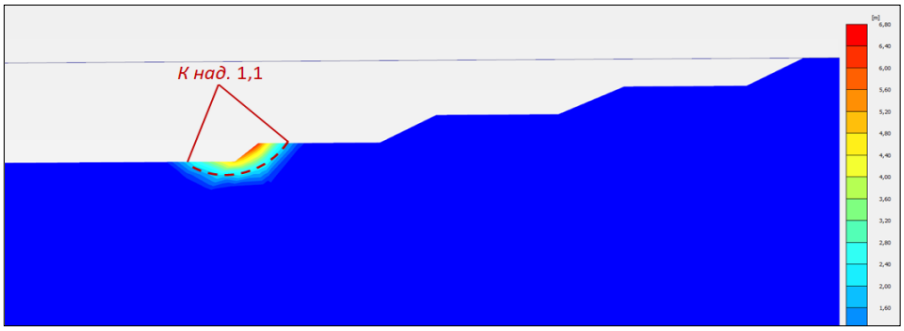
Компьютерным 3D-моделированием были определены расчетные значения показателя надежности $K_{над.}$ для разделительной дамбы при фактических геометрических размерах и отметках уровня воды в отстойнике и в пьезометрах (рис. 3.82).



а



б



в

Рис. 3.82. Картины приращений перемещений: *а* — вид со стороны низового склона дамбы; *б* — локализация возможных зон фильтрации на объемной модели; *в* — локализация проблемной зоны грунтов на фрагменте поперечного сечения дамбы

Согласно нормативным документам СП-39.13330.2012 «Плотины из грунтовых материалов». Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84, раздел 9.11, устойчивость откоса плотины (дамбы) должна быть проверена по возможным поверхностям сдвига с нахождением наиболее опасной призмы обрушения, характеризуемой минимальным отношением обобщенных предельных реактивных сил сопротивления к активным сдвигающим силам. Критерием устойчивости откосов плотины (дамбы) является соблюдение (для наиболее опасной призмы обрушения) неравенства:

$$\gamma_{lc} F \leq (\gamma_c/\gamma_n)\, R, \tag{3.5}$$

где F — расчетное значение обобщенного силового воздействия, определяемое с учетом коэффициента надежности по нагрузке γ_f(в зависимости от метода расчета устойчивости откосов; F — равнодействующая сил или моментов этих сил относительно оси поверхности сдвига); R — расчетное значение обобщенной несущей способности системы сооружение – основание, определяемое с учетом коэффициента безопасности по грунту γ_g, т. е. обобщенное расчетное значение сил предельного сопротивления сдвигу по рассматриваемой поверхности; γ_c, γ_n, γ_{lc} — коэффициенты условий работы, ответственности сооружения, сочетания нагрузок.

При поиске опасной поверхности сдвига может быть использована зависимость для коэффициента устойчивости Ks:

$$Ks = R/F \geq (\gamma_n\, \gamma_{lc})/\gamma_{c,} \tag{3.6}$$

γ_n — коэффициент надежности по ответственности сооружений.

Полученные расчетом значения коэффициента устойчивости при соответствующем сочетании нагрузок не должны превышать величины $(\gamma_n\, \gamma_{lc})/\gamma_c$ более чем на 10 %, если это не обусловлено особенностями сооружения.

Числовые значения коэффициентов γ_n и γ_{lc} приведены в табл. 3.12 и 2.13 (СП-39.13330.2012, табл. 9, 10 [167]).

Таблица 3.12

Числовые значения коэффициента γ_n

Класс сооружения	I	II	III	IV
Значение γ_n	1,25	1,20	1,15	1,10

Таблица 3.13

Числовые значения коэффициента γ_{lc}

Сочетание нагрузок	Основное	Особое	Строительного периода
Значение γ_{lc}	1,0	0,9	0,95

Значение коэффициента устойчивости (надежности) γ_n для класса сооружения II не должно быть меньше нормативного значения 1,20.

Выполненные расчетные исследования устойчивости дамбы хвостохранилища при возведении до отметки +240 м показали, что устойчивость в целом обеспечивается. Однако локально выделяются зоны с коэффициентом запаса $K_{\text{над.}}$ = 1,10, что дает основание прогнозировать формирование здесь потенциально опасных фильтрационных процессов.

Далее приведены картины перемещений грунтов разделительной дамбы и гидравлических показателей при уровне воды в отстойнике +233 м в изолиниях (рис. 3.83 и 3.84).

Динамика изменений значений расчетных данных за период исследований 2022–2024 гг. представлена на рис. 3.85–3.96.

Как следует из вышеприведенных рисунков, общие перемещения грунтов гребня дамбы практически одинаковы в 2023 и 2024 гг. и составляют около 0,1 м. При этом следует обратить внимание на краевые части дамбы (выделено на рис. 3.85 красными овалами), для которых расчетно определяется несколько больший рост (до 20 %) значений перемещений.

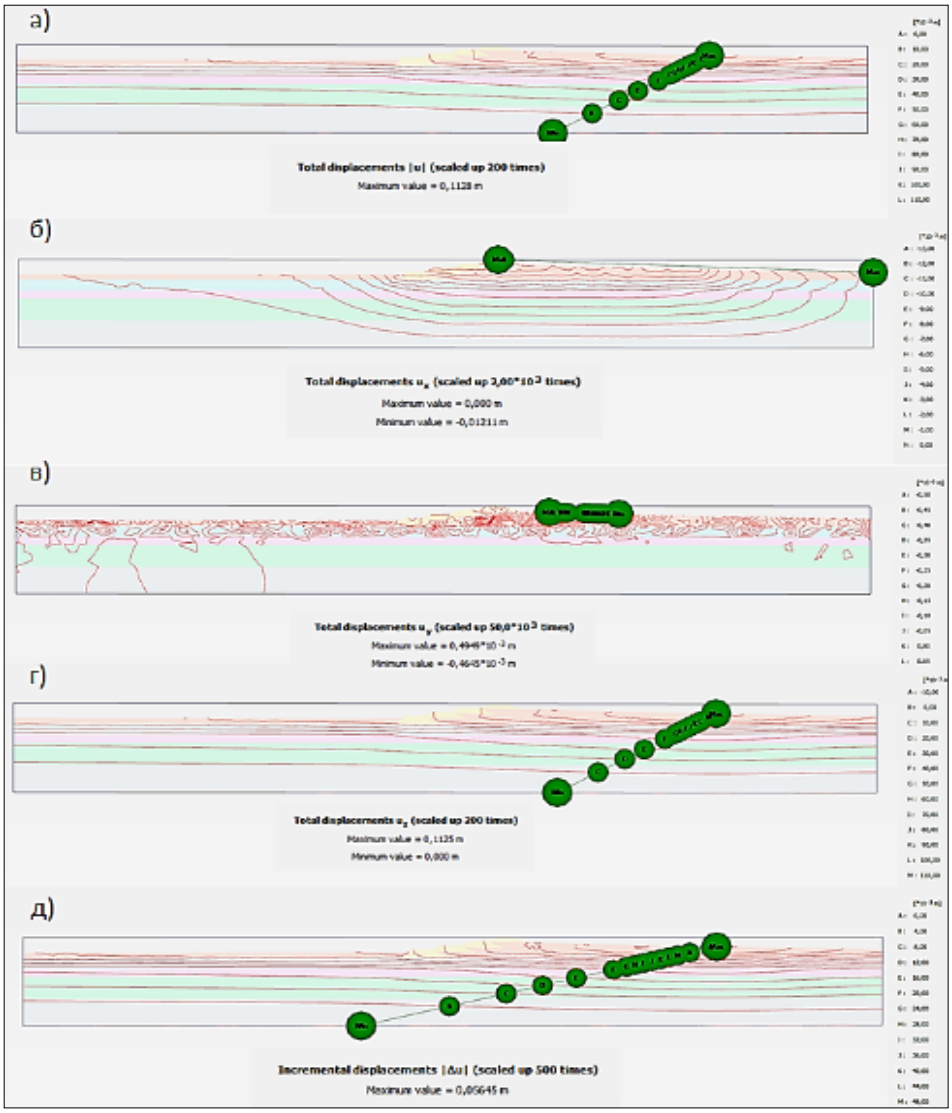


Рис. 3.83. Изолинии значений перемещений грунтов разделительной дамбы, намывных отложений и подстилающего основания при уровне воды в отстойнике на отметке +233 м: *а* — общие $U_{общ.}$; *б* — субгоризонтальные U_x; *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z: *д* — приращение перемещений /Δ*U*/

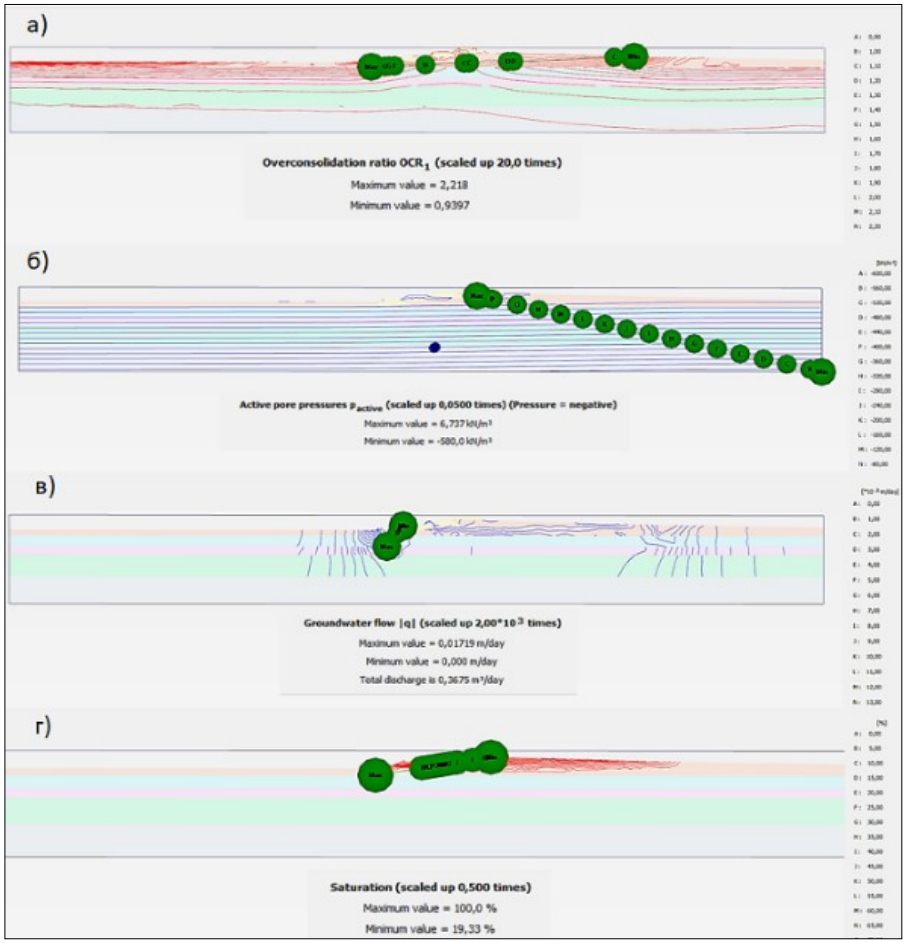


Рис. 3.84. Изолинии значений гидравлических показателей: *а* — коэффициент переуплотнения грунтов OCR; *б* — активное поровое давление P_{active}; *в* — скорость фильтрации грунтовых вод через дамбу Craund water flow /*q*/; *г* — водопроницаемость грунтов Saturation

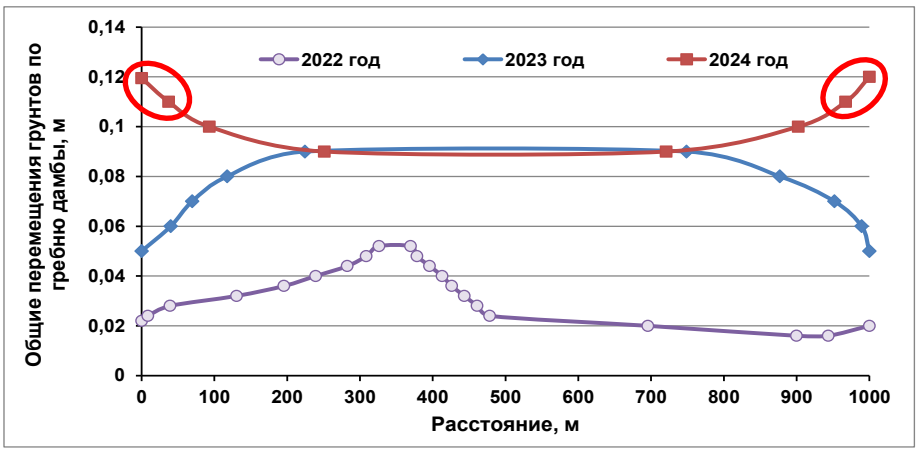


Рис. 3.85. Тенденции изменений общих перемещений грунтов гребня дамбы по продольной оси (овалами выделены краевые участки с возрастанием перемещений)

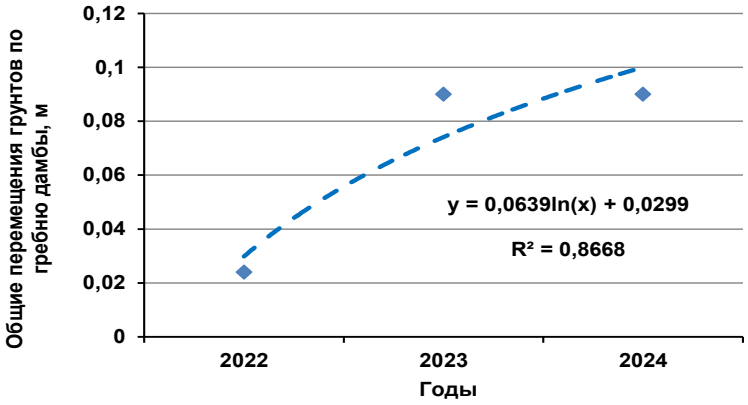


Рис. 3.86. Динамика общих перемещений грунтов гребня дамбы за 2022–2024 гг.

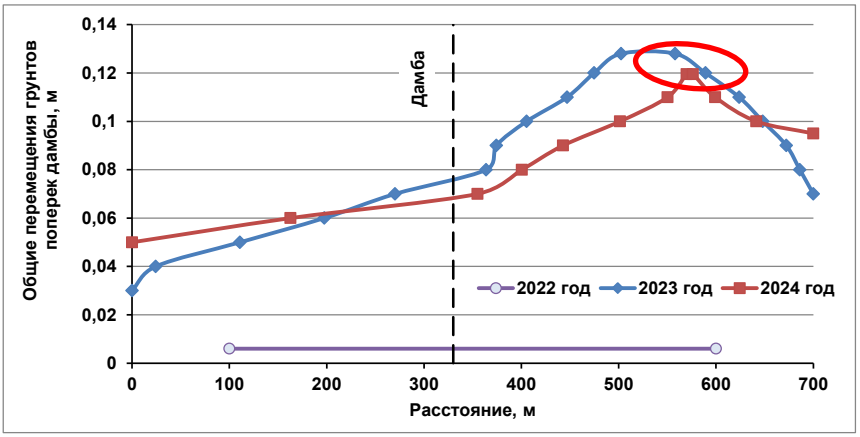
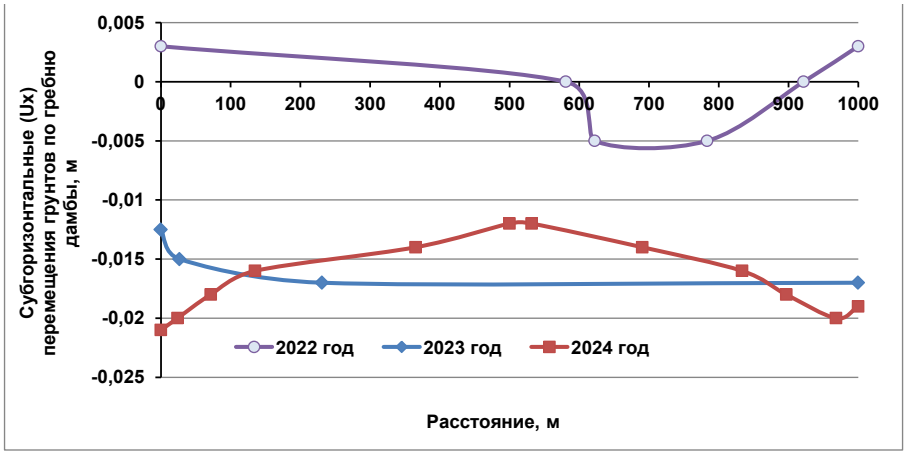
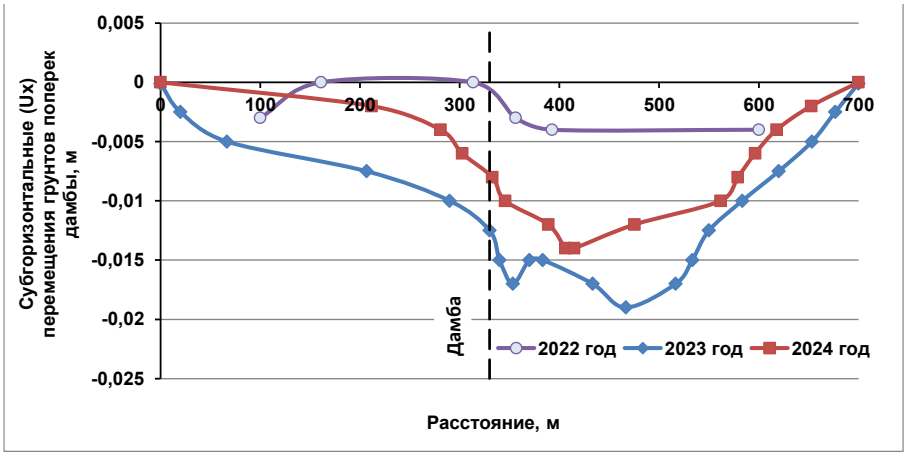


Рис. 3.87. Тенденции изменений общих перемещений грунтов дамбы по перечной оси



а

Рис. 3.88. Расчетные значения субгоризонтальных перемещений грунтов (начало): *а* — по продольной оси дамбы



б

Рис. 3.88. Расчетные значения субгоризонтальных перемещений грунтов (окончание): *б* — по центральному поперечному сечению дамбы и прилегающих намывных отложений

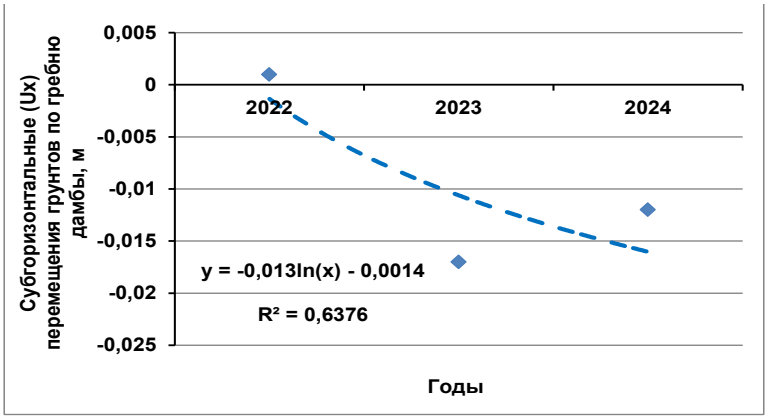
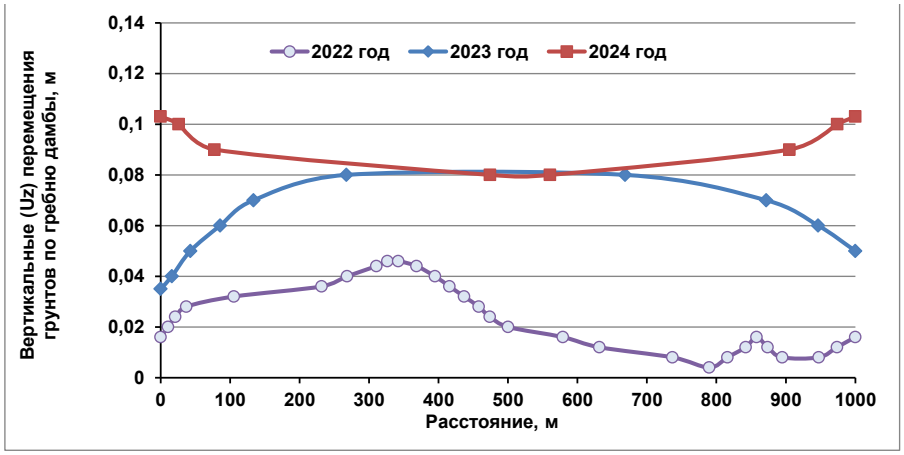
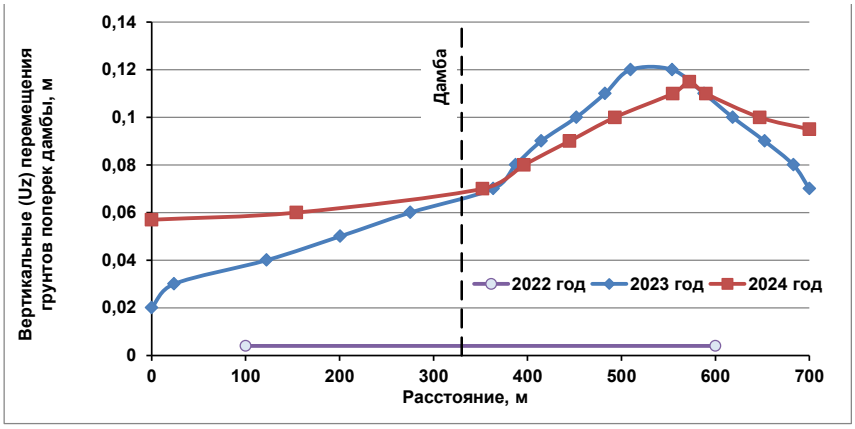


Рис. 3.89. Динамика изменения расчетных значений субгоризонтальных перемещений грунтов гребня дамбы



а

Рис. 3.90. Расчетные значения вертикальных перемещений грунтов (начало): *а* — по продольной оси дамбы



б

Рис. 3.90. Расчетные значения вертикальных перемещений грунтов (окончание): *б* — по центральному поперечному сечению дамбы и прилегающих намывных отложений

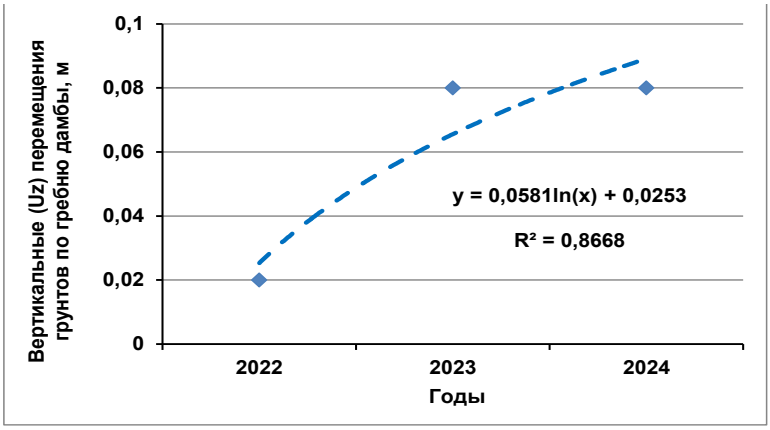
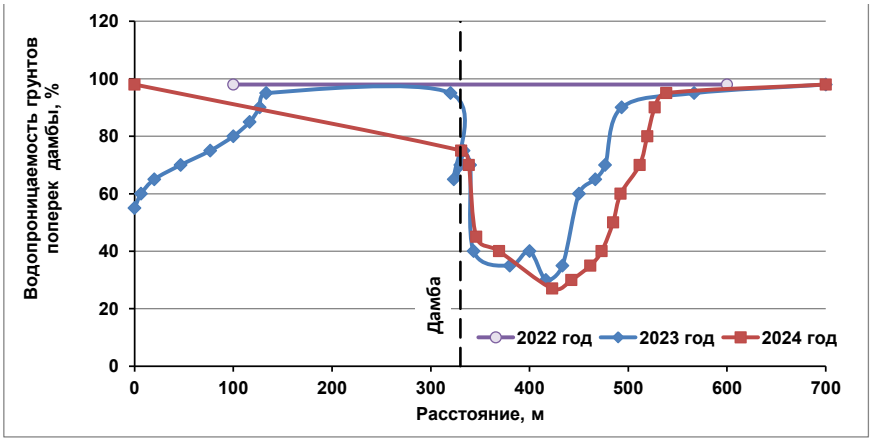
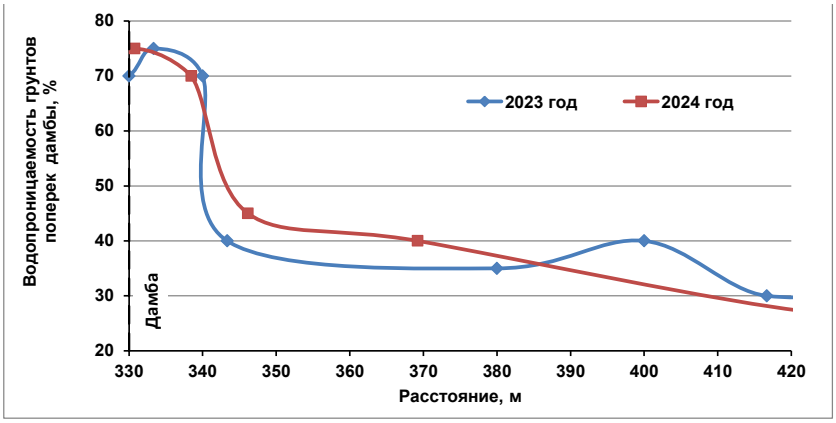


Рис. 3.91. Динамика изменения расчетных значений вертикальных перемещений грунтов гребня дамбы



а

Рис. 3.92. Расчетные значения водопроницаемости грунтов поперек дамбы (начало): *а* — для всего сечения расчетной модели



б

Рис. 3.92. Расчетные значения водопроницаемости грунтов поперек дамбы (окончание): *б* — увеличенный фрагмент непосредственно по дамбе

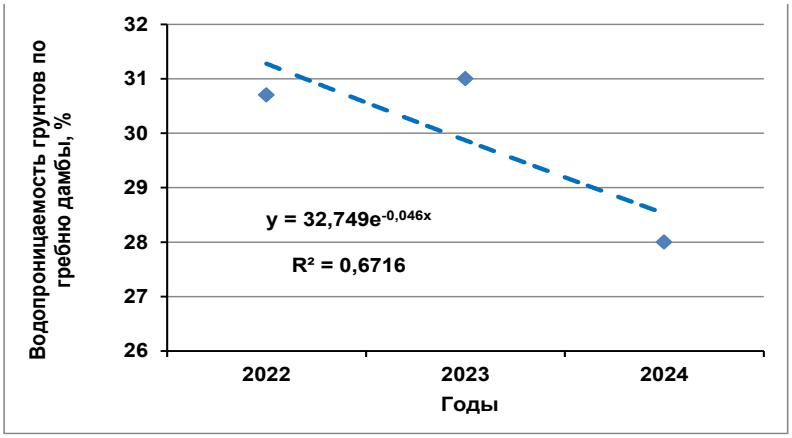
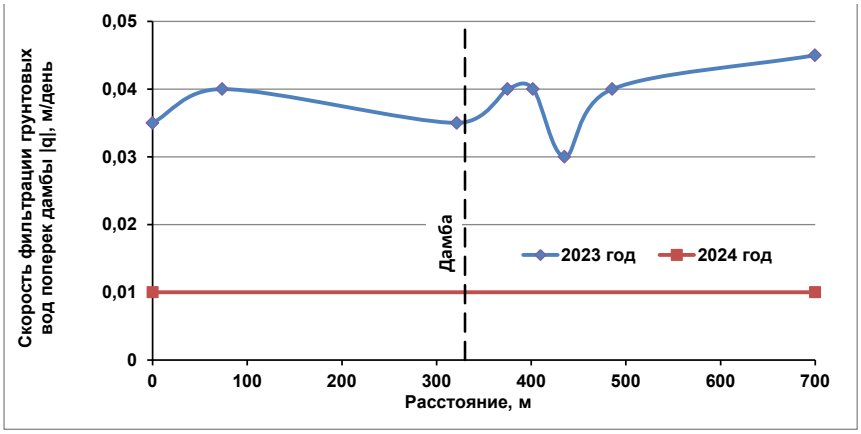
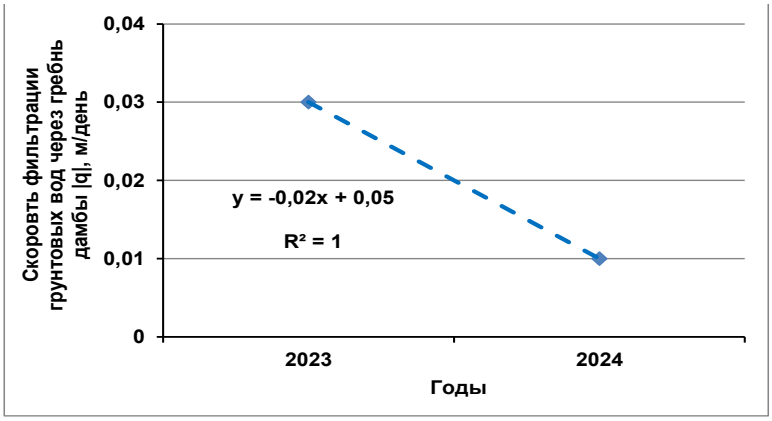


Рис. 3.93. Динамика изменения расчетных значений водопроницаемости грунтов гребня дамбы



а

Рис. 3.94. Динамика изменения скорости фильтрации грунтовых вод (начало): *а* — по поперечному сечению модели



б

Рис. 3.94. Динамика изменения скорости фильтрации грунтовых вод (окончание): *б* — в грунтах гребня дамбы

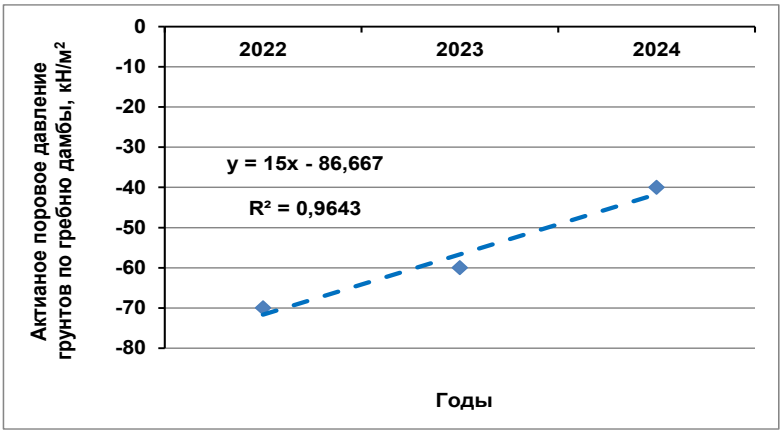
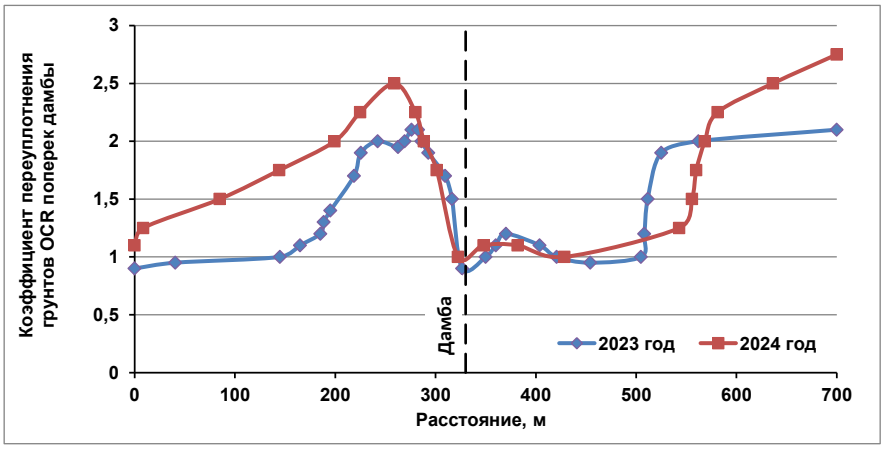
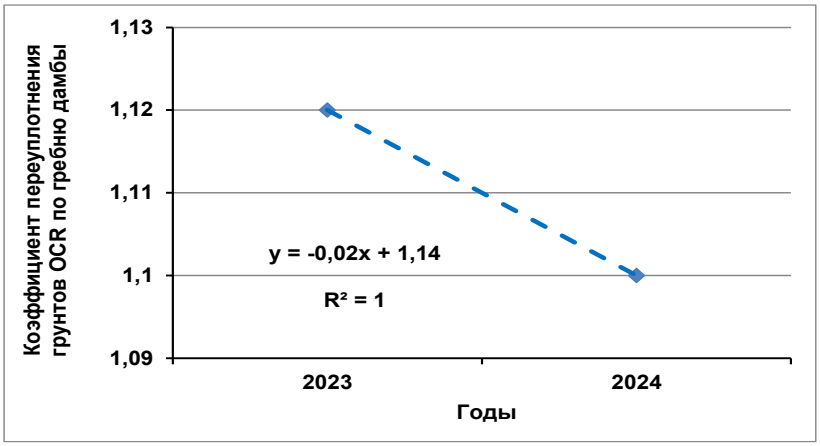


Рис. 3.95. Динамика изменения расчетных значений активного порового давления в грунтах гребня дамбы



а

Рис. 3.96. Динамика изменения расчетных значений коэффициента переуплотнения грунтов (начало): *а* — по поперечному сечению модели



б

Рис. 3.96. Динамика изменения расчетных значений коэффициента переуплотнения грунтов (окончание): *б* — по гребню дамбы

Из рис. 3.85 видно, что намывные грунты, как и следовало ожидать, смещаются по-разному и разнонаправлено: на низовом (0,04–0,07 м) и на верховом (0,07–0,13 м) склонах. При этом максимальные значения перемещений грунтов (выделены красным овалом) приурочены практически к линии уреза воды в отстойнике.

Анализ результатов компьютерного гидрогеомеханического 3D-моделирования ситуационного состояния разделительной дамбы позволяет оценить состояние разделительной дамбы на декабрь 2024 г. в целом как устойчивое.

Вместе с тем по результатам расчетов в теле дамбы локализуются зоны аномальных значений, на которые необходимо обратить внимание и усилить контроль их состояния:

– непосредственно под дамбой формируются: на низовом склоне — зона выпирания, на верховом склоне — зона отжима грунтов намывных отложений. Размеры этих зон и скорость перемещения (выпирания) грунтов будут возрастать по мере наращивания ярусов дамбы [176–180];

– гравитационное влияние дамбы в глубину на подстилающие намывные отложения и грунты геологического основания распространяется на размеры, превышающие ширину дамбы, и будет увеличиваться по мере дальнейшего наращивания ее ярусов [176–180];

– в силу вышеперечисленных причин, непосредственно под первыми двумя ярусами дамбы локализуются зоны с аномальными гидравлическими условиями: активного порового давления, гидравлического напора и скорости фильтрации грунтовых вод. Оценивать потенциальную опасность развития этих зон на сегодняшний день затруднительно. Необходимо проведение более детальных исследований, в том числе с бурением контрольных скважин и оборудованием наблюдательных пьезометров в поперечных створах этих зон;

– прогнозно, вследствие формирования локальных зон аномальных гидравлических условий, следует ожидать протечек на сопряжении низового склона и прилегающих намывных отложений с выносом (механическая суффозия) частиц грунта и локальной потерей устойчивости дамбы [173–175, 179–182].

3.2.8. Особенности гидрогеомеханического состояния разделяющей дамбы

По результатам трехлетних георадарных обследований установлено, что приповерхностная зона разделительной дамбы, до глубины 6 м, представляет собой относительно равномерную волновую картину, которая свидетельствует об уплотненных грунтах. Выявленные структурные особенности в теле дамбы идентифицируются на всех циклах измерений. Уровень грунтовых вод выделяется достаточно четко и изменяется незначительно, с тенденцией к понижению от мая до ноября месяца. Сопоставление результатов всех циклов измерений 2022–2024 гг. позволил выявить наиболее характерные участки, требующие периодического геофизического мониторинга:

- на горизонте +231 м выделяется зона водонасыщения грунтов в интервале 250–290 м, повторяющаяся на всех циклах измерений, которая характеризуются наличием сильных низкочастотных помех, что, как правило, напрямую связано с водонасыщенностью грунтов. Следует принять во внимание зону в интервале 670–930 м, выявленную в 2022 г., которая локализовалась до интервала 790–860 м в 2023 г. В 2024 г. выявляются две зоны в интервале 610–630 и 670–710 м, которые могут быть связаны с возможной миграцией выявленной ранее в 2022–2023 гг. зоны вследствие увеличения высоты дамбы.

- на горизонте +234 м локализована зона водонасыщения грунтов в интервале 450–500 м, повторяющаяся на трехгодичных циклах, остальные выявленные зоны имеют мигрирующий случайный порядок;

- на горизонте +237 м локализована зона водонасыщения грунтов в интервале 60–120 м, повторяющаяся на трехгодичных циклах, остальные выявленные зоны имеют мигрирующий случайный порядок;

- на горизонте +240 м локализованы зоны возможного водонасыщения, повторяющиеся в интервалах 125–160 и 180–210 м.

В целом по результатам георадарного обследования дамба находится в удовлетворительном состоянии, опасных фильтрационно-деформационных процессов не выявлено.

Анализ результатов компьютерного гидрогеомеханического 3D-моделирования ситуационного состояния разделительной дамбы позволяет оценить ее состояние на декабрь 2024 г. в целом как устойчивое. Вместе с тем по результатам расчетов в теле дамбы локализуются зоны аномальных значений, на которые необходимо обратить внимание и усилить контроль их состояния:

– непосредственно под дамбой формируются: на низовом склоне — зона выпирания, на верховом склоне — зона отжима грунтов намывных отложений, Размеры этих зон и скорость перемещения (выпирания) грунтов будут возрастать по мере наращивания ярусов дамбы;

– гравитационное влияние дамбы в глубину на подстилающие намывные отложения и грунты геологического основания распространяется на размеры, превышающие ширину дамбы, и будет увеличиваться по мере дальнейшего наращивания ярусов дамбы;

– в силу вышеперечисленных причин непосредственно под первыми двумя ярусами дамбы локализуются зоны с аномальными гидравлическими условиями: активного порового давления, гидравлического напора и скорости фильтрации грунтовых вод. Оценивать потенциальную опасность развития этих зон на сегодняшний день затруднительно. Необходимо проведение более детальных исследований,

в том числе с бурением контрольных скважин и оборудованием наблюдательных пьезометров в поперечных створах этих зон;

– прогнозно, вследствие формирования локальных зон аномальных гидравлических условий, следует ожидать протечек на сопряжении низового склона и прилегающих намывных отложений с выносом (механическая суффозия) частиц грунта и локальной потерей устойчивости дамбы.

На основании выявленных особенностей гидрогеомеханического состояния разделительной дамбы даны следующие рекомендации по обеспечению ее фильтрационной и механической устойчивости:

– необходимо обратить внимание и усилить контроль состояния локализованных зон повышенного водонасыщения грунтов, аномальных перемещений намывных отложений и гидравлического напора;

– в целях своевременного обнаружения и предотвращения негативного влияния выявленных аномальных зон в теле разделяющей дамбы на безопасную работу хвостохранилища проводить ежегодный геофизический мониторинг как по горизонтам, так и разделительной дамбы в целом;

– необходимо развитие сети КИА на разделительной дамбе с учетом ее наращивания ярусами до отметки +243 м, планируемых сроков и условий ее эксплуатации;

– продолжить регулярную оптико-электронную съемку разделительной и ограждающих дамб хвостохранилища АНОФ-3 АО «Апатит» для своевременного выявления водонасыщенных зон и поверхностных проявлений фильтрационных процессов;

– провести крупномасштабную съемку хвостохранилища АНОФ-3 АО «Апатит» на основе оптико-электронных и радиолокационных деформационных 3D-методов дистанционного зондирования Земли в составе комплексной системы наблюдений.

3.3. Плотина водохранилища горнопромышленного назначения

3.3.1. Построение цифровых моделей

Необходимость и актуальность данного исследования определяются тем, что специально созданные водохранилища являются основными и важными источниками муниципального и горнопромышленного водоснабжения. Как правило, забор водных ресурсов из таких водохранилищ осуществляется для технических нужд и нужд горячего водоснабжения, а также для промышленных цехов и объектов горнопромышленного предприятия [183].

Рассмотрим построение цифровой модели на примере водохранилища, расположенного в северо-западной части Мурманской области. Водохранилище сформировано в пределах расширения небольшой реки в ее среднем течении. Сооруженная насыпная грунтовая плотина перегораживает суженную часть долины, сложенную перемежающимися аллювиальными и водно-ледниковыми образованиями. Кристаллические породы геологического основания интенсивно трещиноваты, на отдельных участках раздроблены.

Плотина водохранилища характеризуется следующими основными параметрами: высота плотины — 18,0 м; длина плотины по гребню — 510,0 м; ширина плотины по гребню — 20,0–50,0 м; ширина плотины по подошве — 120,0 м; отметка

гребня — 201,2 м. Водохранилище имеет полный объем 3,2 млн м^3, площадь зеркала — около 0,6 км^2; при этом отметка нормального подпорного уровня на верхнем бьефе плотины составляет 198,4 м [184]. Схематично система «водохранилище – плотина – геологическое основание» показана на рис. 3.97.

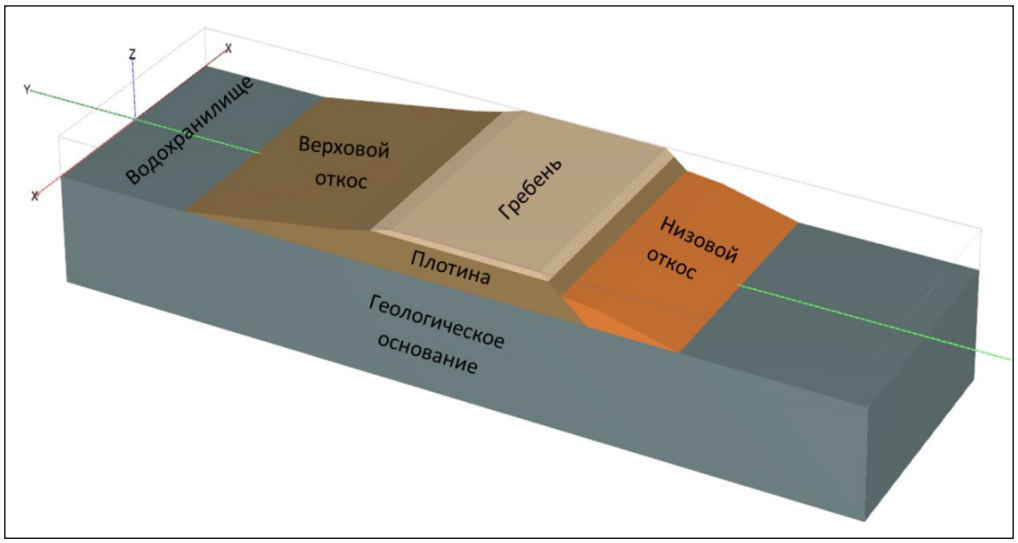


Рис. 3.97. Схематичное отображение системы «водохранилище – плотина – геологическое основание»

Гребень плотины, отсыпанный песчано-глыбовым материалом, представляет собой уплощенную волнистую поверхность с небольшим (0,5–0,7 м) перепадом высот. Водоприемная часть (верхний бьеф) плотины представляет собой склон под углом около 45°, сложенный крупноглыбовым и валунным материалом местных пород. Упорная часть (нижний бьеф) плотины представляет собой склон под углом от 55 до 75°, сверху отсыпанный крупноглыбовым и валунным материалом практически до нижнего бьефа плотины. Вдоль бьефа, в песчано-гравийных отложениях, прослеживается небольшое понижение, к которому приурочены несколько водотоков и водоемов, сформировавшихся вследствие инфильтрационного просачивания воды водохранилища через тело плотины.

На основе вышеизложенных данных была построена тестовая 3D-модель системы «водохранилище – плотина – геологическое основание». Вначале была создана геометрически подобная схема с выделением основных слоев грунтов в геологическом основании и в теле плотины, для которых, на основании данных натурных инженерно-геологических условий, были заданы соответствующие параметры физико-механических свойств [49, 185].

Затем для проведения расчетов геометрическая 3D-модель была разбита на отдельные элементы. Основными элементами в трехмерной сетке конечных элементов являются десятиузловые элементы-тетраэдры. В автоматическом режиме с использованием опции Element distribution как very fain (очень мелкая) авторами была построена сетка конечных элементов, которая включала: конечных элементов — 48082; узлов — 70653. При этом средний размер элемента был подобен 5,318 м; максимальный размер элемента в основании — 14,66 м; минимальный

размер элемента в теле плотины — 0,286 м, что свидетельствует о достаточной детализации исследований.

Далее задавался уровень воды в водохранилище на отметке +198,4 м (отметка нормального подпорного уровня) и по гидрогеологическим данным строилась депрессионная поверхность в теле плотины.

На основе созданной тестовой 3D-модели «водохранилище – плотина – геологическое основание» были выполнены калибровочные расчеты, по результатам которых были построены цветные картины (палитры) смещений грунтов плотины и геологического основания. На рис. 3.98 приведена объемная палитра общих (полных) расчетных смещений грунтов для рассматриваемых исходных условий с указанием геометрических размеров зон одинаковых значений смещений вкрест (поперек) плотины. Зависимости изменения значений смещений грунтов плотины и геологического основания с глубиной приведены на рис. 3.99.

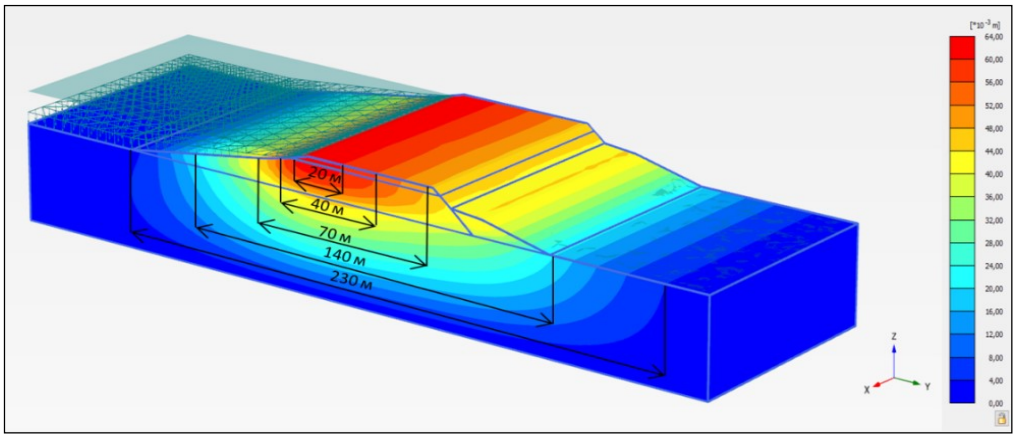


Рис. 3.98. Объемная палитра общих (полных) расчетных смещений грунтов плотины и геологического основания

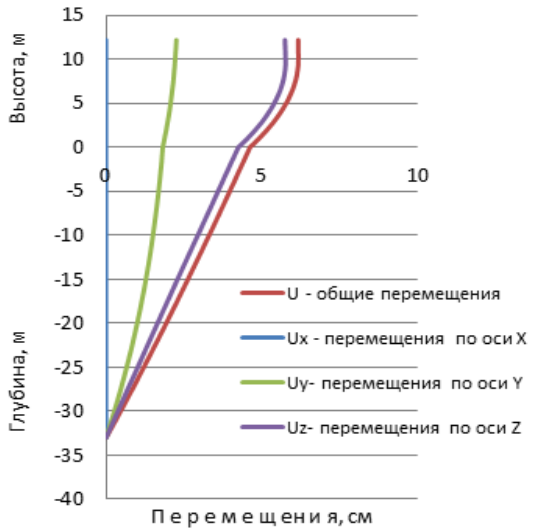


Рис. 3.99. Зависимости изменения значений смещений грунтов плотины и геологического основания с глубиной

Анализ рис. 3.98 и 3.99 показывает, что максимальные смещения (до 6,5 см) локализуются на сопряжении гребня плотины и верхнего

бьефа. Размеры этой зоны могут достигать до 20 м в плане и до 5–6 м по глубине. Следует заметить, что грунты плотины в целом подвержены относительным смещениям 5–6 см практически на всю ее высоту (10–12 м). В целом смещениям подвержены не только грунты плотины, но и геологического основания: горизонтальный размер зоны смещений достигает 230 м, а вертикальный — 30–33 м (что более чем в 2 раза превышает высоту непосредственно плотины). Но значения этих смещений не велики и не превышают 4 см непосредственно под плотиной, практически с линейным затуханием до глубины 30–33 м.

По результатам компьютерного моделирования и выполненных многовариантных параметрических расчетов была выполнена оценка устойчивости (безопасности), базирующаяся на отношении полученных значений сдвиговой прочности к минимальной сдвиговой прочности, необходимой для равновесия [47, 49, 50, 186]. Было определено, что для рассматриваемых условий работы системы «водохранилище – плотина – геологическое основание» при отметке гребня плотины +201 м и при уровне воды в водохранилище +198,4 м устойчивость плотины обеспечивается для всех рассмотренных вариантов со значениями коэффициента устойчивости (безопасности) $K_{без.}$, большими нормативного коэффициента $K_{без.\ н.}$ (согласно нормативным требованиям [48] $K_{без.\ н.}$ должен быть не менее 1,5).

Далее на основе топографических данных плотины, створов плотины в разрезе, значений пьезометров и параметров физико-механических характеристик грунтов, намывных отложений и подстилающих пород геологического основания разработана цифровая геофильтрационная 3D-модель исследуемой области с использованием программного комплекса Processing Modflow 8 [187] (рис. 3.100). Цифровая геофильтрационная 3D-модель плотины водохранилища приведена на рис. 3.101 (построение геофильтрационных моделей выполнено инж. Е. Ю. Лебедик).

Программа Modflow использует блочно-центрированный балансовый метод конечных разностей для расчета трехмерного, неоднородного по фильтрационным свойствам потока. Для решения выбран итерационный метод сопряженных градиентов. Модель состоит из 520 строк и 470 столбцов, 2 слоев, построена для участка плотины 520×470 м^2. Режим фильтрации 1 и 2 структурных слоев принимался напорно-безнапорным в зависимости от расчетного положения уровня воды в конкретной ячейке. Учитывались почвенные и грунтовые воды. Задача решалась в стационарной постановке. Для визуализации результатов использовалась программа 3D Groundwater Explorer [188].

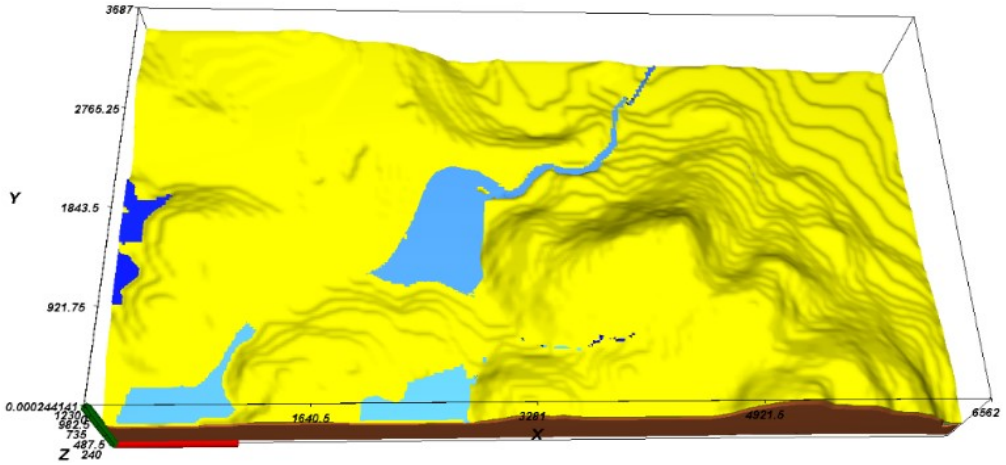


Рис. 3.100. Цифровая 3D-модель текущего состояния водохранилища и прилегающей территории

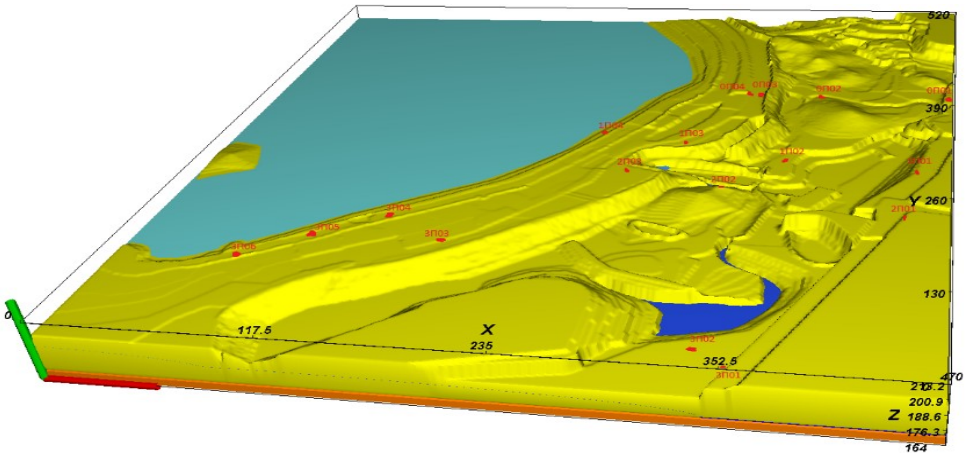


Рис. 3.101. Цифровая геофильтрационная 3D-модель плотины водохранилища (красным цветом указаны пьезометры)

3.3.2. Построение гидрогеомеханической 3D-модели водохранилища

Гидрогеомеханическое моделирование хвостохранилища Селиакка-Ярви выполнено с использованием локализованной версии программного комплекса Plaxis 3D. В расчетах использовались геометрические параметры и гидрогеологические условия, принятые по исходным данным геодезических, геотехнических и гидрогеологических изысканий, полученных в результате полевых измерений в сентябре – ноябре 2025 г.

Построение гидрогеомеханической модели выполнялось в следующей последовательности: создание геометрической схемы «плотина – водохранилище», построение расчетной модели, задание свойств грунтов и пород (параметры деформационных, прочностных и фильтрационных свойств), задание граничных условий и нагрузок, разбивка расчетной модели на конечные элементы, проведение компьютерного моделирования (расчетов), обработка полученных результатов с возможностью получения результирующих картин перемещений грунтов и гидравлических условий, а также коэффициента запаса (устойчивости) и/или показателя надежности.

Геометрическая схема «плотина – водохранилище», выполненная по поперечному створу II-II, представлена на рис. 3.102.

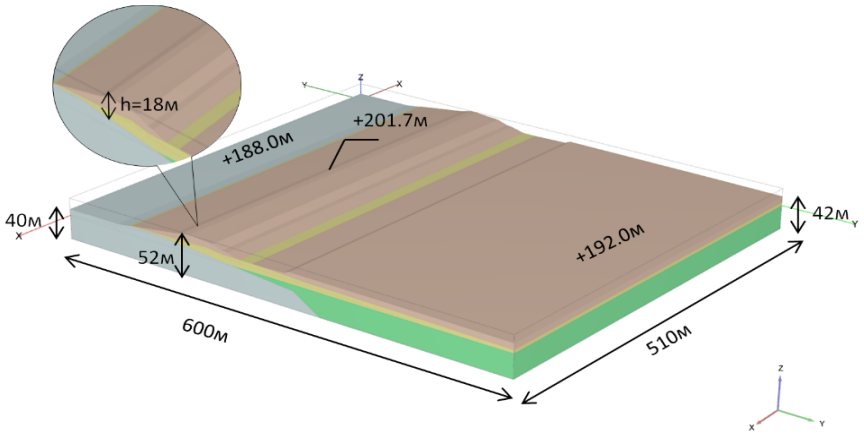


Рис. 3.102. Геометрическая схема «плотина – водохранилище» (по поперечному створу II-II)

Создание расчетной модели включало в себя построение стратиграфических разрезов по данным имеющихся геологических колонок (рис. 3.103).

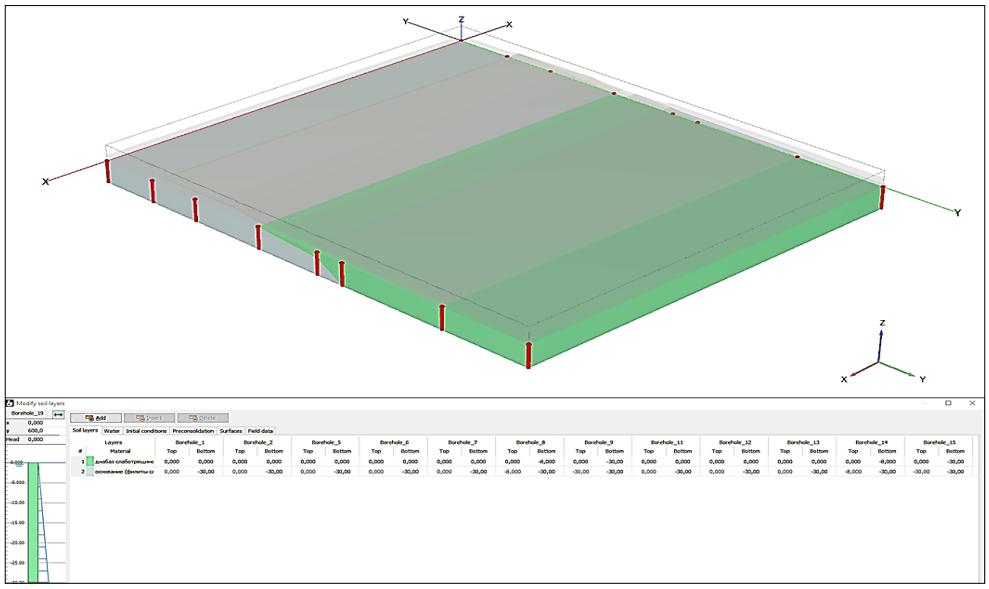


Рис. 3.103. Построение расчетной модели по стратиграфическим разрезам геологических колонок

Далее, с учетом геологического строения исследуемого участка, была построена расчетная модель в ПО Plaxis 3D (рис. 3.104). Расчетные характеристики физико-механических свойств насыпных грунтов плотины и естественного геологического основания (табл. 3.14) приняты по результатам геологического бурения, фильтрационных испытаний и лабораторных определений свойств грунтов и пород, выполненных в рамках данной работы.

Для проведения расчетов методом конечных элементов смоделированная геометрическая (расчетная) модель была разбита на отдельные элементы. Программа Plaxis 3D позволяет учитывать напластование грунта, а также все конструктивные элементы, нагрузки и граничные условия. Для данной модели использовалось два режима разбивки сетки конечных элементов Fine (Мелкая) и Veryfine (Очень мелкая). Режим Veryfine был применен для детализации непосредственно тела самой плотины, где можно было ожидать высокую концентрацию напряжений или значительные градиенты деформации (смещений), в остальных местах расчетной модели был применен режим Fine (рис. 3.105).

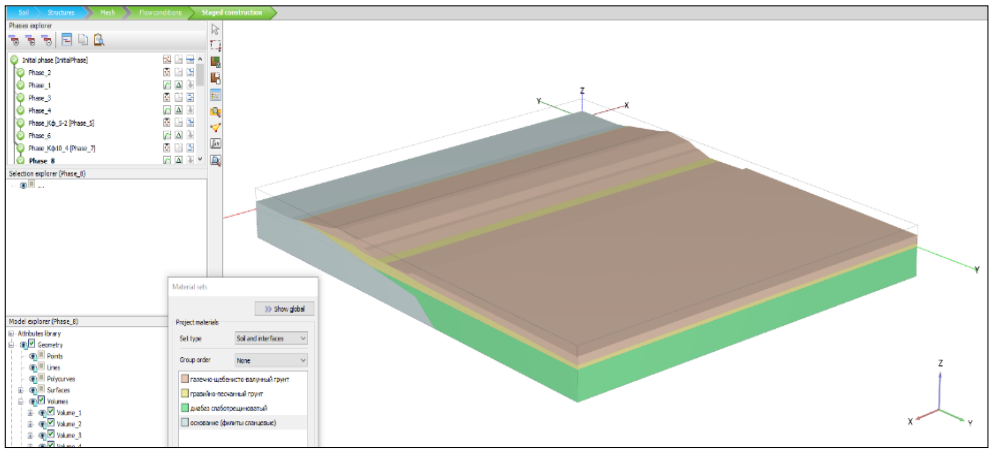


Рис. 3.104. Расчетная 3D-модель «плотина – водохранилище» и подстилающего геологического основания с указанием категорий грунтов и пород

Таблица 3.14

Параметры физико-механических свойств грунтов и пород, принятые для расчетов

Параметры	Грунты, породы,			
	Галечниково-щебенисто-валунный грунт (тело дамбы)	Гравийно-песчаный грунт	Диабаз слаботрещиноватый	Филлиты плотные (основание)
Тип модели	MohrCoulomb	MohrCoulomb	MohrCoulomb	MohrCoulomb
Тип поведения материала	Drained	Drained	Drained	Drained
γ_{unsat} (уд. вес грунта), kN/m³	20,5	18,6	29,0	28,0
γ_{sat} (уд. вес насыщ. грунта), kN/m³	22,5	19,0	29,7	28,8
k_x (коэф. фильтрации), m/day	1,5	1,0	0,01	0,01
k_y (коэф. фильтрации), m/day	1,5	1,0	0,01	0,01
k_z (коэф. фильтрации), m/day	1,5	1,0	0,01	0,01
E (модуль деформ.), kN/m²	17000	25000	97000	95000
ν (коэф. Пуассона)	0,33	0,30	0,23	0,22
c_{ref} (сцепление), kN/m²	7	8	29,7	25
φ (угол внутр. трения), °	29	15	44	36
ψ (угол дилатансии), °	0	0	14	6

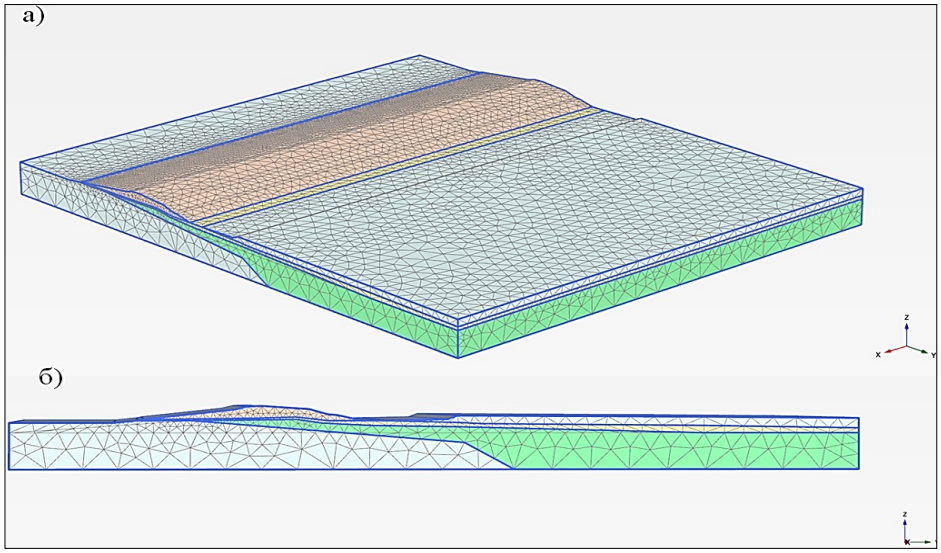


Рис. 3.105. Компьютерная расчетная схема «плотина – водохранилище – геологическое основание»

Основные параметры трехмерной сетки конечных элементов расчетной модели приведены на рис. 3.106, где указано количество элементов, количество узлов, средний размер элементов, а также их максимальные и минимальные размеры.

Основные данные трехмерной сетки конечных элементов: количество элементов (86443), количество узлов (125503), средний размер элементов (9,54 м), а также их максимальные (44,20 м) и минимальные (0,2394 м) размеры.

Исследование модели предусматривало два вида задания граничных условий (нагружения): гравитационное — учет веса грунтов и пород, без воды; и совместное гравитационно-фильтрационное — учет веса грунтов и пород и гидравлических условий.

Далее для генерации порового давления в слоях грунта и внешнего давления воды были заданы гидравлические условия. Для этого были созданы моделируемые уровни воды (на основе данных гидрогеологических определений) и присвоены гидравлические условия объемным кластерам грунта (рис. 3.107–3.108).

Project	
Filename	Селиакка_Ярве_2025_27-01-25_2.p3d
Directory	E:\СЕЛИАККА-ЯРВЕ\Селиакка-Ярве 2025\
Title	Селиакка_Ярве_2025
General	
Model	PLAXIS 3D
Elements	10-Noded
Acceleration	
Gravity	1.0 G (-Z direction)
Earth gravity	9,810 m/s²
Mesh	
Nr of soil elements	86443
Nr of nodes	125503
Average element size	9,540 m
Maximum element size	44,20 m
Minimum element size	0,2394 m
Comments	

Рис. 3.106. Характеристика сетки конечных элементов расчетной модели

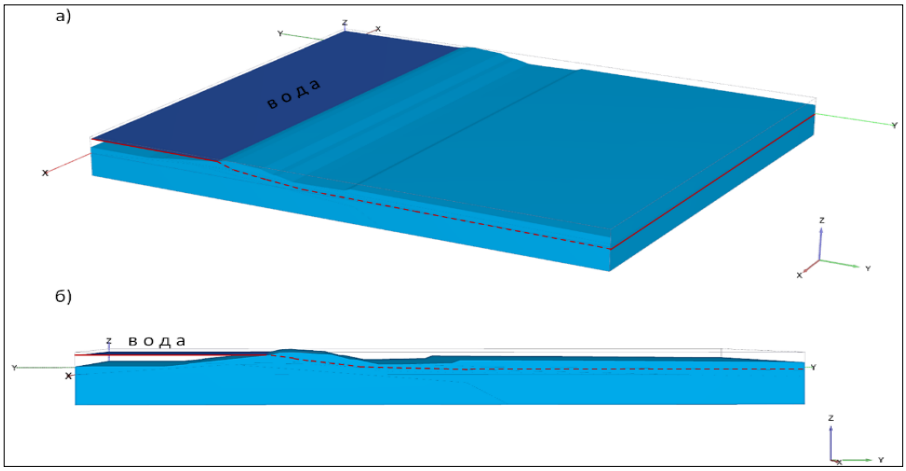


Рис. 3.107. Созданный и смоделированный уровень воды в водохранилище на отметке +198,8 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки уровня воды в пьезометрах — октябрь 2024 г.): *а* — изометрия; *б* — поперечный разрез

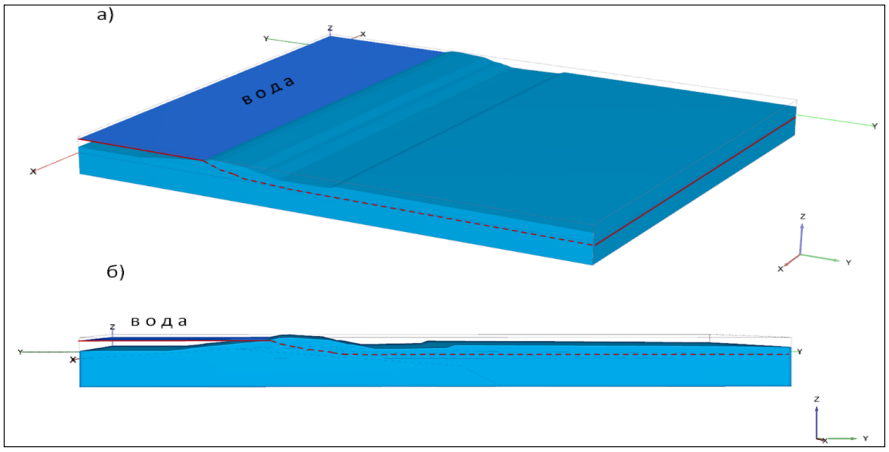


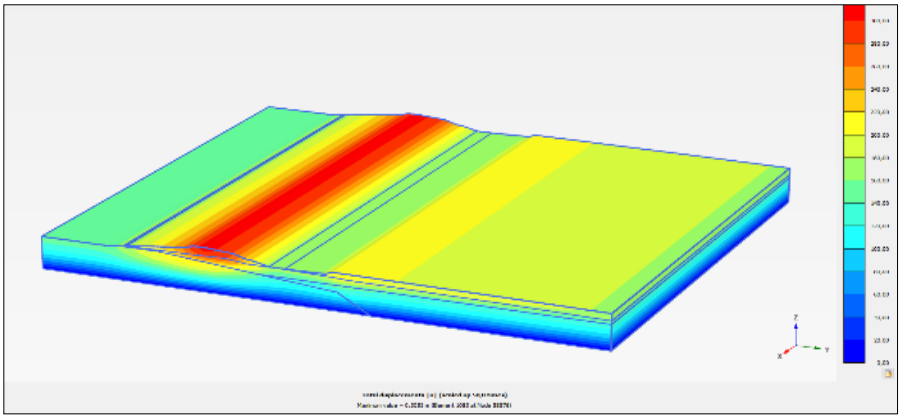
Рис. 3.108. Созданный и смоделированный уровень воды в водохранилище на отметке +198,8 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки уровня воды в пьезометрах — январь 2025 г.): *а* — изометрия; *б* — поперечный разрез

3.3.3. Гидрогеомеханическое моделирование текущего состояния

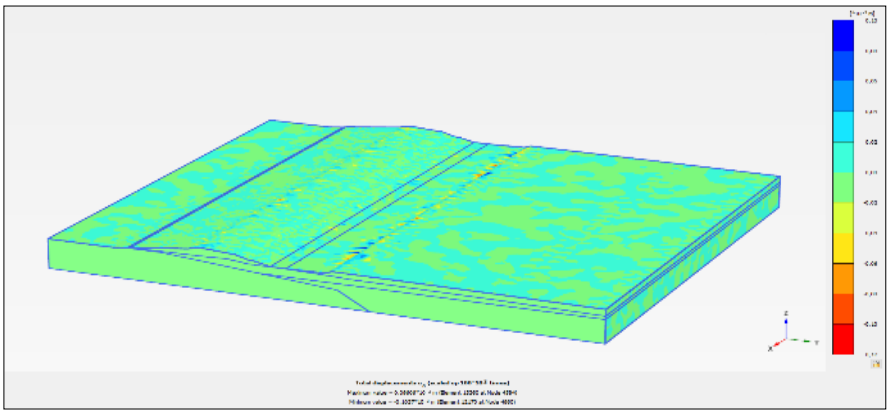
Для прогноза фильтрационного режима, оценки фильтрационной прочности и статической устойчивости грунтов тела плотины выполнены многовариантные расчеты численного моделирования. Для исследования влияния параметрических особенностей использованы значения влияющих параметров, приведенные в табл. 1.14. И далее для рассмотренных расчетных случаев выполнена оценка устойчивости низового откоса плотины.

Для того, чтобы выполнить ситуационное моделирование и проанализировать деформационные и фильтрационные процессы в теле плотины, были произведены параметрические расчеты, которые позволили учесть анизотропную фильтрацию грунтов с направлениями анизотропии, совпадающими с главными осями x, y и z расчетной модели, а также изменения проницаемости грунтов и пород. Гидравлическая проводимость учитывалась через коэффициенты фильтрации K_x, K_y, K_z.

Результаты расчетов обработаны и представлены в виде картин-цветовых палитр значений перемещений и напряжений грунтов, а также активного порового давления (рис. 3.109–3.133).

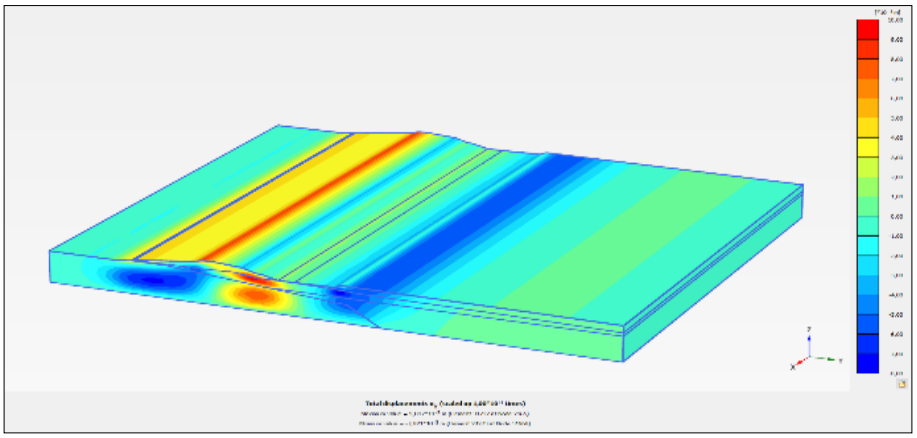


а

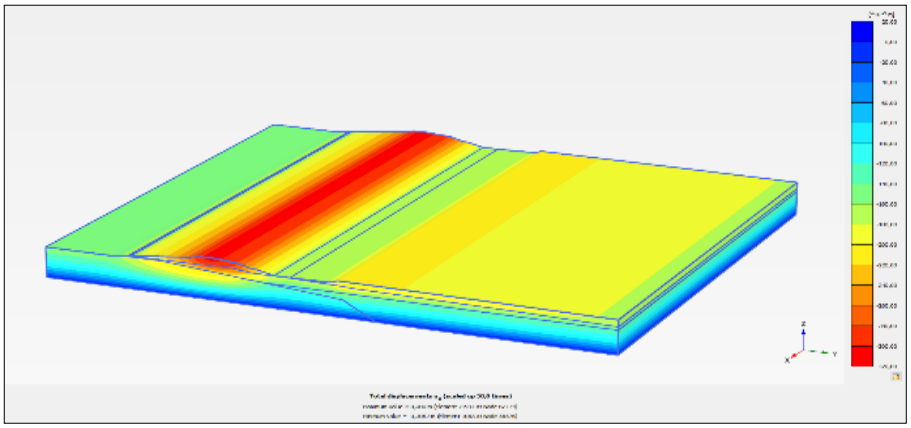


б

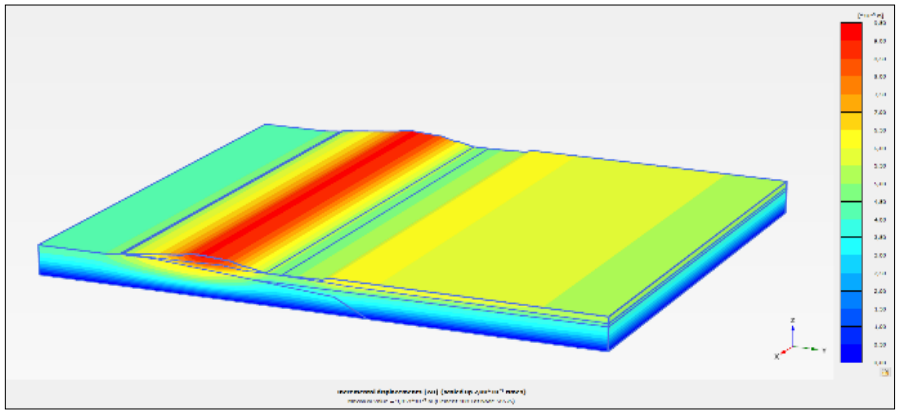
Рис. 3.109. Картины распределения перемещений грунтов плотины и подстилающего основания при исходных геомеханических условиях (гравитационное нагружение) (начало): *а* — общие $U_{общ.}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

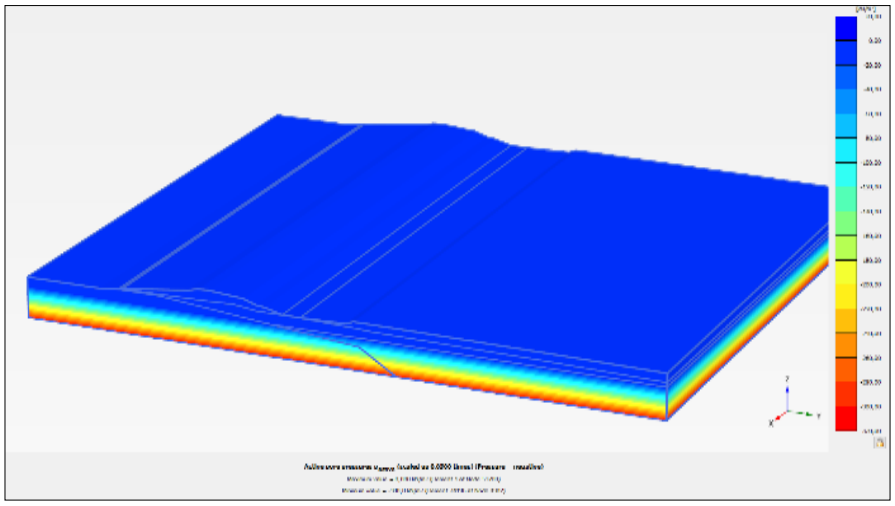


г



д

Рис. 3.109. Картины распределения перемещений грунтов плотины и подстилающего основания при исходных геомеханических условиях (гравитационное нагружение) (продолжение): *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /ΔU/

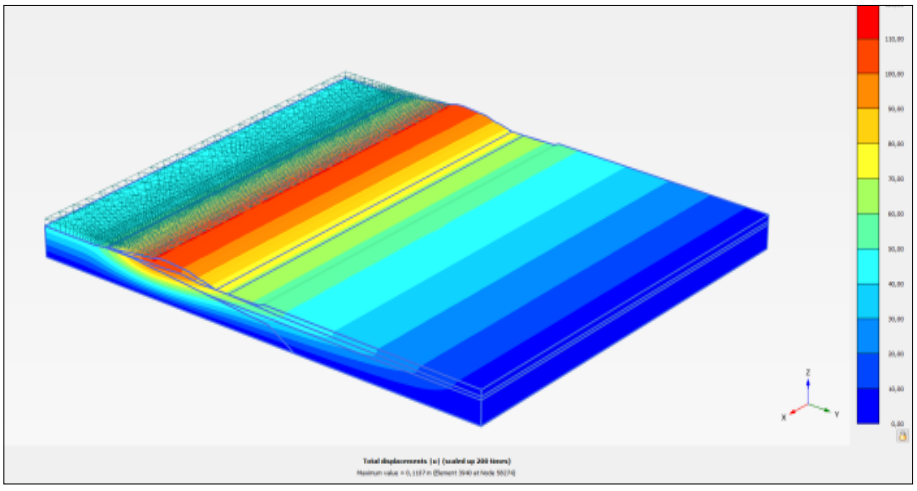


е

Рис. 3.109. Картины распределения перемещений грунтов плотины и подстилающего основания при исходных геомеханических условиях (гравитационное нагружение) (окончание): *е* — активное поровое давление P_{active}

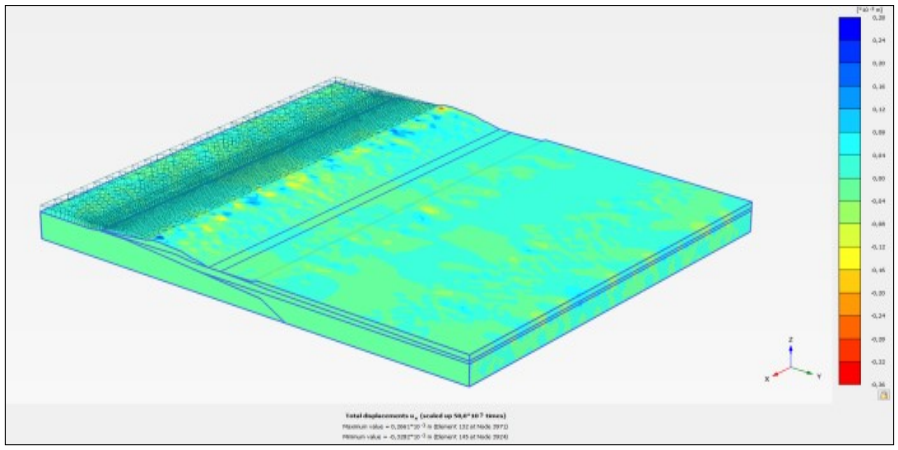
Первоначально были рассмотрены исходные геомеханические условия (гравитационное нагружение: вес грунтов и пород, вода отсутствует) (рис. 3.109).

Затем были заданы гидравлические условия: уровень воды в водохранилище и депрессионная поверхность в теле плотины. Картины перемещений грунтов и пород и гидравлических показателей при уровне воды в водохранилище +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы КГМК (отметки уровня воды в пьезометрах — октябрь 2024 г.) приведены на рис. 3.110.

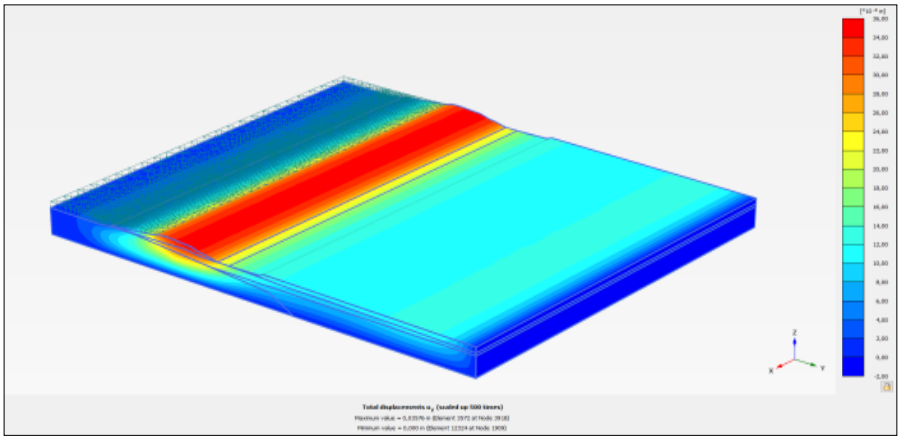


а

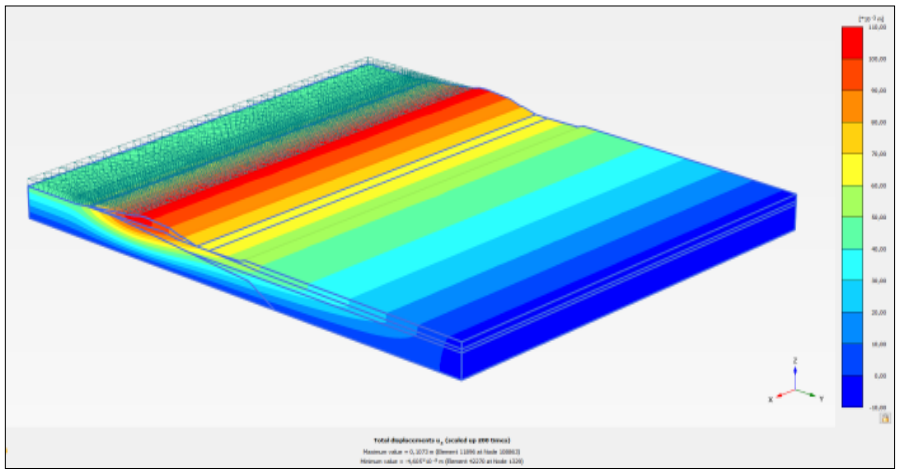
Рис. 3.110. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы КГМК (отметки уровня воды в пьезометрах — октябрь 2024) (начало): *а* — общие $U_{общ}$.



б

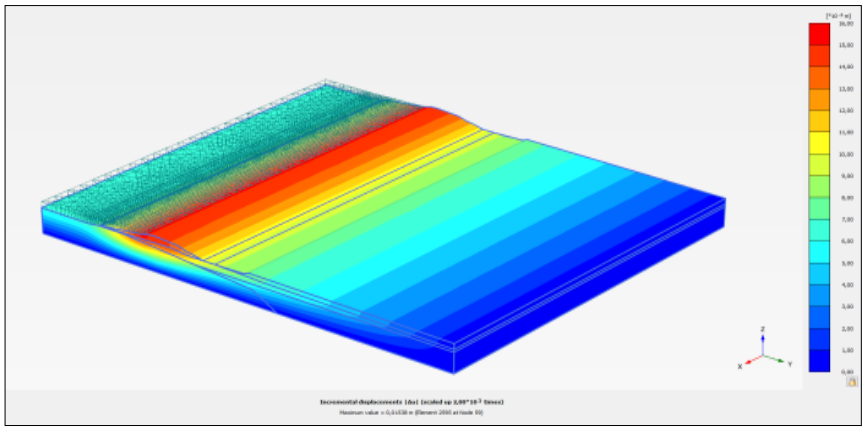


в

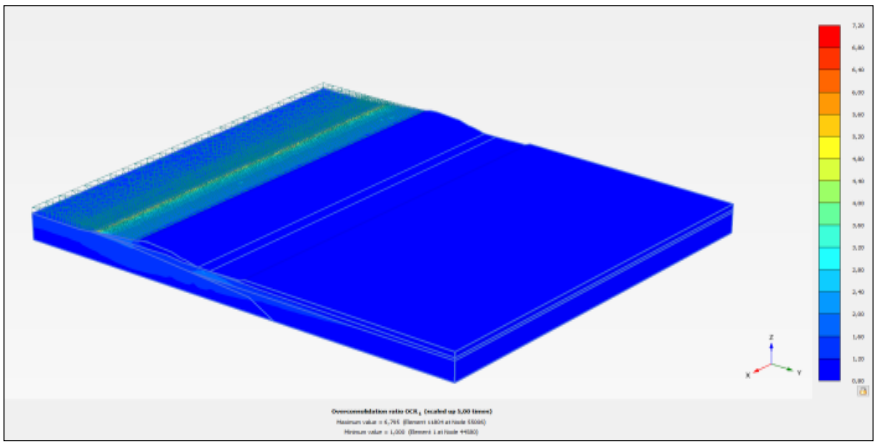


г

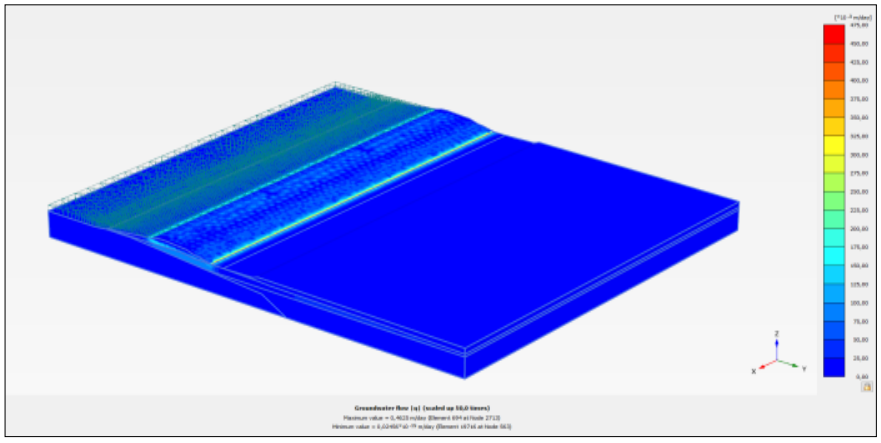
Рис. 3.110. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы КГМК (отметки уровня воды в пьезометрах — октябрь 2024) (продолжение): *б* — субгоризонтальные U_x; *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z



д

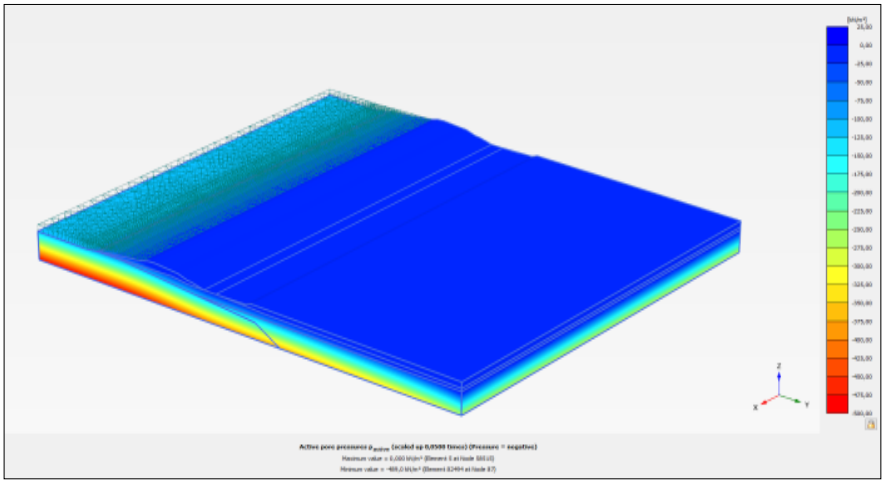


е

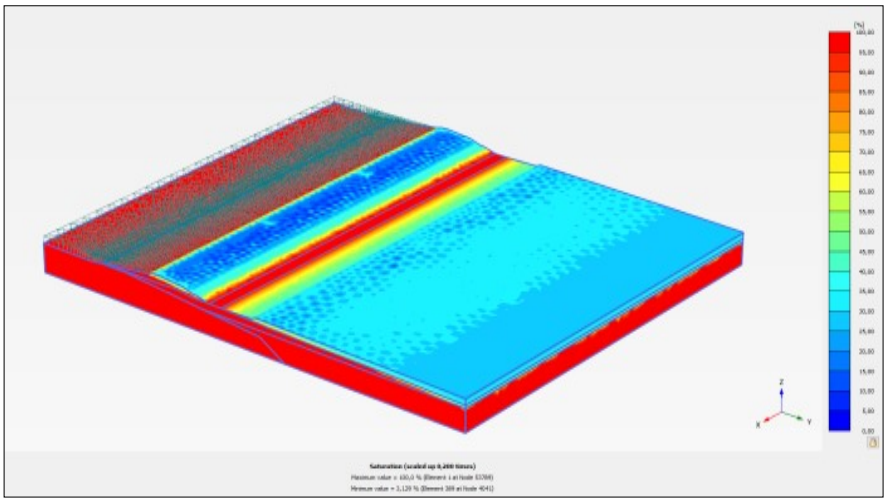


ж

Рис. 3.110. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы КГМК (отметки уровня воды в пьезометрах — октябрь 2024) (продолжение): *д* — приращения перемещений /Δ*U*/; *е* — коэффициент переуплотнения ОС; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через плотину Craund water flow /*q*/



з

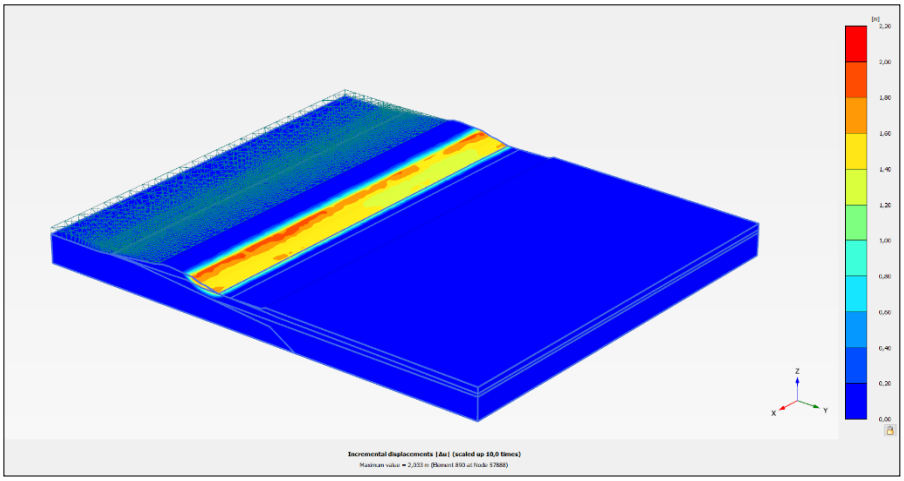


и

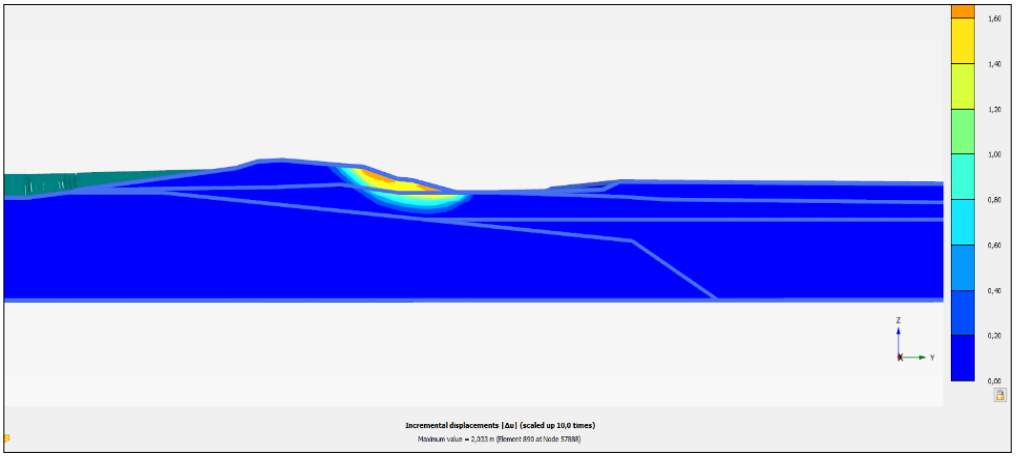
Рис. 3.110. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы КГМК (отметки уровня воды в пьезометрах — октябрь 2024) (окончание): *з* — активное поровое давление Pactive; *и* — водопроницаемость Saturation

Для данного варианта расчета определен коэффициент надежности $K_{\text{над.}}$. Для определения значений показателя надежности дамбы $K_{\text{над.}}$ применен расчет Safety (безопасность, надежность, устойчивость, несущая способность) (рис. 3.111) (см. раздел 3.1.5, формулы 3.3 и 3.4).

Интегральное соотношение $\sum Msf$ используется для определения значений показателя надежности грунтового сооружения на текущем этапе расчета. Для рассмотренного случая $\sum Msf$ составляет 2,587 (рис. 3.112).



а



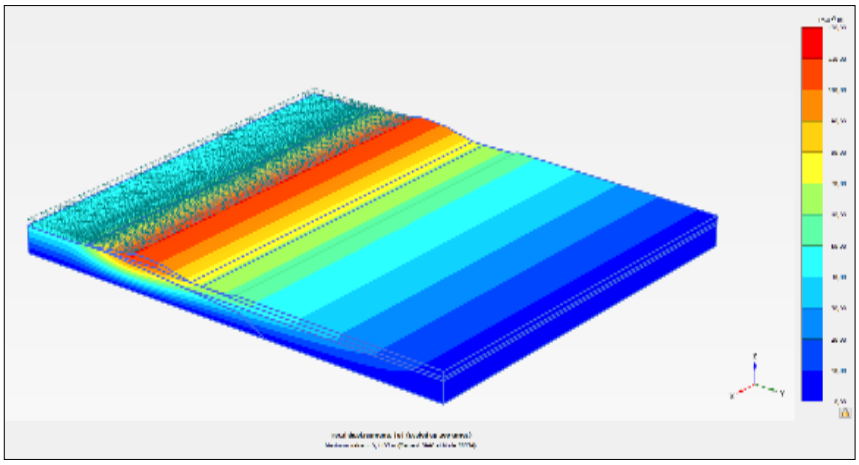
б

Рис. 3.111. Картины приращения перемещений грунтов и пород /Δ*U*/: *а* — изометрия; *б* — поперечный разрез

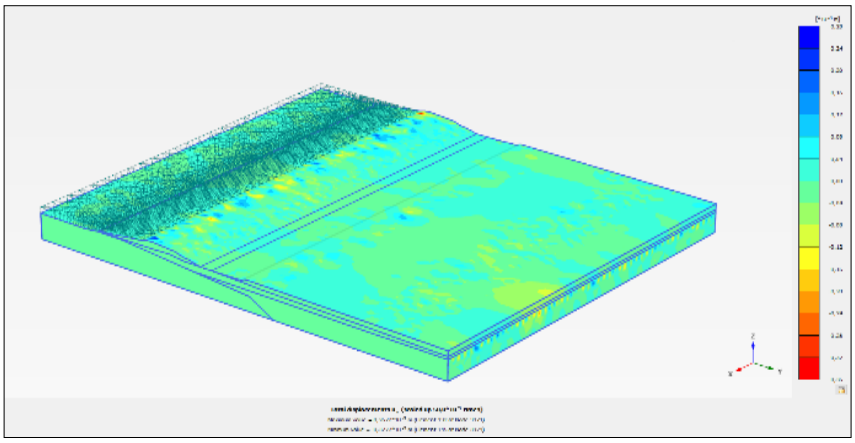
ΣM Weight	1,000
ΣM sf	2,587
End time	0,000
ΣM Area	1,000
ΣM Stage	0,000

Рис. 3.112. Значение $K_{над.}$ для рассмотренного расчетного случая (октябрь 2024 г.)

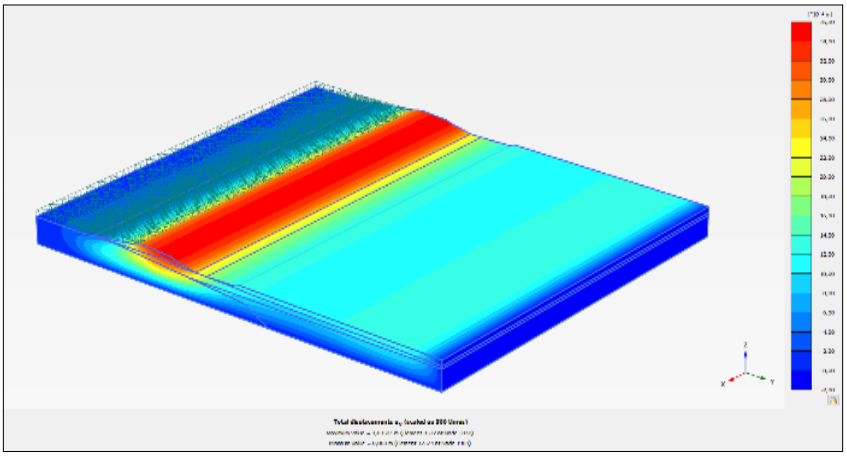
Далее приведены картины перемещений и гидравлических показателей при уровне воды в +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы КГМК (отметки уровня воды в пьезометрах по состоянию — январь 2025 г.) (рис. 3.113).



а

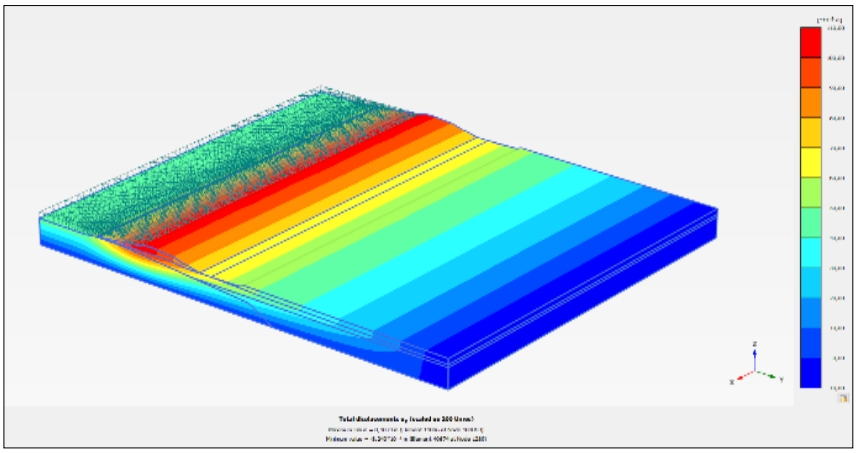


б

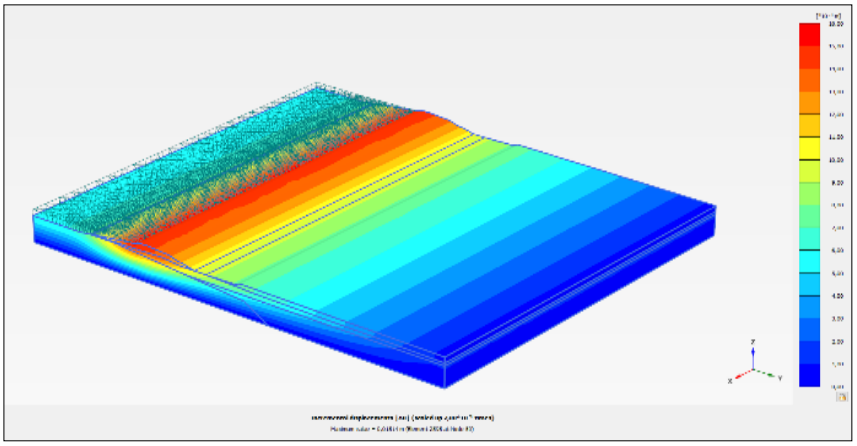


в

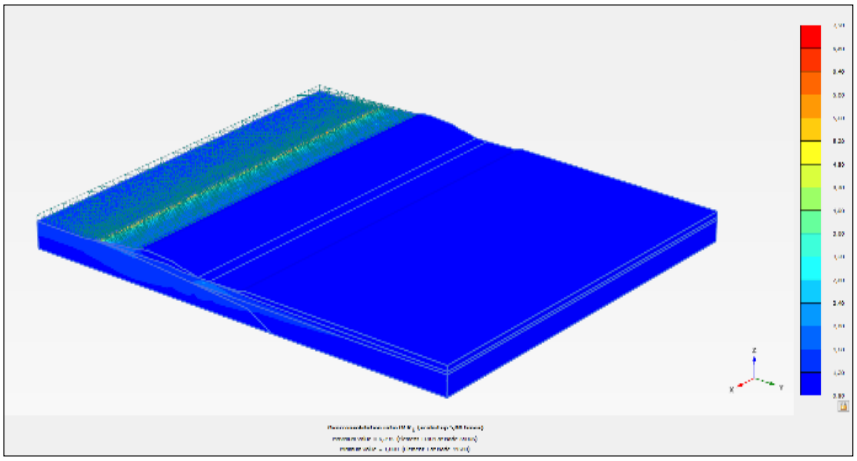
Рис. 3.113. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов дамбы при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (начало): *а* — общие $U_{общ.}$; *б* — субгоризонтальные U_x; *в* — субгоризонтальные U_y



г

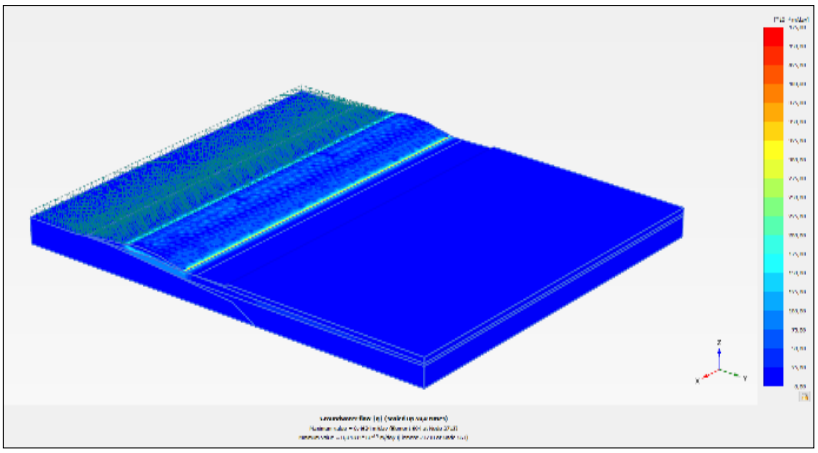


д

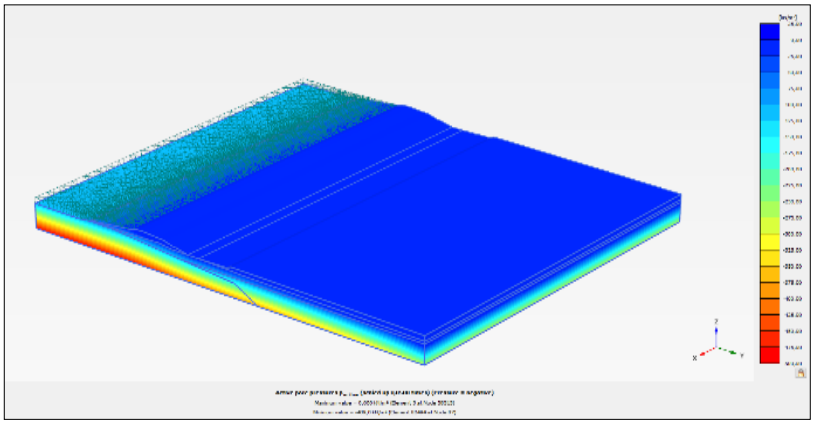


е

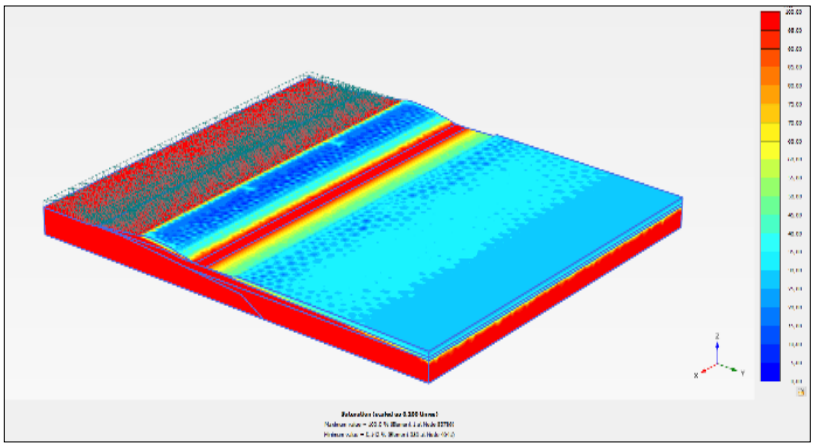
Рис. 3.113. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов дамбы при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /Δ*U*/; *е* — коэффициент переуплотнения ОС



ж



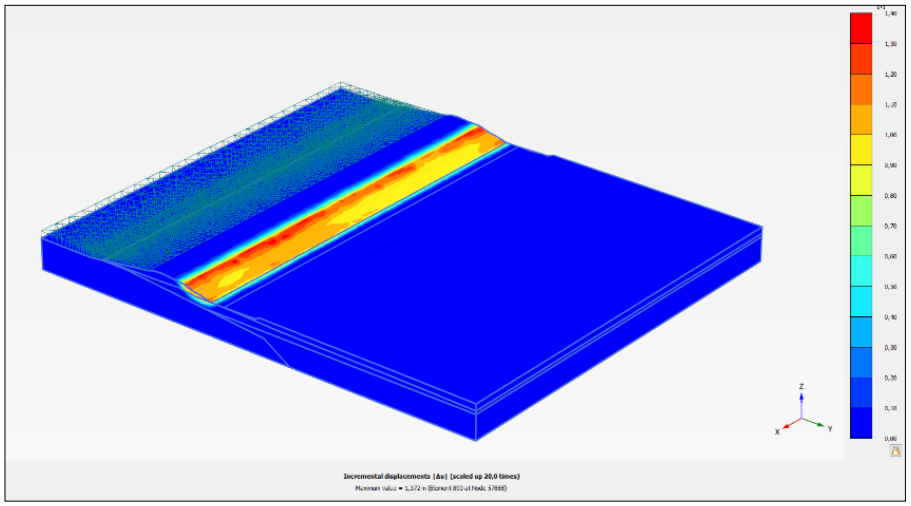
з



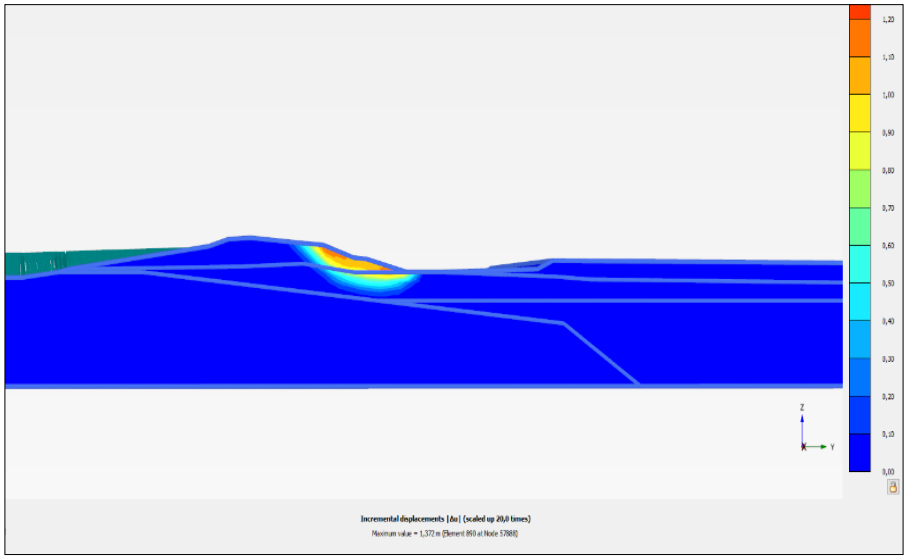
и

Рис. 3.113. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов дамбы при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (окончание): *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через плотину Craund water flow /*q*/; *з* — активное поровое давление Pactive; *и* — водопроницаемость Saturation

Для данного варианта расчета также определен коэффициент надежности $K_{над.}$. Для определения значений показателя надежности дамбы $K_{над.}$ применен расчет Safety (безопасность, надежность, устойчивость, несущая способность) (рис. 3.114).



а



б

Рис. 3.114. Картины приращения перемещений грунтов и пород/ΔU/: *а* — изометрия; *б* — поперечный разрез

Для определения значений показателя надежности грунтового сооружения используется интегральное соотношение $\sum Msf$. Для рассмотренного случая $\sum Msf$ составляет 2,598 (рис. 3.115).

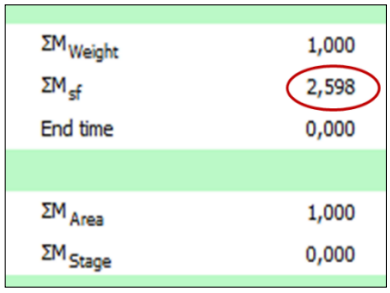


Рис. 3.115. Значение $K_{над.}$ для рассмотренного расчетного случая (январь 2025 г.)

Для определения значений коэффициента надежности $K_{над.}$ плотины применен расчет Safety (безопасность, надежность, устойчивость, несущая способность) [189]. Для вычисления этого показателя использован метод phi-reduction (снижение параметров прочности грунта) — прочностные характеристики грунта tan φ и c последовательно уменьшаются до тех пор, пока не происходит разрушение сооружения (см. раздел 3.1.5, формулы (3.3) и (3.4)).

Компьютерным 3D-моделированием были определены расчетные значения коэффициента надежности $K_{над.}$ для плотины при уровнях в озере на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы КГМК (отметки пьезометров по состоянию октябрь 2024 г. и январь 2025 г.).

Согласно СП-39.13330.2012 «Плотины из грунтовых материалов», актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84, раздел 9.11 [167] устойчивость откоса плотины (дамбы) должна быть проверена по возможным поверхностям сдвига с нахождением наиболее опасной призмы обрушения, характеризуемой минимальным отношением обобщенных предельных реактивных сил сопротивления к активным сдвигающим силам (см. раздел 3.2.7, формулы (3.5) и (3.6), табл. 3.12, 3.13).

Выполненные расчетные исследования устойчивости плотины от обрушения при отметке гребня +201,7 м, показали, что устойчивость в целом обеспечивается.

$K_{над.}$ при многовариантных расчетах (изменялись коэффициенты фильтрации грунтов тела плотины и грунтов основания) превышает 2,5 (при уровне воды в озере +198,8 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки пьезометров — октябрь 2024 г. и январь 2025 г.). Полученные расчетные значения коэффициента надежности значительно превышают критериальное значение для сооружения I класса 1,25, что позволяет оценить текущее состояние плотины как устойчивое.

3.3.4. Гидрогеомеханическое моделирование прогнозного состояния

Гидрогеомеханическое моделирование прогнозного состояния плотины выполнено в вариантах расчетов с изменением гидравлических показателей (коэффициентов фильтрации для грунтов плотины и пород подстилающего основания) (табл. 3.15). В вариантах расчетов моделировалось изменение коэффициентов фильтрации грунтов и пород от 0,1 до 1000 м/сут.

На рис. 3.116 приведены картины перемещений и гидравлических показателей грунтов и пород при уровне воды в водохранилище +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) для расчетного варианта № 1.

Далее приведены картины перемещений и гидравлических показателей при уровне воды в водохранилище +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) для варианта № 2 (рис. 3.117).

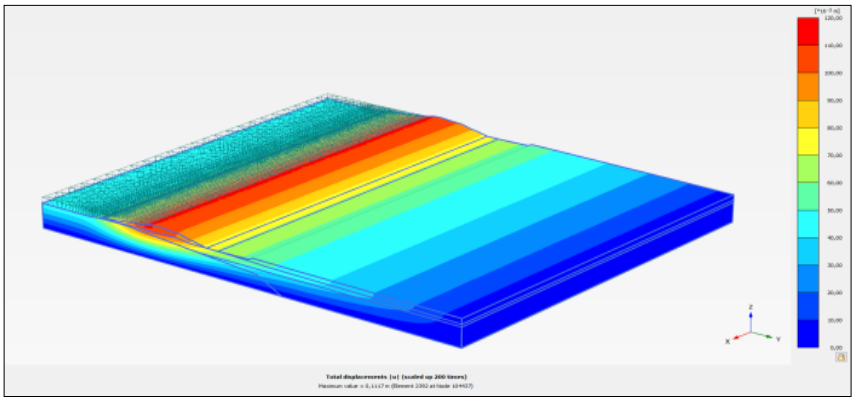
Таблица 3.15

Гидрогеомеханическое моделирование прогнозного состояния плотины в вариантах расчетов с изменением гидравлических показателей

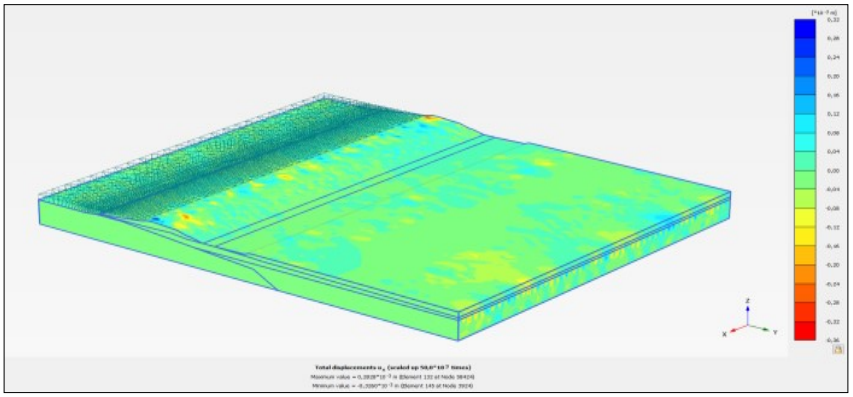
Варианты	Грунты, породы	γ_{unsat}	γ_{sat}	E (модуль деформ.)	ν	c_{ref}	φ	ψ	k_x	k_y	k_z
1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*
№	Наименование	kN/m³	kN/m³	kN/m²	–	kN/m²	°	°	kN/m³	kN/m³	kN/m³
1	Грунты тела плотины	20,5	22,5	17000	0,33	7	29	0	5	5	5
	Гравийно-песчаный грунт	18,6	19,0	25000	0,30	8	15	0	2	2	2
	Диабаз трещиноватый	29,0	29,7	97000	0,23	29,7	44	14	0,01	0,10	0,01
	Филлиты плотные	28,0	28,8	95000	0,22	25	36	6	0,01	0,10	0,01
2	Грунты тела плотины	20,5	22,5	17000	0,33	7	29	0	10	10	10
	Гравийно-песчаный грунт	18,6	19,0	25000	0,30	8	15	0	4	4	4
	Диабаз трещиноватый	29,0	29,7	97000	0,23	29,7	44	14	0,01	0,10	0,01
	Филлиты плотные	28,0	28,8	95000	0,22	25	36	6	0,01	0,10	0,01
3	Грунты тела плотины	20,5	22,5	17000	0,33	7	29	0	20	20	20
	Гравийно-песчаный грунт	18,6	19,0	25000	0,30	8	15	0	8	8	8
	Диабаз трещиноватый	29,0	29,7	97000	0,23	29,7	44	14	0,01	0,10	0,01
	Филлиты плотные	28,0	28,8	95000	0,22	25	36	6	0,01	0,10	0,01
4	Грунты тела плотины	20,5	22,5	17000	0,33	7	29	0	100	100	100
	Гравийно-песчаный грунт	18,6	19,0	25000	0,30	8	15	0	20	20	20
	Диабаз трещиноватый	29,0	29,7	97000	0,23	29,7	44	14	0,01	0,01	0,01
	Филлиты плотные	28,0	28,8	95000	0,22	25	36	6	0,01	0,01	0,01
5	Грунты тела плотины	20,5	22,5	17000	0,33	7	29	0	1,5	1,5	1,5
	Гравийно-песчаный грунт	18,6	19,0	25000	0,30	8	15	0	1,5	1,5	1,5
	Диабаз трещиноватый	29,0	29,7	97000	0,23	29,7	44	14	1,5	1,5	1,5
	Филлиты плотные	28,0	28,8	95000	0,22	25	36	6	1,5	1,5	1,5
6	Грунты тела плотины	20,5	22,5	17000	0,33	7	29	0	15	15	15
	Гравийно-песчаный грунт	18,6	19,0	25000	0,30	8	15	0	15	15	15
	Диабаз трещиноватый	29,0	29,7	97000	0,23	29,7	44	14	15	15	15
	Филлиты плотные	28,0	28,8	95000	0,22	25	36	6	15	15	15
7	Грунты тела плотины	20,5	22,5	17000	0,33	7	29	0	75	75	75
	Гравийно-песчаный грунт	18,6	19,0	25000	0,30	8	15	0	75	75	75
	Диабаз трещиноватый	29,0	29,7	97000	0,23	29,7	44	14	75	75	75
	Филлиты плотные	28,0	28,8	95000	0,22	25	36	6	75	75	75
8	Грунты тела плотины	20,5	22,5	17000	0,33	7	29	0	150	150	150
	Гравийно-песчаный грунт	18,6	19,0	25000	0,30	8	15	0	150	150	150
	Диабаз трещиноватый	29,0	29,7	97000	0,23	29,7	44	14	150	150	150
	Филлиты плотные	28,0	28,8	95000	0,22	25	36	6	150	150	150
9	Грунты тела плотины	20,5	22,5	17000	0,33	7	29		300	300	300
	Гравийно-песчаный грунт	18,6	19,0	25000	0,30	8	15		300	300	300
	Диабаз трещиноватый	29,0	29,7	97000	0,23	29,7	44		300	300	300
	Филлиты плотные	28,0	28,8	95000	0,22	25	36		300	300	300
10	Грунты тела плотины	20,5	22,5	17000	0,33	7	29	0	500	500	500
	Гравийно-песчаный грунт	18,6	19,0	25000	0,30	8	15	0	500	500	500
	Диабаз трещиноватый	29,0	29,7	97000	0,23	29,7	44	14	500	500	500
	Филлиты плотные	28,0	28,8	95000	0,22	25	36	6	500	500	500
11	Грунты тела плотины	20,5	22,5	17000	0,33	7	29	0	750	750	750
	Гравийно-песчаный грунт	18,6	19,0	25000	0,30	8	15	0	750	750	750
	Диабаз трещиноватый	29,0	29,7	97000	0,23	29,7	44	14	750	750	750
	Филлиты плотные	28,0	28,8	95000	0,22	25	36	6	750	750	750
12	Грунты тела плотины	20,5	22,5	17000	0,33	7	29	0	1000	1000	1000
	Гравийно-песчаный грунт	18,6	19,0	25000	0,30	8	15	0	1000	1000	1000
	Диабаз трещиноватый	29,0	29,7	97000	0,23	29,7	44	14	1000	1000	1000
	Филлиты плотные	28,0	28,8	95000	0,22	25	36	6	1000	1000	1000
13	Грунты тела плотины	20,5	22,5	17000	0,33	7	29	0	1,5	1,5	1,5
	Гравийно-песчаный грунт	18,6	19,0	25000	0,30	8	15	0	1,5	1,5	1,5
	Диабаз трещиноватый	29,0	29,7	97000	0,23	29,7	44	14	0,1	0,1	0,1
	Филлиты плотные	28,0	28,8	95000	0,22	25	36	6	0,1	0,1	0,1

Окончание табл. 3.15

1	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*	*11*	*12*
14	Грунты тела плотины	20,5	22,5	17000	0,33	7	29	0	150	150	150
	Гравийно-песчаный грунт	18,6	19,0	25000	0,30	8	15	0	150	150	150
	Диабаз трещиноватый	29,0	29,7	97000	0,23	29,7	44	14	0,1	0,1	0,1
	Филлиты плотные	28,0	28,8	95000	0,22	25	36	6	0,1	0,1	0,1
15	Грунты тела плотины	20,5	22,5	17000	0,33	7	29	0	300	300	300
	Гравийно-песчаный грунт	18,6	19,0	25000	0,30	8	15	0	300	300	300
	Диабаз трещиноватый	29,0	29,7	97000	0,23	29,7	44	14	0,1	0,1	0,1
	Филлиты плотные	28,0	28,8	95000	0,22	25	36	6	0,1	0,1	0,1
16	Грунты тела плотины	20,5	22,5	17000	0,33	7	29	0	500	500	500
	Гравийно-песчаный грунт	18,6	19,0	25000	0,30	8	15	0	500	500	500
	Диабаз трещиноватый	29,0	29,7	97000	0,23	29,7	44	14	0,1	0,1	0,1
	Филлиты плотные	28,0	28,8	95000	0,22	25	36	6	0,1	0,1	0,1
17	Грунты тела плотины	20,5	22,5	17000	0,33	7	29	0	750	750	750
	Гравийно-песчаный грунт	18,6	19,0	25000	0,30	8	15	0	750	750	750
	Диабаз трещиноватый	29,0	29,7	97000	0,23	29,7	44	14	0,1	0,1	0,1
	Филлиты плотные	28,0	28,8	95000	0,22	25	36	6	0,1	0,1	0,1
18	Грунты тела плотины	20,5	22,5	17000	0,33	7	29	0	1000	1000	1000
	Гравийно-песчаный грунт	18,6	19,0	25000	0,30	8	15	0	1000	1000	1000
	Диабаз трещиноватый	29,0	29,7	97000	0,23	29,7	44	14	0,1	0,1	0,1
	Филлиты плотные	28,0	28,8	95000	0,22	25	36	6	0,1	0,1	0,1

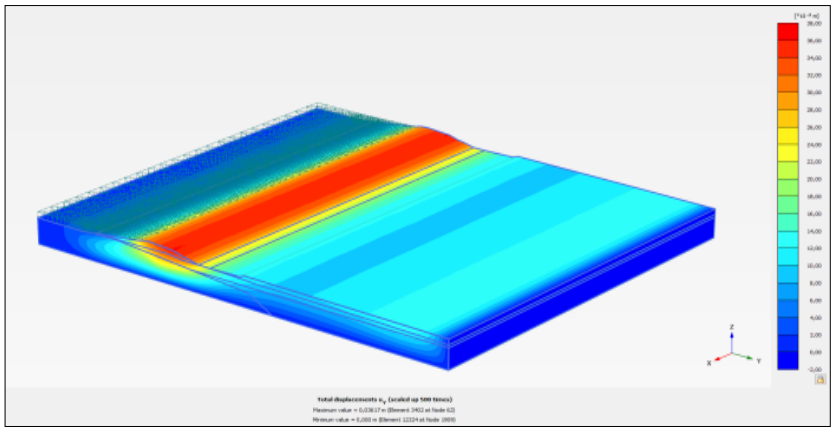


а

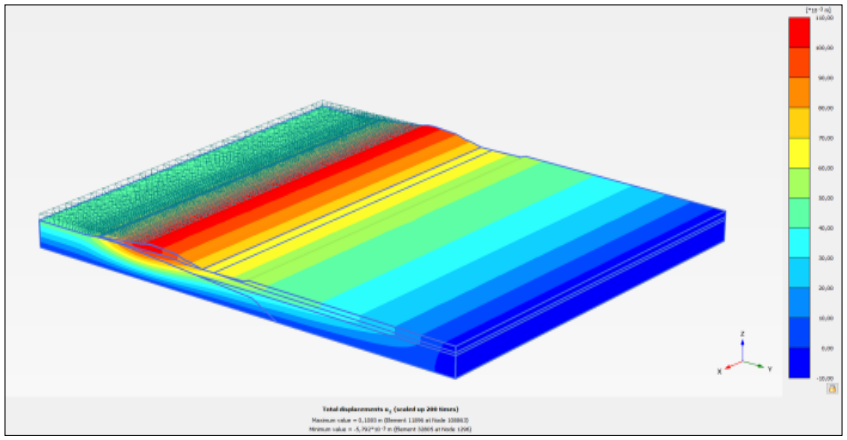


б

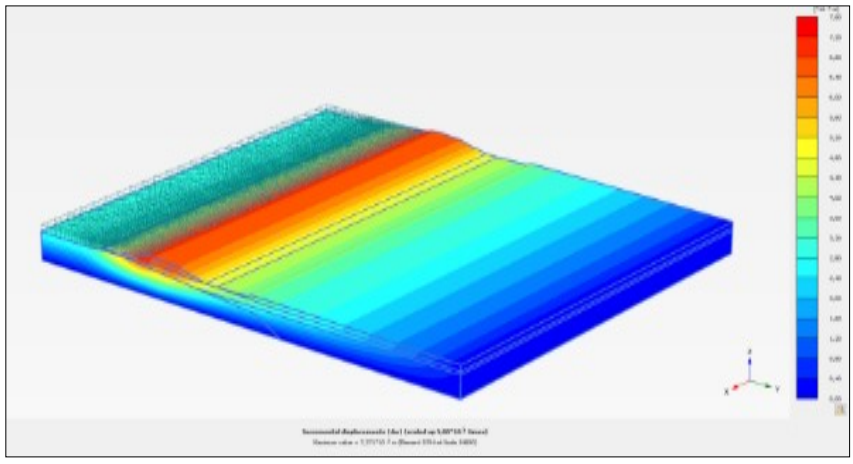
Рис. 3.116. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (начало): *а* — общие $U_{общ.}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

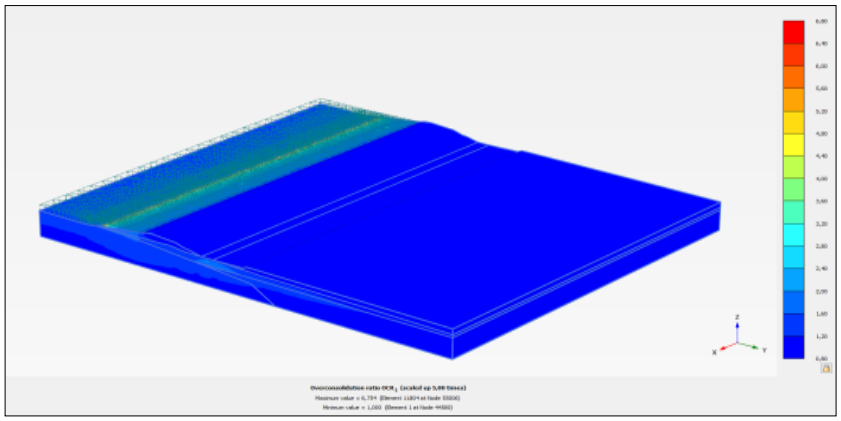


г

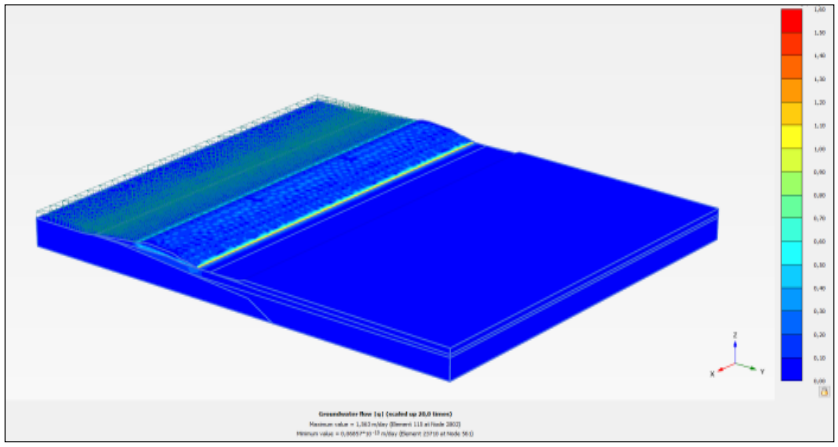


д

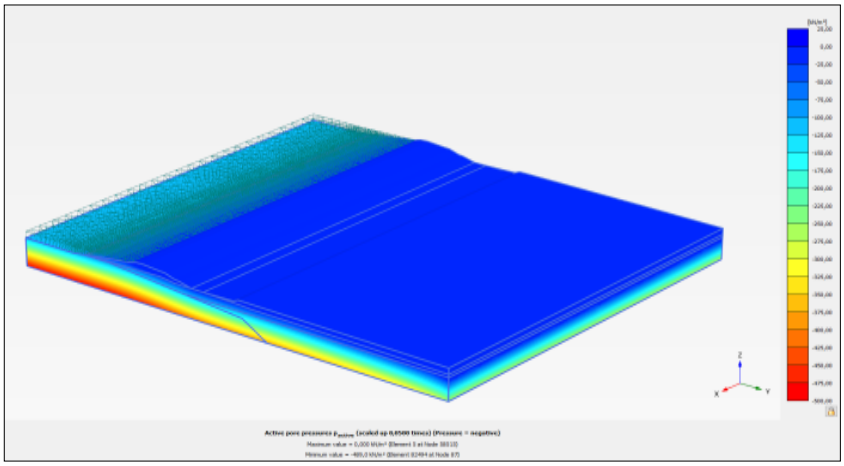
Рис. 3.116. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /ΔU/



е

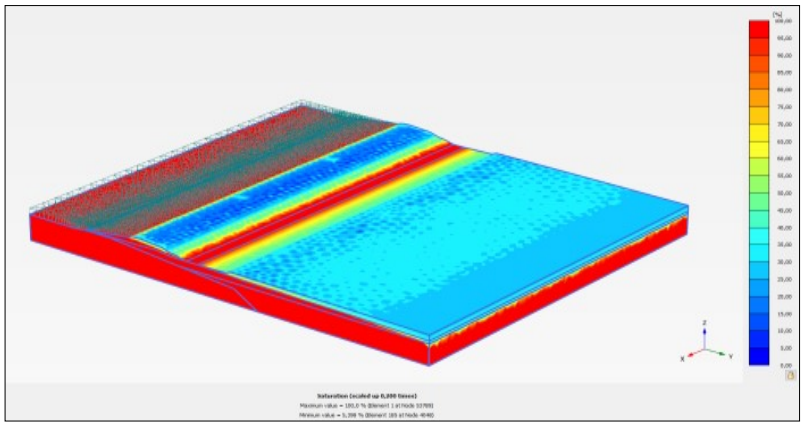


ж



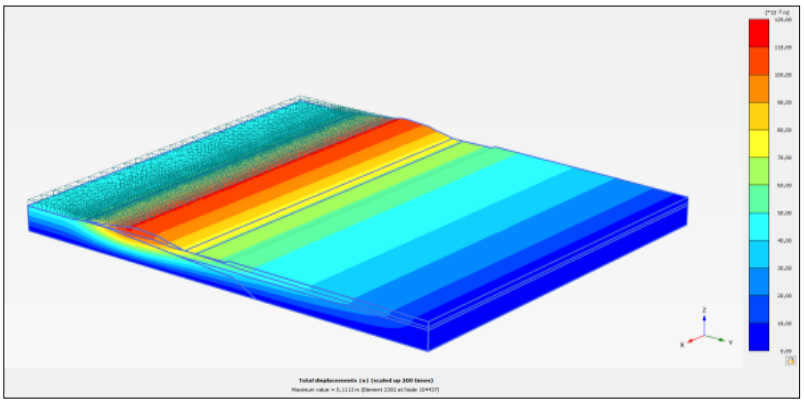
з

Рис. 3.116. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *е* — коэффициент переуплотнения ОС; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через плотину Craund water flow /*q*/; *з* — активное поровое давление Pactive

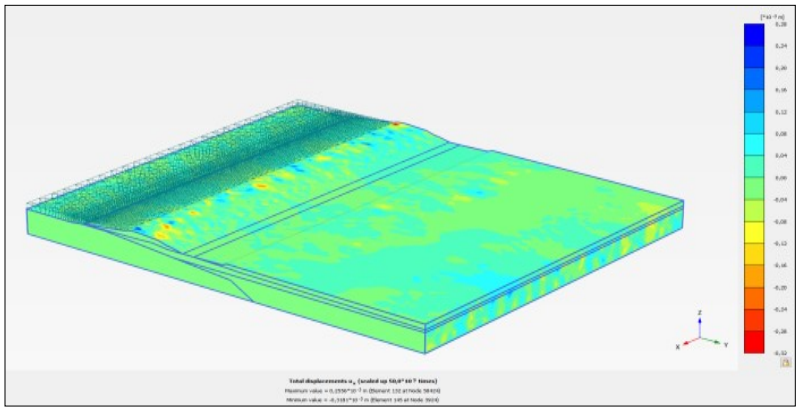


и

Рис. 3.116. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (окончание): *и* — водопроницаемость Saturation (расчетный вариант № 1)

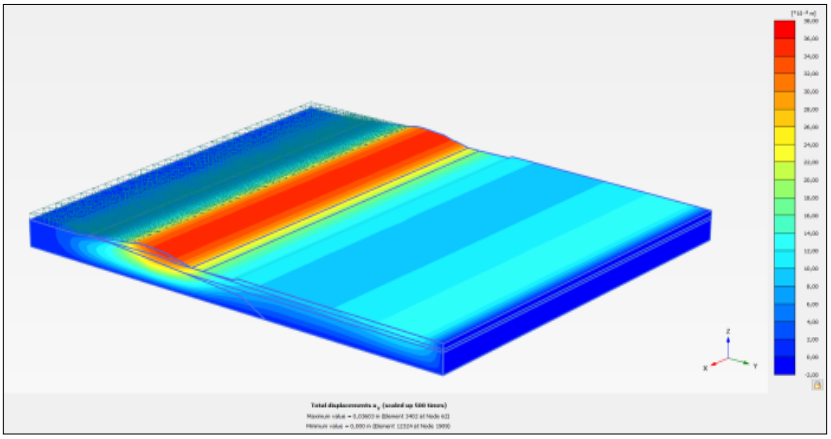


а

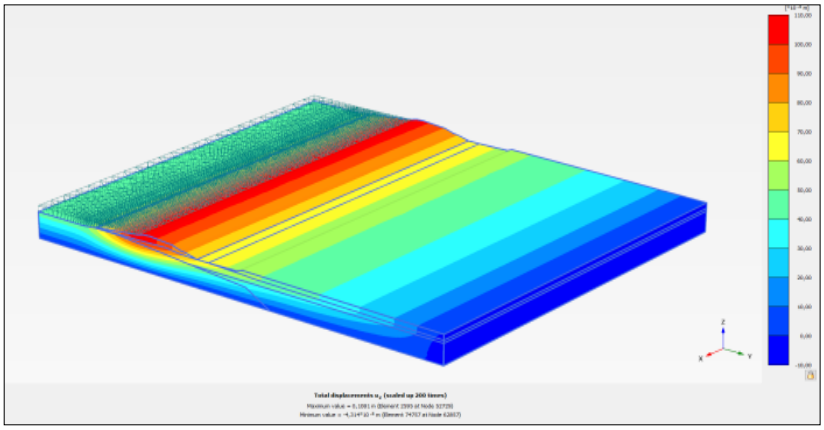


б

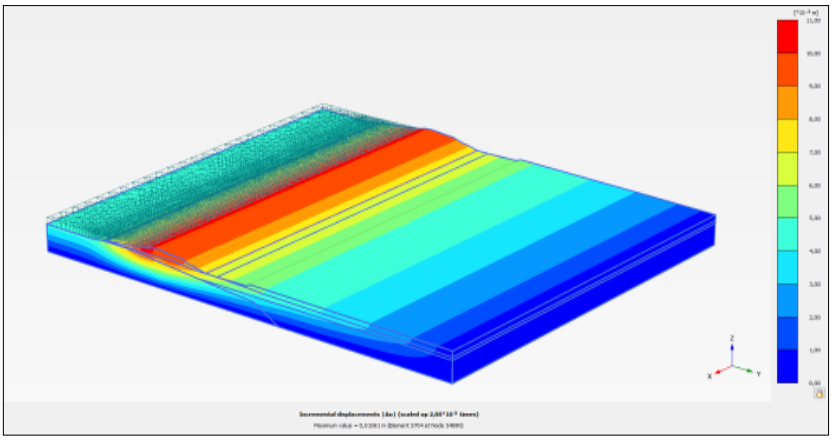
Рис. 3.117. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки пьезометров — январь 2025 г.) (начало): *а* — общие $U_{общ.}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

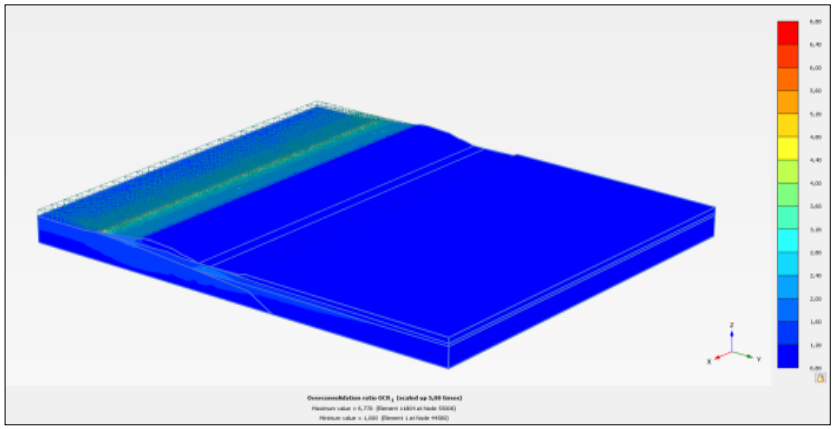


г

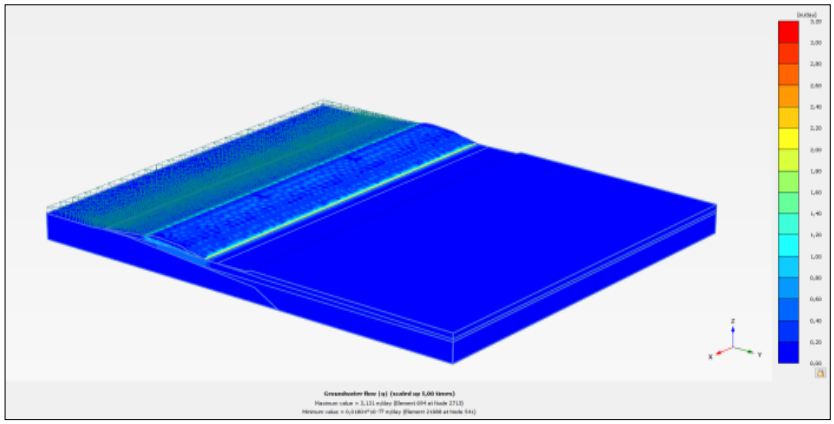


д

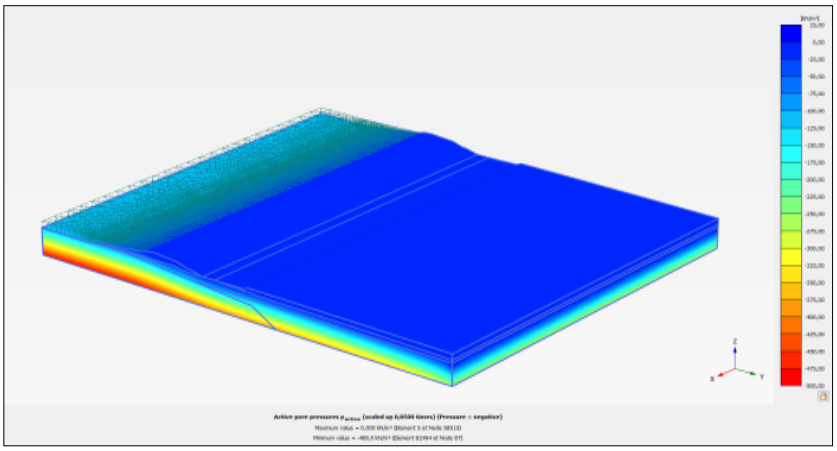
Рис. 3.117. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки пьезометров — январь 2025 г.) (продолжение): *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /Δ*U*/



е

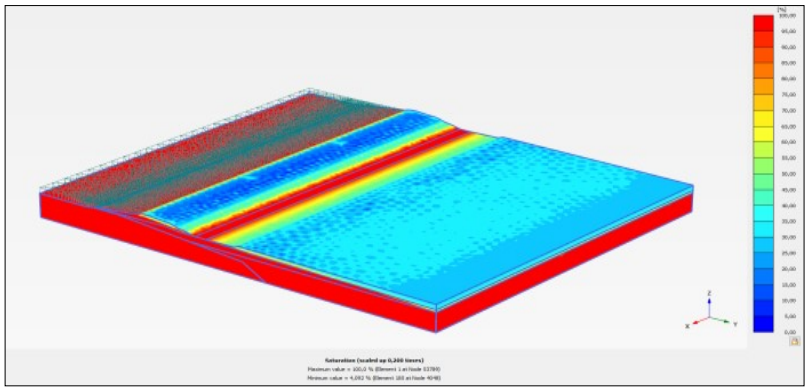


ж



з

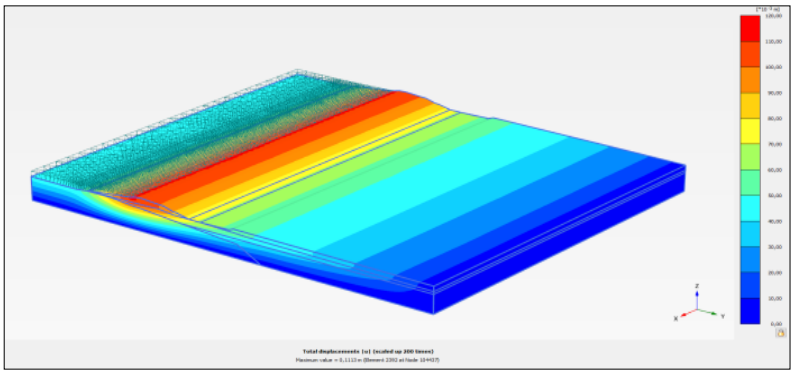
Рис. 3.117. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки пьезометров — январь 2025 г.) (продолжение): *е* — коэффициент переуплотнения ОС; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через плотину Craund water flow /*q*/; *з* — активное поровое давление Pactive



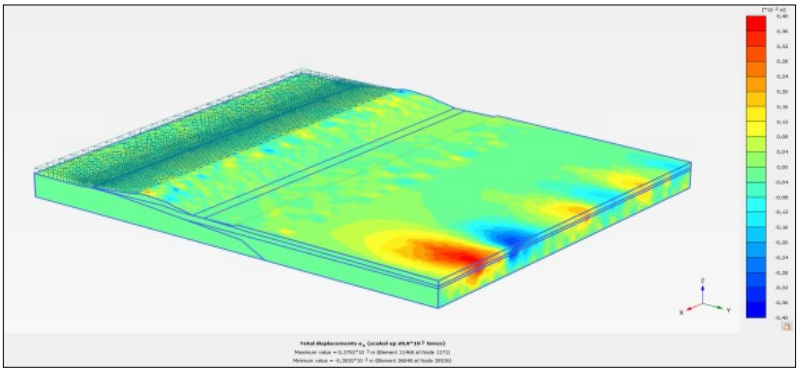
и

Рис. 3.117. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки пьезометров — январь 2025 г.) (окончание): *и* — водопроницаемость Saturation (расчетный вариант № 2)

Далее приведены картины перемещений и гидравлических показателей при уровне воды в водохранилище +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) для варианта № 3 (рис. 3.118).

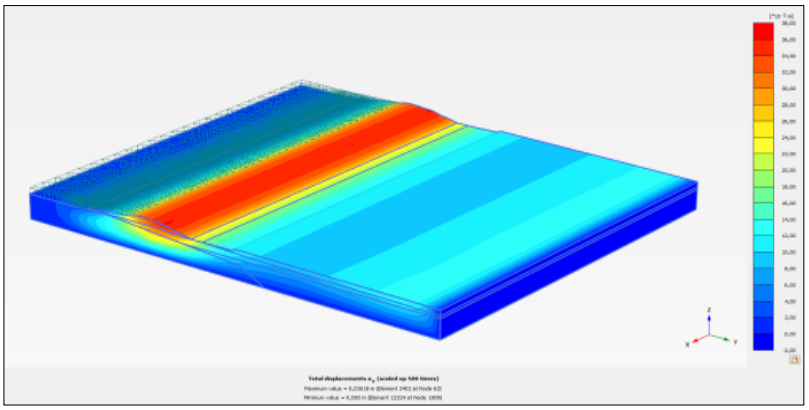


а

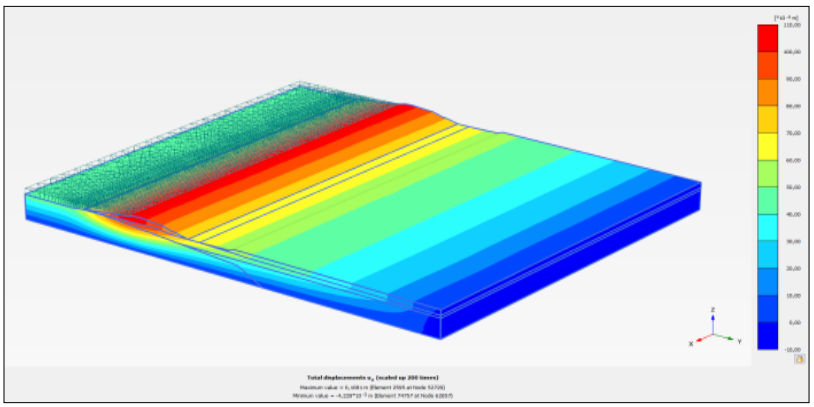


б

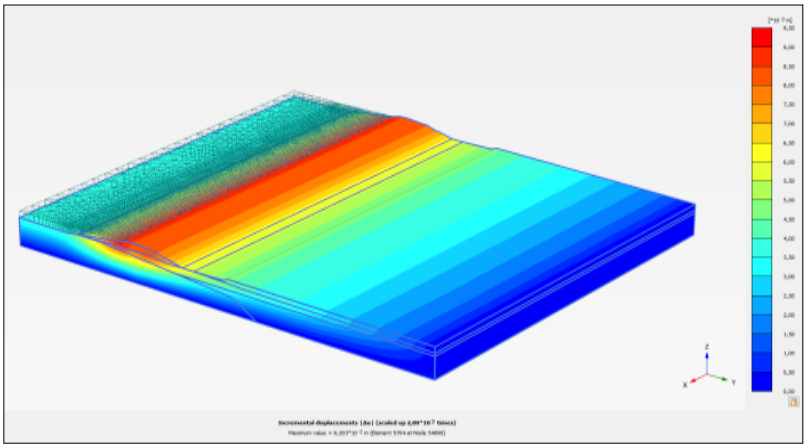
Рис. 3.118. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (начало): *а* — общие $U_{общ}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

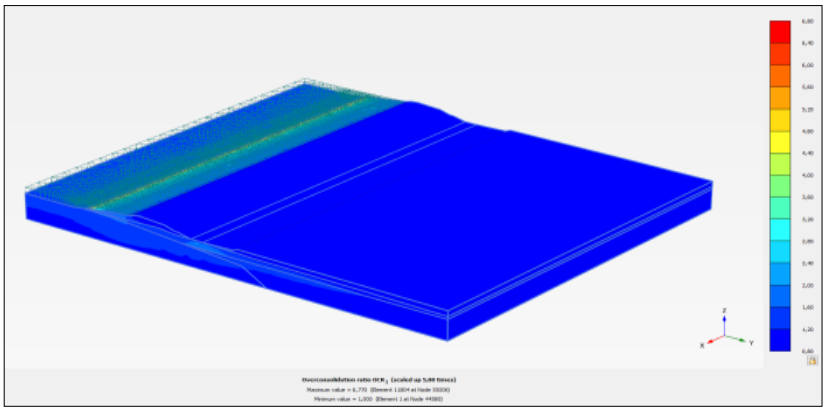


г

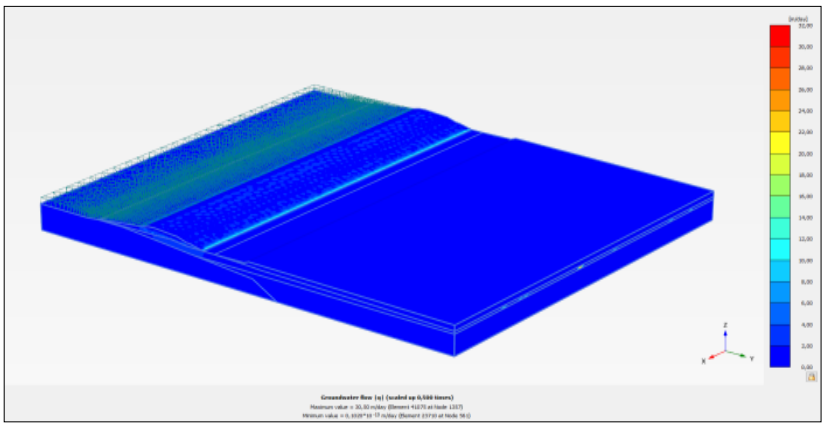


д

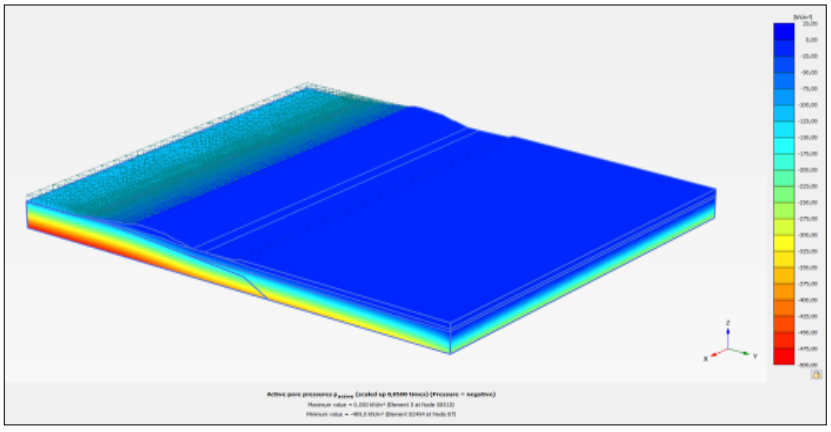
Рис. 3.118. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /Δ*U*/



е

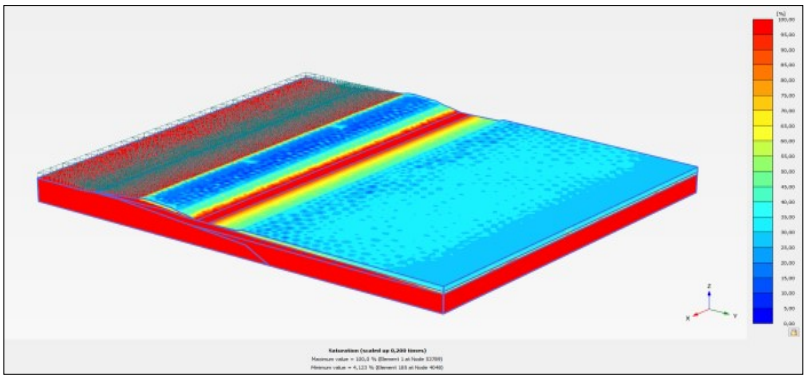


ж



з

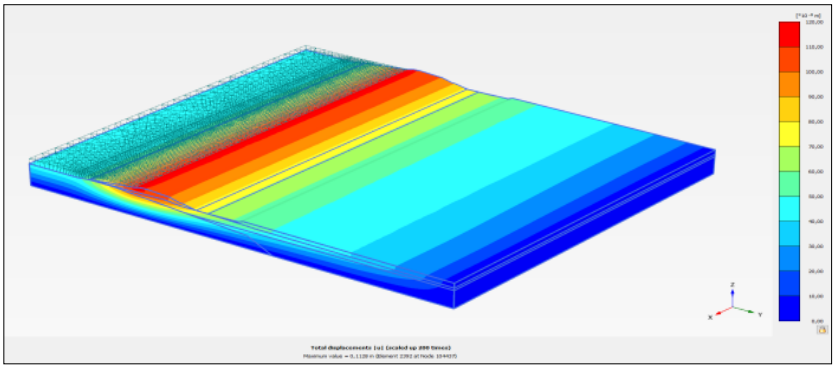
Рис. 3.118. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *е* — коэффициент переуплотнения ОС; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через плотину Craund water flow /*q*/; *з* — активное поровое давление Pactive



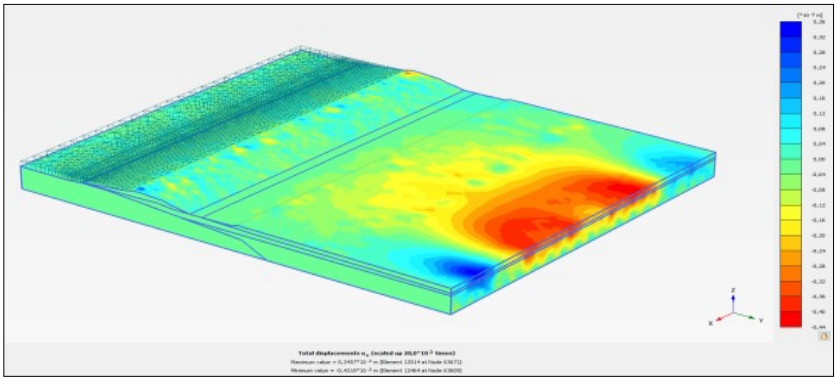
и

Рис. 3.118. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (окончание): *и* — водопроницаемость Saturation (расчетный вариант № 3)

Далее приведены картины перемещений и гидравлических показателей при уровне воды в водохранилище +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) для варианта № 4 (рис. 3.119).

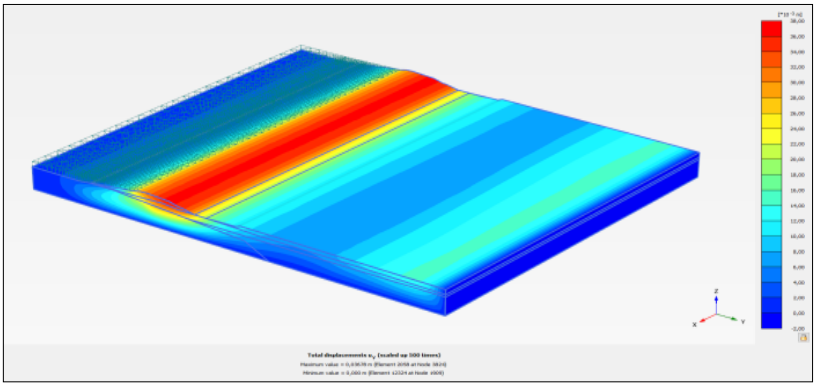


а

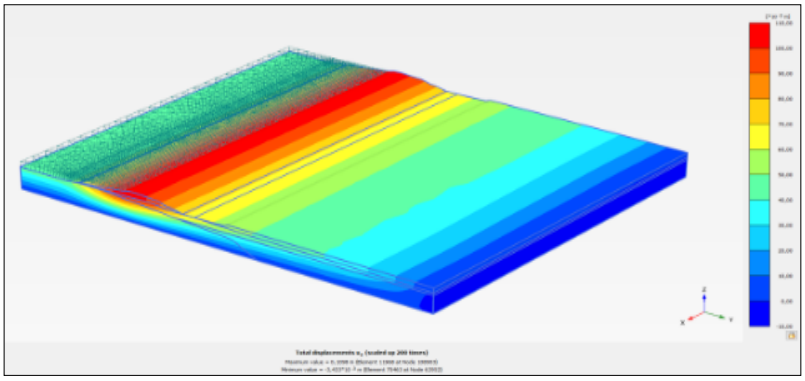


б

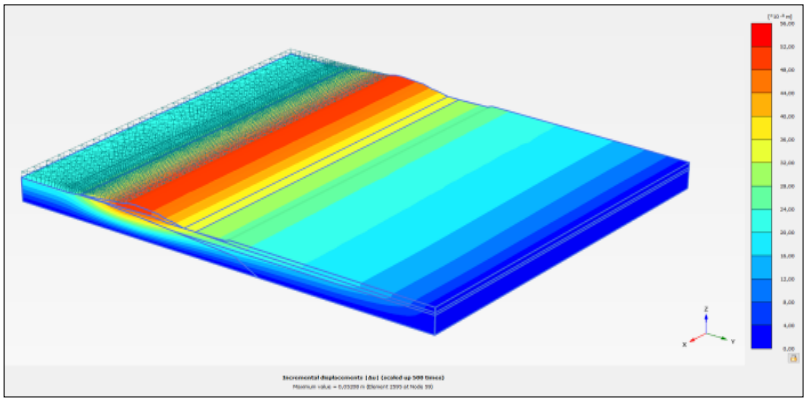
Рис. 3.119. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (начало): *а* — общие $U_{общ}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

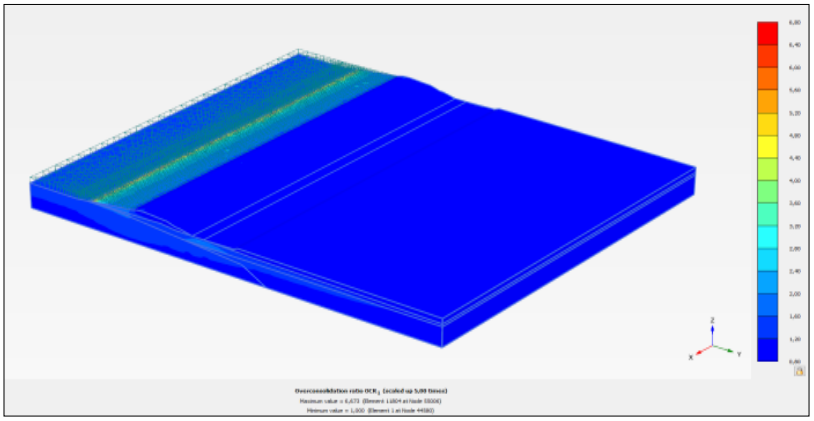


г

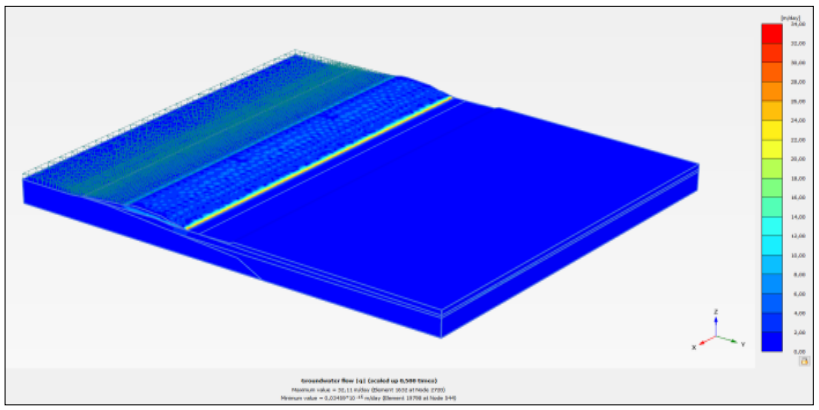


д

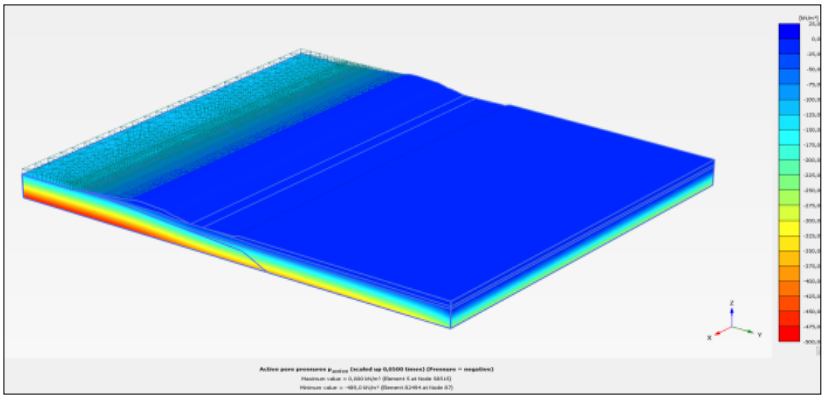
Рис. 3.119. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /ΔU/



е

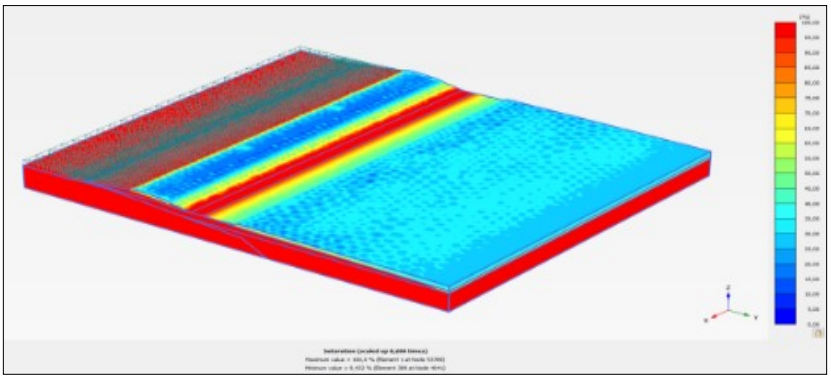


ж



з

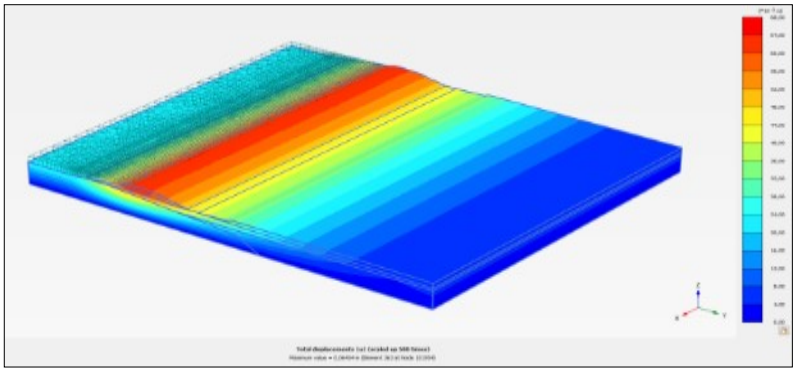
Рис. 3.119. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *е* — коэффициент переуплотнения OC; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через плотину Craund water flow /*q*/; *з* — активное поровое давление Pactive



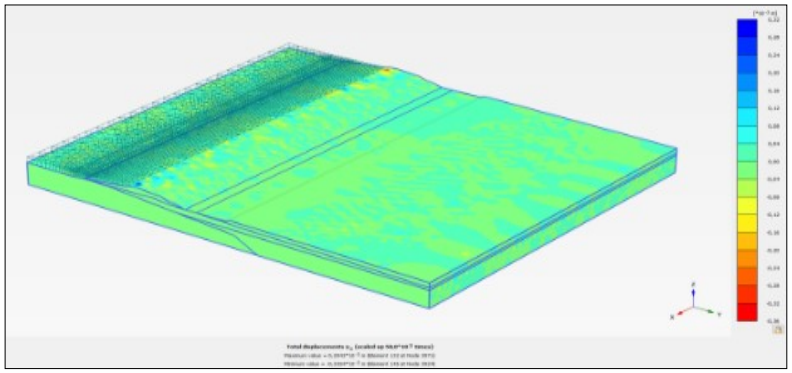
и

Рис. 3.119. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (окончание): *и* — водопроницаемость Saturation (расчетный вариант № 4)

Далее приведены картины перемещений и гидравлических показателей при уровне воды в водохранилище +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) для варианта № 5 (рис. 3.120).

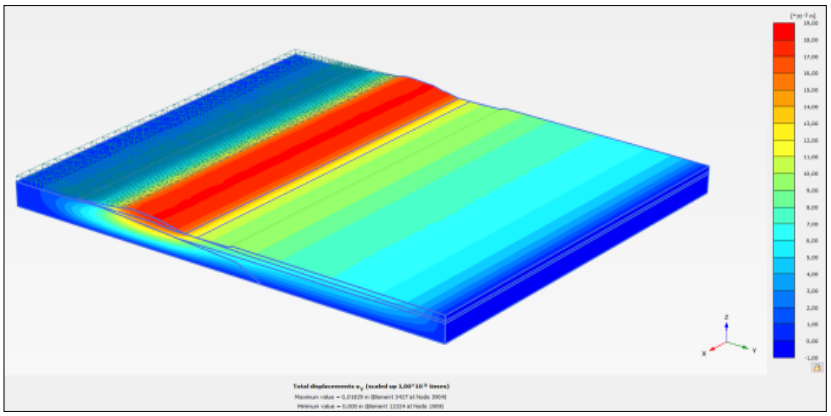


а

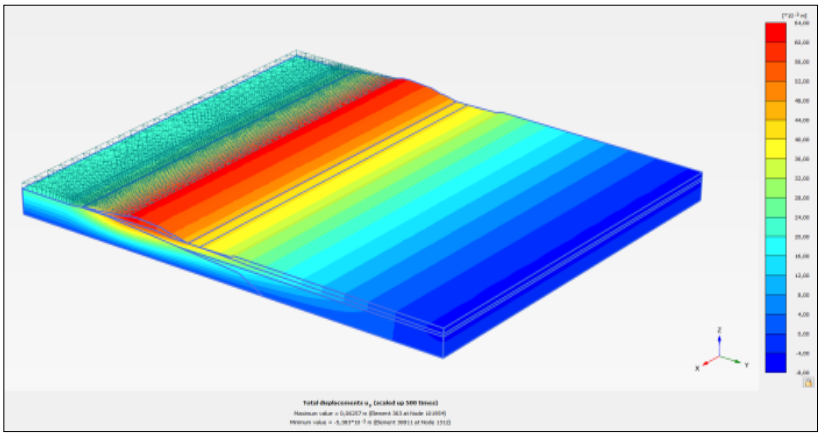


б

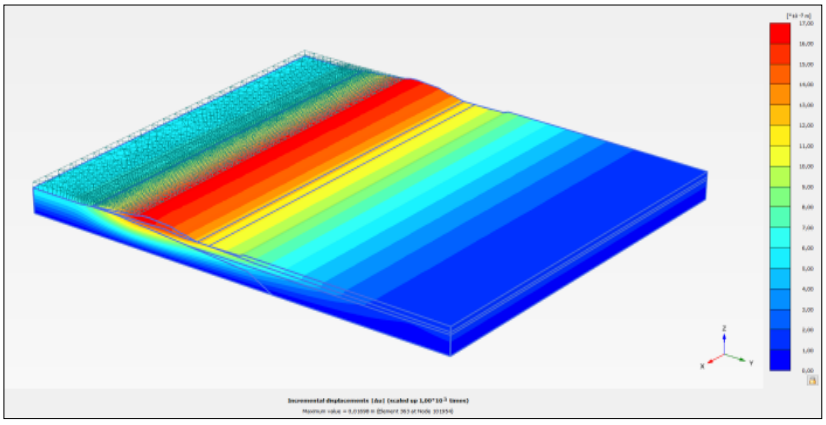
Рис. 3.120. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (начало): *а* — общие $U_{общ}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

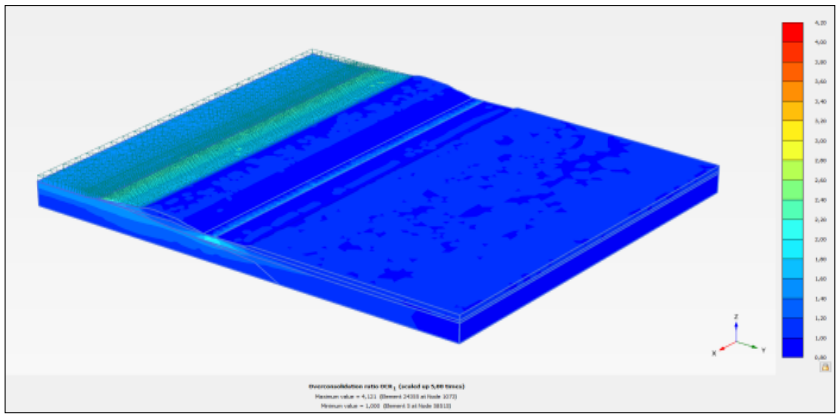


г

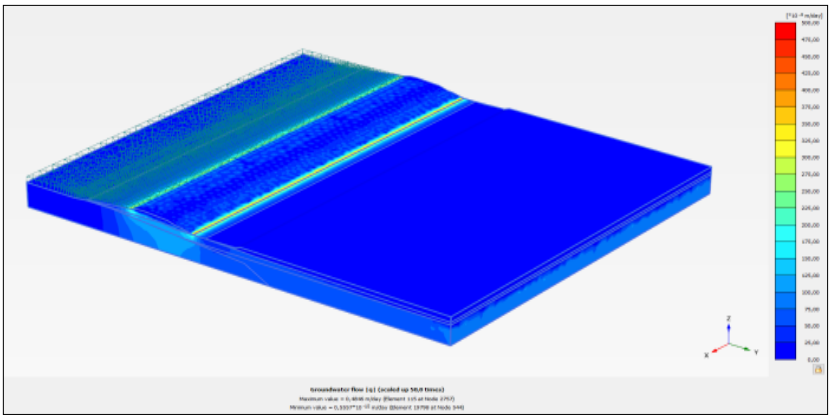


д

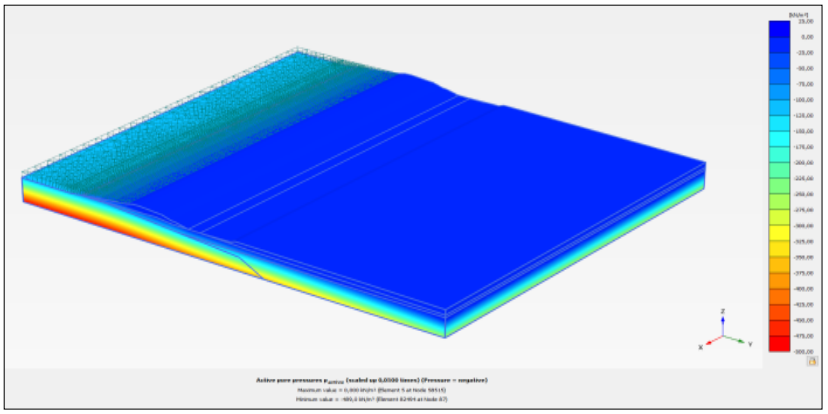
Рис. 3.120. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /ΔU/



е

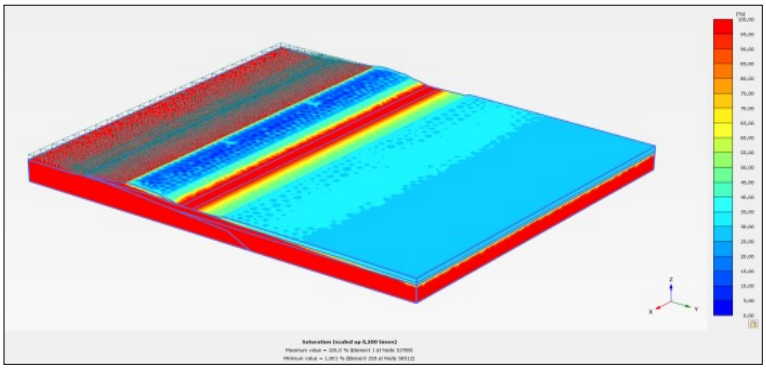


ж



з

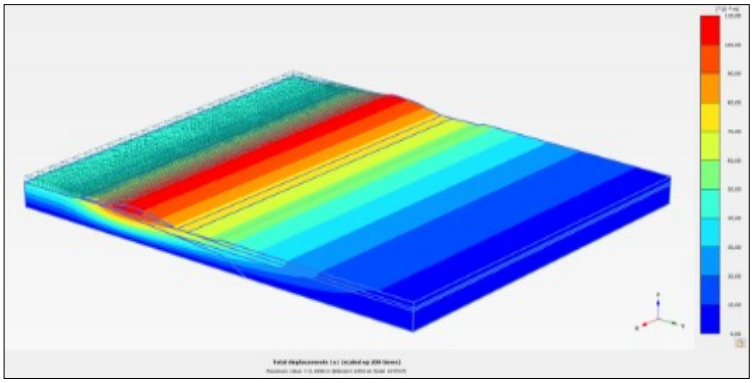
Рис. 3.120. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *е* — коэффициент переуплотнения ОС; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через плотину Craund water flow /*q*/; *з* — активное поровое давление Pactive



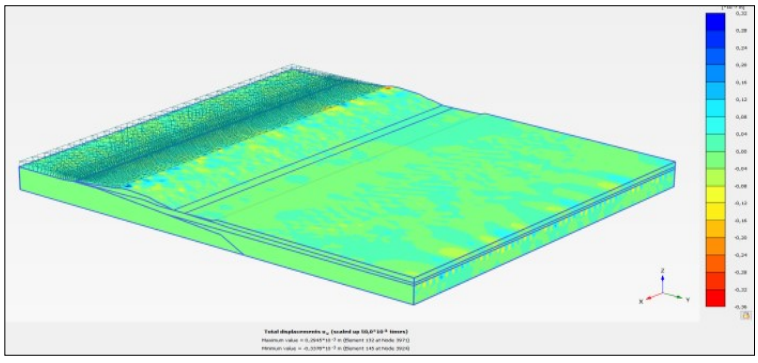
и

Рис. 3.120. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (окончание): *и* — водопроницаемость Saturation (расчетный вариант № 5)

Далее приведены картины перемещений и гидравлических показателей при уровне воды в водохранилище +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) для варианта № 6 (рис. 3.121).

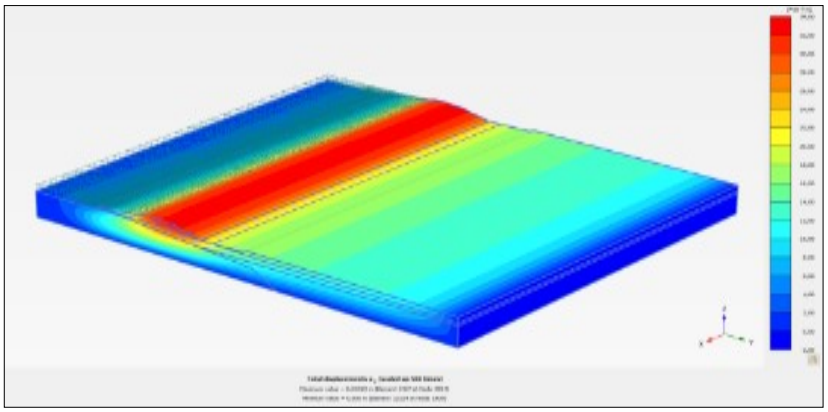


а

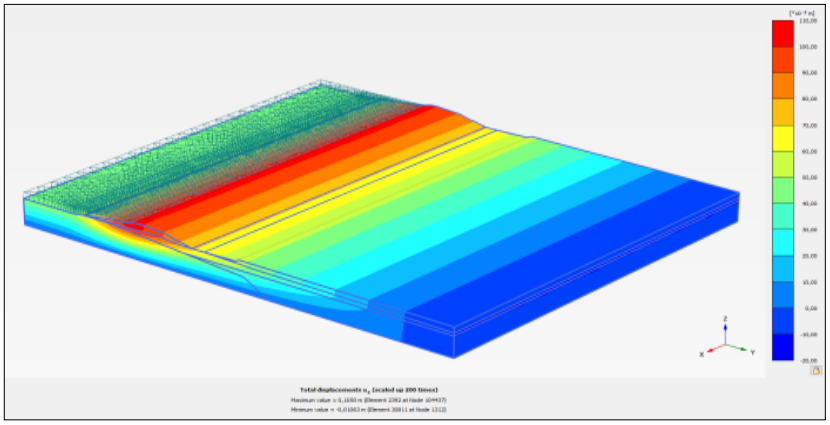


б

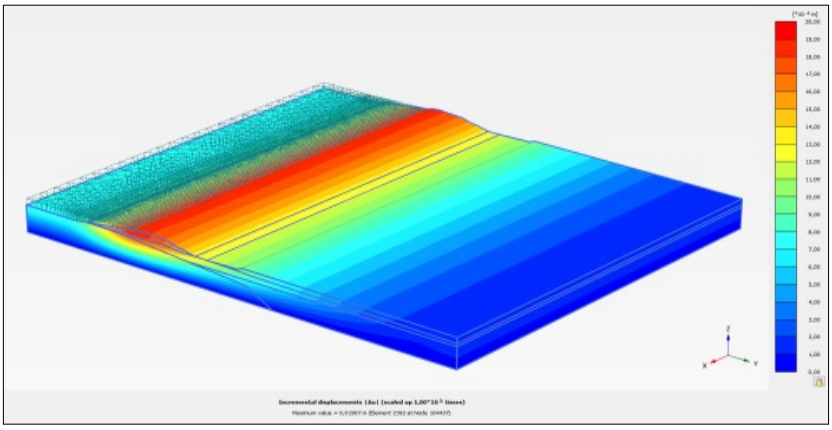
Рис. 3.121. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (начало): *а* — общие $U_{общ.}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

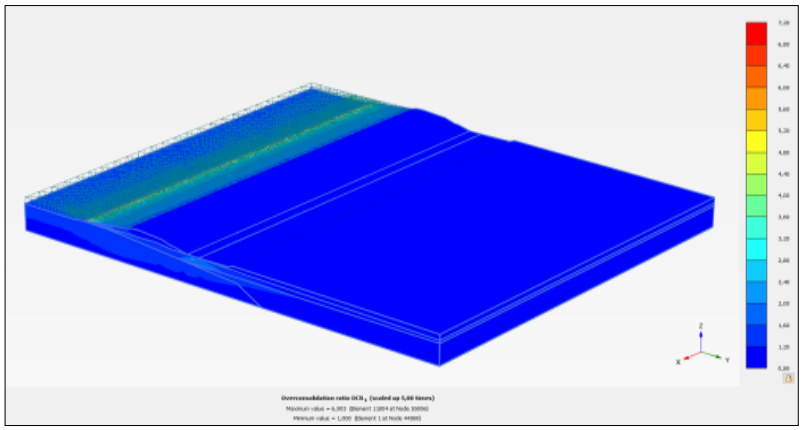


г

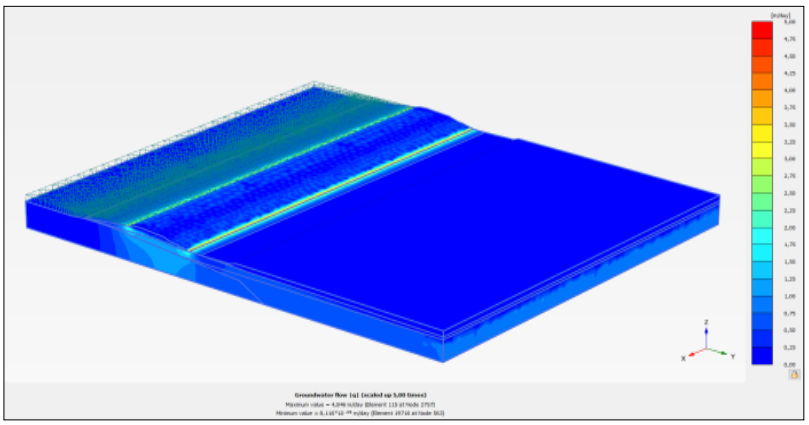


д

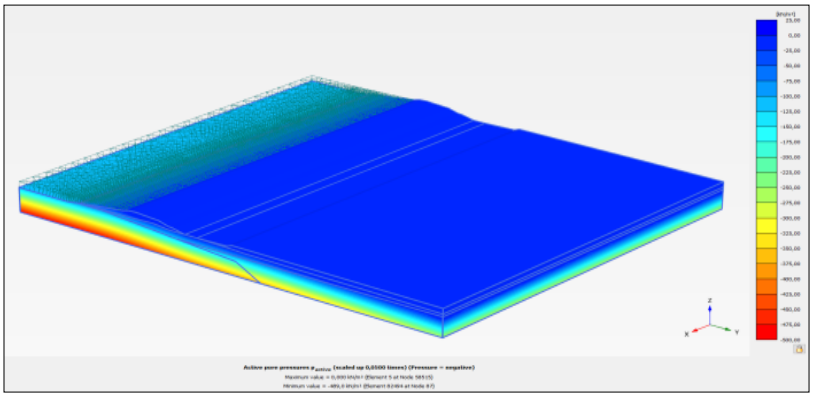
Рис. 3.121. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /Δ*U*/



е

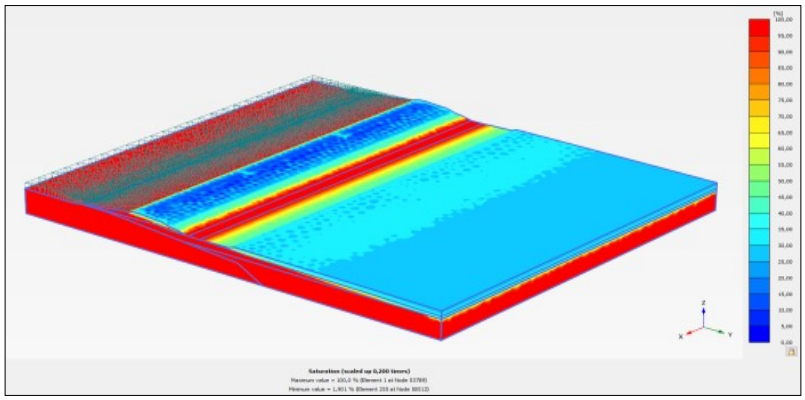


ж



з

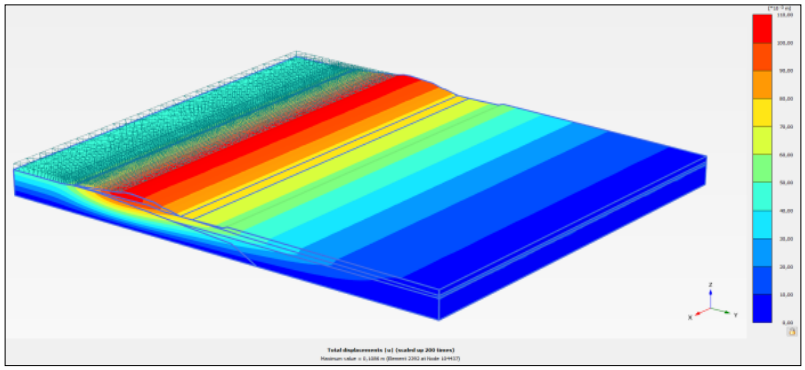
Рис. 3.121. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *е* — коэффициент переуплотнения OC; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через плотину Craund water flow /*q*/; *з* — активное поровое давление Pactive



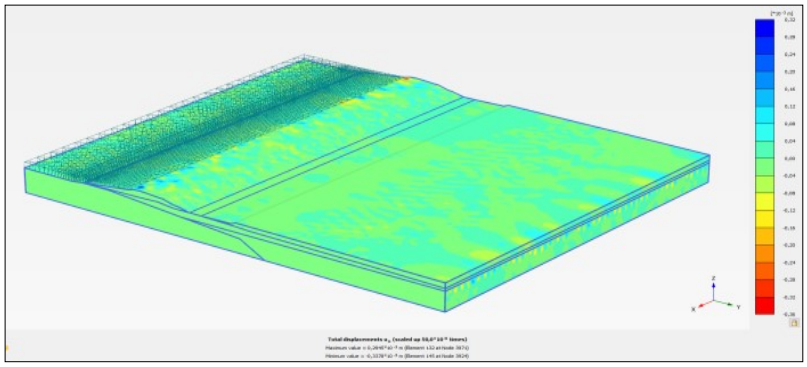
и

Рис. 3.121. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (окончание): *и* — водопроницаемость Saturation (расчетный вариант № 6)

Далее приведены картины перемещений и гидравлических показателей при уровне воды в водохранилище +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) для варианта № 7 (рис. 3.122).

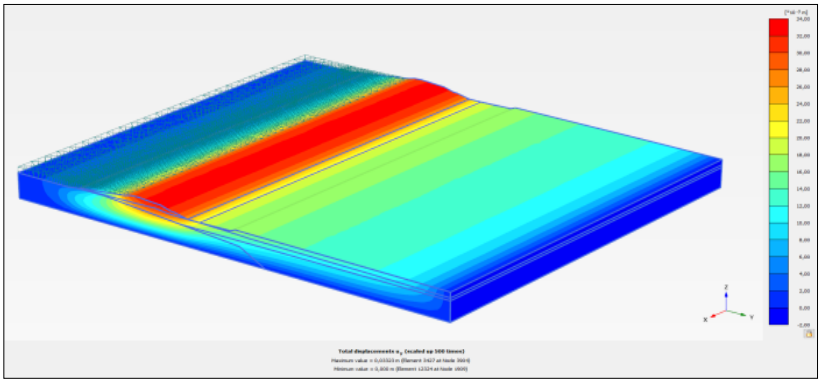


а

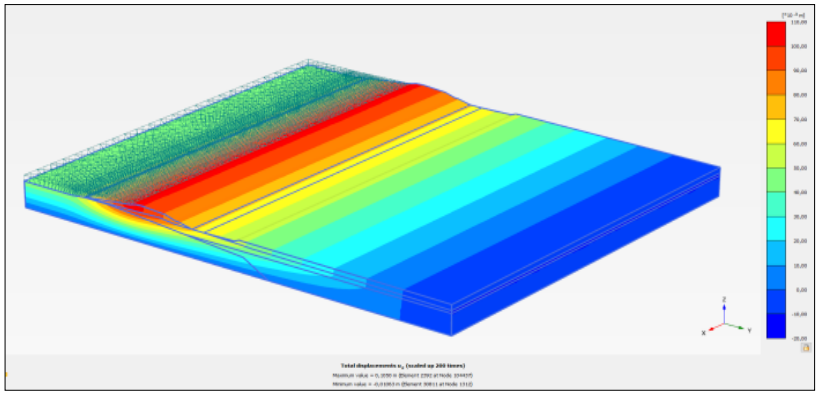


б

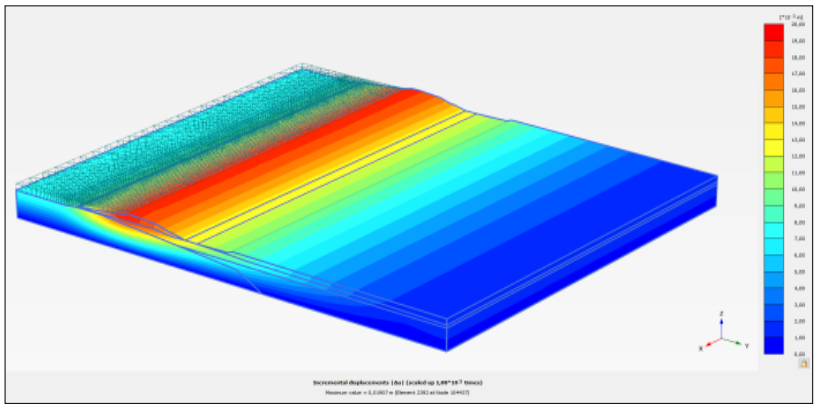
Рис. 3.122. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (начало): *а* — общие $U_{общ.}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

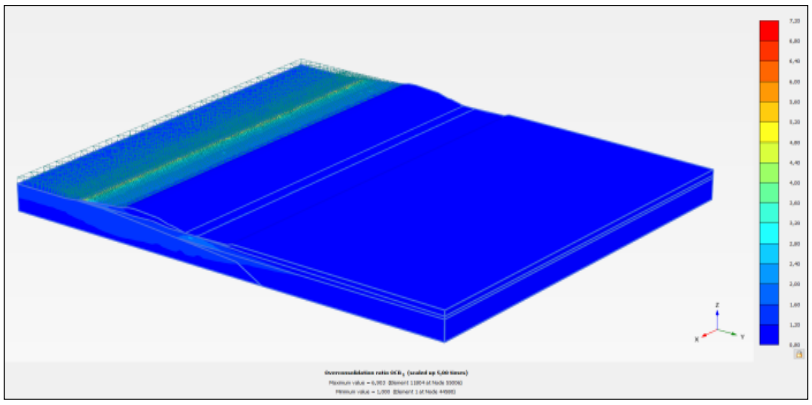


г

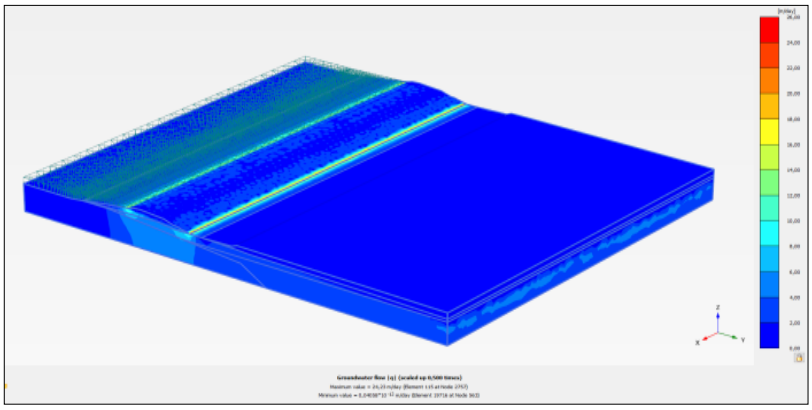


д

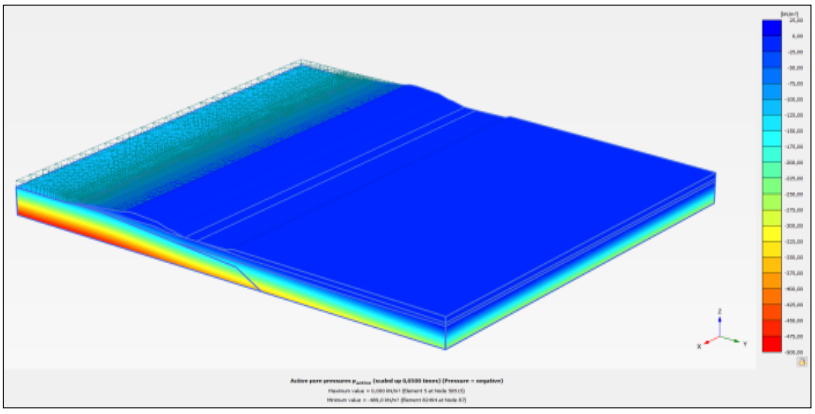
Рис. 3.122. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /Δ*U*/



е

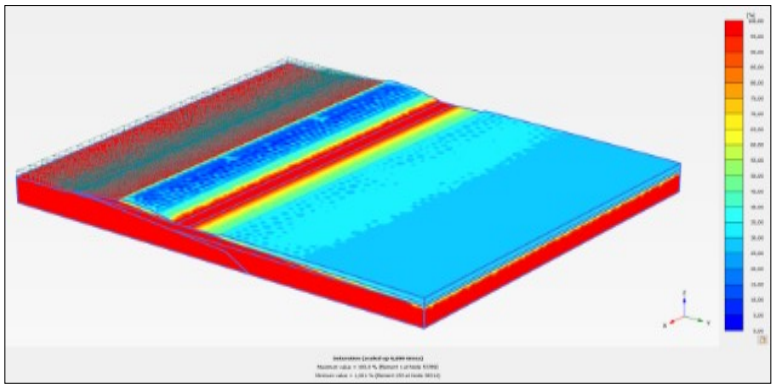


ж



з

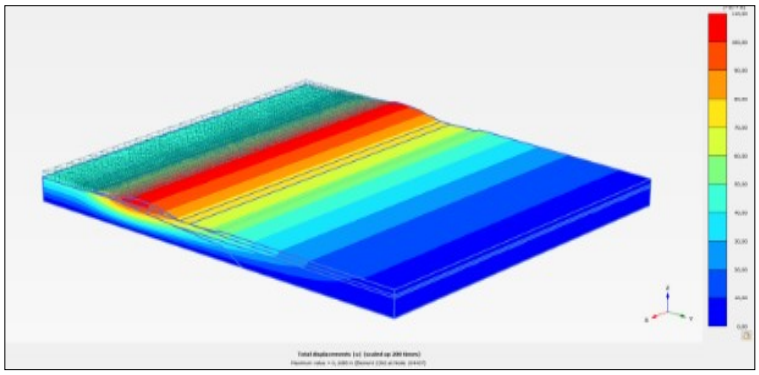
Рис. 3.122. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *е* — коэффициент переуплотнения OC; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через плотину Craund water flow /*q*/; *з* — активное поровое давление Pactive



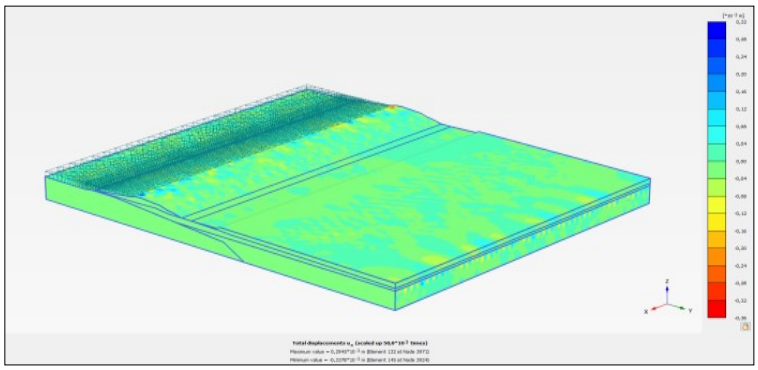
и

Рис. 3.122. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (окончание): *и* — водопроницаемость Saturation (расчетный вариант № 7)

Далее приведены картины перемещений и гидравлических показателей при уровне воды в водохранилище +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025г.) для варианта № 8 (рис. 3.123).

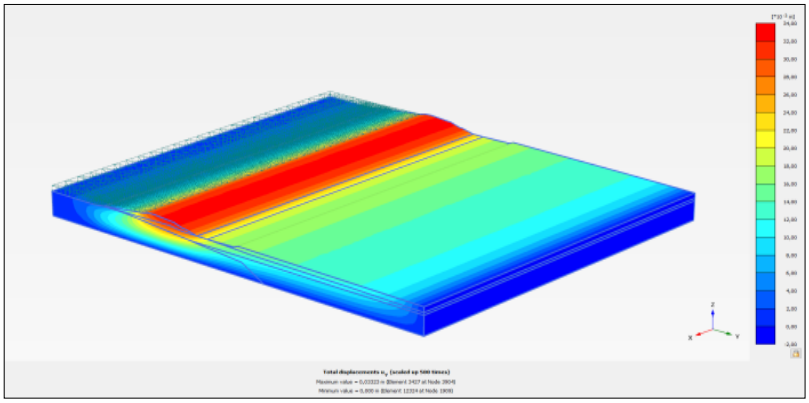


а

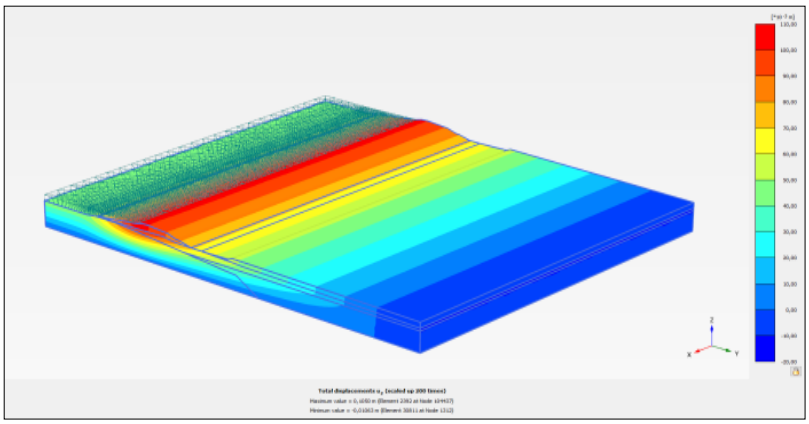


б

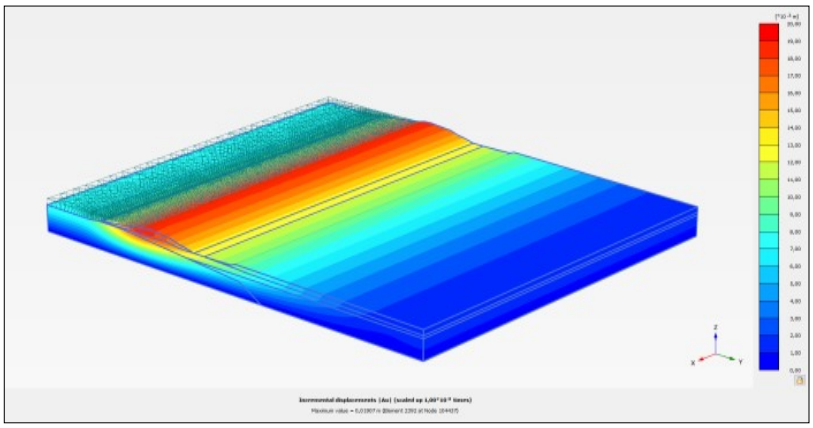
Рис. 3.123. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (начало): *а* — общие $U_{общ.}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

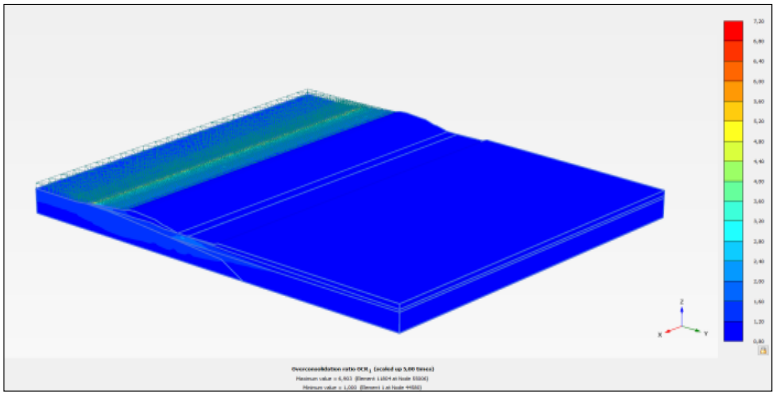


г

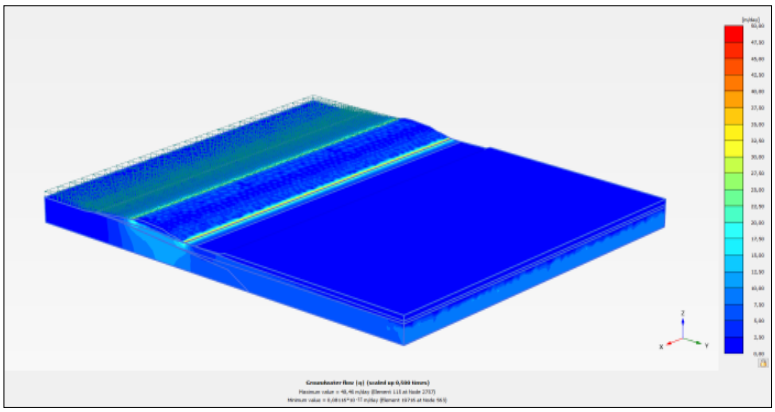


д

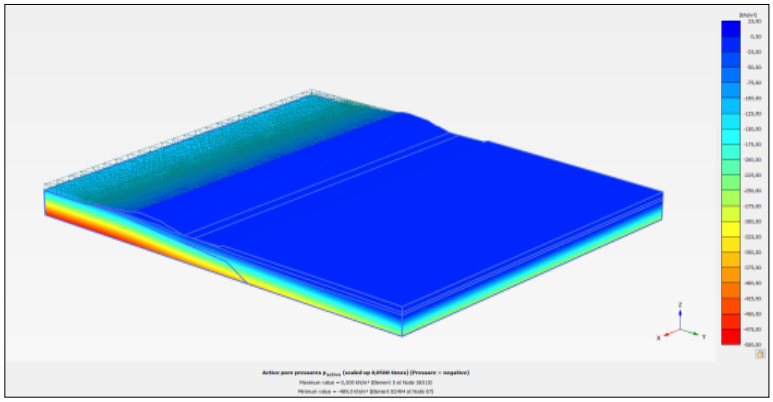
Рис. 3.123. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /ΔU/



е

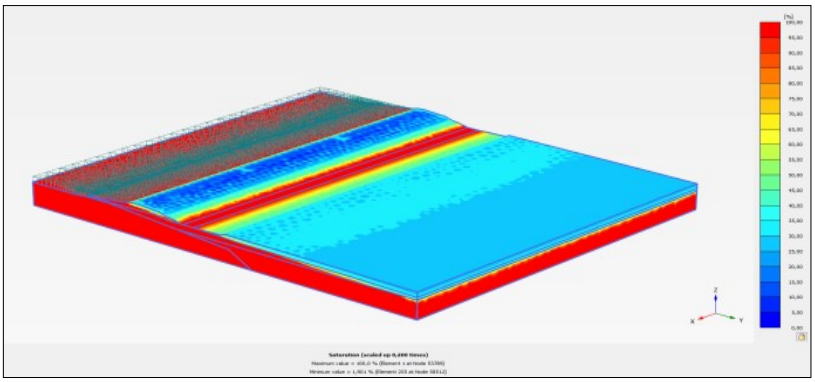


ж



з

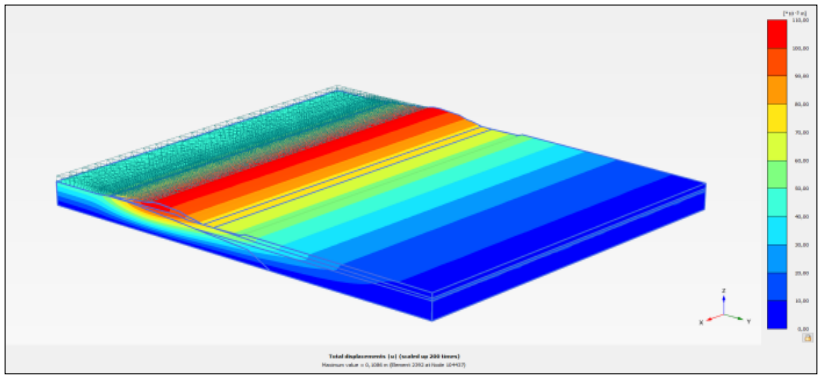
Рис. 3.123. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *е* — коэффициент переуплотнения OC; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через плотину Craund water flow /*q*/; *з* — активное поровое давление Pactive



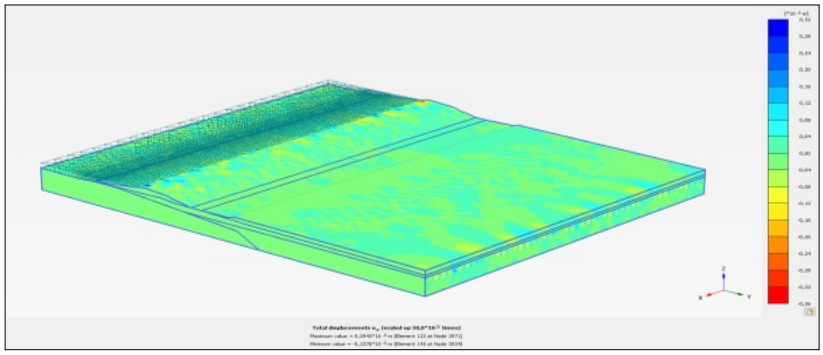
и

Рис. 3.123. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (окончание): *и* — водопроницаемость Saturation (расчетный вариант № 8)

Далее приведены картины перемещений и гидравлических показателей при уровне воды в водохранилище +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) для варианта № 9 (рис. 3.124).

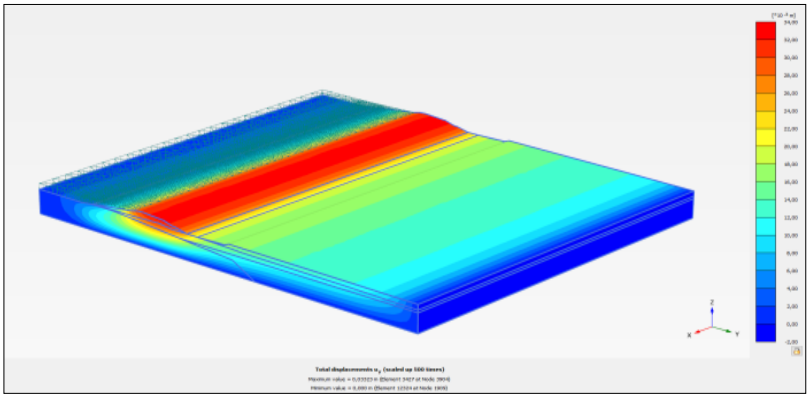


а

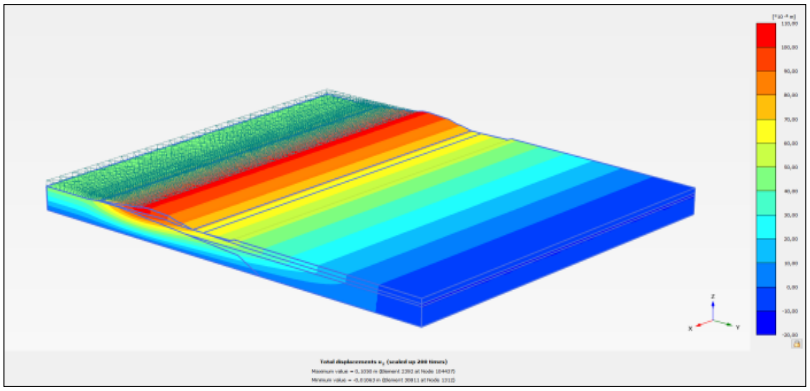


б

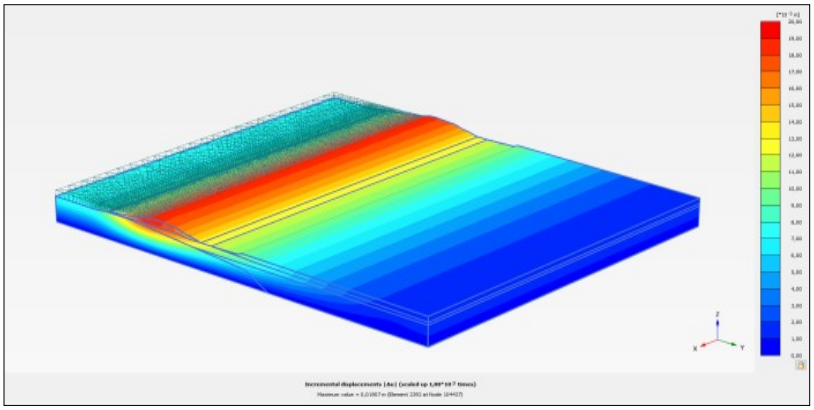
Рис. 3.124. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (начало): *а* — общие $U_{общ.}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

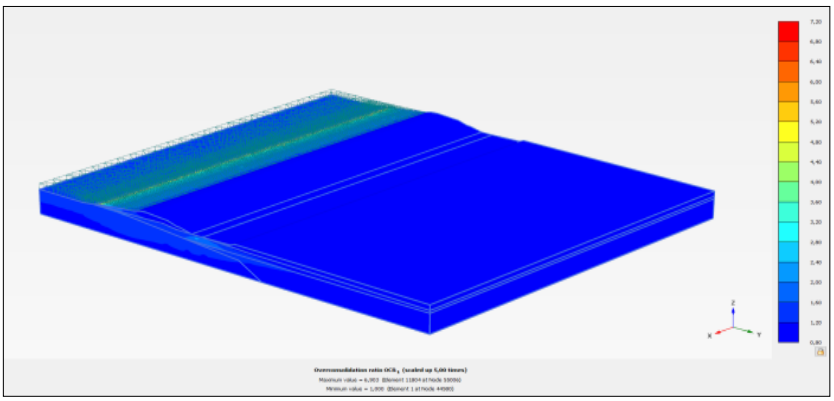


г

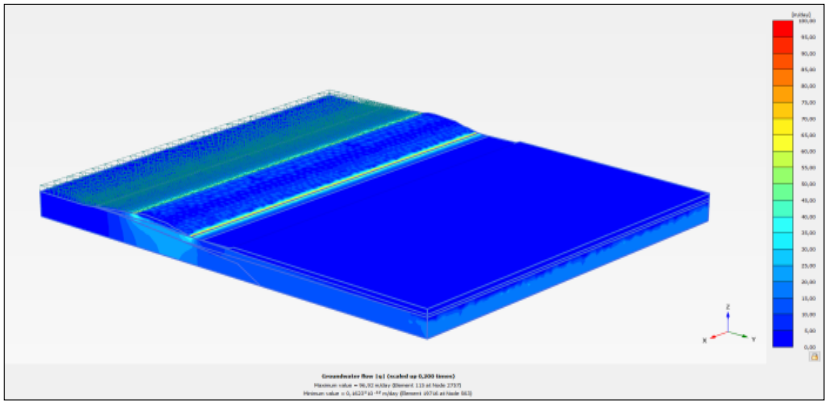


д

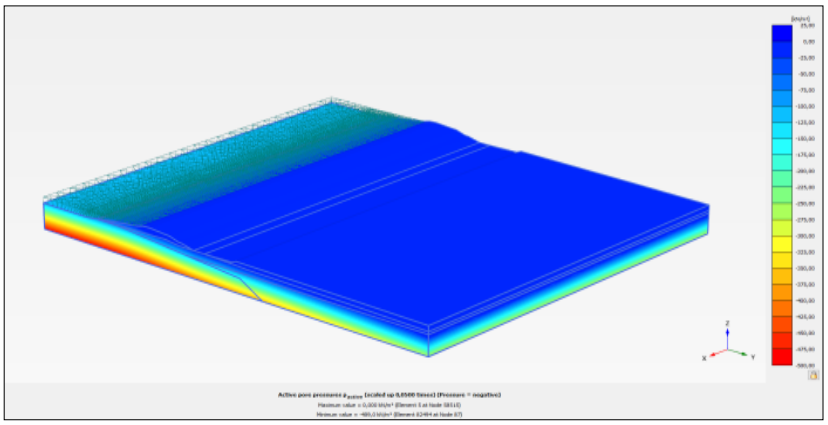
Рис. 3.124. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /ΔU/



е

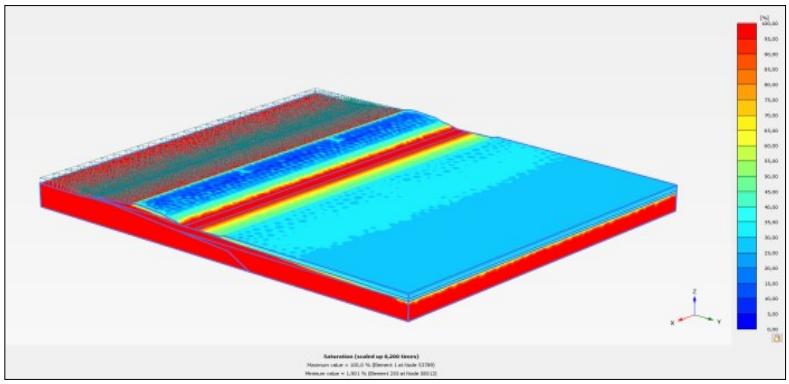


ж



з

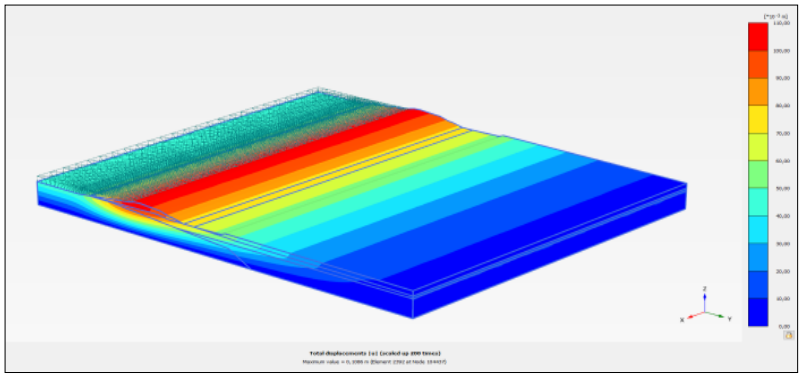
Рис. 3.124. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *е* — коэффициент переуплотнения OC; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через плотину Craund water flow /*q*/; *з* — активное поровое давление Pactive



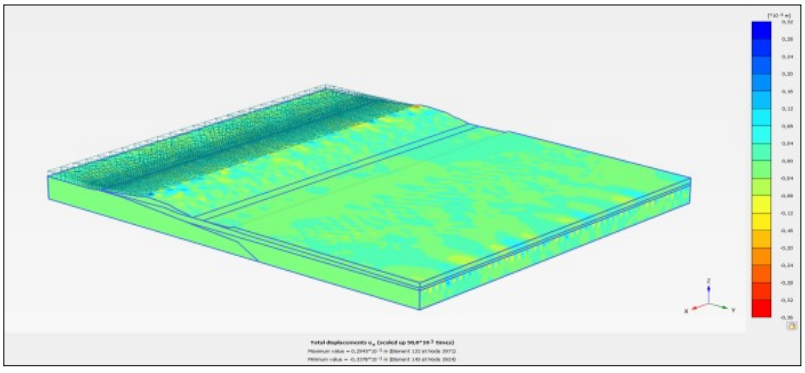
и

Рис. 3.124. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (окончание): *и* — водопроницаемость Saturation (расчетный вариант № 9)

Далее приведены картины перемещений и гидравлических показателей при уровне воды в водохранилище +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) для варианта № 10 (рис. 3.125).

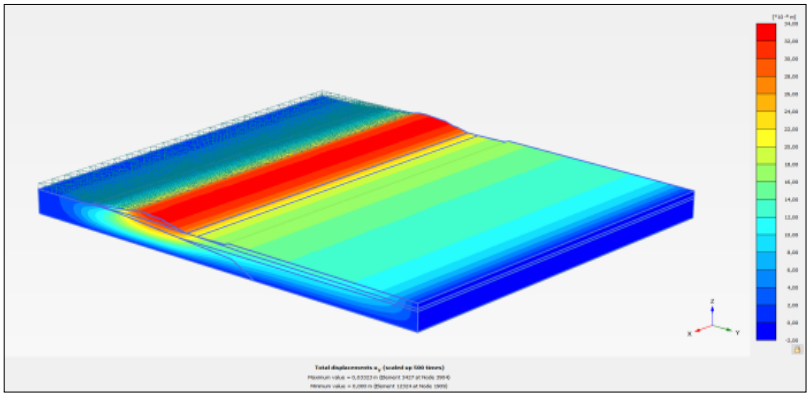


а

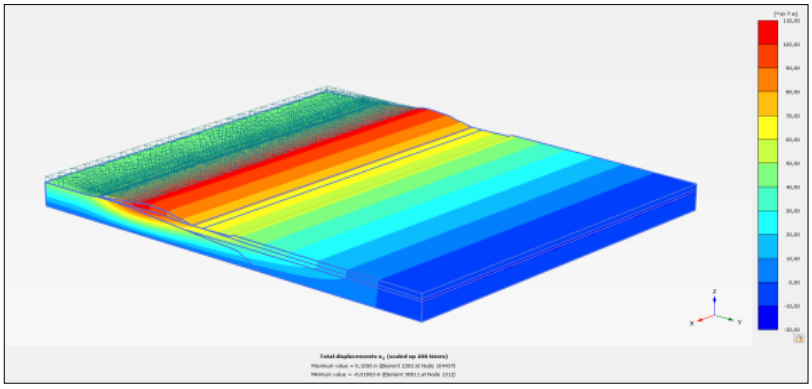


б

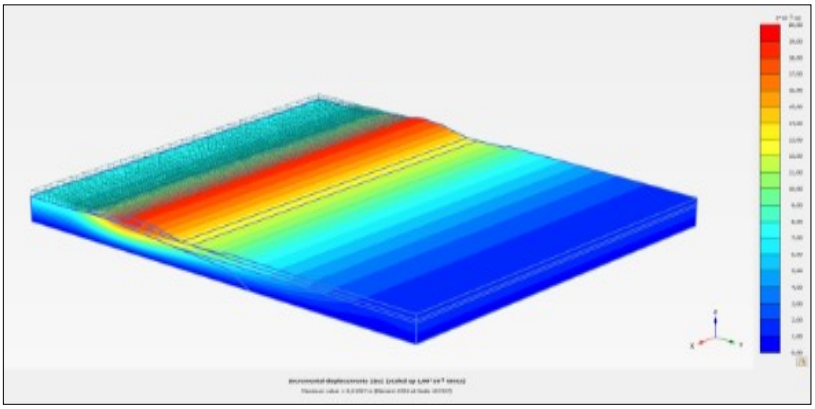
Рис. 3.125. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (начало): *а* — общие $U_{общ.}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

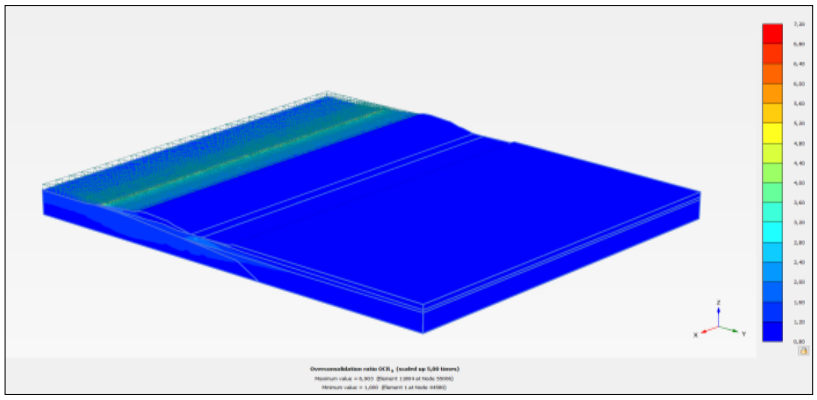


г

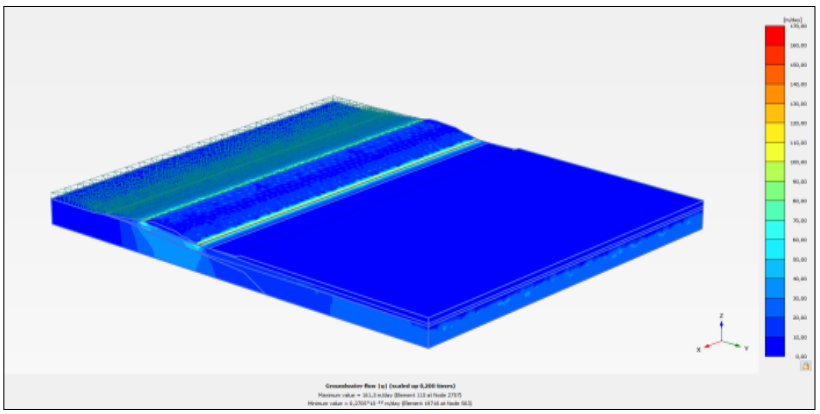


д

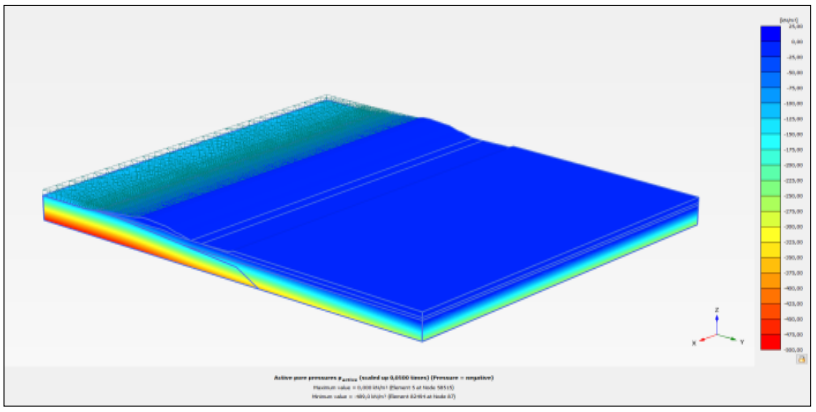
Рис. 3.125. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /ΔU/



е

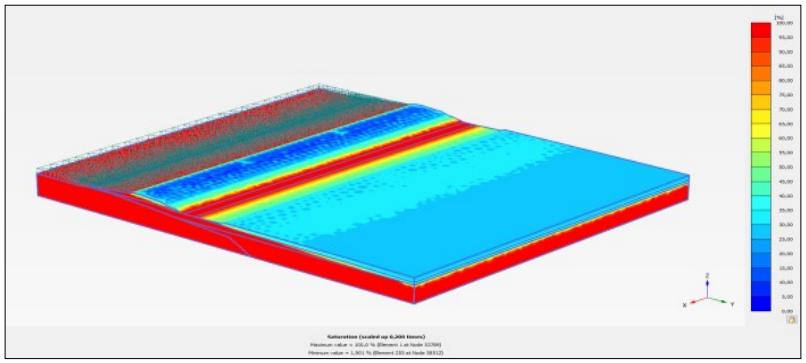


ж



з

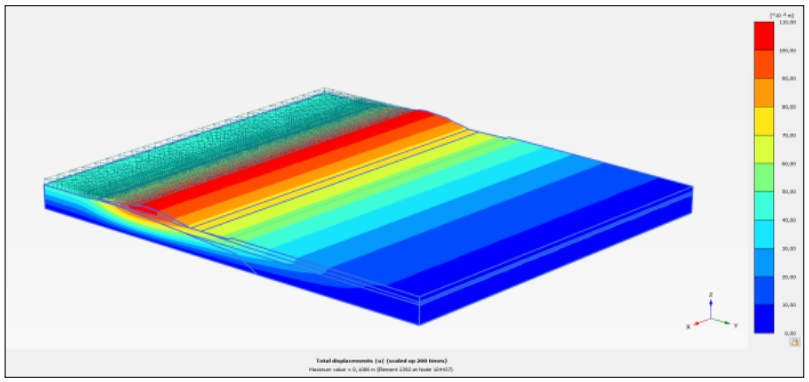
Рис. 3.125. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *е* — коэффициент переуплотнения OC; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через плотину Craund water flow /*q*/; *з* — активное поровое давление Pactive



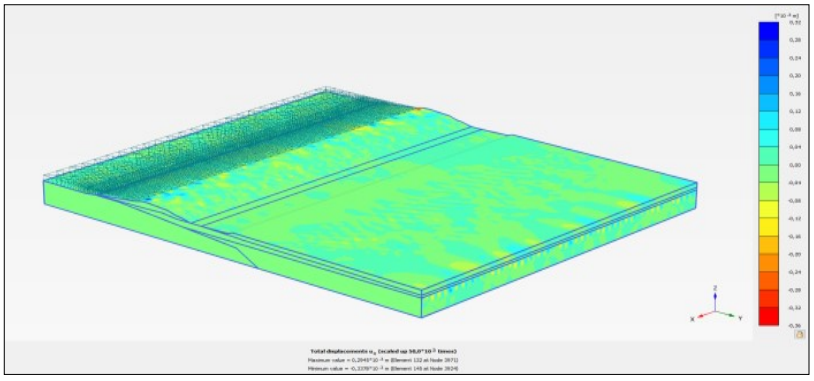
и

Рис. 3.125. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (окончание): *и* — водопроницаемость Saturation (расчетный вариант № 10)

Далее приведены картины перемещений и гидравлических показателей при уровне воды в водохранилище +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) для варианта № 11 (рис. 3.126).

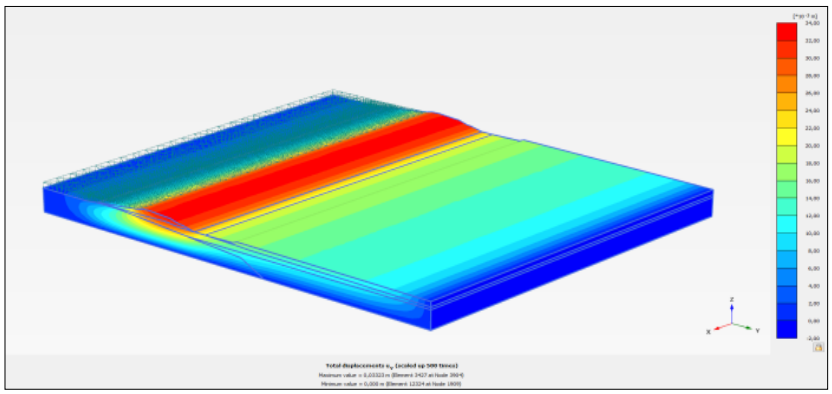


а

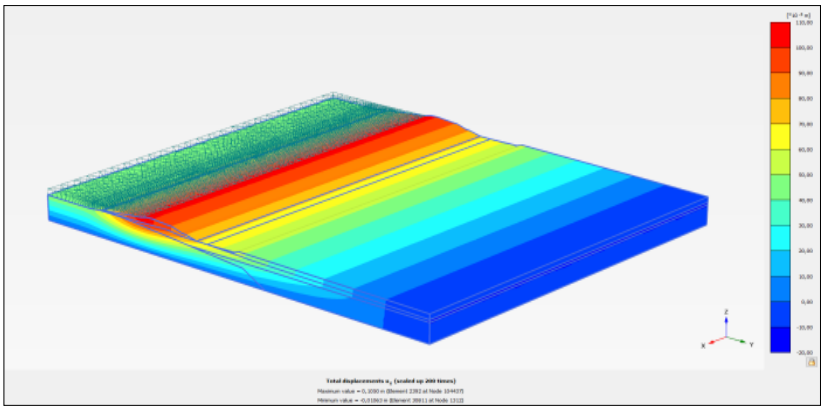


б

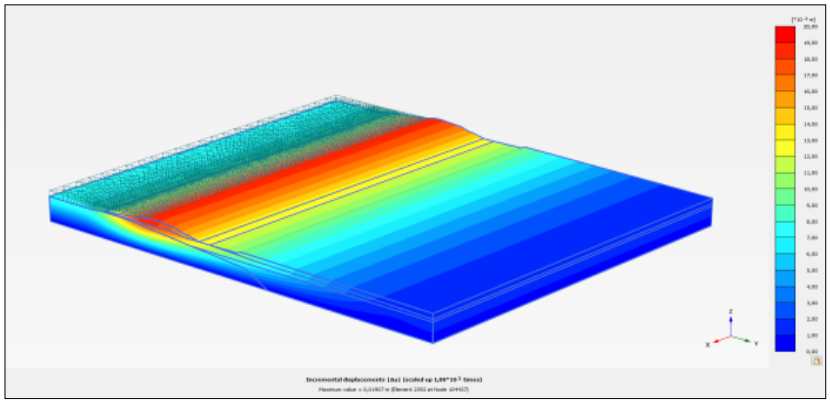
Рис. 3.126. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (начало): *а* — общие $U_{общ.}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

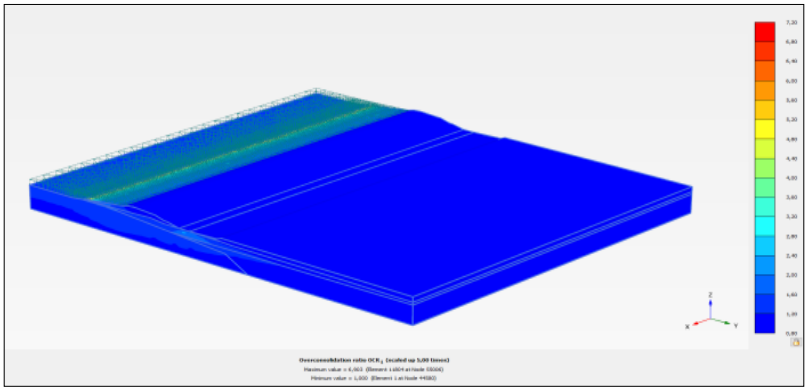


г

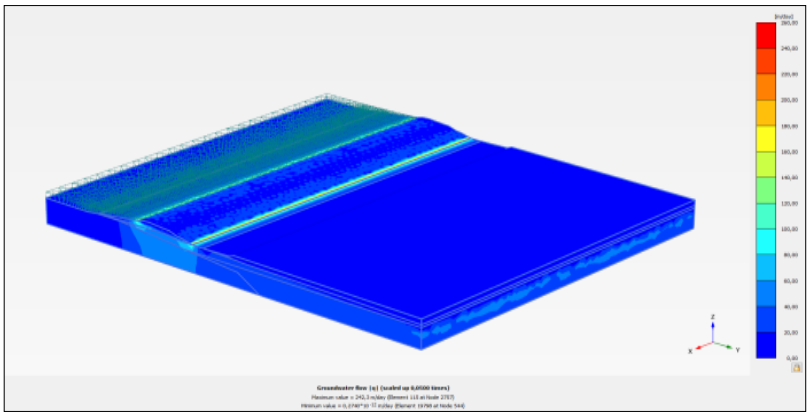


д

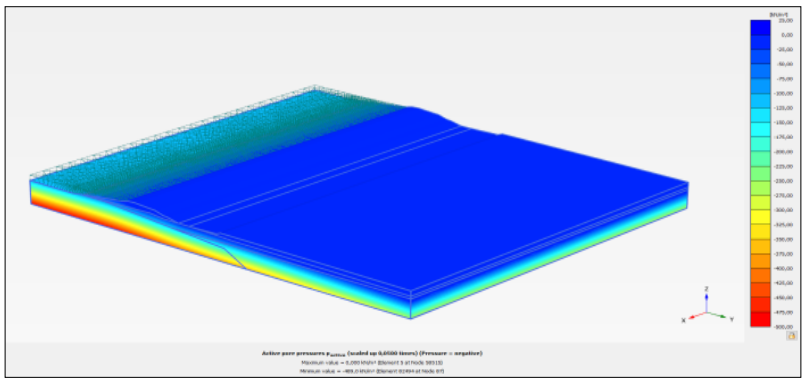
Рис. 3.126. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /ΔU/



е

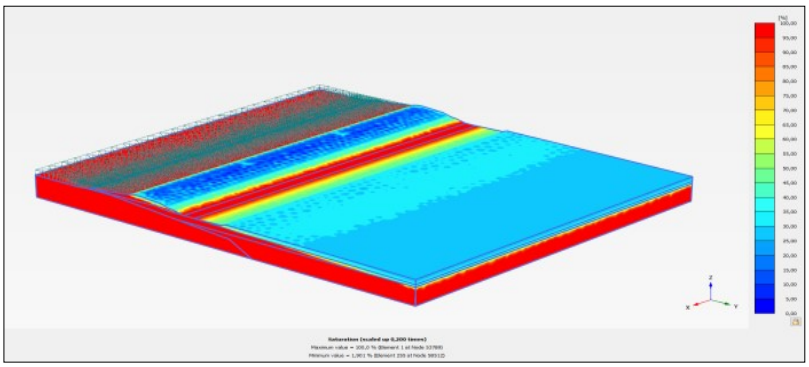


ж



з

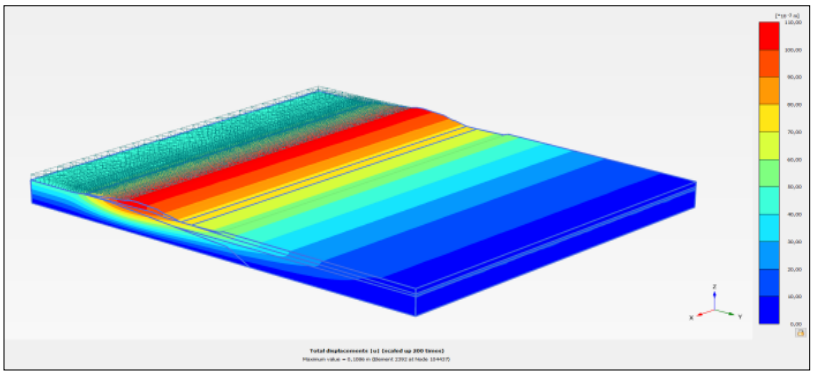
Рис. 3.126. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *е* — коэффициент переуплотнения OC; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через плотину Craund water flow /*q*/; *з* — активное поровое давление Pactive



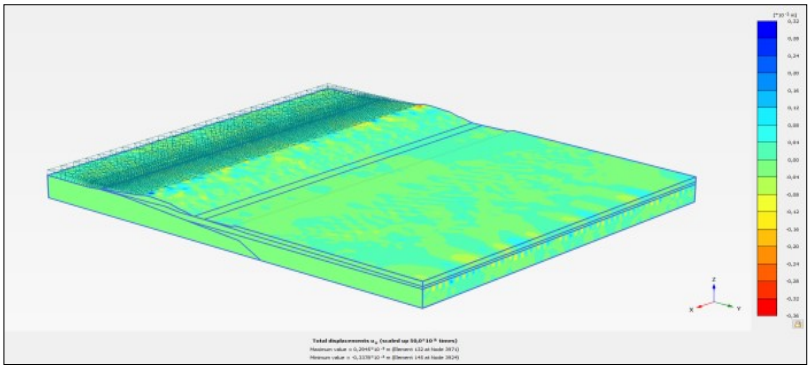
и

Рис. 3.126. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (окончание): *и* — водопроницаемость Saturation (расчетный вариант № 11)

Далее приведены картины перемещений и гидравлических показателей при уровне воды в водохранилище +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки пьезометров — январь 2025 г.) для варианта № 12 (рис. 3.127).

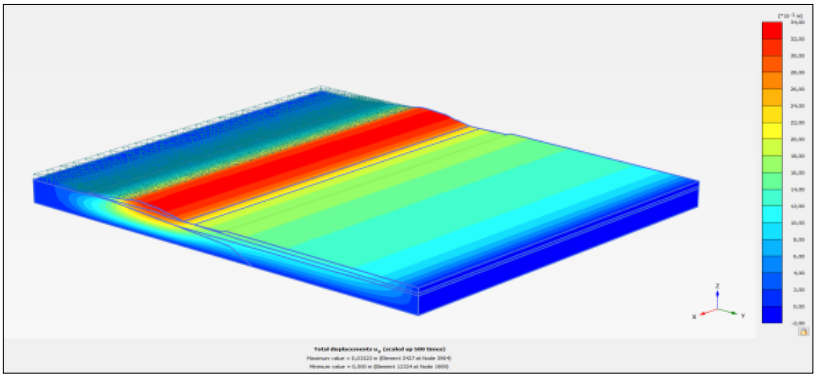


а

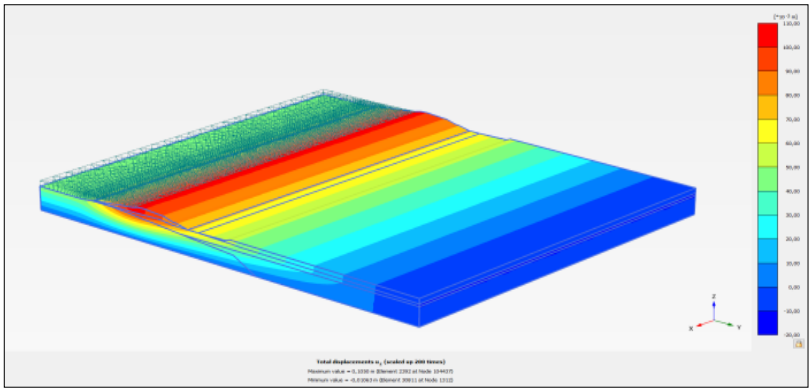


б

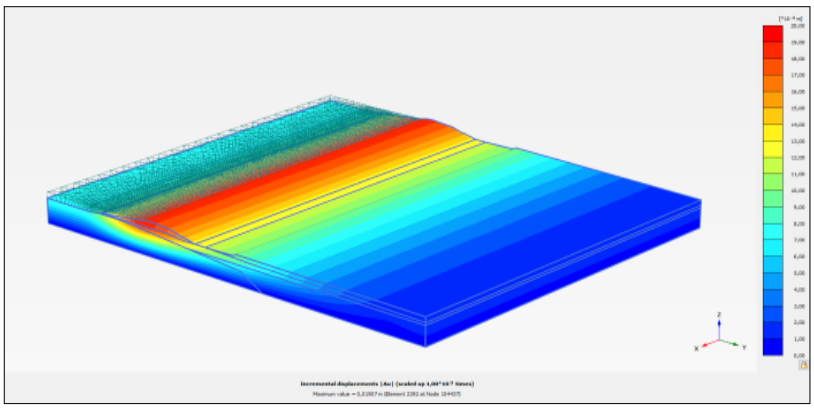
Рис. 3.127. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (начало): *а* — общие $U_{общ.}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

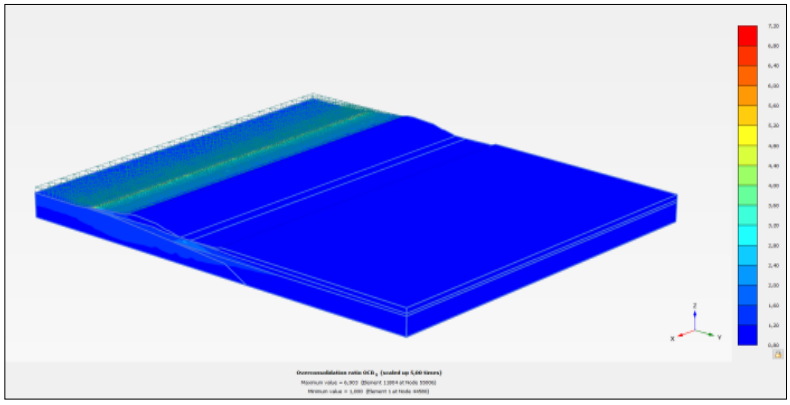


г

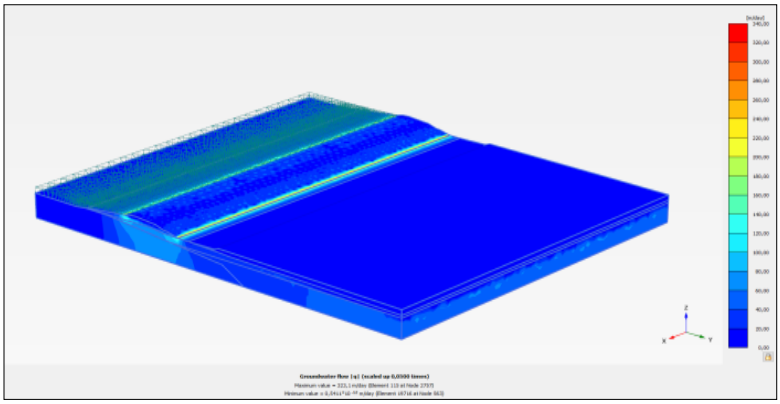


д

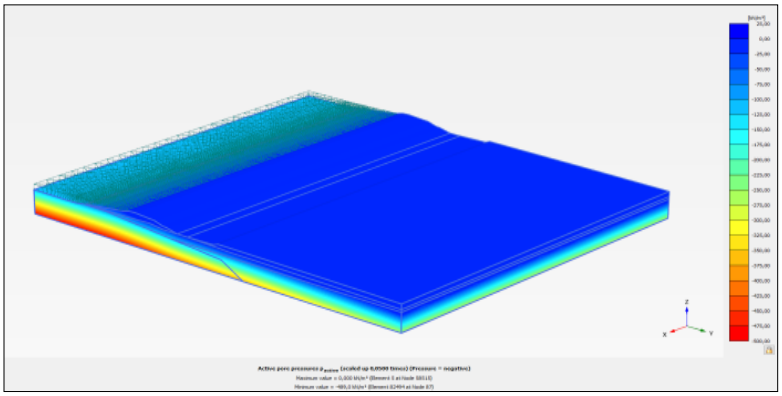
Рис. 3.127. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /ΔU/



е

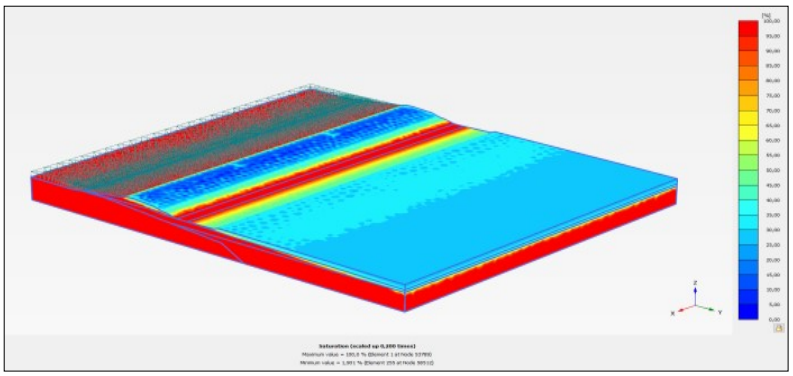


ж



з

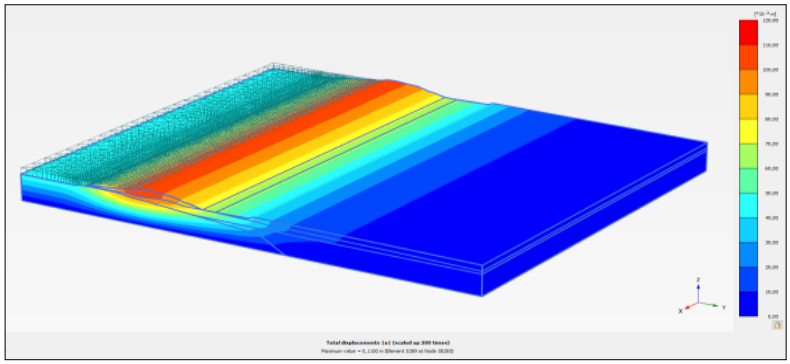
Рис. 3.127. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *е* — коэффициент переуплотнения OC; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через плотину Craund water flow /*q*/; *з* — активное поровое давление Pactive



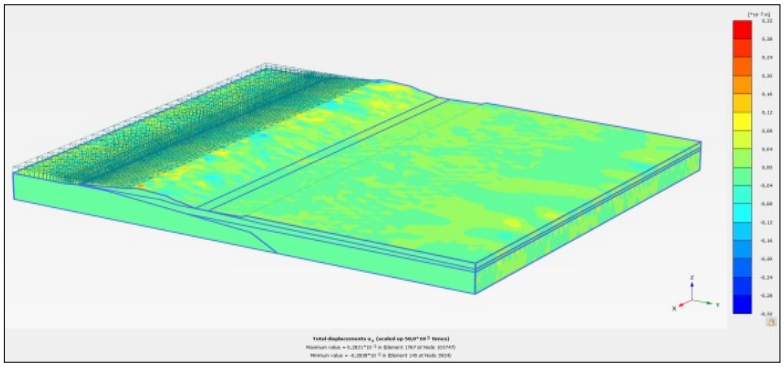
и

Рис. 3.127. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (окончание): *и* — водопроницаемость Saturation (расчетный вариант № 12)

Далее приведены картины перемещений и гидравлических показателей при уровне воды в водохранилище +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки пьезометров — январь 2025 г.) для варианта № 13 (рис. 3.128).

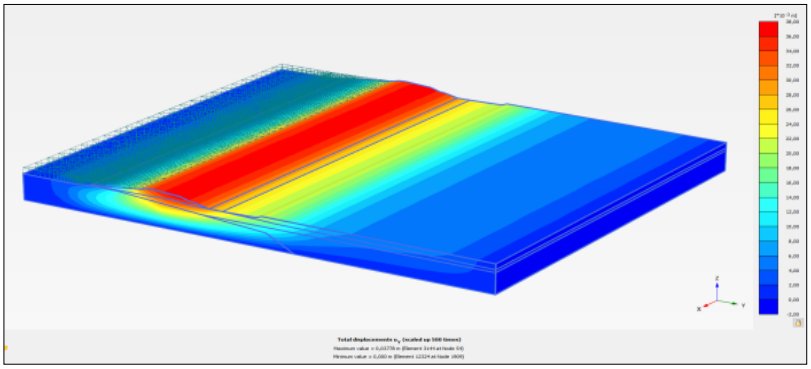


а

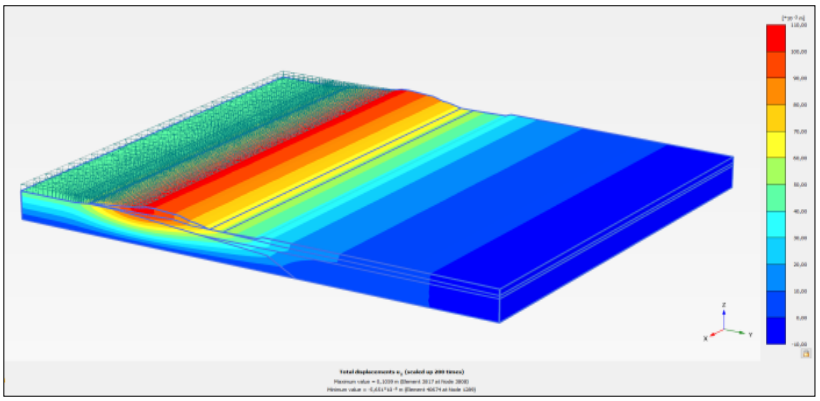


б

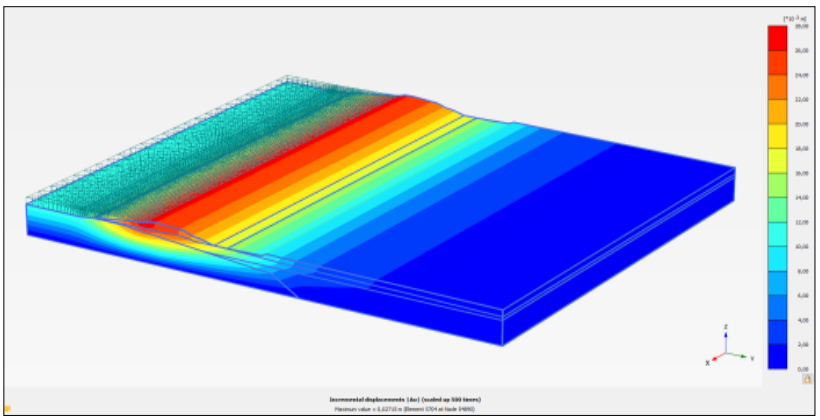
Рис. 3.128. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (начало): *а* — общие $U_{общ.}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

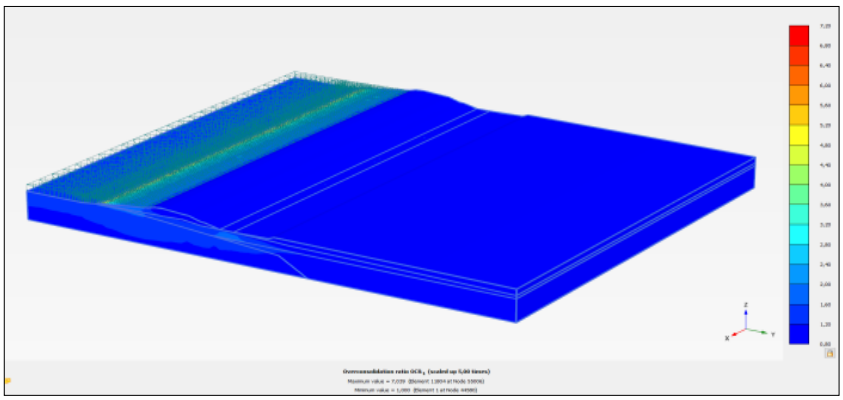


г

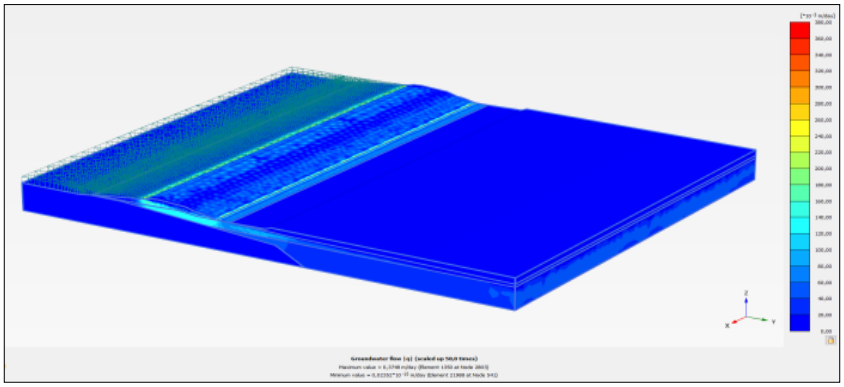


д

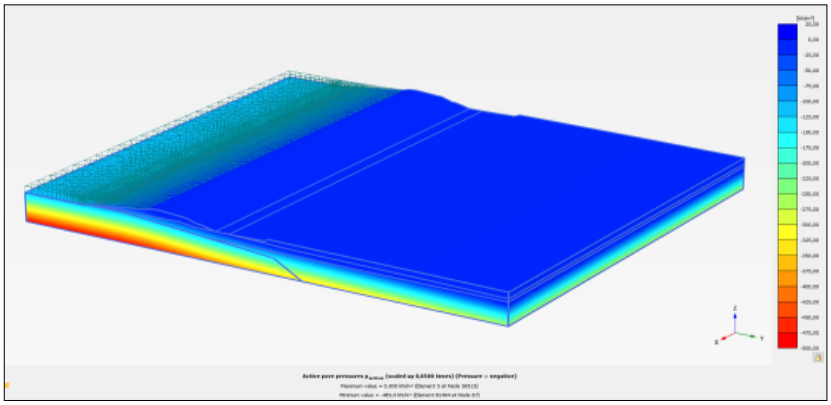
Рис. 3.128. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /ΔU/



е

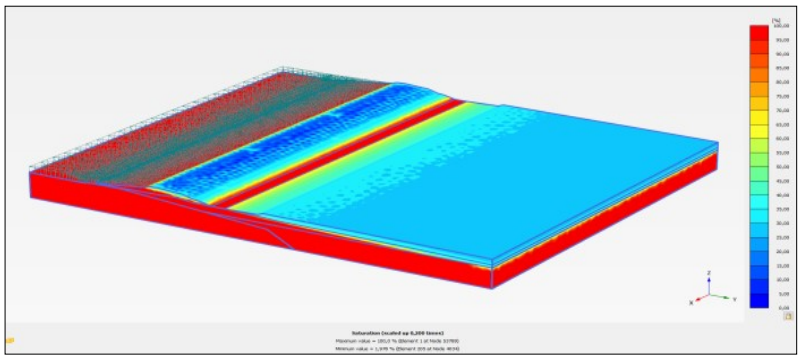


ж



з

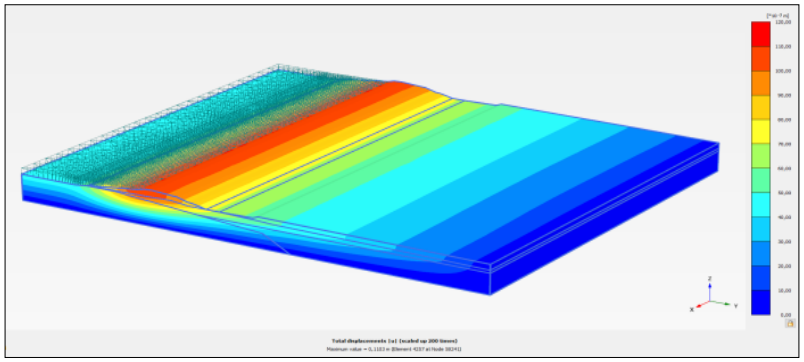
Рис. 3.128. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *е* — коэффициент переуплотнения ОС; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через плотину Craund water flow /*q*/; *з* — активное поровое давление Pactive



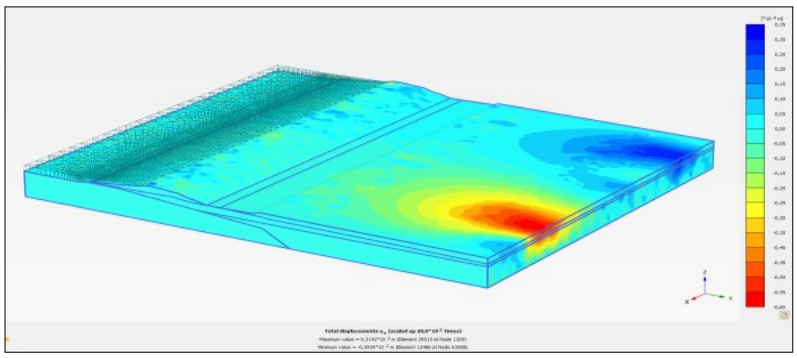
и

Рис. 3.128. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (окончание): *и* — водопроницаемость Saturation (расчетный вариант № 13)

Далее приведены картины перемещений и гидравлических показателей при уровне воды в водохранилище +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) для варианта № 14 (рис. 3.129).

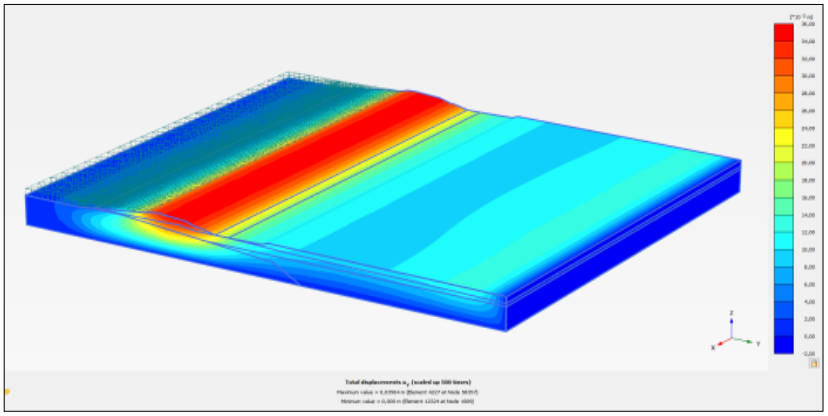


а

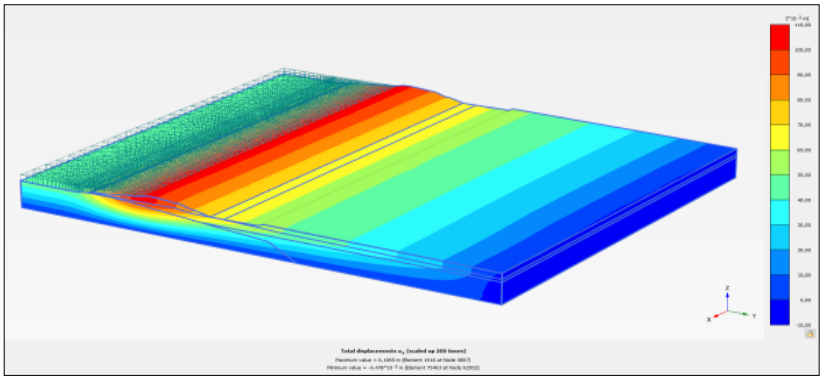


б

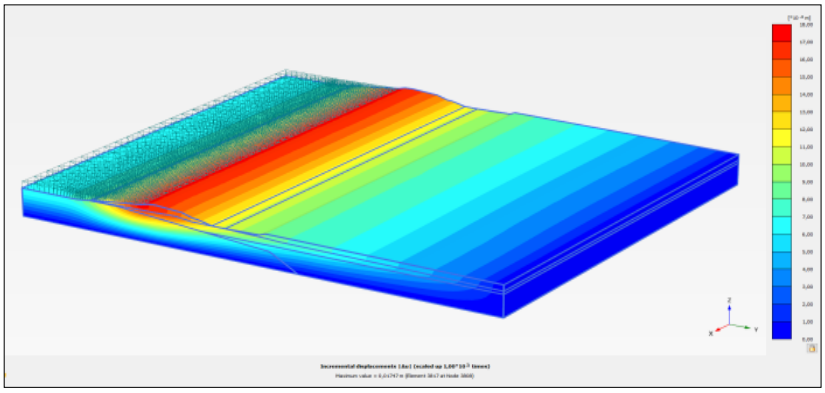
Рис. 3.129. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (начало): *а* — общие $U_{общ.}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

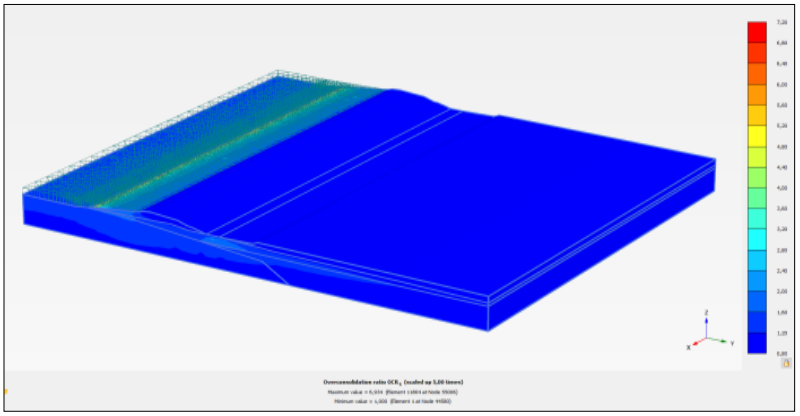


г

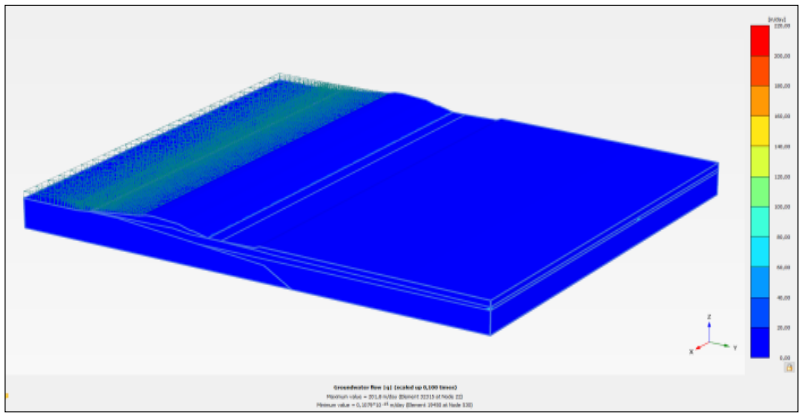


д

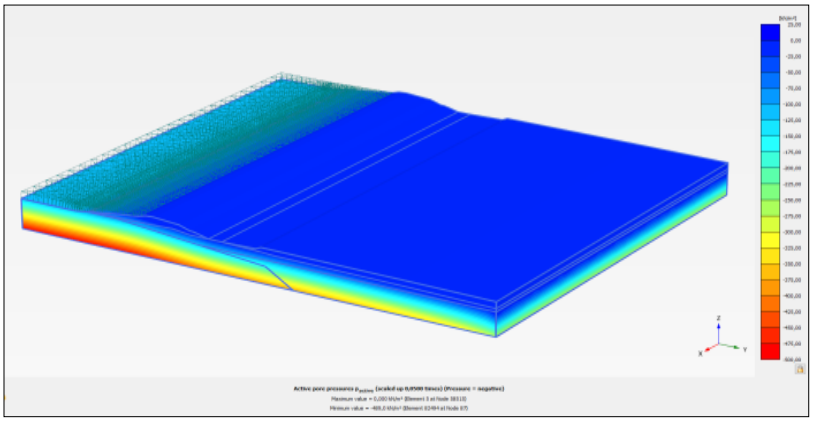
Рис. 3.129. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /ΔU/



е

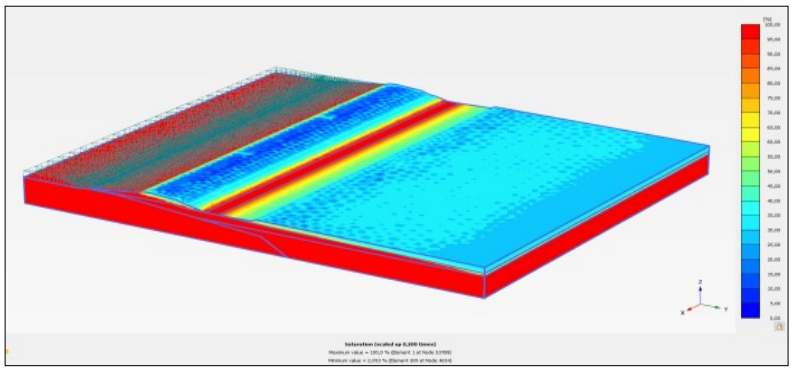


ж



з

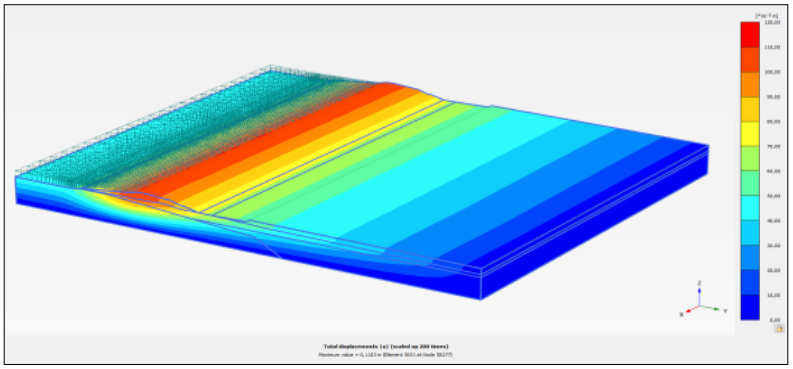
Рис. 3.129. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *е* — коэффициент переуплотнения ОС; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через плотину Craund water flow /*q*/; *з* — активное поровое давление Pactive



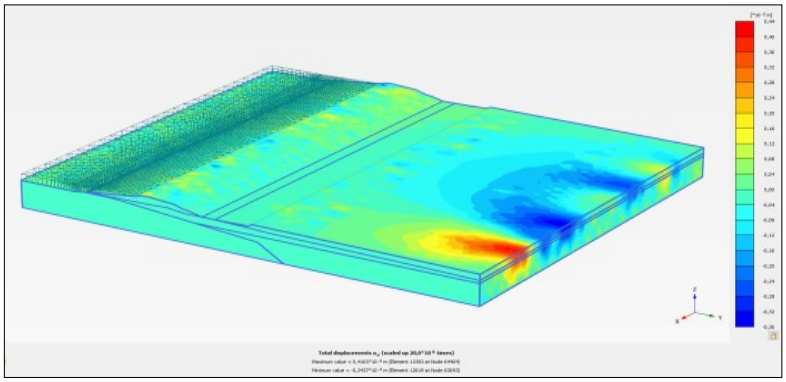
и

Рис. 3.129. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (окончание): *и* — водопроницаемость Saturation (расчетный вариант № 14)

Далее приведены картины перемещений и гидравлических показателей при уровне воды в водохранилище +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) для варианта № 15 (рис. 3.130).

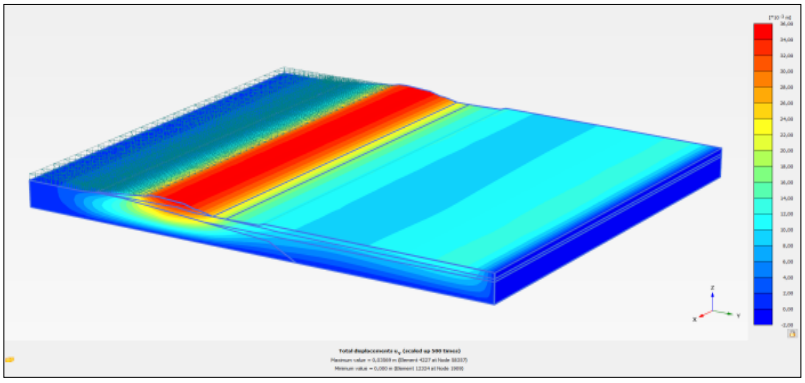


а

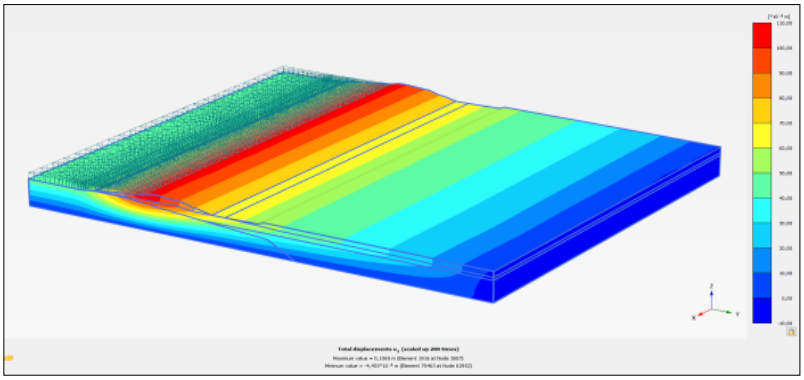


б

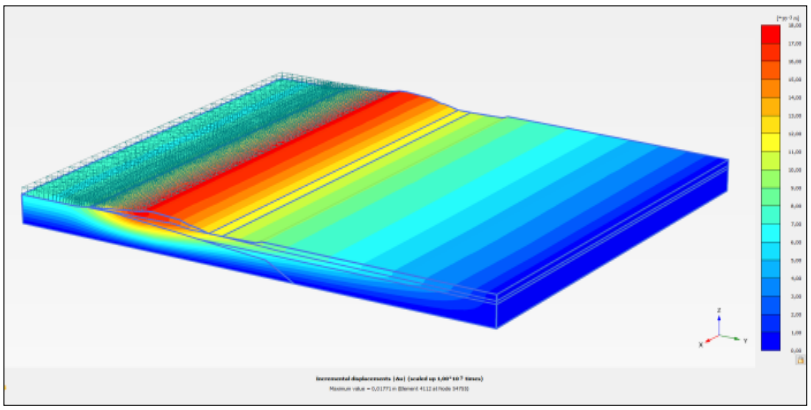
Рис. 3.130. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (начало): *а* — общие $U_{общ.}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

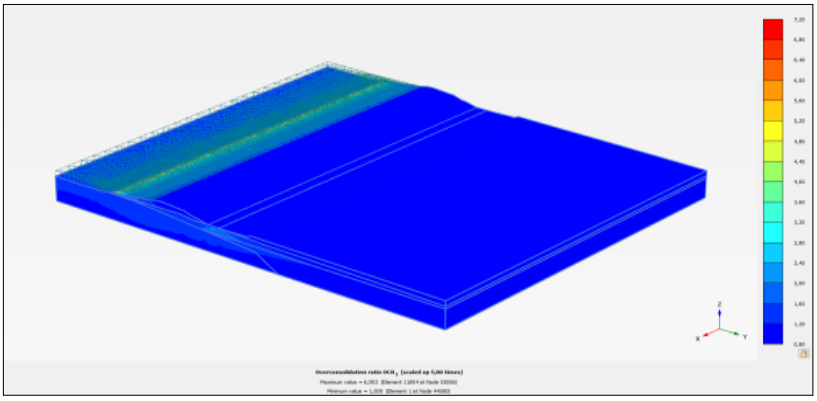


г

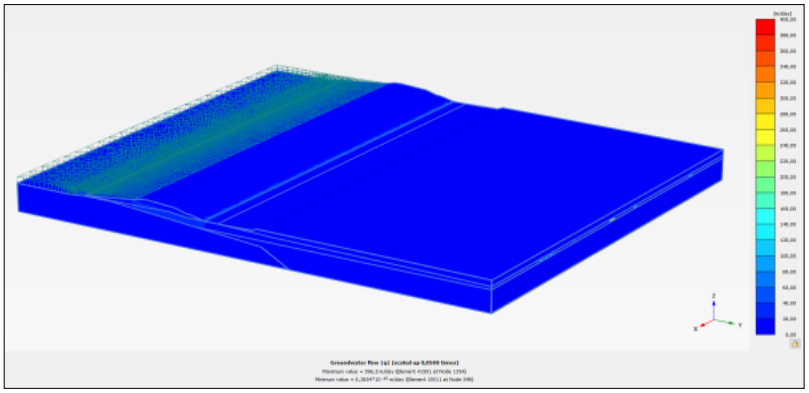


д

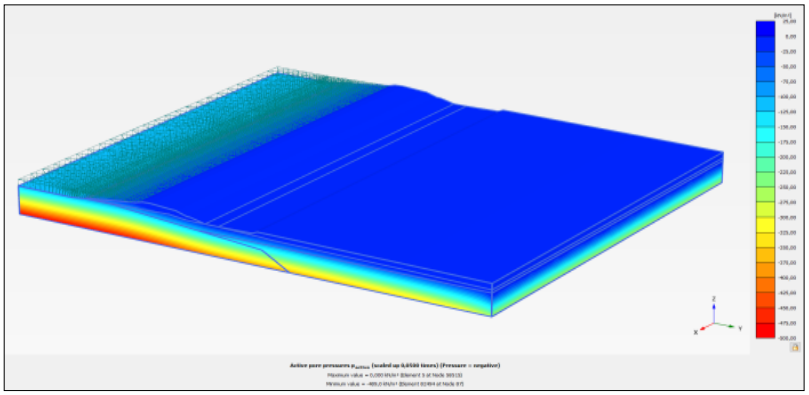
Рис. 3.130. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /ΔU/



е

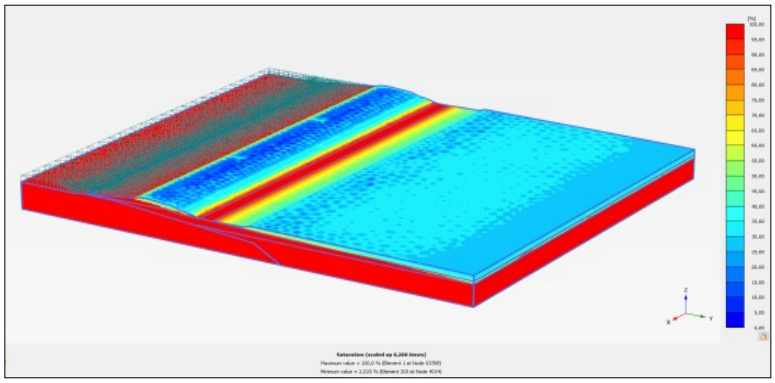


ж



з

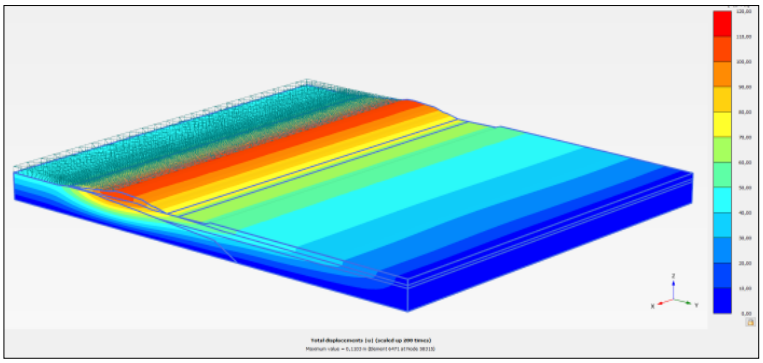
Рис. 3.130. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *е* — коэффициент переуплотнения ОС; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через плотину Craund water flow /*q*/; *з* — активное поровое давление Pactive



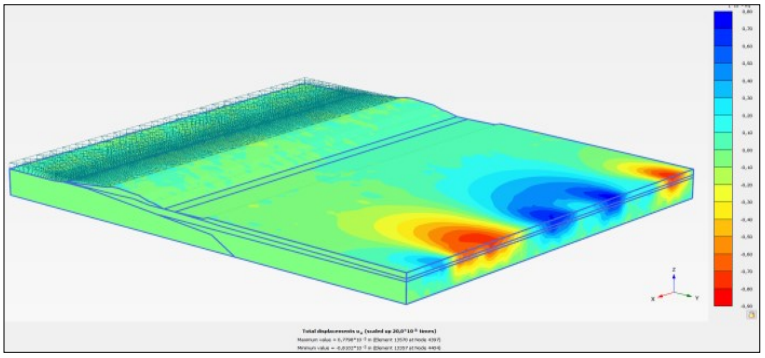
и

Рис. 3.130. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (окончание): *и* — водопроницаемость Saturation (расчетный вариант № 15)

Далее приведены картины перемещений и гидравлических показателей при уровне воды в водохранилище +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) для варианта № 16 (рис. 3.131).

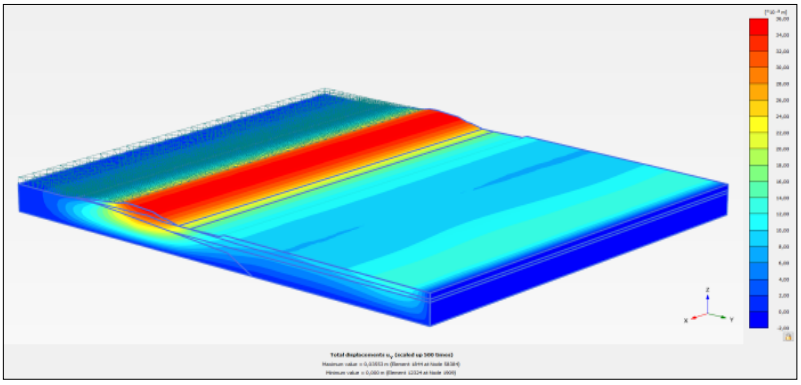


а

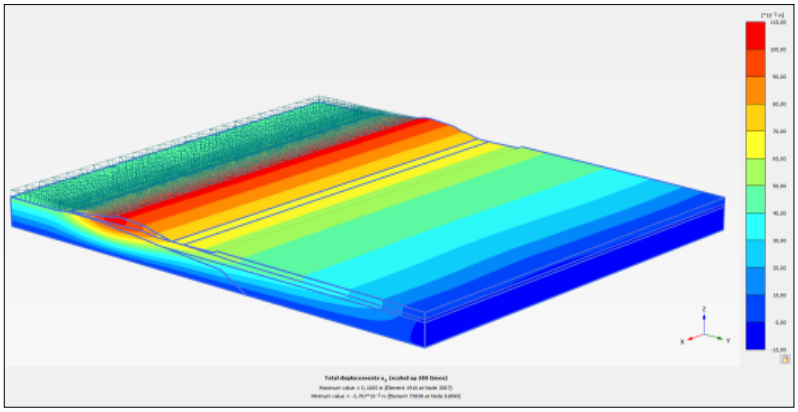


б

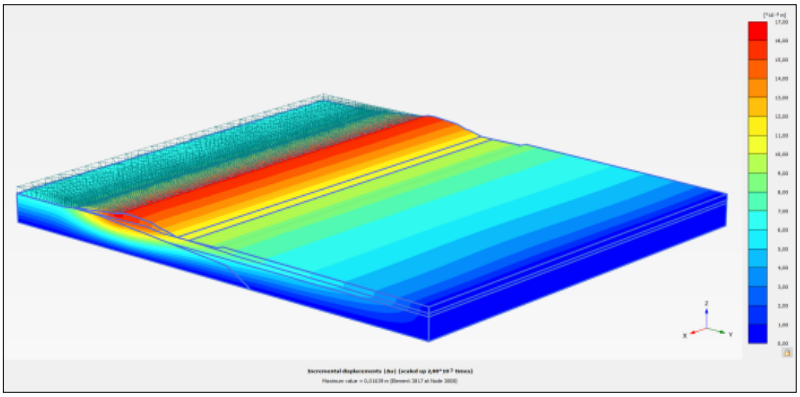
Рис. 3.131. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (начало): *а* — общие $U_{общ.}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

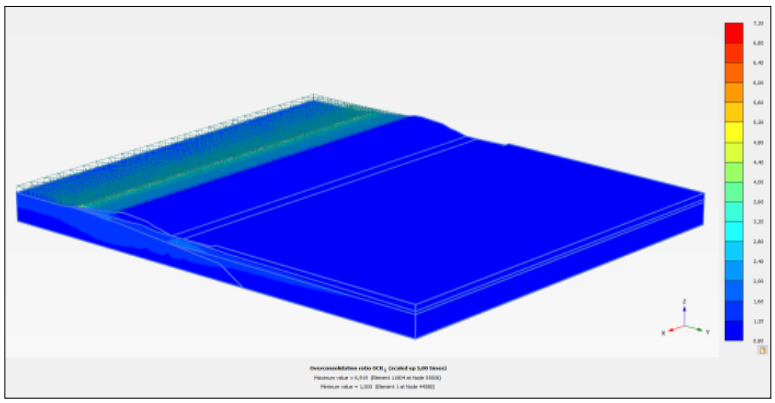


г

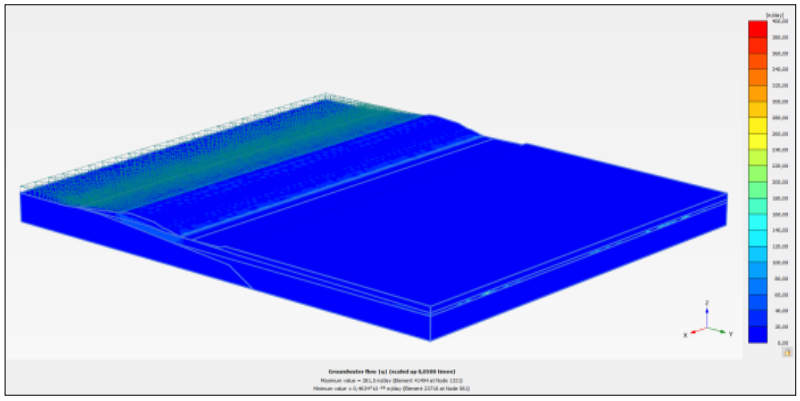


д

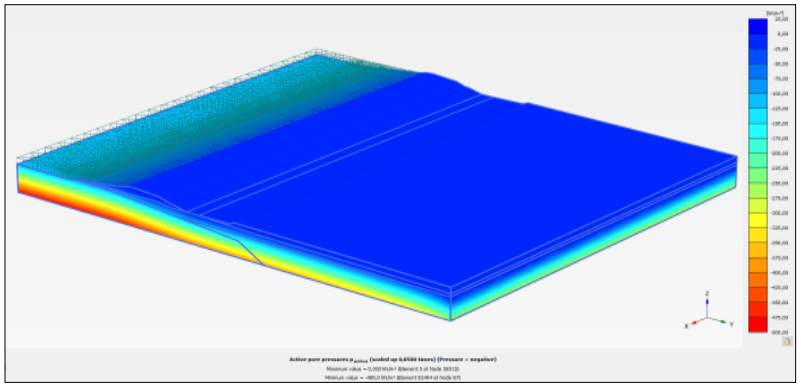
Рис. 3.131. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /ΔU/



е

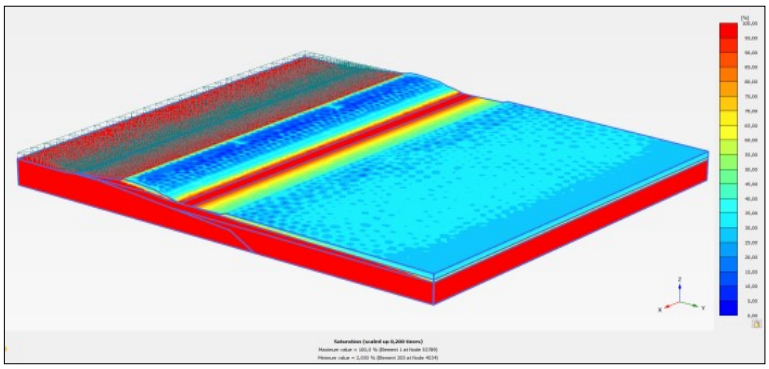


ж



з

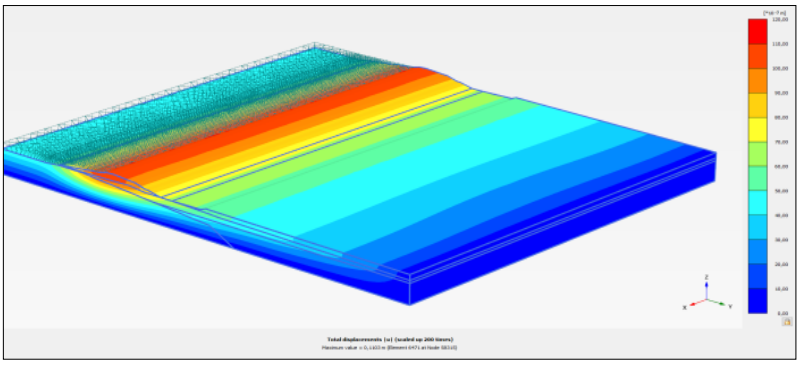
Рис. 3.131. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *е* — коэффициент переуплотнения ОС; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через плотину Craund water flow /*q*/; *з* — активное поровое давление Pactive



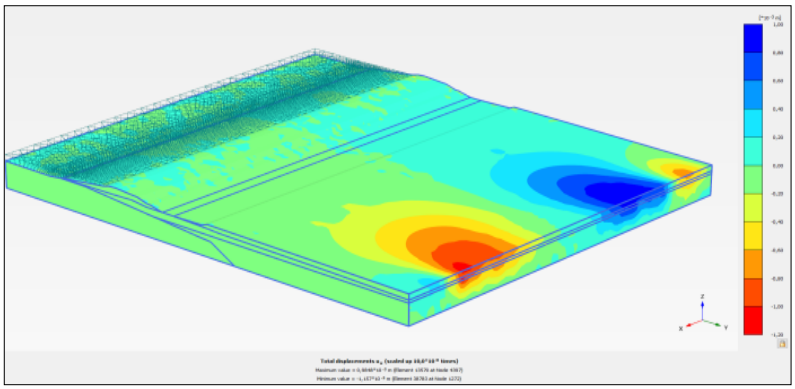
и

Рис. 3.131. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (окончание): *и* — водопроницаемость Saturation (расчетный вариант № 16)

Далее приведены картины перемещений и гидравлических показателей при уровне воды в водохранилище +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) для варианта № 17 (рис. 3.132).

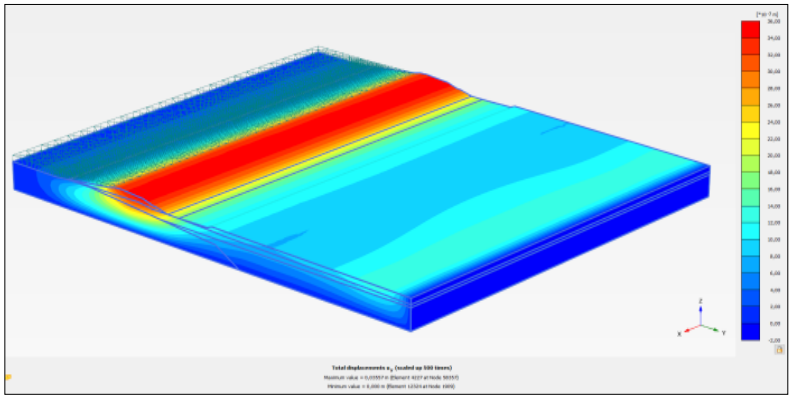


а

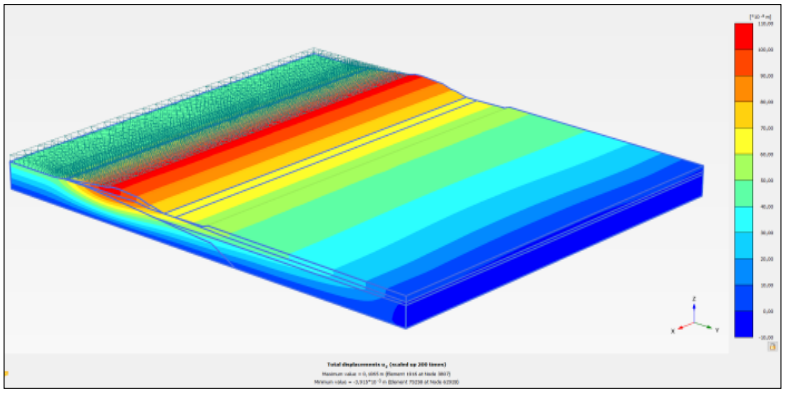


б

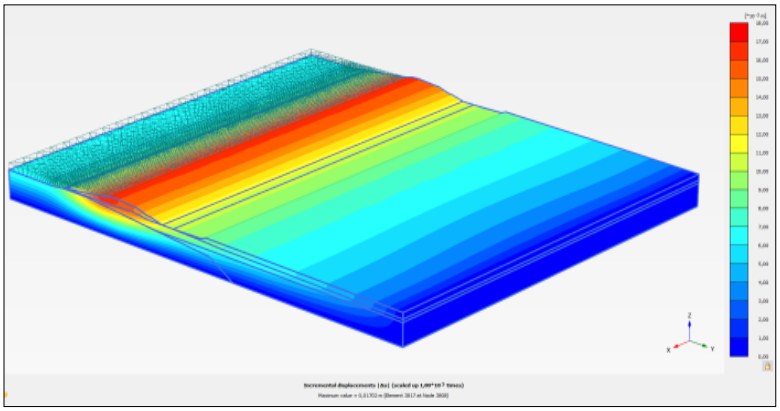
Рис. 3 132. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (начало): *а* — общие $U_{общ.}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

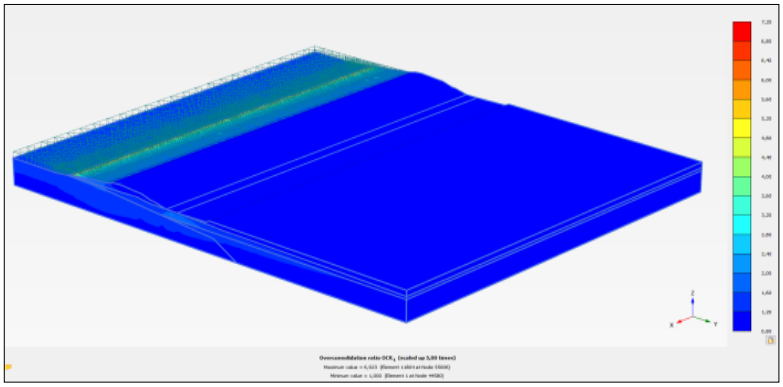


г

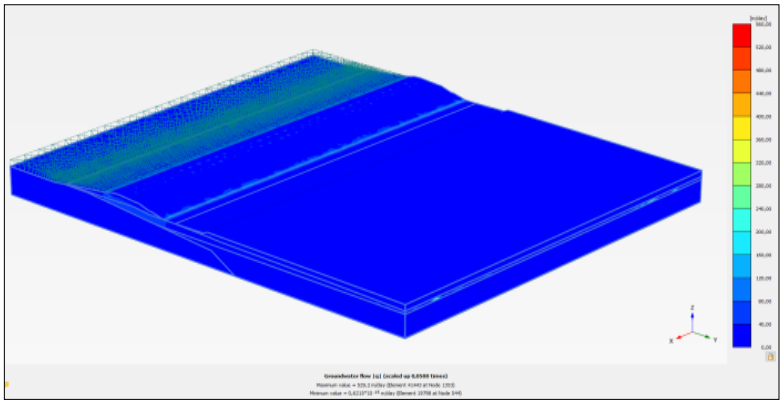


д

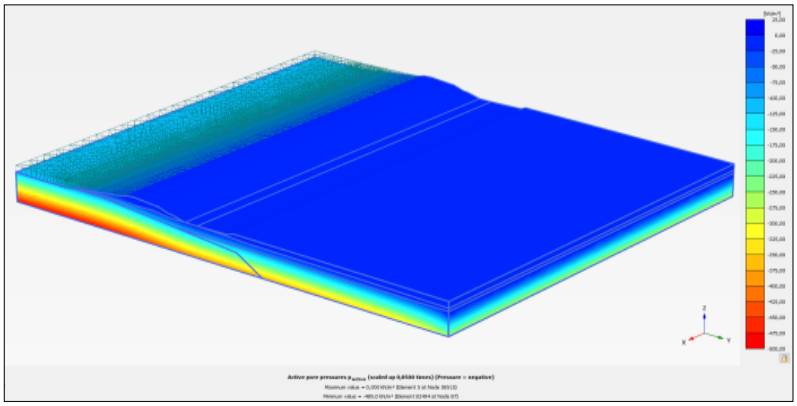
Рис. 3 132. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *а* — общие $U_{общ.}$; *б* — субгоризонтальные U_x; *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /ΔU/



е

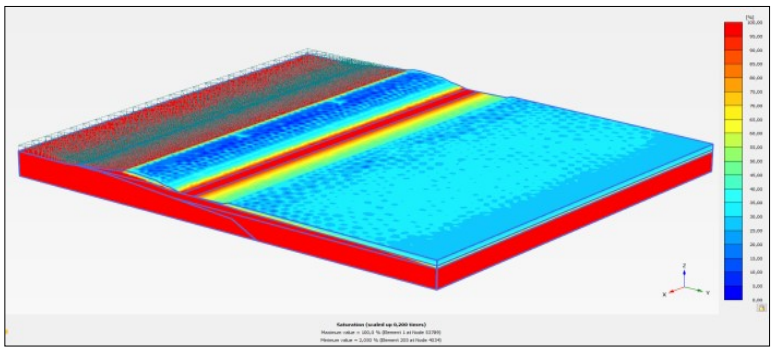


ж



з

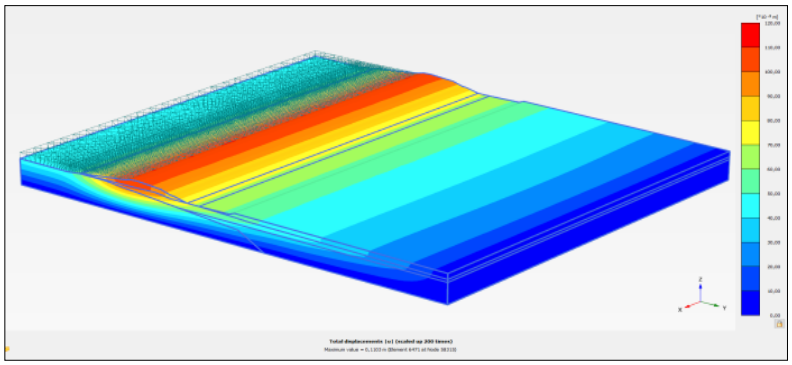
Рис. 3 132. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *е* — коэффициент переуплотнения OC; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через плотину Craund water flow /*q*/; *з* — активное поровое давление Pactive



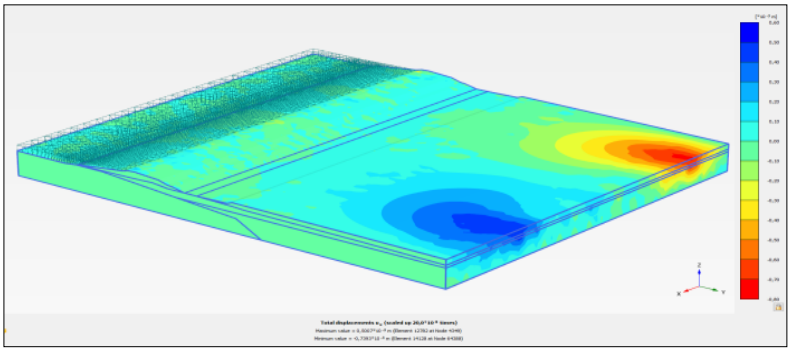
и

Рис. 3 132. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (окончание): *и* — водопроницаемость Saturation (расчетный вариант № 17)

Далее приведены картины перемещений и гидравлических показателей при уровне воды в водохранилище +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) для варианта № 18 (рис. 3.133).

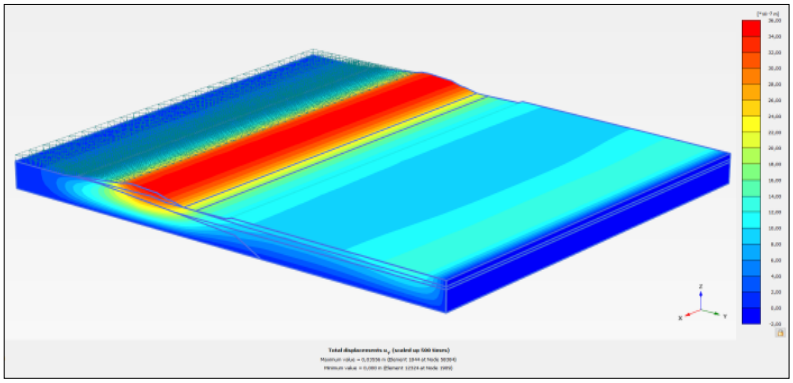


а

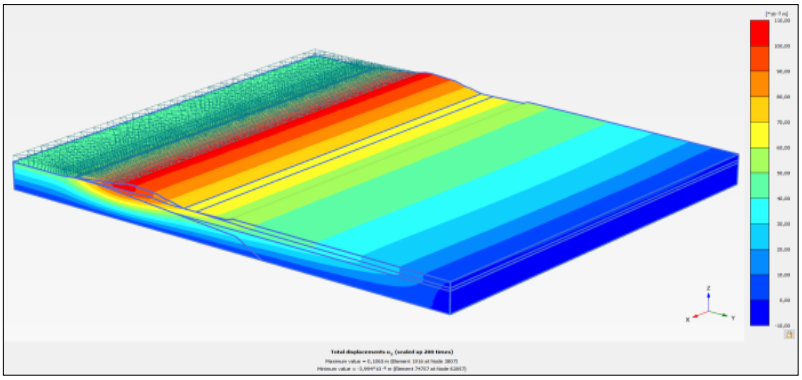


б

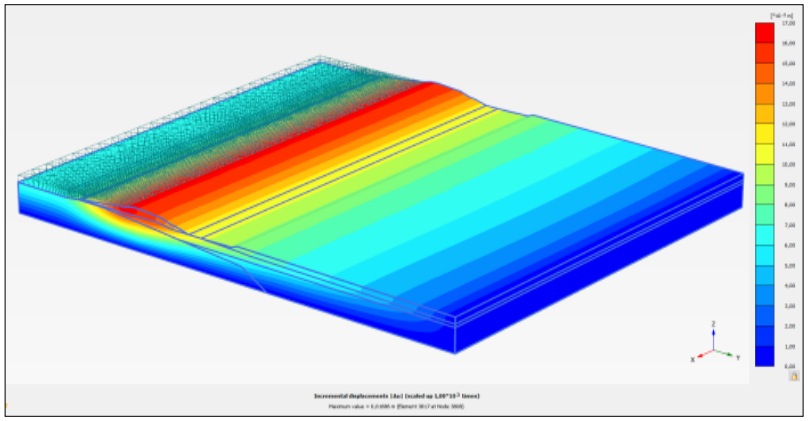
Рис. 3.133. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (начало): *а* — общие $U_{общ.}$; *б* — субгоризонтальные U_x



в

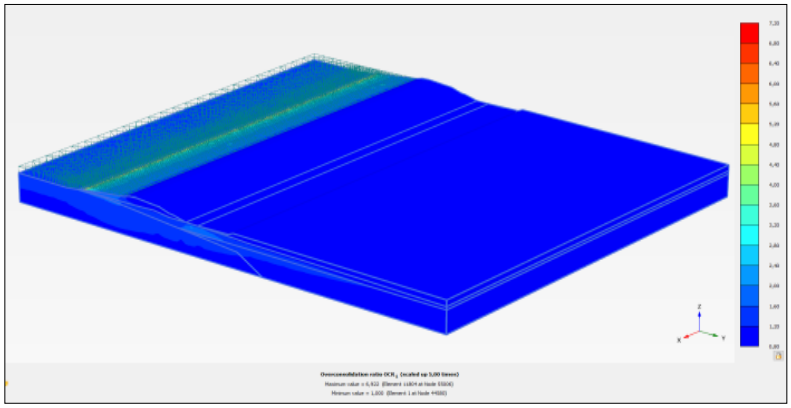


г

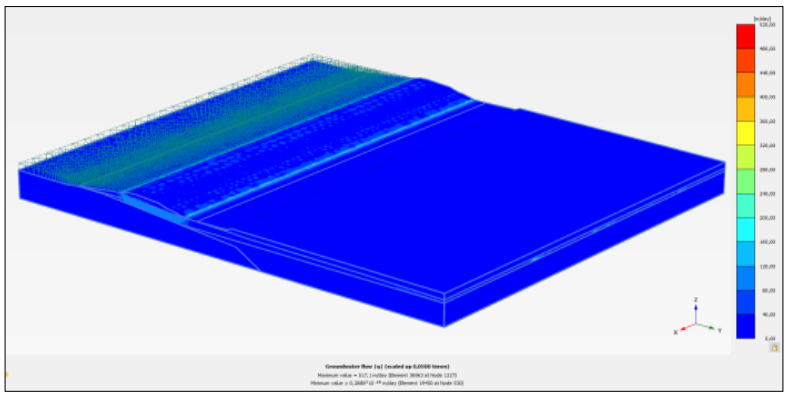


д

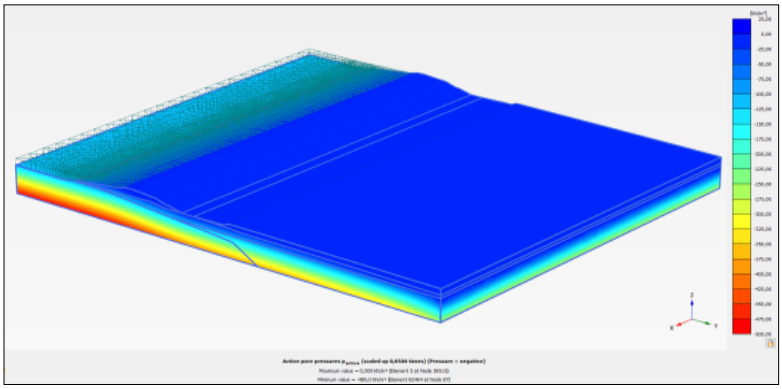
Рис. 3.133. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *в* — субгоризонтальные U_y; *г* — вертикальные U_z; *д* — приращения перемещений /ΔU/



е

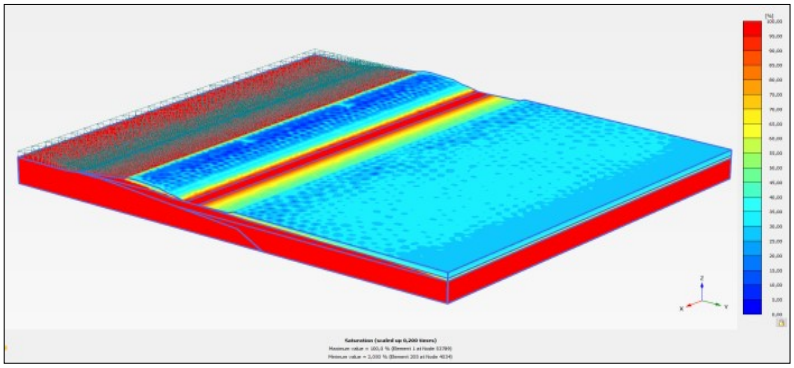


ж



з

Рис. 3.133. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (продолжение): *е* — коэффициент переуплотнения ОС; *ж* — скорость фильтрации грунтовых вод через плотину Craund water flow /*q*/; *з* — активное поровое давление Pactive



и

Рис. 3.133. Картины распределения перемещений и гидравлических показателей грунтов плотины при уровне воды в водохранилище на отметке +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки воды в пьезометрах — январь 2025 г.) (окончание): *и* — водопроницаемость Saturation (расчетный вариант № 18)

3.3.5. Основные комментарии и выводы

В целях обобщения и систематизации результатов моделирования для рассмотренных вариантов выполнены расчеты объемов уходящей воды из водохранилища и динамика снижения объема воды в водохранилище в зависимости от временного интервала: час, сутки, неделя, месяц (табл. 3.16).

Таблица 3.16

Расчетные значения объемов уходящей воды из водохранилища и динамики снижения объема воды в водохранилище в зависимости от временного интервала: час, сутки, неделя, месяц

Варианты	Коэффициент фильтрации			Скорость фильтрации: $v = k * I$, м/сут	Объем уходящей воды из водохранилища Q, м^3/сут	Динамика снижения объема воды в водохранилище: час/сутки/неделя/месяц: $V = V_0 - Q * t$, $V_0 = 3200000$ м^3			
	k_x	k_y	k_z			час	сутки	неделя	месяц
1	1,5	1,5	1,5	0,43125	253242,64	3199835,05	3196041,13	3172287,88	3081233,75
2	15	15	15	4,3125	2532426,4	3198350,47	3160411,25	2922878,75	2012337,5
3	75	75	75	21,5625	12662132	3191752,34	3002056,25	1814393,75	–2738312,5
4	150	150	150	43,125	25324264	3183504,69	2804112,5	428787,5	–8676625,0
5	300	300	300	86,25	50648528	3167009,38	2408225,0	–2342425,0	–20553250,0
6	500	500	500	143,75	84414213,3	3145015,63	1880375,0	–6037375,0	–36388750,0
7	750	750	750	215,625	126621320	3117523,44	1220562,5	–10656062,5	–56183125,0
8	1000	1000	1000	287,5	168828427	3090031,25	560750,0	–15274750,0	–75977500,0

Примечание. $Q = k * I * F$; $F = 9180$ м^2 (высота плотины — 18,0 м; длина плотины по гребню — 510,0 м), $I_{ср.} = 0{,}2875$.

Используя данные табл. 3.16, построены зависимости объема воды в водохранилище от коэффициента фильтрации для заданных временных интервалов: час, сутки, неделя и месяц (рис. 3.134 и 3.135).

Из полученных зависимостей на рис. 3.134 и 3.135 следует, что при скорости фильтрации 1000 м/сут и более весь объем воды полностью уйдет из водохранилища за сутки, при скорости 150–170 м/сут — за неделю и при скорости 40–50 м/сут — за месяц.

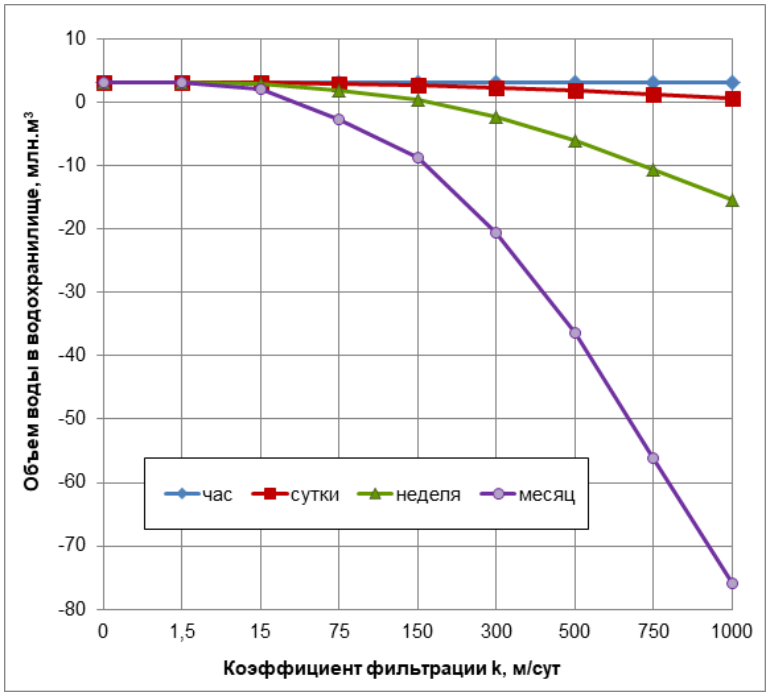


Рис. 3.134. Зависимости объема воды в водохранилище от коэффициента фильтрации (по маркерам заданных значений)

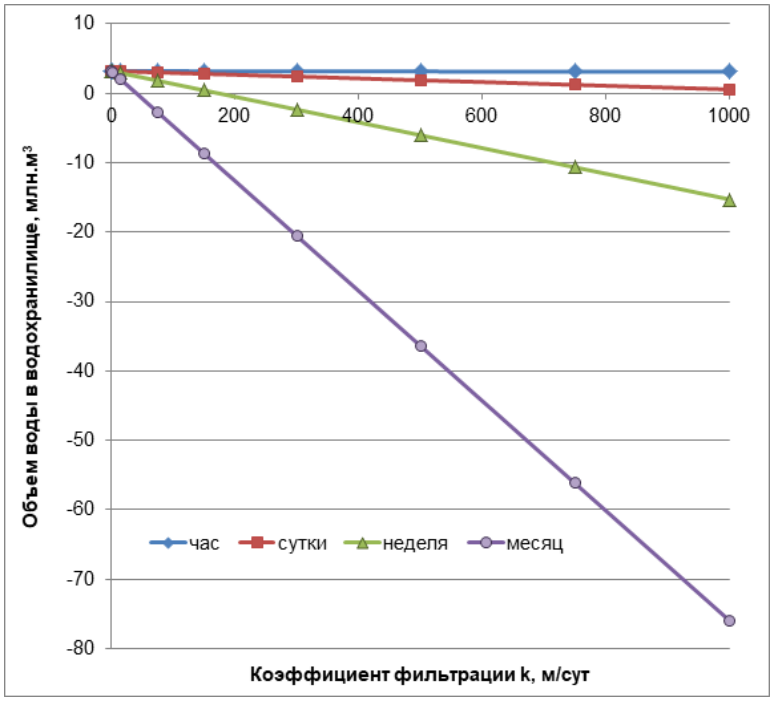


Рис. 3.135. Зависимости объема воды в водохранилище от коэффициента фильтрации (в заданном масштабе)

На рис. 3.136–3.139 показаны зависимости объема воды в водохранилище от коэффициента фильтрации в логарифмическом масштабе. Из выше представленных и этих зависимостей можно сделать вывод о том, что при скорости фильтрации до 15 м/сут процесс фильтрации можно будет контролировать. Представляется, что процесс фильтрации станет неуправляемым при скорости свыше 15 м/сут.

Контролируемым (измеряемым) показателем является уровень воды в водохранилище, поэтому на рис. 3.140–3.143 приведены расчетные зависимости отметки воды от скорости фильтрации в зависимости от принятых временных интервалов.

Таким образом, основные результаты и выводы компьютерного моделирования сводятся к следующему.

Построена геофильтрационная 3D-модель плотины водохранилища и территории низового склона, отражающая гидрогеологический режим объекта инженерных изысканий.

Выполнены фильтрационные расчеты, на основании чего определены расчетные значения гидравлического уклона по наблюдательным створам. Выполнена оценка объемов воды, которая фильтруется из водохранилища: при среднем коэффициенте фильтрации в моделируемой области 1 м/сут объем составит 16179,4 м^3/сут; при коэффициенте фильтрации 0,1 м/сут объем составит 1617,94 м^3/сут.

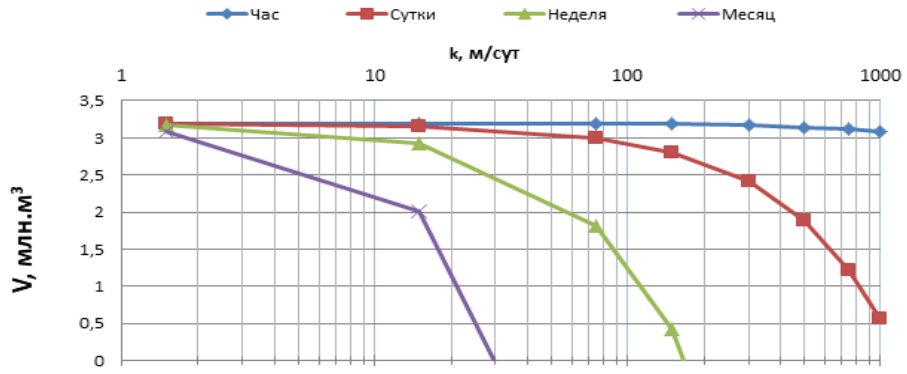


Рис. 3.136. Зависимости объема воды в водохранилище от коэффициента фильтрации (логарифмический масштаб)

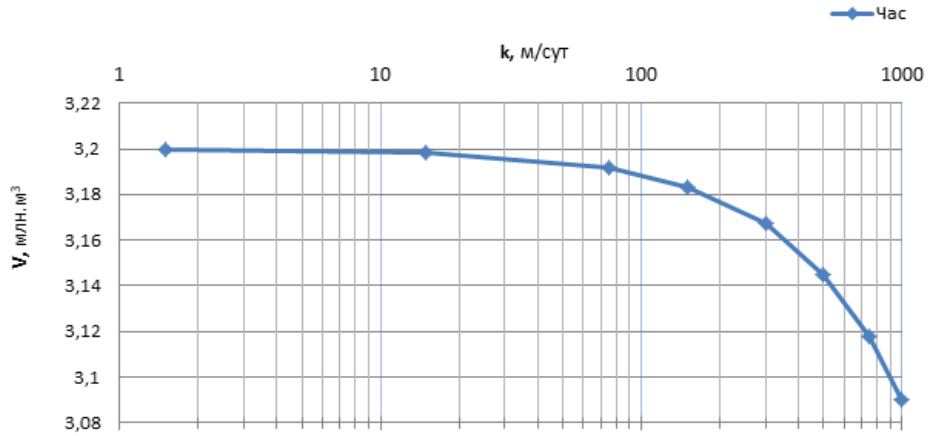


Рис. 3.137. Динамика снижения объема воды в водохранилище за час (логарифмический масштаб)

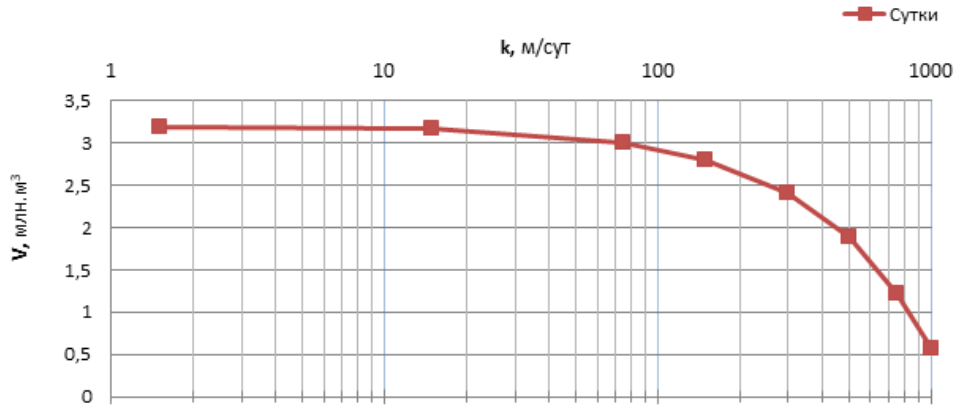


Рис. 3.138. Динамика снижения объема воды в водохранилище за сутки (логарифмический масштаб)

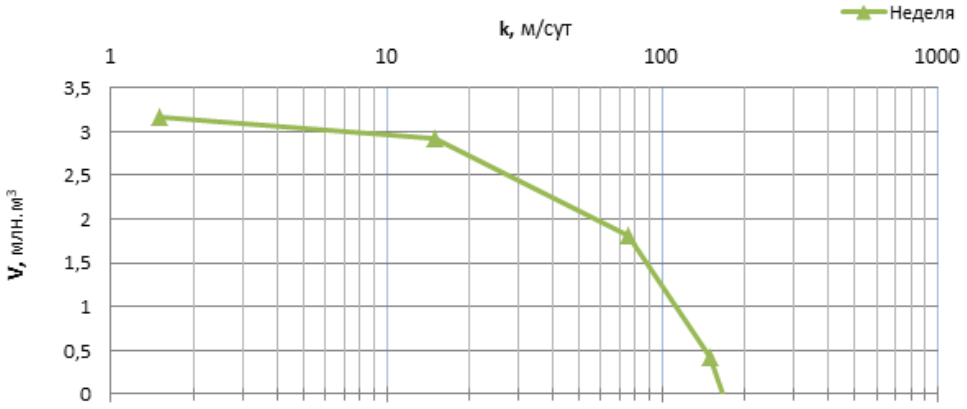


Рис. 3.139. Динамика снижения объема воды в водохранилище за месяц (логарифмический масштаб)

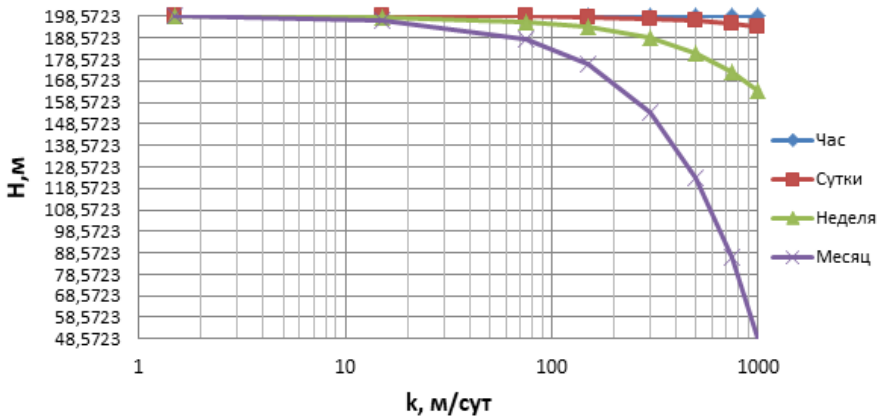


Рис. 3.140. Зависимости снижения уровня воды в водохранилище от коэффициента фильтрации (логарифмический масштаб) для принятых временных интервалов

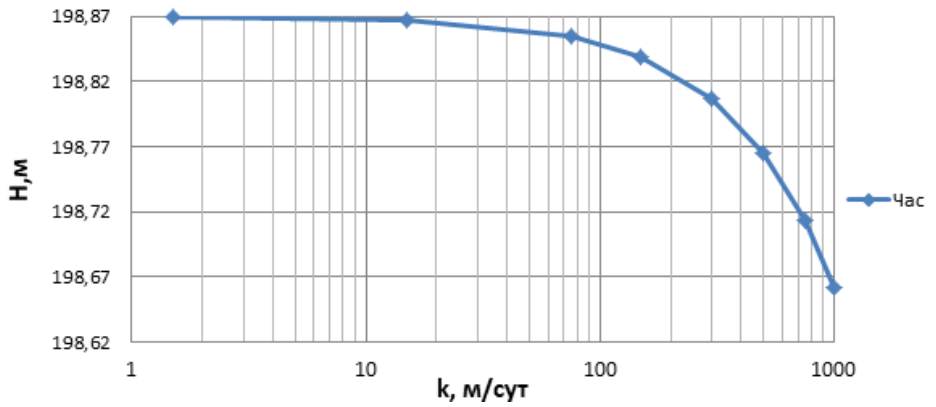


Рис. 3.141. Зависимости снижения уровня воды в водохранилище от коэффициента фильтрации (логарифмический масштаб) для принятого временного интервала час

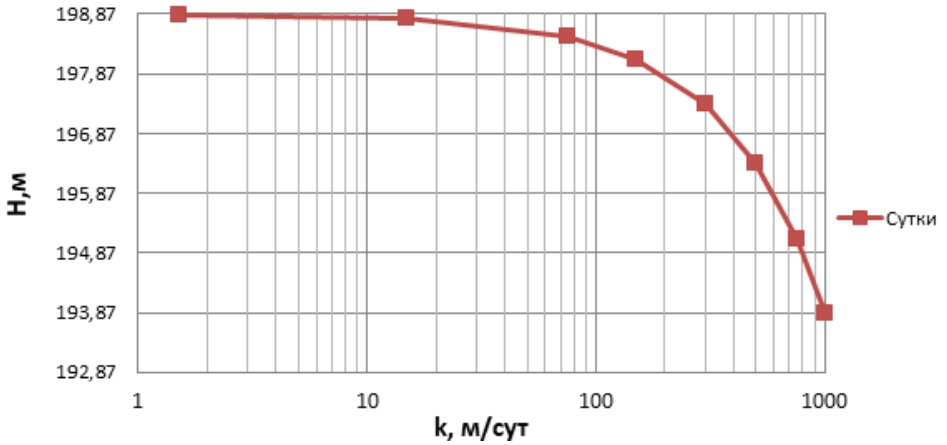


Рис. 3.142. Зависимости снижения уровня воды в водохранилище от коэффициента фильтрации (логарифмический масштаб) для принятого временного интервала сутки

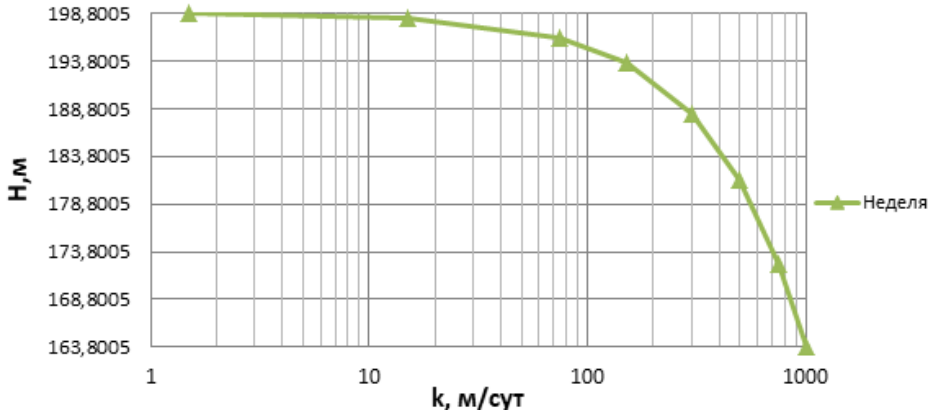


Рис. 3.143. Зависимости снижения уровня воды в водохранилище от коэффициента фильтрации (логарифмический масштаб) для принятого временного интервала неделя

Построена гидрогеомеханическая 3D-модель плотины водохранилища и территории низового склона, позволяющая исследовать совместные фильтрационно-деформационные процессы в объекте инженерных изысканий. Расчетные характеристики физико-механических свойств насыпных грунтов плотины и естественного геологического основания приняты по результатам геологического бурения, фильтрационных испытаний и лабораторных определений свойств грунтов и пород, выполненных ранее инженерных изысканий.

Выполнено гидрогеомеханическое 3D-моделирование при уровне воды в водохранилище +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки уровня воды в пьезометрах — октябрь 2024 г.). По результатам моделирования построены картины формирующихся перемещений грунтов и пород и гидравлических показателей. Выполнен расчет показателя надежности (аналог коэффициента устойчивости), значения которого составило 2,587, т. е. значительно выше нормируемого 1,2. Это свидетельствует о том, что плотина водохранилища на октябрь 2024 г. находилась в устойчивом состоянии.

Выполнено гидрогеомеханическое 3D-моделирование при уровне воды в водохранилище +198,88 м и в теле плотины по данным гидрогеологической службы (отметки уровня воды в пьезометрах — январь 2025 г.). По результатам моделирования построены картины формирующихся перемещений грунтов и пород и гидравлических показателей. Выполнен расчет показателя надежности (аналог коэффициента устойчивости), значения которого составило 2,598, т. е. значительно выше нормируемого 1,2. Это свидетельствует о том, что плотина водохранилища на январь 2025 г. также находилась в устойчивом состоянии.

Выполнено 18 расчетных вариантов гидрогеомеханического 3D-моделирования прогнозного состояния плотины водохранилища и территории низового склона при изменении коэффициента фильтрации грунтов от 1,5 до 1000 м/сут. Для каждого расчетного варианта построены картины формирующихся перемещений грунтов и пород и гидравлических показателей, а также определены объемы фильтрующейся воды в заданную единицу времени (час/сутки/неделя/месяц).

Результаты 3D-моделирования прогнозного фильтрационного состояния плотины водохранилища и территории низового склона обобщены, систематизированы и представлены графическими зависимостями объемов воды в водохранилище. Зависимости дают возможность наглядно видеть взаимосвязь влияющих факторов и формирующихся фильтрационных процессов и укрупненно прогнозировать динамику их изменения во времени.

По результатам фильтрационных расчетов и моделирования следует ожидать, что возрастание скорости фильтрации воды через тело плотины будет сопровождаться разжижением слагающих ее грунтов и механической суффозией — выносом мелких частиц. Вместе с тем механическая прочность скелета плотины, определяемого крупнообломочным породным материалом и щебнем, возможно, не будет утрачена при условии сохранения сплошности пород геологического основания.

4. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ БАРЕНЦЕВА ЕВРО-АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА РОССИИ

4.1. Методические подходы к многофакторной мультимасштабной оценке состояния хвостохранилища

Методические подходы к выполнению многофакторной оценки включают в себя идентификацию основных влияющих факторов, применяемых методов и оборудования для исследований и мониторинга, решаемые задачи, а также понятия и критерии надежности и безопасности [51, 190–199].

При выполнении исследований авторами выделены основные факторы промышленной безопасности объектов складирования минеральных отходов горного производства западной части российского сектора Арктики:

- геометрические размеры ГТС хвостохранилища;
- рельеф;
- структура геологического основания;
- гидрогеологический режим;
- свойства пород и грунтов геологического основания;
- геометрические параметры ограждающих сооружений;
- свойства грунтов дамб обвалования;
- свойства намывных отложений;
- технологические процессы складирования хвостов обогатительной фабрики;
- режимы работы пульпопроводов;
- технологические системы водоуправления;
- объемы и динамика складируемых отходов;
- длина (геометрические параметры) намывных пляжей;
- геометрические и технологические параметры прудка-отстойника;
- положение депрессионной поверхности;
- гидравлические условия;
- гидростатический напор;
- гидродинамические параметры;
- проницаемость пород и грунтов геологического основания;
- проницаемость насыпных грунтов;
- проницаемость грунтов намывных отложений;
- консолидация насыпных грунтов;
- консолидация грунтов намывных отложений;
- механическая прочность ограждающих сооружений;
- фильтрационная устойчивость ограждающих сооружений;
- климатические условия;
- осадконакопление, снеготаяние, половодье;
- природные электромагнитные поля;
- проницаемость стратосферы и атмосферы;
- перемещения больших масс воздуха (ветренность).

Комплексные междисциплинарные исследования, выполняемые для многофакторной оценки ГТС хвостохранилища по данным многоуровневого мониторинга:

– визуальные;

– фотооптические;

– геодезические: топографическая съемка с передачей плановых и высотных координат, геодезическая привязка контрольных пунктов, построение топографического и ситуационного планов крупных масштабов; высокоточное и техническое нивелирование;

– геологические: бурение скважин на глубину до 25–30 м с отбором керна и построением геологического разреза, оборудование наблюдательных пьезометров;

– гидрологические: фильтрационные испытания (экспресс-налив) скважин-пьезометров; промеры глубин воды в прудке-отстойнике;

– геофизические: георадарные зондирования низового склона (ярусов) и гребня дамбы;

– дистанционные: цифровая аэрофотосъемка с применением БПЛА;

– дистанционные: выбор, формирование, обработка и анализ радарных и спектральных космоснимков;

– лабораторные: определения показателей физико-механических грунтов, оценка их состава;

– компьютерные: построение фильтрационной 3D-модели; построение гидрогеомеханической 3D-модели, гидрогеомеханическое 3D-моделирование фильтрационно-деформационных процессов.

Виды оборудования, использованного при многофакторном исследовании комплекса ГТС хвостохранилища, — цифровые фотокамеры, тахеометры, нивелиры, GPS-приемники, система высокоточного наблюдения, система контроля состояния стенок скважин, БПЛА с цифровой фотокамерой, приборы неразрушающего контроля, геофизическая георадиолокация (георадары), сейсмография, оборудование и приборы для надводно-подводно-технических работ и др.

Решение задач на основе многофакторной оценки:

– разработка цифровой модели рельефа (поверхности) [13, 39, 61, 200];

– разработка геофильтрационной 3D-модели хвостохранилища и прилегающей территории [42, 57, 59, 201–203];

– разработка гидрогеомеханической 3D-модели хвостохранилища [42, 201];

– оценка гидрогеомеханического состояния ГТС хвостохранилища [40, 204];

– прогноз тенденций изменения гидрогеомеханического состояния ГТС хвостохранилища [55, 56];

– выявление потенциально опасных фильтрационно-деформационных процессов [43, 58, 205–207];

– гидравлическая безопасность ограждающих, водосбросных и водопропускных сооружений [208];

– прочностная безопасность ограждающих дамб, водосбросных и водопропускных сооружений, основания сооружения;

– надежность ГТС хвостохранилища с учетом нагрузок и воздействий за период эксплуатации [209–211];

– промышленная безопасность производственных зданий, оборудования, механизма и гражданских комплексов, расположенных на близлежащей территории;

– обоснование сейсмобезопасности ГТС хвостохранилища с учетом возможных сейсмических нагрузок;

– разработка рекомендаций и технических мер для минимизации рисков опасных фильтрационно-деформационных процессов, чрезвычайных ситуаций и аварий [52, 212–215].

Особое внимание должно уделяться способам оценки и расчету устойчивости склонов и откосов [208, 210, 215–220].

Обосновывая надежность и безопасность ГТС хвостохранилища, необходимо прежде всего конкретизировать тот смысл, который вкладывается в эти понятия, и те критерии, которые должны быть использованы для их многофакторной оценки [51, 190, 191, 196].

Под надежностью ГТС хвостохранилища в наших исследованиях понимается техническое свойство объекта, характеризующее его способность выполнять определенные функции в условиях эксплуатации. Надежность характеризуется такими качествами, как безотказность, долговечность, ремонтопригодность и сохраняемость во время жизненного цикла хвостохранилища. Показатель надежности является числом, интегрирующим перечисленные показатели и степень влияния факторов, которые не имеют вероятностного характера. Чем больше значение показателя надежности, тем выше надежность хвостохранилища.

Следует принимать во внимание, что безопасность ГТС хвостохранилища имеет более широкий смысл, т. к., помимо технических, включает экономические, социальные, психологические и другие аспекты, например, уровень квалификации обеспечивающего работу ГТС персонала [51]. Определяющее значение имеет подготовленность персонала к работе в условиях чрезвычайных ситуаций, наличие материальных запасов на ГТС хвостохранилища (грунта, камня, металла, дерева, тросов, подъемных устройств, передвижных установок энергопитания и т. д.).

Основные требования к безопасности ГТС хвостохранилища отражены в СП-58.13330.2019 «Гидротехнические сооружения. Основные положения» [48]. Суть их сводится к тому, что безопасность ГТС — это комплекс свойств и мероприятий, позволяющих обеспечить защиту жизни, здоровья и законных интересов людей, имущества физических и юридических лиц, а также окружающей среды.

4.2. Обоснование индикаторов локальных фильтрационно-деформационных процессов на основе многофакторного анализа растительности

Раздел скомпанован по материалам Д. А. Максимова.

Накопители жидких минеральных отходов получили широчайшее применение во многих отраслях современной экономики: промышленности, энергетике, водном хозяйстве и других сферах. Так, в одном Китае насчитывается более 12 тыс. таких накопителей [221]. В связи с этим надежность этих сооружений играет важную роль в современном мире.

При этом одной из основных причин аварий на накопителях являются протечки [222, 223]. Это обуславливает актуальность вопроса обнаружения фильтрационных нарушений в теле ограждающих дамб и плотин, которые могут привести к их появлению [34, 224, 225]. Чаще всего для этих целей используется целый комплекс различных геофизических методов. Однако данные методы, кроме значительных преимуществ, имеют и ряд недостатков: необходимость в дорогостоящем оборудовании и высококвалифицированном персонале, высокая стоимость проведения работ, зависимость от установленной контрольно-измерительной аппаратуры и др. Недостатки геофизических методов обуславливает, как правило, локальное их применение на заранее выделенных потенциально опасных участках накопителей. Для обследования

же сооружения в целом и выделения участков, на которых происходит формирование и развитие локальных фильтрационных нарушений, подходит метод визуальных наблюдений. Однако для эффективного применения визуального обследования для такого узкоспециализированного вида работ, как обнаружение фильтрационных нарушений, требуется специальная система индикаторов, которые бы свидетельствовали о наличии на тех или иных участках сооружения искомых нарушений. В связи с этим актуальной является задача поиска таких индикаторов [226].

Для поиска потенциальных индикаторов наличия локальных фильтрационных нарушений рассмотрим схему разрушения плотины «Лагуна», представленную на рис. 4.1 [227]. Авария на плотине произошла 31 октября 1969 г.

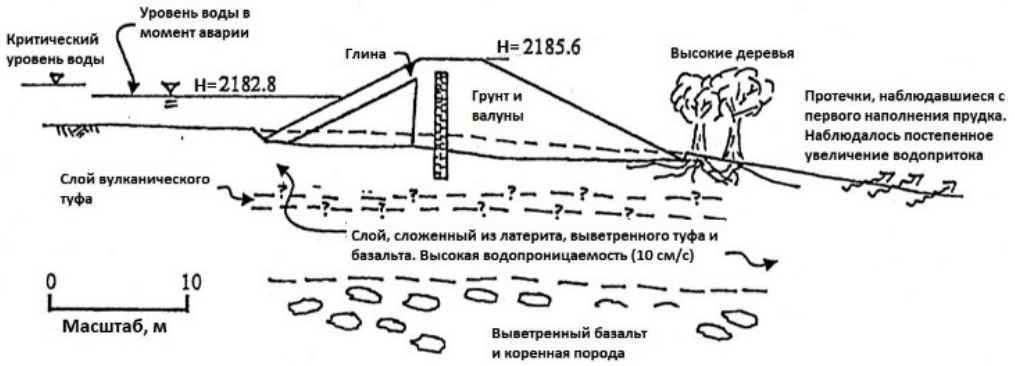


Рис. 4.1. Схема разрушения плотины «Лагуна» (перевод Д. А. Максимова) [227]

Как видно из представленной схемы, основной фильтрационный поток проходил под телом плотины в слое водопроницаемого выветренного туфа и базальта. При этом из-за глубокого расположения потока фильтрующейся воды формирование фильтрационного нарушения не проявлялось на поверхности сооружения. О формировании подобного нарушения свидетельствовало только наличие протечек на небольшом удалении от подножия плотины. При этом наблюдалось постепенное увеличение водопритока, что свидетельствовало о развитии нарушения, которое в итоге и привело к разрушению плотины.

При рассмотрении схемы разрушения плотины «Лагуна» обращает на себя внимание наличие в створе развивающегося нарушения высоких деревьев. При этом подобных деревьев не наблюдалось на соседних участках подножия плотины. Рост высоких деревьев на данном участке объясняется в первую очередь обилием фильтрующейся под сооружением воды, питающей корневую систему. Таким образом, в рассмотренном случае наличие аномально высоких деревьев связанно с наличием фильтрационного нарушения. Другими словами, можно сделать вывод о том, что наличие высоких деревьев на данном участке могло служить индикатором наличия фильтрационного нарушения.

Также стоит отметить, что возможность возникновения такой аномальной растительности связанна в первую очередь с крайне медленным развитием фильтрационного нарушения. Так, развитие данного нарушения проходило с 1927 г. до момента аварии в 1969 г. Такое продолжительное развитие локальных фильтрационных нарушений является, скорее, исключением, чем правилом, поэтому

возникает вопрос о проявлении какого-либо характера аномальной растительности при отсутствии такого длительного периода времени развития нарушения.

Таким образом, можно сформулировать гипотезу о том, что высокие деревья или другой аномальный характер растительности на поверхности и у подножия насыпных сооружений может указывать на наличие нарушений фильтрационных процессов, другими словами, — являться индикатором фильтрационных нарушений. Для подтверждения или опровержения выдвинутой гипотезы проведем, во-первых, анализ литературных источников заданной тематики, а, во-вторых, рассмотрим результаты специальных натурных наблюдений на насыпных сооружениях.

Анализ международного опыта наблюдений на насыпных сооружениях показывает, что, кроме высоких деревьев, как и предполагалось, на участках наличия фильтрационных нарушений, которые приводили к выходу фильтрующихся вод на поверхность или увлажнению поверхности ГТС, могут наблюдаться аномалии в растительном покрове. На рис. 4.2 представлены взаимно противоположные варианты воздействия фильтрующихся вод на растительный покров.

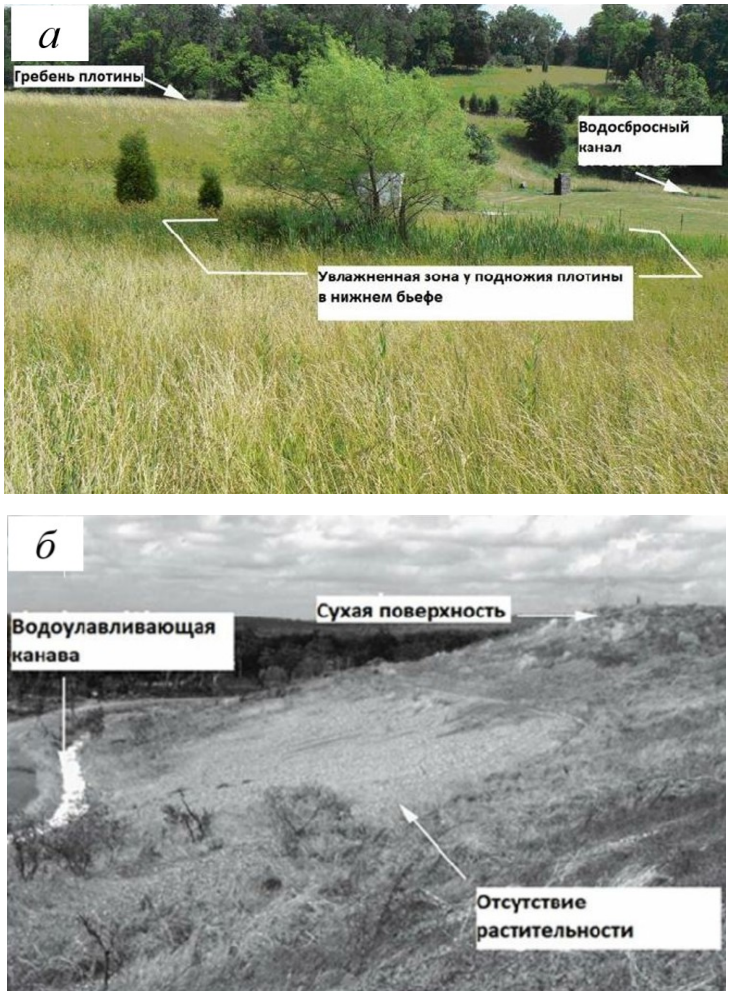


Рис. 4.2. Участки с аномальным характером растительности: *а* — увлажненная зона у подножия плотины [228]; *б* — участок ГТС с отсутствующей растительностью [229]

На рис. 4.2 *а* приведен пример более интенсивного относительно смежных участков развития растительного покрова на участке локального фильтрационного нарушения. Фильтрующаяся вода на локальном участке у подножия плотины привела к увеличению увлажненности приповерхностного участка почвы. Увлажнение почвы привело к более бурному росту растительности в данной области. Другими словами, локальные фильтрационные процессы привели к более интенсивному развитию растительного покрова на вышележащем участке поверхности.

На рис. 4.2 *б* представлен обратный случай воздействия локальных фильтрационных процессов на растительный покров: протекание фильтрующейся воды вблизи поверхности может приводить не только к развитию растительного покрова, но и к его деградации. Так, на дамбе хвостохранилища уранового рудника Rum Jungle в Австралии наблюдалась локальная деградация растительного покрова (рис. 4.2 *б*) [229]. Хвостовые отложения, полученные в результате переработки сульфидных руд приводили к значительному изменению кислотности фильтрующейся в теле дамбы воды. На участке локального нарушения фильтрационных процессов, сопровождавшегося поднятием уровня фильтрующейся воды, вода с измененной кислотностью воздействовала на корневую систему растений, приводя к деградации растительное покрова, а затем и к полному его исчезновению. Таким образом, в случае, представленном на рис. 4.2 *б*, деградация растительного покрова указывала на локальные нарушения фильтрационных процессов.

Таким образом, видно, что международный опыт подтверждает выдвинутую гипотезу об аномальном характере растительности как об индикаторе наличия фильтрационных нарушений на насыпных ГТС. Кроме того, ряд авторов отмечает, что растительность может приводить к негативному воздействию на сооружение и на состояние окружающей среды, вследствие чего аномальное развитие растительности может нести дополнительный риск для сооружения и обуславливает еще большую актуальность рассматриваемого индикатора [230–232].

Кроме подтверждения выдвинутой гипотезы на основании анализа международного опыта, остался немаловажный вопрос об апробации данного индикатора в натурных условиях. Также интересным представляется и вопрос о его применимости в неблагоприятных для развития растительного покрова условиях, т. к. все рассмотренные случаи имели место в благоприятных климатических условиях.

Для ответа на поставленные вопросы хорошо подходят результаты многолетнего ежемесячного визуального обследования дамбы хвостохранилища горнодобывающего предприятия Мурманской области. В качестве метода выполнения работ использовалось наземное визуальное обследование. Стоит отметить, что для мониторинга растительного покрова на насыпных ГТС может использоваться космо- и аэрофотосъемка, однако данные методы требуют дорогостоящей техники, сложны в использовании и не оперативны (требуют значительных затрат по времени) в применении, что делает их использование нецелесообразным для поставленных задач [233–236].

Выбранное сооружение является крайне неблагоприятным для развития растительного покрова в виду своего строения (намывная дамба с дефицитом питательных веществ) и нахождения в суровых климатических условиях Арктики. Кроме того, объект исследования был выбран исходя из имеющейся информации о наличии в его теле нарушений фильтрационных процессов [75, 237]. На рис. 4.3 представлен временной ряд проявлений на поверхности участка рассматриваемой дамбы хвостохранилища фильтрационных и деформационных процессов [237].

Временной ряд, представленный на рис. 4.3, объединяет данные многолетних ежемесячных визуальных наблюдений на участке ГТС и демонстрирует развитие локальных нарушений фильтрационных процессов, по визуальным индикаторам [237]. Кроме визуального метода обследования наличие локальных фильтрационных

нарушений на выбранном объекте подтверждается и данными многолетнего ежемесячного геофизического обследования [75].

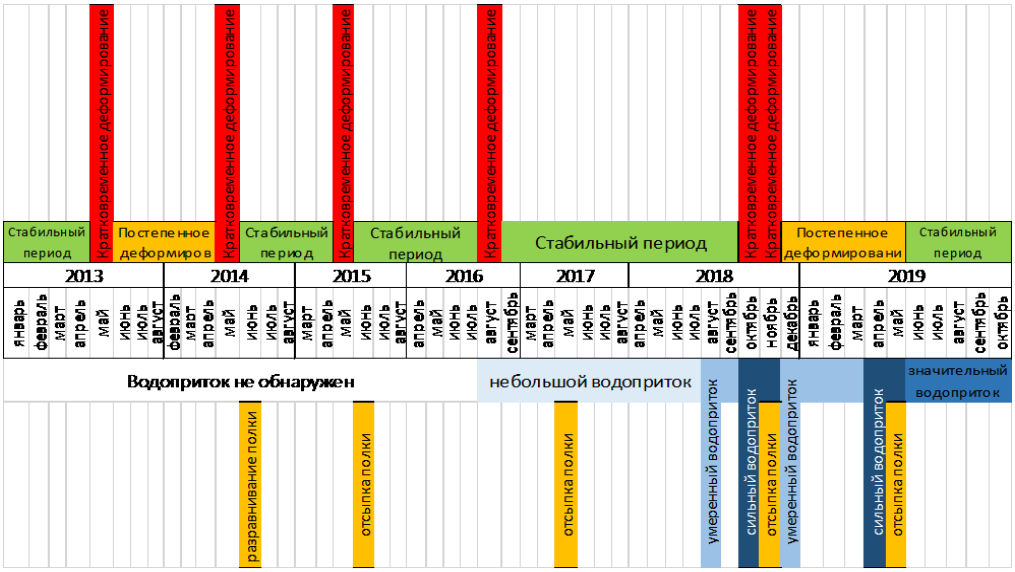


Рис. 4.3. Временной ряд проявлений фильтрационных и деформационных процессов [13, 237, 238]

Визуальное обследование с поиском аномального характера растительности позволили выявить ряд подобный явлений. Первый характерный пример наблюдавшегося аномального растительного покрова представлен на рис. 4.4.

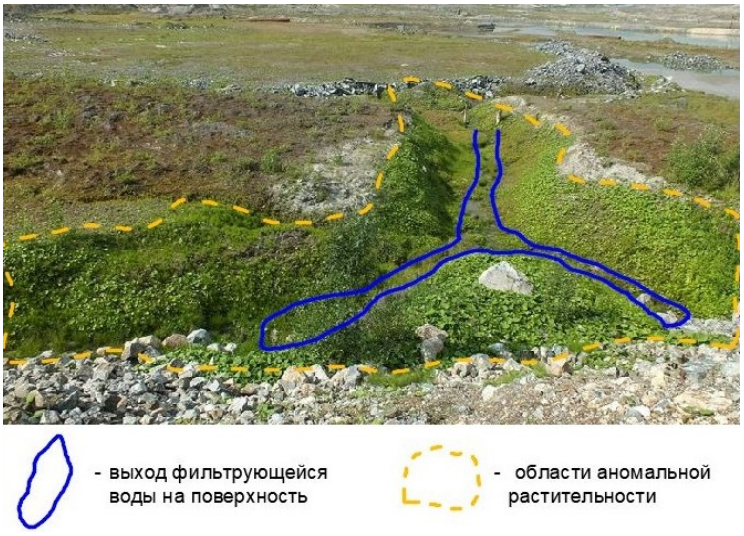


Рис. 4.4. Участок аномальной растительности у подножия дамбы хвостохранилища [238]

У подножия обследуемого сооружения наблюдался ряд сконцентрированных выходов фильтрующейся воды, один из которых представлен на рис. 4.4 (сплошная линия). В области выхода фильтрующейся воды наблюдалось более

интенсивное развитие растительного покрова относительно остальных участков сооружения. Исходя из совпадения в локализации и геометрии наблюдавшихся протечек и аномальной растительности можно рассматривать данный пример как подтверждение выдвинутой гипотезы. Другими словами, в рассмотренном случае аномальная растительность являлась индикатором наличия локального фильтрационного нарушения.

Также стоит отметить, что данный индикатор приобретает особенное значение, если прямая идентификация выхода фильтрующейся воды на поверхность невозможна по ряду причин, например, из-за невозможности подойти достаточно близко к исследуемому участку, небольшому количеству инфильтрующейся воды или наличию скрывающей выход воды скальной наброски.

Однако наибольшее значение аномальный характер растительности может приобретать в случаях, когда сформировавшиеся локальные фильтрационные потоки не имеют прямого выхода на поверхность и могут быть обнаружены только по косвенным признакам. Пример такого случая представлен на рис. 4.5.

На рис. 4.5 представлен фотоснимок участка нижней полки рассматриваемой дамбы хвостохранилища. На рассматриваемом участке не наблюдалось выходов фильтрующихся вод на поверхность сооружения. Прямое наблюдение выхода фильтрующихся вод, при его наличии, у подножия сооружения на данном участке также невозможно из-за укрепления откоса скальной наброской и наличия у подножия сооружения прудка. Однако на представленном фотоснимке видно, что на выделенном участке ГТС наблюдались другие индикаторы, наличия локальных фильтрационных процессов. Так, штриховой линией выделена область аномальной растительности, которая имеет линейно протяженную структуру, начинаясь у подножия вышележащего уступа дамбы и заканчиваясь в области деформации, выделенной штрихпунктирной линией. В выделенной области деформации на протяжении ряда лет наблюдалось проседание поверхности полки дамбы, которое устранялось засыпкой скальным материалом. В результате, дамба на данном участке имеет сниженные противофильтрационные свойства.

В результате анализа был сделан вывод о том, что на участке, представленном на рис. 4.5, развивается локальное фильтрационное нарушение, в результате чего в теле сооружения на данном участке сформировался аномальный фильтрационный поток. Данный фильтрационный поток не имеет выхода на поверхность, однако привел к увлажнению материала сооружения и питанию корней растений, что привело к развитию растительности над данным фильтрационным потоком на нижней полке сооружения. Далее данный поток, проходя под областью, на которой развилась аномальная растительность, инфильтруется в область деформации, обладающую сниженными противофильтрационными свойствами, и соединяется с прудком, находящимся у подножия сооружения.

В качестве дополнительного подтверждения наличия на участках с аномальной растительностью фильтрационных нарушений на рис. 4.6 приведены выделенные участки дамбы с нанесенными на них результатами визуального наблюдения.

Из рис. 4.6 видно, что в створах дамбы с аномальной растительностью наблюдаются и другие индикаторы наличия фильтрационных нарушений: выходы фильтрующихся вод, следы суффозионного выноса материала сооружения и области деформирования поверхности сооружения.

Таким образом, из представленных примеров видно, что аномальный характер растительности действительно может использоваться как индикатор наличия

фильтрационных нарушений, приводящих к формированию локальных фильтрационных потоков. При этом даже в отсутствие выхода фильтрующихся вод на поверхность сооружения или у его подножия наличие фильтрационного потока может приводить к изменению растительности, наблюдающейся на поверхности сооружения.



Рис. 4.5. Участок аномальной растительности на полке нижнего бьефа дамбы [238]

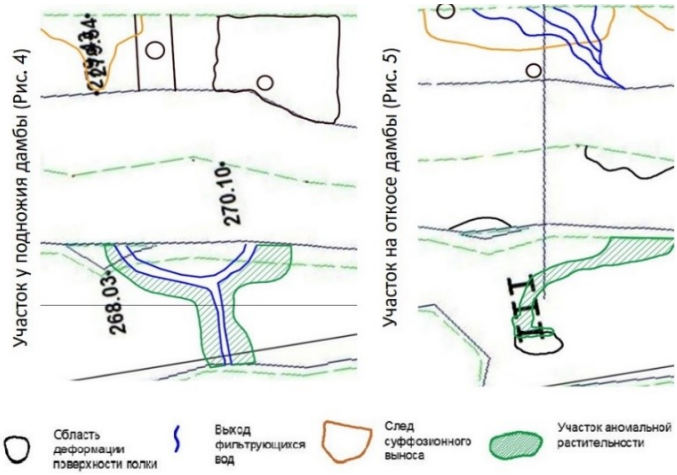


Рис. 4.6. Схема участков дамбы с аномальной растительностью

Кроме того, опыт обследования ГТС в натурных условиях показал, что идентификация локальных фильтрационных процессов по аномальному характеру растительного покрова осложнялась условиями неблагоприятного арктического климата, в том числе длительным периодом наличия снежного покрова, а также условиями дамб хвостохранилища горнорудного предприятия. Однако, несмотря на неблагоприятные условия, такая идентификация все же оказалась возможна и в достаточной мере эффективна, особенно в период лета и начала осени: в рассматриваемом регионе — с июня по сентябрь.

Подводя итог, можно сказать, что в рассмотренные случаи нарушения фильтрационных процессов на насыпных ГТС приводили к ряду аномалий в наблюдаемой растительности: рост аномально высоких деревьев, интенсификация

или деградация растительного покрова. В связи с этим аномальный характер растительности мог использоваться как индикатор наличия локальных нарушений фильтрационных процессов в теле насыпных ГТС.

Также эффективность использования данного индикатора подтверждается результатами ежемесячного многолетнего визуального обследования дамб хвостохранилищ Мурманской области, на которых ранние исследования позволили выявить рассматриваемые фильтрационные нарушения. Рассмотренные примеры показывают, что визуально наблюдаемая аномальная растительность тесно связанна с фильтрационными потоками в теле сооружения и может использоваться как индикатор наличия нарушений фильтрационных потоков в теле насыпных ГТС. При этом данный индикатор может проявляться и в случаях, когда непосредственный выход фильтрующейся воды на поверхность отсутствует. Кроме того, рассмотренный пример показывает, что аномальный характер растительности может эффективно использоваться и в неблагоприятных для растительности условиях: условия хвостохранилищ горнорудных предприятий, а также в климатических условиях Крайнего Севера.

4.3. Пример оценки гидрогеомеханической безопасности хвостохранилища

Выполнен 10-летний цикл комплексных исследований и мониторинга хвостохранилища ОФ АО «Кольская ГМК» (рис. 4.7), результатами которых явились установленные особенности гидрогеологического состояния в части общего и осветленного (условно чистого) объемов вод, площади прудка-отстойника, объемов осадков (рис. 4.8), а также длин намывных пляжей и смещения контрольных реперов (рис. 4.9).

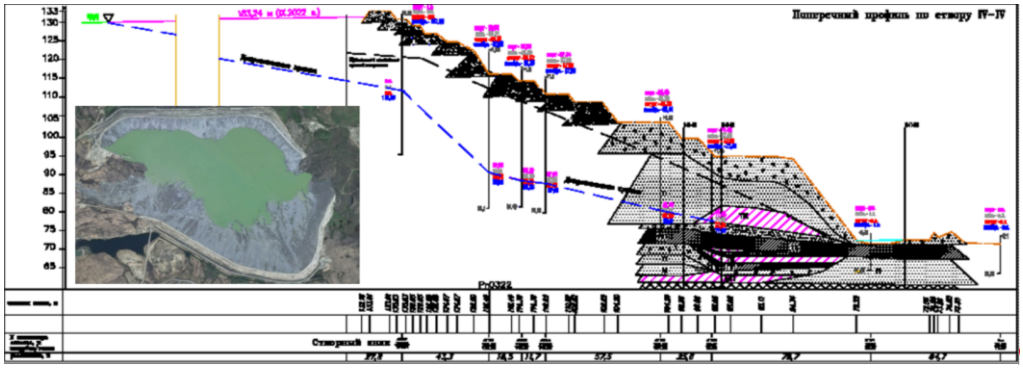


Рис. 4.7. Хвостохранилище АО «Кольская ГМК»: схема и типовой поперечный профиль

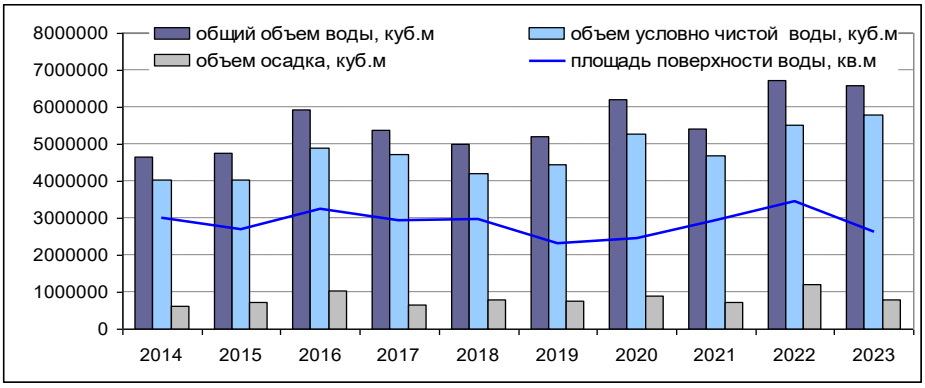
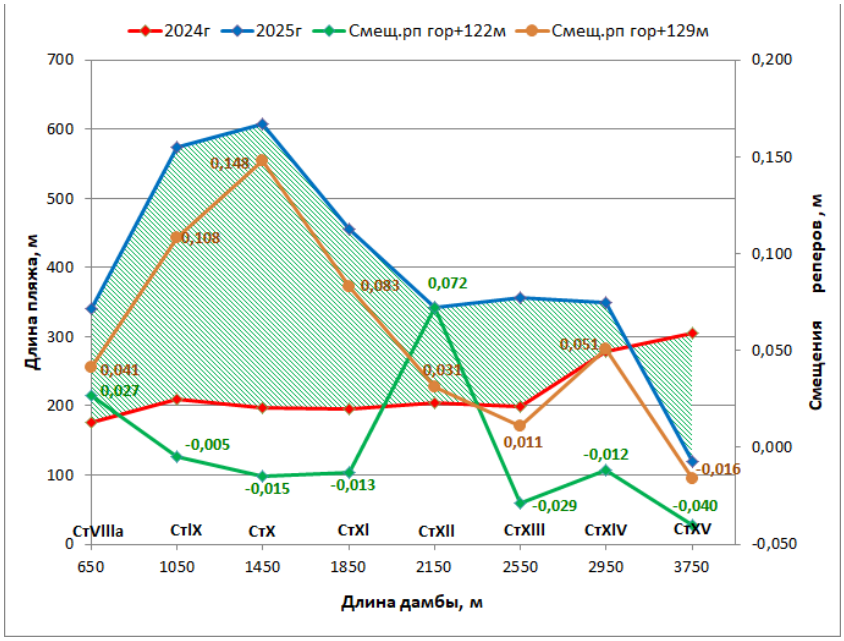
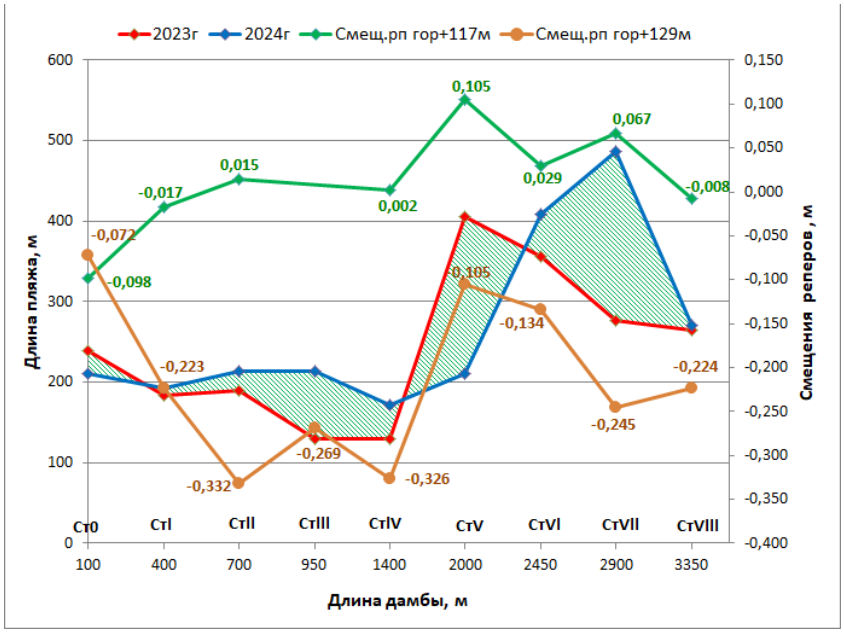


Рис. 4.8. Динамика гидрогеологического режима хвостохранилища АО «Кольская ГМК»



а



б

Рис. 4.9. Динамика длин намывных пляжей и смещения контрольных реперов: *а* — Южной дамбы; *б* — Северной дамбы хвостохранилища [13]

Результатами исследований подтверждено, что хвостохранилище заполняется и эксплуатируется в соответствии с проектом и критериальными требованиями, вследствие чего опасные фильтрационно-деформационные процессы в ограждающих

дамбах не формируются, а граничные условия соответствуют уравнениям Бернулли (рис. 4.10). Вместе с тем динамика гидрогеологического режима хвостохранилища не отвечает принципу суперпозиции, не аппроксимируется как линейной, так и более сложными дифференциальными зависимостями, что подтверждает, что хвостохранилище представляет собой открытую нелинейную гидротехническую систему, требующую постоянного контроля (рис. 4.11).

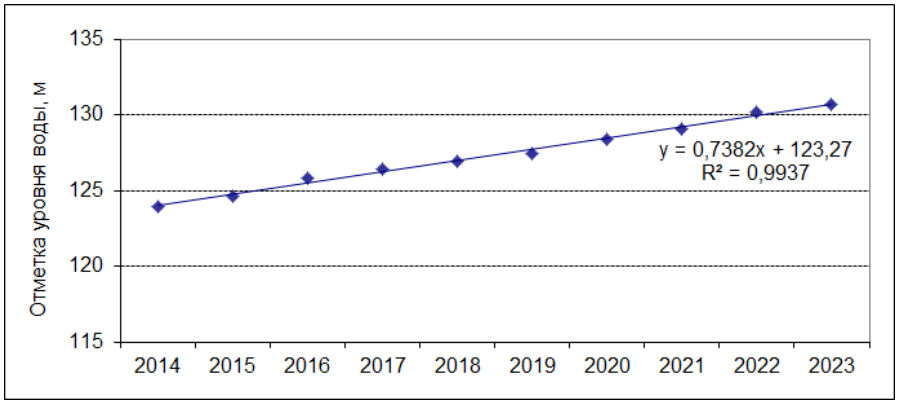


Рис. 4.10. Динамика отметки уреза воды

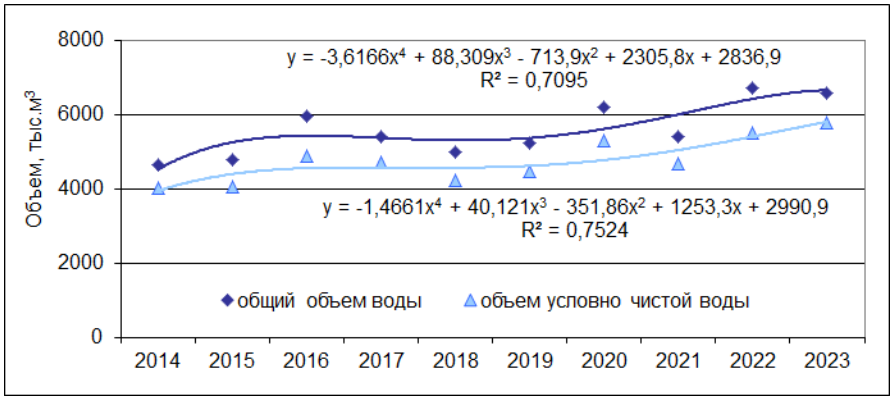


Рис. 4.11. Динамика общего объема и условно чистой воды

4.4. Трансформация горнотехнического объекта из стационарного гидрогеомеханического состояния в нестационарное

Как было сказано в предыдущих разделах, нарушение фильтрации и функциональности, потеря устойчивости ограждающих дамб хвостохранилищ приводят к аварийной ситуации, следствием которой становится значительный социально-экономический ущерб населению, гражданским и промышленным зданиям, дорогам, инженерно-техническим коммуникациям и т. п. Произошедшая авария влечет за собой финансовые потери (недополученная прибыль вследствие остановки предприятия), дополнительные затраты (ремонтно-восстановительные работы на дамбах, дорогах, линиях электропередач, устройствах и механизмах и др.; ликвидация последствий аварии; восстановление

окружающих природных систем), а также штрафы за загрязнение окружающей среды и нанесенный экологический ущерб [239–242].

В данном разделе рассмотрено модельное выявление условий трансформации гидростатического состояния хвостохранилища: от стационарной фильтрации сквозь тело ограждающей дамбы к формированию зон повышенной фильтрации и далее в формирование водотока и размыв дамбы.

Для выявления условий трансформации гидростатического состояния в формирование водотока и размыв ограждающей дамбы применено компьютерное 3D-моделирование деформационных и фильтрационных процессов [207, 243–246]. Для исследования условий перехода гидростатического состояния в стационарную фильтрацию и при определенном сочетании параметров механической и фильтрационной устойчивости грунтов в гидродинамику водотока и размыва дамбы применен системный анализ. Непосредственно хвостохранилище, ограждающая его дамба, подстилающее геологическое основание рассматривались как элементы системы, находящейся под водной нагрузкой. Для обобщения и интерпретации полученных графических результатов использованы синтез и метод логического умозаключения (аналогии).

Для проведения исследования была разработана гидрогеомеханическая 3D-модель, отражающая типовые характеристики ГТС хвостохранилищ горнорудных предприятий западной части российского сектора Арктики. В модели была заложена возможность исследования совместных фильтрационно-деформационных расчетов, в которых учитываются гидростатические (степень водонасыщения грунтов, гидравлический напор), гидродинамические (образование водотоков, скорость и давление потока) и геомеханические (деформации и смещения грунтов под действием силы тяжести, а также вследствие гидростатического и динамического давления воды) условия и нагрузки (рис. 4.12). Для подтверждения адекватности модели и повышения достоверности получаемых результатов выполнялась ее калибровка по данным натурных геотехнических и гидрологических измерений [91].

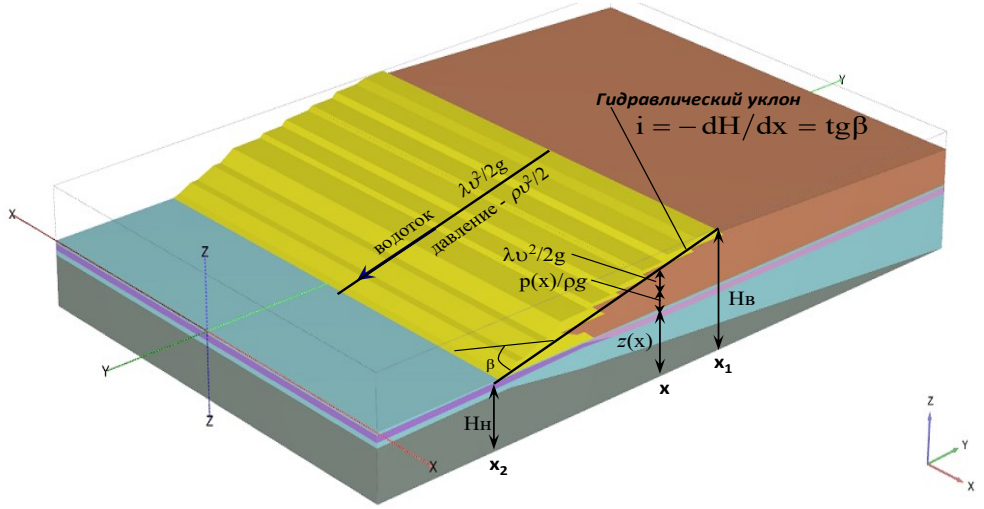
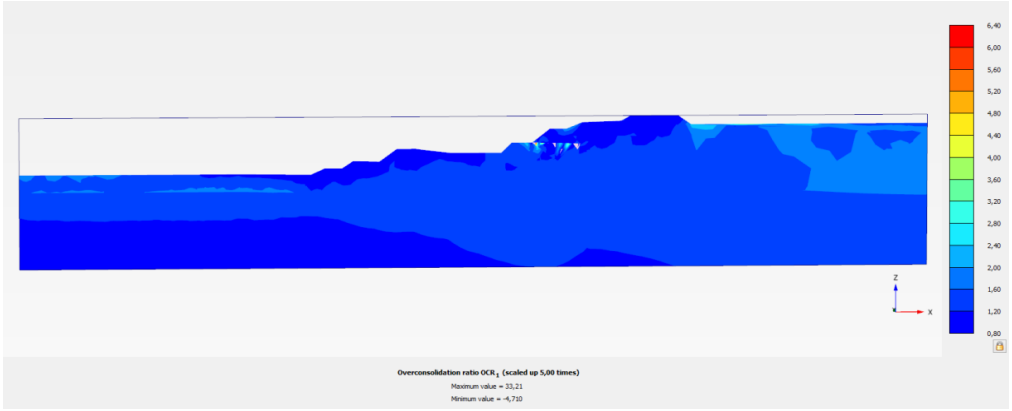


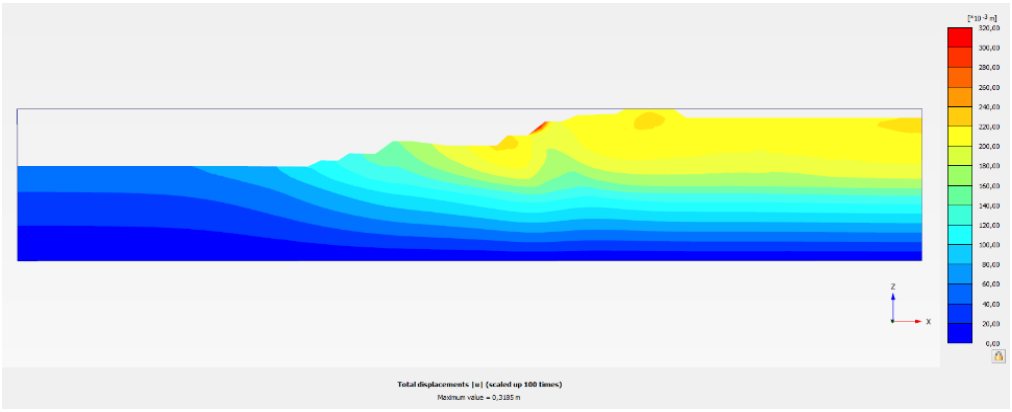
Рис. 4.12. Гидрогеомеханическая 3D-модель объекта складирования жидких минерально-сырьевых отходов горного производства как нестационарной природно-технической системы

Граничные условия для модели описываются известными уравнениями Бернулли, где: $H_в$ и $H_н$ — верховой и низовой уровни воды соответственно; $z(x) = H_в - H_н$ — геометрический напор в сечении x; $p(x)/\rho g$ — пьезометрический напор; $\lambda\upsilon^2/2g$ — скоростной напор фильтрации; λ — коэффициент гидравлического сопротивления; υ — скорость фильтрации воды; g — ускорение силы тяжести; β — угол гидравлического уклона; ρ — плотность воды; x — координатное сечение.

В результате исследования модели выявлены особенности переуплотнения грунтов хвостохранилища, ограждающей дамбы и подстилающего геологического основания (рис. 4.13 *а*). Определено, что наибольшее уплотнение испытывают грунты ограждающей дамбы. В меньшей степени уплотняется геологическое основание. Уплотнение намывных грунтов хвостохранилища происходит неравномерно — у расположенных вблизи ограждающей дамбы более интенсивно, чем на удалении от нее.



а



б

Рис. 4.13. Переуплотнение (*а*) и относительные смещения (*б*) грунтов хвостохранилища, ограждающей дамбы и подстилающего геологического основания

Такое переуплотнение грунтов привело к неравномерному их относительному смещению в пределах рассматриваемого сечения (рис. 4.13 *б*). Наибольшие смещения наблюдаются на гребне и на низовом склоне дамбы. При этом в центральной части

низового склона формируется конусообразная зона, в которой можно ожидать формирование повышенной фильтрации. Непосредственно на поверхности, в локальной красной зоне, возможна потеря механической устойчивости и разрушение яруса дамбы.

Помимо дамбы, относительные смещения присущи и намывным отложениям в хвостохранилище. В подстилающем геологическом основании относительные смещения минимальны или отсутствуют.

Выполненные исследования позволили выявить основные условия перехода объекта складирования жидких минерально-сырьевых отходов горного производства из стационарного состояния в нестационарное в зависимости от степени фильтрации. Совместными фильтрационно-деформационными расчетами установлены эмпирические зависимости устойчивости объекта от скорости фильтрации воды (рис. 4.14).

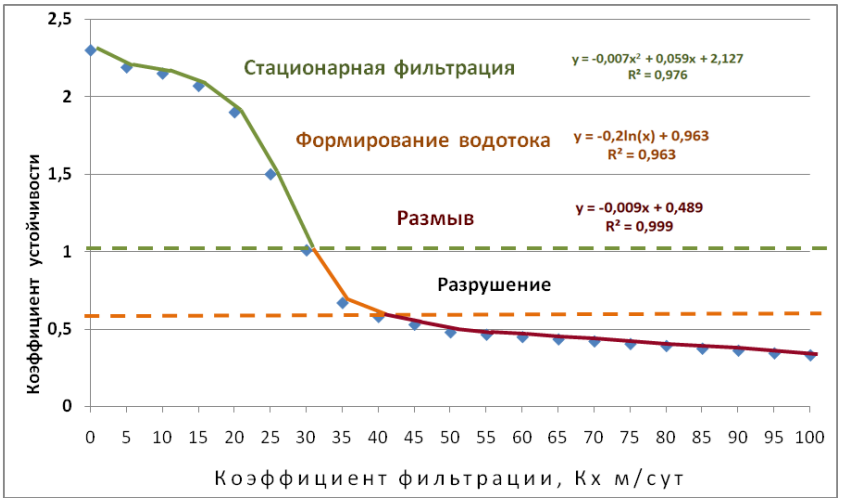


Рис. 4.14. Модельные закономерности трансформации объекта складирования жидких минерально-сырьевых отходов горного производства как нестационарной природно-технической системы

При скорости фильтрации до 20 м/сут коэффициент устойчивости превышал 2, но уже при повышении скорости до 30 м/сут $K_{уст.}$ резко снижался до 1 и далее — до 0,6, и ниже при скорости фильтрации свыше 40 м/сут. Последующее возрастание скорости фильтрации вплоть до 100 м/сут также приводило к снижению коэффициента устойчивости. Однако характер снижения устойчивости представлял собой плавное снижение значений от 0,6 до 0,3.

Графическая трансформация объекта аппроксимируется эмпирическими зависимостями: стационарная фильтрация — полиномиальной $y = -0{,}007x^2 + 0{,}059x + 2{,}127$ ($R^2 = 0{,}976$); формирование водотока — логарифмической $y = -0{,}2\ \ln(x) + 0{,}963$ ($R^2 = 0{,}963$); размыв и последующее разрушение — линейной $y = -0{,}009x + 0{,}489$ ($R^2 = 0{,}999$).

Выявленные зависимости позволяют с высокой степенью достоверности ($R^2 \geq 0{,}97$) определить условия перехода объекта из стационарного состояния (стационарная фильтрация ($K_{уст.} > 2$)) в нестационарное: последовательное формирование водотока ($2 > K_{уст.} > 1$), размыв ($1 > K_{уст.} > 0{,}6$) и разрушение ($K_{уст.} < 0{,}6$). Дальнейшее снижение показателя устойчивости незначительно

в силу резкой трансформации гидростатической фильтрации непосредственно в водоток и размыв.

В результате формирования водотоков дополнительно генерируется гидродинамическое воздействие, которое имеет скоростные $\upsilon^2/2g$ и динамические $\rho\upsilon^2/2$-характеристики. Кроме того, гидродинамическое давление действует на стенки водотока и, преодолевая силы тяжести грунта, приводит к его разжижению. При этом возможно вымывание грунта вместе с водой — механическая суффозия, вследствие чего увеличиваются поперечные размеры водотока, вплоть до размыва и разрушения.

Установленные модельные закономерности трансформации объекта складирования жидких минерально-сырьевых отходов горного производства как нестационарной природно-технической системы концептуально обоснованы и подтверждены комплексными экспериментальными наблюдениями на ГТС хвостохранилищ ГОК «Олений ручей» «СЗФК», АО «Ковдорский ГОК», АО «Кольская ГМК».

4.5. Практические примеры мультимасштабных исследований ответственных горнотехнических сооружений Баренцева Евро-Арктического региона России

Результаты выполненных исследований за отчетный период внедрены на АО «Кольская ГМК», АО «Ковдорский ГОК», АО «СЗФК», КФ АО «Апатит».

На объектах АО «Кольская ГМК» (хвостохранилище, отстойник шахтных вод рудника «Северный», гидротехнические сооружения оз. Селиакка-Ярви, гидротехнические сооружения ливненакопителя Центра энергообеспечения) был выполнен комплекс визуальных, инженерно-геологических, инженерно-технических, георадарных и гидрологических исследований, направленных на определение соответствия текущих параметров критериям безопасной эксплуатации сооружений и параметрам, заданным в проектной и рабочей документации по эксплуатации и декларации безопасности исследуемых объектов. По результатам комплексных исследований и мониторинга объектов построены цифровые модели: поверхности и прилегающего рельефа, продольных профилей по гребням ограждающих дамб, поперечных профилей по наблюдательным створам, дна в прудках-отстойниках, гидравлических напоров и уклонов. Выявлен характер деформационных смещений контрольно-наблюдательных реперов ограждающих объекты дамб. Георадарным зондированием уточнена структура и локализованы зоны повышенной фильтрации потенциально опасного участка ограждающей дамбы. Построена гидрогеомеханическая 3D-модель фрагмента основного хвостохранилища АО «Кольская ГМК». Выполнено гидрогеомеханическое 3D-моделирование текущего и прогнозного состояния основных гидротехнических сооружений.

На ограждающей дамбе № 1 хвостохранилища обогатительной фабрики АО «Ковдорский ГОК» были выполнены комплексные многоуровневые исследования и мониторинг, включающие: георадарные зондирования; визуальное обследование и фотооптическое документирование; геодезические измерения вертикальных осадок и горизонтальных смещений контрольно-наблюдательных реперов; аэрофотосъемка с использованием БПЛА, гидрогеомеханическое 3D-моделирование совместных фильтрационно-деформационных процессов в теле дамбы. По результатам исследований выявлена динамика фильтрационных процессов на нижних полках дамбы, определен ход вертикального и планового смещения контрольно-наблюдательных реперов. В структуре дамбы выделены зоны неоднородности и повышенной фильтрации, локализованы уровни депрессионной поверхности на момент измерений. По полученным с применением аэрофотосъемки снимкам созданы цифровые

ортофотоплан и 3D-модель дамбы хвостохранилища. Построена гидрогеомеханическая 3D-модель дамбы № 1 хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК» и выполнено сценарное моделирование объемов складирования отходов, сбросов промышленных, а также водопритоков осадковых и грунтовых вод. Выполнена оценка фильтрационной устойчивости грунтов дамбы. В целях снижения рисков опасных фильтрационно-деформационных процессов в теле дамбы и повышения ее устойчивости были даны рекомендации о проведении работ по укреплению ее низового откоса и развитию сети контрольно-измерительной аппаратуры на хвостохранилище.

На хвостохранилище ОФ АО «СЗФК» выполнены георадарные измерения по определению структуры, состояния и водонасыщенности ограждающих дамб. Выделена граница насыпной части дамбы с естественным основанием, глубина залегания которой колеблется от 7–14 м в центральной части. Выявлены участки с возможными нарушениями изолирующей способности грунтов в определенных диапазонах наблюдательного профиля. Анализ изменчивости размеров и интенсивности зон неоднородностей низовой ограждающей дамбы хвостохранилища показывает, что наибольшая часть локальных протечек наблюдается в ее западной части. Размеры зон неоднородностей имеют тенденцию к уменьшению, однако это может быть связано с проведением георадарных обследований в период времени с меньшим объемом осадков, чем предыдущие измерения. Построены депрессионные кривые по результатам измерений (по данным георадиолокации и гидрографических наблюдений) с нанесением фактических отметок уровня воды и дневной поверхности (уступов дамбы). На контрольно-наблюдательном полигоне на дамбах проведены наземные геодезические (нивелирование и тахеометрическая съемка) измерения. По данным измерений определены плановые координаты и высотные отметки реперов в привязке к местной системе координат. На низовых откосах дамб выявлены деформации набухания, которые накладываются (с обратным знаком) на осадку, обусловленную уплотнением тела дамбы и основания от собственного веса грунта. Выполнено визуальное обследование и фотодокументация проблемных участков ограждающих дамб. В целом, основываясь на данных визуального осмотра ГТС, можно констатировать, что фильтрационные процессы, проявляющиеся на поверхности низовой дамбы, в текущем состоянии не угрожают безопасности дамбы. Развитие фильтрационных или деформационных процессов, которые бы могли оцениваться как негативно влияющие на устойчивость ГТС, не выявлено.

Созданы объемные параметрические 3D-модели ограждающих дамб хвостохранилища ОФ ГОК «Олений ручей» «СЗФК», отражающие геометрические и гидрогеомеханические характеристики выбранных (проблемных) участков. Выполнено компьютерное 3D-моделирование гидрогеомеханических условий дамб в целях уточнения параметров проблемных участков и выявления геоиндикаторов опасных фильтрационно-деформационных процессов и критериев устойчивости дамбы. Выполненные расчетные исследования устойчивости низовой дамбы хвостохранилища при возведении ее гребня до отметки 205,0 м показали, что показатель надежности (коэффициент запаса (устойчивости)) изменяется от 1,57 до 1,308 в зависимости от уровня воды в водохранилище. На основании выполненных исследований был сделан вывод, что при уровне воды в хвостохранилище до 201,3 м статическая устойчивость низовой дамбы будет обеспечена. При подъеме уровня воды в хвостохранилище выше отметки 201,3 м статическая устойчивость низовой дамбы не будет обеспечена в полной мере, а при дополнительных динамических нагрузках может быть утрачена.

В целом результаты проведенных комплексных наблюдений и измерений, инженерных расчетов и прогнозного компьютерного моделирования, составляющих основу мониторинга, дают основание считать, что по состоянию на написание монографии ограждающие хвостохранилище дамбы устойчивы. Устойчивость низовой

дамбы обеспечивается с соблюдением нормативного требования к коэффициенту запаса $K_{над.} > 1{,}2$. На основе выполненных исследований рекомендовано произвести дополнительную, к уже существующим в диагностических створах, установку пьезометрических скважин на гребне обвалования низовой дамбы, а также заложить в начале и конце низовой ограждающей дамбы хвостохранилища, на моренном основании, по три опорных репера (кусты реперов), от которых будут выполняться высокоточные геодезические измерения при последующем мониторинге. Кусты реперов будут служить в качестве исходной планово-высотной основы и позволят выполнять режимные высокоточные измерения с минимальными погрешностями.

На объекте складирования минеральных отходов горного производства КФ АО «Апатит» (хвостохранилище АНОФ-3) выполнено 12 циклов рекогносцировочного и визуального обследования поверхности разделительной дамбы. Визуальное обследование сопровождалось фотооптическим документированием. Дополнительно проведена оптико-электронная съемка территории хвостохранилища дистанционными методами. На основе этих обследований потенциально опасных фильтрационно-деформационных проявлений на поверхности разделительной дамбы не выявлено. Локальных зон повышенной влажности на поверхности дамбы не выявлено, однако обнаружены признаки повышенного водонасыщения нижней части откосов сооружения.

По результатам 12 циклов георадарных обследований установлено, что приповерхностная зона разделительной дамбы хвостохранилища АНОФ-3, до глубины 6 м, дает относительно равномерную волновую картину, которая свидетельствует об уплотненных грунтах. Выявленные структурные особенности в теле дамбы идентифицируются на всех циклах измерений. Уровень грунтовых вод выделяется достаточно четко и изменяется незначительно с тенденцией к понижению от мая до ноября месяца. Выделяются две зоны возможного водонасыщения вмещающих пород дамбы: в интервале 255–280 м, на глубине 6–8 м и в интервале 800–850 м, на глубине 6–10 м. Измерения, выполненные в последующий период, показали положительную динамику в уменьшении зон возможного водонасыщения. В целом по результатам георадарного обследования разделительная дамба хвостохранилища находится в удовлетворительном состоянии, опасных фильтрационно-деформационных процессов не выявлено.

Разработана гидрогеомеханическая 3D-модель фрагмента ГТС хвостохранилища АНОФ-3, включающего разделительную дамбу, на основе данных рекогносцировочного и визуального обследования, геологических данных, результатов инженерно-геологических и гидрологических изысканий. Выполнены расчеты фильтрационно-деформационного состояния разделительной дамбы для условий ее эксплуатации в 2022–2024 гг. Анализ полученных результатов компьютерного моделирования эксплуатации разделительной дамбы показал, что на этом этапе потенциально опасные фильтрационно-деформационные процессы как в теле дамбы, так и на ее сопряжении с подстилающим основанием не формируются.

Применение комплекса полевых поверхностных и подповерхностных обследований в сочетании с гидрогеомеханическим 3D-моделированием позволило получить результаты, предоставляющие основу для оценки текущего и прогнозного состояния разделительной дамбы хвостохранилища АНОФ-3 как удовлетворительное. Было рекомендовано развитие сети КИА на разделительной дамбе с учетом ее наращивания до отметки +243 м, а также планируемых сроков и условий ее эксплуатации.

В целом выполненные исследования позволили сопоставить текущие значения параметров исследуемых объектов складирования минеральных отходов горного производства АО «Кольская ГМК», АО «Ковдорский ГОК», КФ АО «Апатит», АО «СЗФК» с критериальными и дать рекомендации по обеспечению их промышленной и экологической безопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В книге изложены методические подходы и научно-технические результаты мультимасштабных исследований ответственных горнотехнических сооружений Баренцева Евро-Арктического региона России. Примененный системный подход в комплексировании междисциплинарных методов и инструментария позволил авторам получать структурированную информацию о контролируемом объекте в разных масштабах (от 10:1 до 1:10000) и своевременно реагировать на природно-технические вызовы. Для этих целей на всех горнопромышленных предприятиях региона были созданы специализированные наблюдательные полигоны, для контролируемых объектов — геофильтрационные и гидрогеомеханические 3D-модели. Результаты комплексных исследований на крупнейших горнопромышленных предприятиях региона за последние 15 лет однозначно подтверждают эффективность и информативность такого подхода.

В книге получило развитие методических подходов к мультимасштабным исследованиям ответственных горнотехнических сооружений Баренцева Евро-Арктического региона России для получения более полной, детализированной и иерархически структурированной информации о состоянии контролируемых объектов. Основными объектами исследований являлись комплексы складирования жидких минеральных отходов горнодобывающих предприятий западной части российского сектора Арктики.

Важной методической особенностью выполненных исследований являлась их мультидисциплинарность: горное дело, гидрогеомеханика, гидротехника, геомеханика, компьютерное моделирование, геодезия, геофизика (в части георадарного подповерхностного зондирования, сейсмотомография), GPS-геодезия, аэрофотосъемка, оптические и радарные спутниковые снимки. Авторами развиты подходы и способы комплексирования методов и создана научно-техническая основа для мультимасштабного мониторинга особо ответственных объектов. На основе получаемых результатов сформированы научно-технические приемы для выявления опасных фильтрационно-деформационных процессов на ранних стадиях их развития и обоснования принятия своевременных решений по инженерно-защитным мероприятиям.

В книге приведен укрупненный обзор международных подходов к мониторингу и обеспечению безопасности хвостохранилищ горнодобывающих предприятий с учетом достижений российских исследователей. Показано, что зачастую финансовый и социальный ущербы аварий и разрушений возможно было предотвратить за счет применения комплексных систем мониторинга с сопоставительно более низкой стоимостью понесенных затрат.

Авторами развиты методологические основы мультимасштабных исследований ответственных горнотехнических сооружений Баренцева Евро-Арктического региона России, базирующиеся на эффективном комплексировании мультидисциплинарных методов как на одном, так и на разных уровнях для целей мониторинга, позволяющие реализовать эффект мультимасштабности: от структурных зерен скелета грунтов (миллиметры) до объекта в целом (десятки километров). Приведены конкретные примеры реализации разработанных методологических принципов комплексного многоуровневого мониторинга на хвостохранилищах горнодобывающих предприятий

северо-западной части российского сектора Арктики, проиллюстрированные применением методов и средств контроля и полученными результатами.

Разработан методический подход к построению компьютерной геофильтрационной 3D-модели массива пород и гидрогеомеханическому моделированию формирующихся в контролируемых объектах фильтрационно-деформационных процессов. Геофильтрационная 3D-модель объекта создается имитационным подобием реальных геометрических, инженерно-геологических и гидрологических условий. Отличительной особенностью подхода является возможность реализации совместных фильтрационно-деформационных расчетов, в которых учитываются гидростатические (степень водонасыщения грунтов, разность напоров), гидродинамические (образование водотоков, скорость и давление потока) и геомеханические (деформации и смещения грунтов под действием силы тяжести, а также вследствие гидростатического и динамического давления воды) условия и нагрузки. Гидрогеомеханическое моделирование осуществляется посредством решения уравнений фильтрации с учетом заданных граничных условий и структуры фильтрационного поля. В геофильтрационной 3D-модели ведется подсчет грунтовых вод, а положение поверхности вод определяется с учетом суммарного значения их уровней. Результаты моделирования предоставляют возможность прогнозировать формирование локальных зон повышенного гидростатического напора и фильтрации в сопряженных с контролируемым объектом природно-технических водных средах.

Наиболее характерные примеры мультимасштабного мониторинга и моделирования горнотехнических объектов Кольского региона рассмотрены для хвостохранилища горнодобывающего предприятия (на примере АО «СЗФК»), разделительной дамбы хвостохранилища (на примере АНОФ-3 КФ АО «Апатит») и плотины водохранилища горнопромышленного предприятия.

Результаты проведенных комплексных наблюдений и измерений, инженерных расчетов и прогнозного компьютерного моделирования применительно к хвостохранилищу горнодобывающего предприятия дают основание считать, что по состоянию на момент измерений ограждающие хвостохранилище дамбы устойчивы. Даны рекомендации по развитию контрольно-наблюдательной системы и режимности выполнения наблюдений.

Построена цифровая гидрогеологическая 3D-модель хвостохранилища АНОФ-3 КФ АО «Апатит», отражающая результаты выполненных инженерно-геологических, гидрологических, геофизических и геодезических исследований. Модель позволяет путем численного моделирования выявлять наиболее характерные особенности изменения гидрогеологического режима хвостохранилища. На базе гидрогеологической модели разработана гидрогеомеханическая 3D-модель фрагмента хвостохранилища, включающего разделяющую дамбу, построенную на хвостовых отложениях с иловыми прослойками. Моделированием выявлены скачкообразные изменения фильтрационно-деформационных процессов, определяющие механическую и фильтрационную устойчивость дамбы как линейного насыпного грунтового сооружения на слабом основании. На основе гидрогеомеханического 3D-моделирования насыпного грунтового сооружения (дамбы) на слабых несвязных грунтах (намывных хвостовых отложениях) выявлены характерные закономерности фильтрационно-деформационных процессов. Зона влияния сооружения с разнонаправленным переуплотнением намывных отложений достигает трех его размеров с выдавливанием отложений в сторону низового склона

и отжимом в сторону верхового. Вследствие этого под сооружением возникает зона аномального гидростатического напора, приводящая к двухкратному снижению его фильтрационной устойчивости.

Для исследования механизмов развития фильтрационно-деформационных процессов разработаны геофильтрационная и гидрогеомеханическая 3D-модели плотины горнопромышленного предприятия как открытой природно-технической системы «водохранилище – прилегающая территория». Отличительной особенностью моделей является одновременный учет гидростатических, гидродинамических и геомеханических условий и нагрузок. Модель апробирована на примере водохранилища, расположенного в северо-западной части Баренцева Евро-Арктического региона. По результатам фильтрационных расчетов и моделирования следует ожидать, что возрастание скорости фильтрации воды через тело плотины будет сопровождаться разжижением слагающих ее грунтов и механической суффозией — выносом мелких частиц. Вместе с тем механическая прочность скелета плотины, определяемого крупнообломочным породным материалом и щебнем, возможно, не будет утрачена при условии сохранения сплошности пород геологического основания

Созданы методические основы построения трехмерной гидрогеомеханической модели хвостохранилища горнодобывающего предприятия, отличающиеся от известных одновременным применением нескольких моделей деформирования пород и грунтов и учетом фактора времени в фильтрационно-деформационных расчетах. Построены более 10 компьютерных гидрогеомеханических 3D-моделей ГТС хвостохранилищ крупных горнодобывающих предприятий западной части российского сектора Арктики: АО «Ковдорский ГОК», АО «Кольская ГМК», КФ АО «Апатит», ГОК «Олений ручей». Модели адекватно соответствуют фрагментам природно-технической системы «геологическое основание – чаша хвостохранилища – ограждающая дамба», отражают динамику наращивания насыпных и намывных дамб, заполнения хвостохранилища и изменения гидрогеологического режима. Модели реализованы в программном комплексе Plaxis 3D, ежегодно актуализируются и исследуются при различных параметрических сочетаниях влияющих факторов.

Установлены модельные закономерности трансформации гидрогеомеханического состояния ГТС хвостохранилищ горнодобывающих предприятий западной части российского сектора Арктики, заключающиеся в переходе гидростатического состояния в стационарную фильтрацию, а при определенном сочетании параметров механической и фильтрационной устойчивости грунтов — в гидродинамику водотока и размыва дамбы.

Сформирован комплекс механизмов, влияющих на формирование и развитие локальных нарушений фильтрационных процессов в насыпных ГТС. В комплексе объединены различные по природе механизмы, воздействие которых может тем или иным образом проявляться на поверхности сооружения как в целом, так и на отдельных его элементах, в частности: вынос частиц материала сооружения, влияние зоны нарушения как структурной неоднородности, неравномерный характер продольной и поперечной фильтрации, действие гидростатического давления.

Установлены признаки наличия в теле насыпного гидротехнического сооружения локальных фильтрационных нарушений, что позволило сформировать систему визуальных геоиндикаторов, включающую: следы суффозионного выноса материала сооружения; локальные оседания и поднятия поверхности полок насыпных ГТС; сконцентрированный выход фильтрующихся вод в основании сооружения или отдельных уступов; фонтанирование воды у основания сооружения. Многочисленными

системными визуальными наблюдениями на ряде насыпных ГТС горного профиля были выявлены и сформулированы качественные закономерности различных проявлений, что позволило усовершенствовать разработанную систему геоиндикаторов.

Получило развитие методических основ по обеспечению промышленной и экологической безопасности природно-технических водонасыщенных систем Кольского региона применительно к ГТС горнодобывающих предприятий. Предложены методические подходы к обоснованию инженерных решений и мероприятий по минимизации рисков опасных проявлений гидрогеомеханических процессов в ГТС в арктических условиях, включающих в себя: прогнозную оценку устойчивости ограждающих дамб хвостохранилища, способ оценки их устойчивости на основе георадарных и компьютерных исследований, обоснование комплексных инженерных решений и мероприятий по повышению механической и фильтрационной устойчивости ограждающих дамб хвостохранилищ АО «Ковдорский ГОК», АО «Кольская ГМК», ГОК «Олений ручей», АО «Олкон».

Созданы методологические основы многоуровневых исследований гидротехнических сооружений горнодобывающих предприятий западной части российского сектора Арктики. Методология исследований основана на оптимальном комплексировании мультидисциплинарных методов и способов наблюдений в комбинациях на различных уровнях от дневной поверхности (дистанционный, воздушный, наземный и подповерхностный) с применением компьютерного моделирования, что позволяет решать задачи диагностики и контроля гидрогеомеханического состояния исследуемого объекта в иерархии от регионального уровня до локальных компонентов и элементов. Методология апробирована на горнодобывающих предприятиях Кольского полуострова и может быть применена в других горнодобывающих регионах РФ.

В целом семантическое наполнение книги по развитию научно-методических основ многоуровневых комплексных исследований и мониторинга действующих хвостохранилищ горнодобывающих предприятий западной части российского сектора Арктики соответствует критическим технологиям РФ: 19. Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения; 21. Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Авторы надеются, что их идеи, методические подходы, научно-техническое обоснование и полученные практические результаты будут полезны не только научным сотрудникам, но и инженерно-техническим работникам горнопромышленных предприятий, а также аспирантам и студентам горнотехнических и гидрогеологических специальностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Adamo N., Al-Ansari N., Sissakian V., Laue J., Knutsson S. Dam Safety: Monitoring of Tailings Dams and Safety Reviews // Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering. 2020. Vol. 11. No.1. P. 249-289.
2. Tailings Dams-risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences. ICOLD and UNEP Publication. 2001. Bulletin 121. 144 p. URL: https://www.academia.edu/9168393/RISK OF DANGEROUS OCCURRENCES (дата обращения: 18.06.2025)
3. Berghe J. F. V., Ballard J. C., Pirson M., Reh U. Risks of tailings dams failure // Proceedings of the 3rd International Symposium on Geotechnical Risk and Safety (ISGSR). 2011. Munich. Germany. June 2011. Vol. 2. No. 3. p. 6.
4. Azam S., Li Q. Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years // Geotechnical News. 2010. Vol. 28. Is. 4. P. 50-54.
5. Rico M., Benito G., Salgueiro A.R., D´iez-Herrero A., Pereira H.G. Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context // Journal of Hazardous Materials 2008. Vol. 152. Is. 2. P. 846-852.
6. Palu M. C., Julien P. Y. Review of Tailings Dam Failures in Brazil // XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (ISSN 2318-0358). 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/337498009_REVIEW_OF_TAILINGS_DAM_FAILURES_IN_BRAZIL (дата обращения: 18.06.2025).
7. Ricoa M., Benitob G., Salguero A. R., Dıez-Herrerod A., Pereir H.G. (2008). Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context // Journal of Hazardous Materials. 2008. Vol. 152(2). P. 846-852.
8. Shiqiang H., Lawrence C., Colin C. Real-time monitoring for structural health, public safety, and risk management of mine tailings dams // Canadian Journal of Earth Sciences. 2018. Vol. 55. P. 221-229.
9. Natural Resources Canada. National Building Code of Canada seismic hazard maps. 2015. Date modified: 2021-04-06. URL: https://earthquakescanada.nrcan.gc.ca/hazard-alea/zoning-zonage/NBCC2015maps-en.php (дата обращения: 18.06.2025).
10. Szymanski M. B., Davies M. P. Tailings Dams: Design Criteria and Safety Evaluations at Closure. 2004. Corpus ID: 112815136. URL: https://open.library.ubc.ca/media/stream/pdf/59367/1.0042456/1 (дата обращения: 18.06.2025).
11. Niemeläinen E., Juvankoski M., Kaartinen T. et al. Dams: Water management-Dams at mine closure phase. VTT Technical Research Centre of Finland, Finland. Retrieved on 25th June 2020. URL: https://mineclosure.gtk.fi/dams/ (дата обращения: 20.01.2025).
12. Solismaa L. Monitoring of Tailings Dams. Geological Survey of Finland. Finland. Retrieved on 25th June 2020. URL: https://mineclosure.gtk.fi/monitoring/ (дата обращения: 20.01.2025).
13. Калашник А. И., Максимов Д. А., Калашник Н. А., Дьяков А. Ю., Запорожец Д. В., Мелихов М. В. Многоуровневые комплексные исследования и мониторинг хвостохранилищ горнодобывающих предприятий северо-западной части Российского сектора Арктики. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2022. 250 с.
14. Bligh G. E., Fourie A. B. A Review of Catastrophic Flow Failures of Deposits of Mine Waste and Municipal Refuse. 2004. URL: https://www.researchgate.net/publication/ 242193591. A review of catastrophic flow failures of deposits of mine waste and municipal refuse. (дата обращения: 14.03.2024).

15. Smith E., David H. The Role of Water in the Failure of Tailings Dams // Proceedings of First International Mine Drainage Symposium-mine drainage. 1979. Denver, Colorado, USA. P. 627-649. URL: http://www.imwa.de/docs/imds_1979/IMDS1979_Smith_627.pdf (дата обращения: 14.03.2024).
16. Lyu Z., Chai J., Xu Z., Yuan Qin Y., Jing Cao J. A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History // Hindawi Advances in Civil Engineering. 2019. Vol. 2019, P. 1-18.
17. Hui S., Charlebois L., Colin Sun C. Real-time monitoring for structural health, public safety, and risk management of mine tailings dams // Canadian Journal of Earth Sciences. 2018. Vol. 55. No. 3. P. 221-229.
18. U N. Economic Commission for Europe. Safety guidelines and good practices for tailings management facilities. Report. 2014. Chapter B4. p.24. New York Geneva 2014. URL: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2014/TEIA/Publicati ons/1326665. ECE TMF Publication.pdf. (дата обращения: 14.03.2024).
19. Martin T. E., Davies M. P. Development and Review of Surveillance Programs for Tailings Dams. AGRA Earth & Environmental Limited. Burnaby. BC:16. URL: https://www.researchgate.net/publication/237335026_DEVELOPMENT_AND_REVIEW_OF_SURVEILLANCE_PROGRAMS_FOR_TAILINGS_DAMS (дата обращения: 14.03.2024).
20. Martin T. E., Davies M. P., Rice S., Higgs T., Lighthall, P. C. Stewardship of Tailings Facilities // Mining, Minerals and Sustainable Development Project. International Institute for Environment and Development (IIED). April 2002. No. 20. 37 p. URL: https://pubs.iied.org/pdfs/G01027.pdf. (дата обращения: 20.06.2025).
21. Le Roux G. J. R. The effectiveness of single and multiple open standpipe piezometers in monitoring of pore pressure in tailings dams // Proceedings of the 9th International Conference on Tailings and Mine Waste. Colorado, USA 27-30 January 2002. P. 35-38. URL: https://www.routledge.com/Tailings-and-Mine-Waste-2002-Proceedings-of-the-9th-International-Conference/Symposium-Editors/p/book/9789058093530 (дата обращения: 20.06.2025).
22. Knutsson R. Tailings Dam Performance Modeling and Safety Analysis of a Tailings dam. MSc thesis. 2015. P. 37. Luleå University of Technology, Luleå, November 2015 Sweden. URL: http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:991090/FULLTEXT01.pdf (дата обращения: 14.03.2024).
23. Tailings info. Water Management Considerations for Conventional Storage. A tailings storage and handling resource. Retrieved on 1st July 2020. URL: https:// www.tailings.info/technical/water.htm. (дата обращения: 14.03.2024).
24. Klohn E. J. Seepage Control for Tailings Dams // IMDA. Section 4. Tailings and Waste Disposal-Seepage, Contamination, Regulations, and Control, 1979. p.722. URL: https://www.imwa.info/docs/imds_1979/IMDS1979_Klohn_671.pdf (дата обращения: 14.03.2024).
25. Technical Report: Design and Evaluation of Tailings Dams. USEPA. Washington DC. August 1994. P. 44-45. URL: https://pdf4pro.com/view/technical-report-design-and-evaluation-of-tailings-dams-73c084.html (дата обращения: 20.06.2025).
26. Endress and Houser. Tailings water management, safe, efficient and compliant URL: https://www.se.endress.com/sv/industrier/mining-minerals-metals/Tailings-water-management. (дата обращения: 20.06.2025).
27. Hu J., Liu X. Design and implementation of tailings dam security monitoring system // Procedia Engineering. 2011. Vol. 26 (5). P. 1914-1921.

28. Li W., Wang C. GPS in the Tailings Dam Deformation Monitoring // Procedia Engineering. 2011. Vol. 26. P. 1648-1657.
29. Sure Wave Technology Ltd. Tailings Dam and Side Wall Monitoring. URL: https://www.surewavetechnology.co.uk/mine-monitoring/mine-monitoring-surface/ (дата обращения: 03.07.2020).
30. Lemphers H. Could the Hungarian tailings dam tragedy happen in Alberta? 2010. URL: https://www.pembina.org/blog/could-hungarian-tailings-dam-tragedy-happen-alberta. (дата обращения: 20.06.2025).
31. BHP. Tailing dams. 2019. 44 p. URL: https://www.bhp.com/-/media/documents/media/reports-and-presentations/2019/190607_esgbriefingtailingsdams.pdf?la=en (дата обращения: 20.06.2025).
32. Adamo N., Al-Ansari N., Sissakia, V., Laue J., Knutsson S. Dam Safety: The question of Tailings Dams // Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering. 2021. Vol. 11. No.1. P. 1-26.
33. Davies M., Lighthall P., Rice S, Martin T. Design of tailings dams and impoundments. In: Proceedings of the Tailings and Mine Waste Practices. SME, Phoenix. 2002.
34. Калашник А. И. Комплексные исследования и мониторинг хвостохранилищ горнопромышленных предприятий Кольского региона // Горный журнал. 2020. № 9. С. 101–106.
35. Калашник А. И., Дьяков А. Ю. Информационные технологии в задачах мониторинга гидротехнических сооружений горнодобывающих предприятий подповерхностным георадиолокационным зондированием // Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-техн. жур.). 2017. № S23. С. 283–291.
36. Carmo F. F. D., Kamino L. H. Y., Junior R. T. et al. Fundao tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context // Perspectives in Ecology and Conservation. 2017. Vol. 15. No. 3. P. 145–151.
37. Tailings info. Tailings Related Accidents-Failures. Breaches and Mudflows. 2018. URL:https://www.tailings.info/ (дата обращения: 26.03.2021).
38. Zongjie L., Junrui C., Zengguang X., Qin Y., Cao J. A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History // Advances in Civil Engineering. Vol. 2019. article ID 4159306. URL: https://www.hindawi.com/journals/ace/2019/4159306/ (дата обращения: 22.03.2021).
39. Калашник А. И. Многоуровневые комплексные исследования и мониторинг природно-технических объектов Кольского региона // Псковский регионологический жур. 2023. Т. 19, № 2. С. 65–77.
40. Калашник Н. А. Оценка фильтрационно-деформационных процессов в ограждающей дамбе хвостохранилища на основе 3D-моделирования // Горная промышленность. 2024. № 1. С.100–104.
41. Kalashnik A. Influence of water flow on the strength characteristics of rocks of the Lovosersk rare metal deposit // E3S Web of Conferences. APEC-VII-2024. 2024. V. 524. P.03007.
42. Kalashnik N. A. Impact of the Mine Tailings Pond Water Filling on the Hydrogeomechanical State of the Enclosing Dam // Lecture Notes in Networks and System. Springer, Cham. 2025. V. 1489. P. 268-273.
43. Kalashnik A. I. Transformation of hydrostatic state in watercourse formation and scouring of tailings dam // Journal of Physics: Conference Series. 2022. V. 2388. P.012161.

44. Калашник А. И. Модельные закономерности изменения гидрогеомеханического состояния ограждающей дамбы хранилища горнопромышленных отходов // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Естественные и гуманитарные науки. 2022. Т. 1, № 2. С. 107–112.
45. Агарков Н. Б., Жданова Т. В., Маликов А. М., Карпенко Н. Г. Оптимизация системы защиты от подтопления территории с использованием геофильтрационного моделирования // Маркшейдерский вестник. 2020. № 4(137). С. 62–67.
46. Карпенко Н. П., Ширяева М. А. Методы расчета прогноза подпора грунтовых вод в зоне влияния гидротехнических сооружений // Природообустройство. 2020. № 5. С. 109–116.
47. Данилкин А. А., Калашник А. И., Запорожец Д. В., Максимов Д. А. Мониторинг состояния ограждающей дамбы в зоне отработки техногенного месторождения Ковдорского ГОКа // Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-техн. жур.). 2014. № 7. С. 344–351.
48. СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Утв. Минрегион России 29.12.2011. Ввод в действие 01.01.2013.
49. Калашник Н. А. Компьютерное моделирование механической прочности и противофильтрационной функциональности ограждающей дамбы хвостохранилища // Современные инновационные технологии подготовки инженерных кадров для горной промышленности и транспорта. Днепропетровск, 2016. № 3. С. 304–308.
50. Калашник А. И., Запорожец Д. В., Калашник Н. А. Идентификация фильтрационно-деформационных процессов в теле ограждающей дамбы хвостохранилища // Вестник КНЦ. 2013. № 2. С. 13.
51. Волосухин Я. В. Многофакторные исследования надежности и безопасности Эшкаконского гидроузла в бассейне реки Подкумок // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2017. № 1(193). С. 71–75.
52. Аргал Э. С. Борьба с фильтрацией в основании западной дамбы хвостохранилища Удоканского ГМК // Гидротехническое строительство. 2023. № 10. С. 16–21.
53. Chen B., Barboza B. R., Sun Y. et al. A Review of Hydraulic Fracturing Simulation // Archives of Computational Methods in Engineering. 2022. Vol. 29. P. 1–58.
54. Тихонова С. А., Стручкова Г. П., Капитонова Т. А. Оценка антропогенного загрязнения водоемов Якутии по спектральным характеристикам космоснимков // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 12–1. С. 213–222.
55. Калашник Н. А. Влияние степени водонасыщенности хвостохранилища обогатительной фабрики горнодобывающего предприятия на гидрогеомеханическое состояние ограждающей дамбы: 3D-моделирование // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 5. С.144–155.
56. Kalashnik N. Scenario modeling of groundwater filtration in a enclosing tailings dam of a mining enterprise // E3S Web of Conferences. March 2023. Vol. 376. 03020.
57. Behera A. K., Pradhan R. M., Kumar S., Chakrapani G. J., Kumar P. Assessment of Groundwater Flow Dynamics Using MODFLOW in Shallow Aquifer System of Mahanadi Delta (East Coast), India // Water. 2022. Vol. 14. P. 611.
58. Zhang W., Zhang J., Yang N., Duan L. Influence of mining activities on hydrological processes in the mining district, Loess Plateau: insights from spatio-temporal variations of δD and δ18O // Frontiers in Environmental Science. 2024. Vol. 12. 1388262.

59. Леонтьева Е. В., Сапачёв Р. Ю., Гришин А. А. Прогнозная численная геофильтрационная модель притока подземных вод в карьер Горевского ГОКа // Геоэкология. 2023. № 6. С. 84–96.
60. Clarkson L., Williams D. Critical review of tailings dam monitoring best practice // International Journal of Mining, Reclamationand Environment. 2019. Vol. 34. Iss. 2. P. 119-148.
61. Kalashnik A., Zaporozhets D. Information Technologies in Monitoring of Urbanized Territories in the Western Russian Arctic Sector // Lecture Notes in Networks and Systems. 2023. Vol. 509. P. 837-844.
62. Калашник А. И. Применение мультидисциплинарных методов и цифровых технологий в мониторинге накопителей жидких промышленных отходов западной части Арктики // Успехи современного естествознания. 2022. № 12. С. 155–160.
63. Melnikov N. N., Kalashnik A. I., Kalashnik N. A. Integrated multi-level geofluidmechanics monitoring system for mine waterworks // Eurasian Mining. 2018. No. 2. P. 7–10.
64. Мельников Н. Н., Калашник А. И., Запорожец Д. В., Дьяков А. Ю., Максимов Д. А. Опыт применения георадарных подповерхностных исследований в западной части российского сектора Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 1(107). С. 39–49.
65. Мусалев Д. Н., Прохоров Н. Н., Клабук А. М. Опыт георадиолокационных исследований при научно-техническом сопровождении горных работ на Старобинском месторождении калийных солей // Горный журнал. 2018. № 8. С. 42–47.
66. Кучинская Г., Ставская М. Применение наземного лазерного сканирования в современных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 1. С. 160–169.
67. Михайлов В. О., Киселева Е. А., Смольянинова Е. И., Дмитриев П. Н., Голубев В. И., Тимошкина Е. П., Хайретдинов С. А. Радарная спутниковая интерферометрия: новые технологии спутникового мониторинга областей разработки полезных ископаемых, смещений природных и техногенных объектов // Наука и технологические разработки. 2016. Т. 95, № 3. С. 5–11.
68. Пономаренко М. Р., Кутепов Ю. И., Волков М. А., Гринюк А. П. Космические методы в составе комплексного деформационного мониторинга земной поверхности горного предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 12. С. 103–113.
69. Рыбников П. А., Бузина Д. А. Использование мультиспектральных и гиперспектральных данных авиационных и космических аппаратов для изучения горнопромышленных территорий // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 11–1. С. 55–70.
70. Hartwig M. E. Detection of mine slope motions in Brazil as revealed by satellite radar interferograms // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2016. Vol. 75(2). P. 605–621.
71. Morin R. Satellite Remote Sensing for Effective Monitoring of Tailings Storage // Engineering and Mining Journal. 2016. December 2016.
72. Дерябин С. А., Мисинева Е. В. Построение гибридной имитационной модели экологического состояния горнопромышленного региона на основе мультиагентного подхода // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 4. С. 169–181.

73. Зиновьева О. М., Кузнецов Д. С., Меркулова А. М., Смирнова Н. А. Цифровизация систем управления промышленной безопасностью в горном деле // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 2–1. С. 113–123.
74. Методы применения данных с дрона. URL: https://dronemanya.com/post/parrot-anafi-ai-ilk-seri-robotik-4g-iha (дата обращения: 17.04.2023).
75. Максимов Д. А., Дьяков А. Ю. Мониторинг локальных нарушений фильтрационных процессов в дамбах хвостохранилищ горнорудных предприятий комплексом геофизических и визуальных методов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 8. С. 154–163.
76. Максимов Д. А. Механизмы негативного влияния локальных нарушений фильтрационной устойчивости на надежность насыпных гидротехнических сооружений // Проблемы недропользования. 2018. № 2(17). С. 90–97.
77. Мельников Н. Н., Калашник А. И., Калашник Н. А., Запорожец Д. В. Применение современных методов для комплексных исследований состояния гидротехнических сооружений региона Баренцева моря // Вестник Мурманского гос. техн. ун-та. 2017. Т. 20, № 1–1. С. 13–20.
78. Дьяков А. Ю., Калашник А. И. Методические основы георадарных исследований горнотехнических объектов. Апатиты: КНЦ РАН, 2021. 110 с.
79. Саввин Д. В., Федорова Л. Л., Куляндин Г. А. Геофизические исследования мерзлотных условий водозащитной дамбы угольного разреза «Кангаласский» // Известия вузов. Горный журнал. 2022. № 4. С. 38–46.
80. Носкевич В. В., Горшков В. Ю., Байдиков С. В., Угрюмов И. А. Обследование состояния грунтовой плотины комплексом геофизических методов // Гидротехническое строительство. 2019. № 5. С. 30–37.
81. Широбоков М. П., Иванов А. А., Пудова Н. Г. Применение комплекса геофизических методов для обследования состояния гидротехнических сооружений на примере грунтовой плотины в составе МГЭС (Карелия) // ГеоЕвразия – 2021. Геологоразведка в современных реалиях: тр. IV Междунар. геол.-геофиз. конф. и выставки. Тверь: ООО «ГеоЕвразия», 2021. С. 35–36.
82. Фёдорова О. И., Горшков В. Ю. Геоэлектрический мониторинг при диагностике насыпных гидротехнических сооружений на примере изучения грунтовой плотины // Гидротехническое строительство. 2022. № 11. С. 45–51.
83. Ахметов Е. М., Асемов К. М., Жуматаева М. О. Исследование аварий на гидротехнических сооружениях и методы контроля их безопасности // Известия Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331, № 4. С. 70–82.
84. Ахметов Е. М., Асемов К. М., Мукашбеков Е. Т., Шульга М. В. Исследование земляной плотины комплексом геофизических методов // Геофизика. 2020. № 3. С. 72–77.
85. Rocha D. C. G., Braga M. A. S., Rodrigues C. T. Geophysical methods for br tailings dam research and monitoring in the mineral complex of Tapira – Minas Gerais, Brazil // Brazilian Journal of Geophysics. 2019. Vol. 37. No. 3. P. 275-289.
86. Rey J., Mendoza R., Martínez J., Hidalgo C., Rodríguez C. F. Combining geophysical methods (DC, IP, TDEM and GPR) to characterise mining waste in the Linares-La Carolina district (southern Spain) // Journal of Environmental Management. 2022. Vol. 322. No. 7. 116166.
87. Ahmad W., Rehman K., Farooq M., Ali A., Ahmed T. Near surface cavities mapping using integrated geophysical techniques: Case study of Gadwalian dam, North Pakistan, Iranian // Journal of Earth Sciences. 2022. Vol. 14. No. 3. P. 165-177.

88. Loperte A., Soldovieri F., Palombo A., Santini F., Lapenna V. An integrated geophysical approach for water infiltration detection and characterization at Monte Cotugno rock-fill dam (southern Italy) // Engineering Geology. 2016. Vol. 211. P. 162-170.
89. Laksono Y. A., Zulaikah S., Sutrisno S., Yusop Z., Rahman M. B. S., Anggana Q. F. Using georadar as a dam pore water pressure measurement - case study of Sutami Dam // AIP Conference Proceedings. 2020. Vol. 2251. 040015.
90. Калашник А. И., Дьяков А. Ю., Абрамов Н. Н. Комплексирование георадарного и сейсмического зондирования дамбы хвостохранилища // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2018. № 4. С. 104–111.
91. Abramov N. N., D'yakov A. Y., Kalashnik A. I. Identification of water-saturated zones in a protective hydraulic earthen structure by synchronous electromagnetic and seismic sounding // Power Technology and Engineering. 2019. Т. 53. № 2. С. 167-171.
92. Максимов Д. А., Дьяков А. Ю. Комплексирование визуального и георадарного метода обследования с применением цифровых технологий в целях мониторинга локальных нарушений фильтрационных процессов в теле насыпного ГТС // Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-техн. жур.). 2019. № S37. С. 409–416.
93. Абрамов Н. Н., Дьяков А. Ю., Калашник А. И. Идентификация водонасыщенных зон в ограждающем грунтовом гидротехническом сооружении синхронным электромагнитным и сейсмическим зондированием // Гидротехническое строительство. 2019. № 2. С. 17–21.
94. Владов М. Л., Старовойтов А. В. Введение в георадиолокацию. М.: Изд-во МГУ, 2005. 153 с.
95. Владов М. Л., Судакова М. С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений. М.: ГЕОС, 2017. 240 с.
96. Капустин В. В., Синицын А. В. Применение способов автоматизированного определения диэлектрической проницаемости среды при решении прикладных задач георадиолокации // Геофизика. 2014. № 6. С. 39–45.
97. Antonis G. Modeling ground penetrating radar using GprMax // Construction and Building Material. 2005. Vol. 19. P. 755–762.
98. Tzanis A. MATGPR: A freeware MATLAB package for the analysis of common-offset GPR data // Geophys. Res. Abstracts. 2006. Vol. 8. P. 09488.
99. Tzanis A. A freeware package for the analysis & interpretation of common and single offset GPR data // Fast Times. 2010. No. 15 (1). P. 17–43.
100. Атлас физических свойств минералов и пород Хибинских месторождений / И. А. Турчанинов, М. П. Воларович, А. Т. Бондаренко [и др.]. Л: Наука, 1975. 71 с.
101. Дьяков А. Ю. Георадарное исследование ограждающей дамбы на объекте складирования намывных отходов горного производства // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 11(125). 6 с. URL: https:// research-journal.org/archive/11-125-2022-november/10.23670/IRJ.2022.125.56 (дата обращения: 22.10.2024).
102. Калашник А. И., Дьяков А. Ю. Георадарные обследования горнотехнических сооружений западной части Арктики // Горная промышленность. 2023. № S1. С. 103–109.
103. Калашник А. И., Дьяков А. Ю., Абрамов Н. Н. Комплексирование георадарного и сейсмического зондирования дамбы хвостохранилища // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2018. № 4. С. 104–111.

104. Годзиковская А. А., Асминг В. Э., Виноградов Ю. А. Ретроспективный анализ первичных материалов о сейсмических событиях, зарегистрированных на Кольском полуострове и прилегающей территории в XX веке. М.: Ваш полиграфический партнер, 2010. 130 с.
105. Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками / Козырев А. А., Савченко С. Н., Панин В. И., Семенова И. Э., Рыбин В. В., Федотова Ю. В., Козырев С. А. и др. Апатиты КНЦ РАН, 2019. 431с.
106. Benter A., Moore W., Antolovich M. GPR signal attenuation through fragmented rock // Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. SectionA: Mining Technology. 2016. Vol. 125. Is. 2. P. 114-120.
107. Денисенко И. А., Лунина О. В., Гладков А. С., Казаков А. В, Серебряков Е. В., Гладков А. А. Структура Дельтового разлома и сейсмогенные смещения на участке «Шерашево – Инкино» по данным георадиолокации (Байкальский регион) // Геология и геофизика. 2020. Т. 61, № 7. С. 879–888.
108. Bricheva S. S., Deev E. V., Dubrovin I. O., Doroshenkov M. M., Entin A. L., Panin A. V. Ground-penetrating radar evidence of faulting in unconsolidated coarse sediments // NSG2021 27th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics.2021. Vol. 2021. P. 1-5.
109. Александров П. Н., Морозов Ю. А., Кулаковский А. Л., Матвеев М. А., Смульская А. И., Соколова Ю. Ф. Изучение приповерхностной структуры метаморфических толщ георадарным методом (северное приладожье) // Геофизические исследования. 2020. Т. 21, № 1. С. 5–23.
110. Ercoli M., Cirillo D., Pauselli C., Jol H.-M., Brozzetti F. Ground-penetrating radar signature of Quaternary faulting: a study from the Mt. Pollino region, southern Apennines, Italy // Solid Earth. 2021. No12. P. 2573–2596.
111. Bano M., Tsend-Ayush N., Schlupp A., Munkhuu U. Ground-Penetrating Radar Imaging of Near-Surface Deformation along the Songino Active Fault in the Vicinity of Ulaanbaatar, Mongolia // Applied Sciences. 2021. No 11. 8242.
112. Chamyal L. S., Parul Joshi, Swarali Vasaikar, Maurya D. M. Neotectonic characterization of the Narmada-Son Fault (NSF) using field and GPR data, Gujarat, western India // Journal of the Palaeontological Society of India. 2022. Vol. 67(1). P. 72-84.
113. Takao Kobayashi, Changwan Sun, Jin-Hyuck Choi Near-surface fault investigation by Ground Penetrating Radar (GPR) surveys // Journal of the Geological Society of Korea. 2022. Vol. 58. No. 4. P. 445-455.
114. Takao Kobayashi, Kyoungtae Ko, Sung-Ja Choi, Jin-Hyuck Choi Orthogonal Dual Polarization GPR Measurement for Detection of Buried Vertical Fault // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2022. Vol. 19. 4022805.
115. Bikram Bali, Ahsan Afzal Wani Analysis of neotectonic structures in the piedmont region of PirPanjal Range NW Himalaya by integrating geomorphic indicators coupled with geophysical transects (GPR) // Natural Hazards. 2021. Vol. 105(2). P. 1-14.
116. Калашник А. И., Дьяков А. Ю. Георадарное исследование геолого-структурного строения рабочего уступа карьера // Изв. вузов. Горный журнал. 2015. № 6. С. 73–78.
117. Цифровизация в горной промышленности. Индустрия 4.0: мат-лы междунар. форума 24–25 окт. 2019 г. URL: https://tu-ugmk.com/upload/NPF-journal.pdf (дата обращения: 18.11.2024).
118. Лукичев С. В. Цифровая трансформация горнодобывающей промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-техн. жур.). 2019. № S37. С. 7–20.

119. Yosoon C., Baek J., Park S. Review of GIS-Based Applications for Mining: Planning, Operation and Environmental Management // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. No. 7. 2266.
120. Barnewold L., Lottermoser B. Identification of digital technologies and digitalisation trends in the mining industry // International Journal of Mining Science and Technology. 2020. Vol. 30 (6). P. 747-757.
121. Лукичев С. В., Наговицын О. В. Цифровая трансформация и технологическая независимость горнодобывающей отрасли // Горная промышленность. 2022. № 5. С. 74–78.
122. Lottermoser B. G. Tailings. In: Mine Wastes. – Springer. Berlin. Heidelberg. 2010. 404 p. URL:https://doi.org/10.1007/978-3-642-12419-8_4 (дата обращения: 25.11.2024).
123. Архипов А. В., Решетняк С. П. Техногенные месторождения. Разработка и формирование. Апатиты: КНЦ РАН, 2017. 175 с.
124. Чуркин О. Е., Гилярова А. А. Освоение отходов горного производства как инвестиционное направление развития горнорудной промышленности Кольского полуострова // Экономика, предпринимательство и право. 2020. Т. 10, № 3. С. 905–916.
125. Пыление хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд: экологическая проблема и пути ее решения / Амосов П. В., Бакланов А. А., Горячев А.А. и др. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2023. 170 с.
126. Franks D., Stringer M., Torres-Cruz L., Baker E. Tailings facility disclosures reveal stability risks // Scientific Reports. 2021. March. 11(1). 5353.
127. WMTF: World Mine Tailings Failures — from 1915. URL: https://worldminetailings failures.org/ (дата обращения: 25.11.2024).
128. Clarkson L., Williams D., Seppälä, J. Real-time monitoring of tailings dams // Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards. 2020. Vol. 15 (2). P. 113-127.
129. Zare M., Nasategay F., Gomez J., Moayedi F., Sattarvand J. A review of tailings dam safety monitoring guidelines and systems // Minerals. 2024. Vol. 14 (6). 551. https://doi.org/10.3390/min14060551 (дата обращения: 02.12.2024).
130. Global Satellite-Based Earth Observation Market Research Report: Forecast (2021-2026). MarkNtel Advisors LLP, 2021. 210 p.
131. Мелихов М. В. Особенности геоинформационного космического мониторинга горнопромышленных природно-технических систем // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 12–1. С. 29–41.
132. ДЗЗ для экологических задач. Ч. 1: Введение в теорию ДЗЗ. URL: https://wiki.gis-lab.info/w/ (дата обращения: 25.10.2024).
133. Мелихов М. В. Геоинформационное обеспечение складирования горнопромышленных отходов на основе космических и цифровых технологий: тезисы докл. Всерос. науч.-техн. конф. «Цифровые технологии в горном деле». Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2023. С. 32–33.
134. Романов И. А. Геоинформационный космический мониторинг // Геоинформатика. 2015. № 2(10). С. 131–137.
135. Melikhov M. V. Geoinformation Space Monitoring of Industrial Safety of Mining and Hydrotechnical Natural and Anthropogenic Complexes // Power Technology and Engineering. 2022. Vol. 55. No. 6. P.837-844.
136. QGIS. URL: https://www.qgis.org/ (дата обращения: 25.11.2024).
137. Google Earth Pro. URL: https://www.google.com/intl/ru_ALL/earth/versions/ (дата обращения: 25.11.2024).

138. The Sentinel missions. URL: https://www.esa.int/Applications/ Observing_the_Earth/ Copernicus/The_Sentinel_missions (дата обращения: 25.11.2024).
139. Loginov D. S. Web technologies in cartographic support of geological exploration // Proceedings of the ICA. 2021. Vol. 4. article 68.
140. Girija R., Mayappan S. Mapping of mineral resources and lithological units: a review of remote sensing techniques // International Journal of Image and Data Fusion. 2019. Vol. 10 (2). P. 79-106.
141. Werner T., Bebbington A., Gregory G. Assessing impacts of mining: Recent contributions from GIS and remote sensing // The Extractive Industries and Society. 2019. Vol. 6. Is. 3. P. 993-1012.
142. Yang Z., Li Z., Zhu J., Wang Y., Wu L. Use of SAR/InSAR in mining deformation monitoring, parameter Inversion, and forward predictions: a review // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 2020. Vol. 8. No.1. P. 71-90.
143. Zheng M., Deng K., Fan H., Du S. Monitoring and analysis of surface deformation in mining area based on InSAR and GRACE // Remote Sensing. 2018. Vol. 10. No. 9. P. 1392.
144. Kozhaev Zh. T., Mukhamedgalieva M. A., Mustafin M. G., Imansakipova B. B. Geoinformation system for geomechanical monitoring of ore deposits using spaceborn radar interferometry methods // Gornyi Zhurnal. 2017. No. 2. P. 39-44.
145. Song W., Song W., Gu H., Li F. Progress in the remote sensing monitoring of the ecological environment in mining areas // Environmental Research and Public Health. 2020. Vol. 17 (6). 1846.
146. McKenna P., Lechner A., Phinn S., Erskine P. Remote sensing of mine site rehabilitation for ecological outcomes: a global systematic review // Remote Sensing. 2020. Vol. 12 (21). 3535.
147. Maus V., Giljum S., Gutschlhofer J., Silva D.M., Probst M., Gass S.L.B., Luckeneder S., Lieber M., McCallum I. A global-scale data set of mining areas // Scientific Data. 2020. Vol. 7 (1). article 289.
148. Stanković R., Vulovic N., Lilic N., Obradovic I., Tošović R., Pešić-Georgiadis M. D. WebGIS decision support system for management of abandoned mines // Energies. 2016. Vol. 9 (7). article 567.
149. Мелихов М. В. Мультиплощадный космический мониторинг хранилищ отходов горного производства в Арктике // Горная промышленность. 2024. № 5S. С. 21–27.
150. Tao M., Zhang X., Wang S., Cao W., Jiang Y. Life cycle assessment on lead–zinc ore mining and beneficiation in China // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 237. 117833.
151. Абдыгазиев К. К., Чукин Р. Б., Самаган уулу Б. Исследование развития гидродинамической аварии, связанной с распространением потока неконсолидированной жидкости при переливе через гребень дамбы хвостохранилища рудника Кумтор // Вестник Кыргызско-Российского Славянского ун-та. 2022. Т. 22, № 12. С. 93–99.
152. Fortuna J., Waterhouse J., Chapman P., Gowan M. Applying Practical Hydrogeology to Tailings Storage Facility Design and Management // Mine Water Environ. 2021. No. 40. P. 50-62.
153. Owen J.R., Kemp D., Lèbre É., Svobodova K., Pérez Murillo G. Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2020. Vol. 42. 101361.
154. Kalashnik N. A. Influence of water filtration rate on the functionality of the mining tailings dam // Journal of Physics Conference Series. 2022. Vol. 2388. 012149.

155. Храпов С. С. Численное моделирование гидродинамических аварий: размыв дамб и затопление территорий // Вестник Санкт-Петербургского ун-та. Математика. Механика. Астрономия. 2023. Т. 10, № 2. С. 357–373.
156. Храпов С. С. Численное моделирование самосогласованной динамики поверхностных и грунтовых вод // Математическая физика и компьютерное моделирование. 2021. Т. 24, № 3. С. 45–62.
157. Obrzud R. F., Truty A. The hardening soil model - a practical guidebook. 2018. 216 p. URL: http://www.zsoil.com/zsoil_manual_2018/Rep-HS-model.pdf (дата обращения: 11.09.2023).
158. Song X., Pettersen J. B., Pedersen K. B., Røberg S. Comparative life cycle assessment of tailings management and energy scenarios for a copper ore mine: A case study in Northern Norway // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 164. P. 892-904.
159. Tost M., Hitch M., Chandurkar V., Moser P., Feiel S. The state of environmental sustainability considerations in mining // Journal of Cleaner Production. 2018. Vol. 182. P. 969-977.
160. Muniruzzaman M., Karlsson T., Ahmadi N., Role M. Multiphase and multicomponent simulation of acid mine drainage in unsaturated mine waste: Modeling approach, benchmarks and application examples Appl // Geochemistry. 2020. Vol. 120. 104677.
161. Шарипов Д. Ш. Гидродинамические и гидростатические силы как факторы, влияющие на устойчивость хвостохранилищ // Науки о Земле и недропользование. 2021. № 44(1). С. 63–72.
162. Lolaev A., Oganesyan A., Badoev A.S., Oganesyan E. Tailing dams formation algorithm // Arab J. Geosci. 2020. Vol. 13 (19). 974.
163. Белослудцева Ю. О., Котлов О. Н. Прогноз температурного режима гидротехнических сооружений с учетом фильтрационного потока // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева. 2024. Т. 311. С. 65–74.
164. Muller S., Lassin A., Lai F., Thiéry D., Guignot S. Modelling releases from tailings in life cycle assessments of the mining sector: From generic models to reactive transport modeling // Minerals Engineering. 2022. Vol. 180 (6). April 2022. 107481.
165. Щипцов В. В., Тишков С. В., Волков А. Д. Современное состояние и перспективы развития хвостохранилища моногорода арктической зоны (на примере АО «Карельский окатыш») // Горный журнал. 2023. № 2. С. 68–73.
166. Шерхов А. Х., Гергокова З. Ж. Оценка актуального состояния некоторых компонентов комплекса гидротехнических сооружений хвостохранилища Тырныаузского горно-обогатительного комбината // Природообустройство. 2022. № 4. С. 100–106.
167. СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов. М.: Минрегион России, 2012. 34 с. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200095521?ysclid=lxohf3z2jy963752248 (дата обращения: 11.09.2023).
168. Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений» от 23 июня № 117-ФЗ. 1997. URL: https://docs.cntd.ru/document/9046062?ysclid=m46ztxa3p3544304477 (дата обращения: 02.12.2024).
169. ГОСТ-55100. Ресурсосбережение. Наилучшие доступные технологии обращения с отходами в горнодобывающей промышленности. Аспекты эффективного применения. М.: Стандартинформ, 2019. URL: https://internet-law.ru/gosts/gost/53555/ (дата обращения: 02.12.2024).
170. Руководство по безопасности РБ-078-12. Обеспечение безопасности при выводе из эксплуатации (закрытии) хвостохранилищ. URL: https://docs.cntd.ru/document/898949988?ysclid=m471ebwr2q656942391 (дата обращения: 02.12.2024).

171. Бурлуцкий С. Б., Танинкова В. С., Глазунов В. В. Уточнение оценки устойчивости оползневого склона с использованием материалов геофизических исследований // Инженерные изыскания. 2020. Т. 14, № 3. С. 58–67.
172. Чугаев Р. Р. Земляные гидротехнические сооружения. Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1967. 460 с.
173. Праведный Г. Х. Руководство по расчетам фильтрационной прочности плотин из грунтовых материалов: П55 76. Л.: ВНИИГ, 1976. 77 с.
174. Жиленков В. Н. Руководство по расчету фильтрационной прочности грунтовых сооружений и их оснований: П59-94. СПб.: Изд-во АО ВНИИГ, 1995. 108 с.
175. Розанов Н. Н. Плотины из грунтовых материалов. М.: Стройиздат, 1983. 296 с.
176. Тетельмин В. В., Баклыков И. В. Глубинные процессы массо- и теплопереноса в основаниях высоких плотин // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 2017. Т. 283. С. 45–53.
177. Тетельмин В. В. Упругий режим фильтрации в основаниях высоких плотин // Гидротехническое строительство. 2009. № 5. С. 17–22.
178. Тетельмин В. В. Коэффициенты упругоемкости и пьезопроводности в задачах нестационарной фильтрации в основаниях высоких плотин // Гидротехническое строительство. 2011. № 2. С. 33–38.
179. Радченко В. Г., Радченко С. В. Ремонт плотин из грунтовых материалов в случае нарушения фильтрационной прочности // Гидротехническое строительство. 2011. № 5. С. 20–26.
180. Wan C. F., Fell R. Investigation of rate of erosion of soils in embankment dams. Proc. ASCE // Journal of Geotechnical and Geo Environmental Engineering. 2004. Vol. 130 (4). P. 373-380.
181. ICOLD. Dam failures. Statistical analysis. Bulletin № 99. 1995. URL: https://www.icold-cigb.org/GB/publications/bulletins.asp (дата обращения: 10.02.2022).
182. Rocha M. Deterioration of dams and reservoirs. Examples and their analysis. Rotterdam: A.A. Balkema, 1984. 367 p.
183. Калашник Н. А. 3D-моделирование насыпной грунтовой плотины водохранилища муниципального и горнопромышленного значения // Тенденции развития науки и образования. 2019. № 50. Ч. 2. С. 24–27.
184. Научно-технический прогресс на горнорудных предприятиях Заполярья / Мельников Н. Н., Усачев П. А., Демидов Ю. В. и др. Л.: Наука, 1988. 239 с.
185. Калашник А. И., Калашник Н. А. Исследования ограждающего насыпного гидротехнического сооружения как прототипа дамбы хвостохранилища горно-обогатительного предприятия // Вестник КНЦ. 2013. № 1. С. 27–30.
186. Калашник А. И., Калашник Н. А., Смирнова О. В. Компьютерное 3D-моделирование фильтрационно-деформационного состояния ограждающей дамбы хвостохранилища Ковдорского ГОКа // Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-техн. жур.). 2017. Спецвыпуск 23. С. 292–298.
187. Программный комплекс Processing Modflow 8. URL: https://www.simcore.com/wp/archive/ (дата обращения: 24.02.2025).
188. Программа 3D Groundwater Explorer. URL: https://groundwaterdesktop.com/Pages/Downloads.aspx (дата обращения: 24.02.2025).
189. Plaxis 3D Руководство пользователя. Essential for geotechnical professionals. 2013. 150 с.
190. Сират Д., Руденко А. А. Многофакторность модели и оценки эффективности производственных структур при строительстве технически сложных объектов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного ун-та. 2024. № 1(67). С. 117–126.

191. Евдокимов С. В., Селиверстов В. А., Орлова А. А. Результаты многофакторного анализа состояния гидротехнических сооружений // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10, № 1(38). С. 71–76.
192. Кашперюк П. И., Лаврусевич А. А., Мартынов А. М. К вопросу о рассмотрении осадки грунтов основания как многофакторного антропогенно обусловленного геологического процесса // Грунтоведение. 2021. № 2(17). С. 31–37.
193. Чернышев С. Н., Кашперюк П. И., Мартынов А. М. Еще раз об осадке грунтов основания как многофакторном интегральном инженерно-геологическом процессе // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2020. № 2. С. 39–47.
194. Чернышев С. Н., Мартынов А. М. Осадка — многофакторный инженерно-геологический процесс // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 6. С. 81–86.
195. Ямашкин С. А., Ямашкин А. А., Зарубин О. А., Кирюшин А В. Многофакторный анализ межкомпонентных связей в геосистемах на основе имитационного моделирования и численных методов // Инженерный вестник Дона. 2022. № 11(95). С. 411–424.
196. Деревянов М. Ю., Плешивцева Ю. Э., Афиногентов А. А. Многофакторный анализ ресурсо- и энергосбережения в системе переработки техногенных отходов предприятий нефтегазового комплекса // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Серия: Технические науки. 2021. Т. 29, № 1(69). С. 19–35.
197. Барлиани А. Г., Чудова В. С. Анализ влияния факторов на осадку инженерных сооружений методом многофакторного регрессионного анализа // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. № 9. С. 141–147.
198. Земцов Ю. В., Устюгов А. С. Многофакторный анализ эффективности ограничения водопритоков в различных геолого-физических условиях скважин и пластов // Нефтепромысловое дело. 2016. № 5. С. 20–26.
199. Жарницкий В. Я., Андреев Е. В., Баюк О. А. Многофакторное моделирование прогноза оценки надежности гидротехнических сооружений с использованием массива статистических данных // Природообустройство. 2016. № 3. С. 32–39.
200. Kalashnik A. Interdisciplinary Studies and Digital Technologies in Monitoring Liquid Mining Waste Reservoirs of the Barents Euro-Arctic Region // В сборнике: II International Scientific Forum on Sustainable Development and Innovation (WFSDI 2023). Conference Proceedings. Ekaterinburg, 2024. С.1555-1561.
201. Волкова М. К., Василевский П. Ю., Кортунов Е. В., Самарцев В. Н., Лехов В. А., Солодов И. Н., Поздняков С. П. Разработка геофильтрационной модели для сопровождения добычи урана методом подземного выщелачивания на Хиагдинском месторождении // Подземная гидросфера. 2021. С. 454–457.
202. Leaf A. T., Fienen M. N. Modflow-setup: Robust automation of groundwater model construction // Frontiers in Earth Science. September 2022. 10:903965.
203. Московцева Д. А., Кичигин Е. В. Геофильтрационное моделирование и характеристика подземных вод Лебединского месторождения // Геология, География и глобальная энергия. 2021. № 2(81). С. 68–73.
204. Луканов Д. Д., Расторгуев И. А., Юрьев С. В. Оценка геофильтрационных параметров на основе одновременной калибровки серии профильных моделей // Вестник Московского ун-та. Серия 4. Геология. 2024. Т.63, № 2, С. 101–107.
205. Калашник Н. А. Оценка фильтрационной устойчивости ограждающей дамбы хвостохранилища на основе гидрогеомеханического 3D-моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-техн. жур.). 2022. № 12–1. С. 5–15.

206. Калашник Н. А. Оценка надежности насыпного грунтового сооружения при образовании в его теле зоны повышенной фильтрации // Вестник КНЦ РАН. 2019. Т. 11, № 2. С. 69–74.
207. Ефремов Е. Ю. Анализ процесса деформирования грунтовой дамбы при заполнении чаши хвостохранилища // Известия Томского политехнического ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 6. С. 178–185.
208. Бийбосунов Б. И., Абдылдаев К. К., Курманбек уулу Т. Гидродинамическая и геодинамическая оценка устойчивости склонов и откосов // Дневник науки. 2020. № 2(38). С. 14.
209. Шарипов Д. Ш. Гидродинамические и гидростатические силы как факторы, влияющие на устойчивость хвостохранилищ // Маркшейдерия и недропользование. 2021. № 3(113). С. 34–37.
210. Калинин Э. В., Кропоткин М. П. Методы расчета устойчивости склонов и откосов: российские подходы в сопоставлении с мировыми тенденциями // Инженерная геология. 2022. Т. 17, № 4. С. 22–38.
211. Анискин Н. А., Ступивцев А. В. Влияние неустановившейся фильтрации на надежность и безопасность грунтовых плотин // Гидротехническое строительство. 2025. № 6. С. 27–36
212. Саинов М. П., Талалаев Н. С. Оценка работоспособности противофильтрационной стены в основании хвостохранилища // Гидротехническое строительство. 2024. № 2. С. 36–41.
213. Сольский С. В., Гладштейн О. И., Зеленский И. Г. Современные решения применения геосинтетических материалов на грунтовых сооружениях // Гидротехника. 2023. № 4(73). С. 62–67.
214. Сольский С. В., Быковская С .А. Оптимизация стабилизации оползнеопасных склонов // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14, № 10. С. 1258–1271.
215. Анискин Н. А., Сергеев С. А. Устойчивость откоса грунтовой плотины при сработке водохранилища // Строительство: наука и образование. 2022. Т. 12, № 3. С. 6–17.
216. Караблин М. М., Простов С. М. Оценка повышения точности прогноза устойчивости откосных сооружений на основе объемных геолого-геофизических моделей // Вестник Кузбасского гос. техн. ун-та. 2021. № 4(146). С. 66–76.
217. Исмаилова К. Д., Окмоткулов С. У. Оценка устойчивости земляных сооружений // Вестник Пространство ученых в мире. 2023. № 5. С. 36–42.
218. Бамборин М. Ю., Шишкин Я. В. Анализ методов расчета устойчивости откосов и склонов // Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-техн. жур.). 2024. № S5. С. 14–25.
219. Комилов О. К., Негматов Т. А., Рахманов А. А. Расчет устойчивости многослойного откоса при переменном значении сцепления грунтов // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2024. № 4(68). С. 162–170.
220. Переверзева Л. В., Носков И. В. Современные методы расчета устойчивости откосов и склонов // Ползуновский альманах. 2025. № 1. С. 167–170.
221. Chen F., Yao Q., Tian J. Review of ecological restoration technology for mine tailings in China // Engineering Review. 2016. Vol. 36 (2). P. 115-121.
222. Piciullo L., Storrøsten E. B., Liu Z., Nadim F., Lacasse S. A new look at the statistics of tailings dam failures // Engineering Geology. 2022. Vol. 303. P. 1-15.

223. Ma W., Zhang G., Yang Y., Wang P., Zhao Y., Lin Q. The Piping Failure Mechanism of a Loess Dam: The 2021 Dam Break of the Yang Village Reservoir in China // Frontiers in Earth Science. 2022. Vol. 10. P. 1-10.
224. Калашник А. И., Запорожец Д. В., Калашник Н. А. Многоуровневая система мониторинга гидротехнических сооружений горнопромышленных предприятий и гидроэнергетики Мурманской области // Вестник КНЦ РАН. 2019. Т. 11, № 2. С. 45–53.
225. Мельников Н. Н., Калашник А. И., Калашник Н. А., Запорожец Д. В. Комплексная многоуровневая система геомониторинга природно-технических объектов горнодобывающих комплексов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. Т. 54, № 4. С. 3–10.
226. Максимов Д. А. Индикаторы наличия в теле насыпного гидротехнического сооружения локальных нарушений фильтрационной устойчивости // Проблемы недропользования. 2018. № 2(17). С. 98–105.
227. Marsal R. J., Pohlenz W. The failure of Laguna Dam // Performance of Earth and Earth-Supported Structures, ASCE. 1972. Vol. 1. P. 489-505.
228. Evaluation and monitoring of seepage and internal erosion. Interagency Committee on Dam safety. Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2015. 576 p.
229. Bernd G. L. Mine wastes. Characterization, treatment, environmental impacts. Springer, 2007. 315 p.
230. Bahn G.-S., Kim S.-Y., Choi J.-Y. Comparative Study on Flora Characteristics and Species Diversity on Dam Slopes for Sustainable Ecological Management: Cases of Eight Dams in Korea // Land. 2021. Vol. 10 (12). 1403.
231. Suhatril M., Osman N., Azura Sari P., Shariati M., Marto A. Significance of Surface Eco-Protection Techniques for Cohesive Soils Slope in Selangor, Malaysia // Geotechnical and Geological Engineering. 2019. Vol. 37. P. 2007-2014.
232. Punetha P., Samanta M., Sarkar S. Bioengineering as an Effective and Ecofriendly Soil Slope Stabilization Method: A Review // Landslides: Theory, Practice and Modelling. 2019. Vol. 1. P. 201-224.
233. Leite D. H., Marcelino J. Application of drones and oss for mapping and visual inspection of embankment dams // Fourth International DAM WORLD Conference. 2020. Vol. 1. P. 1-13.
234. Martins W. B. R., Lima M. D. R., Barros U. O., Amorim L. S. V.-B., Oliveira F., Schwartz G. Ecological methods and indicators for recovering and monitoring ecosystems after mining: A global literature review // Ecological Engineering. 2020. Vol. 145. P. 1-11.
235. Mesyats S. P., Ostapenko S. P. A satellite data driven study of the relief impact on the assessment of the vegetable cover created to suppress the wind and water erosion of stored ore processing waste // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020, Albena. 2020. P. 11-18.
236. Mesyats S. P., Ostapenko S. P. Perspective of using satellite observing data to monitor the grass sod state while conserving stockpiled ore processing wastes // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019, Albena. 2019. P. 533-540.
237. Максимов Д. А. Динамика деформационных и фильтрационных процессов на участке насыпного гидротехнического сооружения по данным визуального мониторинга // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. №. 10. С. 80–89.

238. Максимов Д. А. Аномальный характер растительности как индикатор локальных фильтрационных нарушений в теле насыпных гидротехнических сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 7. С. 146–156.
239. Совершенствование технологии подземной разработки маломощных рудных месторождений Кольского полуострова / Бессонов И. И., Боборыкин В. Н., Калашник А. И. и др. Апатиты: КНЦ АН СССР, 1989. 156 с.
240. Zhen Z, Wu X, Ma B et al. Propagation Network of Tailings Dam Failure Risk and the Identification of Key Hazards // Sci. Rep. 2022. Vol. 12. No. 1. P. 1–17.
241. Мельников Н. Н., Калашник А. И. Создание многоуровневой системы геодинамического мониторинга горнотехнических и нефтегазовых объектов западной части российского сектора Арктики // Арктика: экология и экономика. 2015. № 3(19). С. 66–75.
242. Максимов Д. А. Влияние фильтрационных нарушений на уровень фильтрующихся вод и состояние насыпного гидротехнического сооружения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 5–1. С. 280–291.
243. Калашник А. И., Калашник Н. А., Запорожец Д. В. Исследование состояния насыпного гидротехнического сооружения на моренном основании // Ученые записки ПетрГУ. Серия: Естественные и технические науки. 2014. № 6(143). С. 92–98.
244. Wang W., Cao G., Li Y., Zhou Y. et al. Experimental Study of Dynamic Characteristics of Tailings with Different Reconsolidation Degrees after Liquefaction // Front Earth Sci. 2022. Vol. 10. 876401.
245. Тишков С. В., Волков А. Д., Кулаков К. А., Щипцов В. В. Совершенствование методов эколого-экономической оценки процессов добычи и переработки железной руды корпораций арктической зоны России на основе математического моделирования // Горная промышленность. 2022. № 2. С. 112–119.
246. Wilson R., Toro N., Naranjo O. et al. Integration of Geostatistical Modeling into Discrete Event Simulation for Development of Tailings Dam Retreatment Applications // Miner. Eng. 2021. Vol. 164. 106814.

ISBN 978-5-91137-554-6

РИО
КНЦ

