



ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

МНОГОУРОВНЕВЫЕ КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОНИТОРИНГ ХВОСТОХРАНИЛИЩ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ РОССИЙСКОГО СЕКТОРА АРКТИКИ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ

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

**МНОГОУРОВНЕВЫЕ КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
И МОНИТОРИНГ ХВОСТОХРАНИЛИЩ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ
ПРЕДПРИЯТИЙ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ
РОССИЙСКОГО СЕКТОРА АРКТИКИ**



Издательство Кольского научного центра
2022

УДК 622'17:004.9(985)

ББК 33

М73

Многоуровневые комплексные исследования и мониторинг хвостохранилищ горнодобывающих предприятий северо-западной части Российского сектора Арктики: монография / А. И. Калашник, Д. А. Максимов, Н. А. Калашник, А. Ю. Дьяков, Д. В. Запорожец, М. В. Мелихов. — Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2022. — 250 с.: ил.

ISBN 978-5-91137-465-5

Основной целью монографии являлось развитие методологии многоуровневых комплексных исследований хвостохранилищ горнодобывающих предприятий западной части Российского сектора Арктики для получения полной, детализированной и иерархически структурированной информации о контролируемом объекте. Более 10 лет авторы разрабатывают методологические основы многоуровневых исследований и мониторинга хвостохранилищ, реализующие оптимальное комплексирование мультидисциплинарных методов и способов наблюдений в комбинациях на различных уровнях от дневной поверхности. Такой системный подход позволяет решать задачи диагностики и контроля гидрогеомеханического состояния исследуемого объекта в иерархии от регионального уровня до локальных его компонентов и элементов. Для теоретического базиса созданы методические основы и построены гидрогеомеханические 3D-модели всех действующих хвостохранилищ Кольского полуострова. В книге дано описание установленных модельных закономерностей трансформации гидрогеомеханического состояния хвостохранилищ: от гидростатического в стационарную фильтрацию, и далее — в гидродинамику водотока и размыва ограждающей дамбы. В комплексе натурных и теоретических исследований получили развитие методические основы по обеспечению промышленной и экологической безопасности природно-технических водонасыщенных систем применительно к хвостохранилищам горнодобывающих предприятий. Методология многоуровневых исследований и мониторинга апробирована на хвостохранилищах всех горнодобывающих предприятий Кольского полуострова и может быть применена в других горнодобывающих регионах России.

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

УДК 622'17:004.9(985)

ББК 33

Фото на обложке – В. Жиганов

Научное издание

Редактор Ю. Н. Еремеева

Технический редактор В. Ю. Жиганов

Подписано в печать 13.05.2022. Формат бумаги 70×108 1/16.

Усл. печ. л. 21.88. Заказ № 30. Тираж 500 экз.

ISBN 978-5-91137-465-5

doi: 10.37614/978.5.91137.465.5

© Коллектив авторов, 2022

© ФГБУН ФИЦ «Кольский научный центр
Российской академии наук», 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	Стр. 5
ВВЕДЕНИЕ.....	9
1. ХВОСТОХРАНИЛИЩА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	
КАК ОСОБО ОТВЕТСТВЕННЫЕ ОБЪЕКТЫ.....	9
1.1. Особенности ГТС Кольского региона.....	9
1.2. Хвостохранилище — неотъемлемая часть технологической схемы горнодобывающего производства.....	14
1.3. Аварии и чрезвычайные ситуации на хвостохранилищах.....	16
1.4. Подходы к оценке риска аварий на ГТС.....	20
1.5. Подходы к идентификации проблемных участков хвостохранилищ...	27
1.6. Опыт исследований и мониторинга хвостохранилищ.....	38
2. РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ МНОГОУРОВНЕВЫХ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МОНИТОРИНГА ХВОСТОХРАНИЛИЩ.....	42
2.1. Методические подходы к проведению многоуровневых комплексных исследований.....	42
2.2. Комплексирование мультидисциплинарных методов.....	45
2.3. Методические подходы к компьютерному моделированию хвостохранилищ	46
2.4. Разработка компьютерных 3D-моделей хвостохранилищ.....	53
2.5. Моделирование ситуационного и прогнозного гидрогеомеханического состояния хвостохранилищ.....	58
3. МНОГОУРОВНЕВЫЕ КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОНИТОРИНГ ХВОСТОХРАНИЛИЩ.....	66
3.1. Наблюдательные полигоны на ГТС хвостохранилищ.....	66
3.2. Особенности мониторинговых наблюдений на ГТС горнодобывающих предприятий в евро-арктических условиях.....	70
3.3. Комплексные уровневые исследования.....	73
3.3.1. Подповерхностные определения (подповерхностный уровень)...	73
3.3.2. Наземные наблюдения и измерения (поверхностный уровень)...	79
3.3.3. Аэрофотосъемка (воздушный уровень).....	85
3.3.4. Дистанционный контроль (спутниковый уровень).....	89
3.3.5. Компьютерное моделирование (виртуальный уровень).....	97
3.4. Комплексирование мультидисциплинарных методов различных уровней	100
3.4.1. Визуальные наблюдения, фотофиксация и георадарное зондирование	100
3.4.2. Аэрофотосъемка, наземная и GPS-геодезия.....	102
3.4.3. Визуальные наблюдения, георадарное зондирование и спутниковые снимки.....	104
3.4.4. Компьютерное гидрогеомеханическое моделирование и натурные многоуровневые наблюдения.....	105
4. ИНТЕГРИРОВАНИЕ ГЕОРАДАРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МНОГОУРОВНЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	111
4.1. Применение георадаров на горнодобывающих предприятиях.....	111
4.2. Современные тенденции георадарных исследований.....	112
4.3. Комплексирование георадарного и сейсмического зондирования дамбы хвостохранилища.....	114
4.4. Компьютерное моделирование как инструмент прогнозирования в георадарных исследованиях.....	118
4.5. Пример натурного георадарного исследования.....	121

5. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ НАРУШЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ВИЗУАЛЬНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ.....	130
5.1. Развитие локальных нарушений фильтрационных процессов и их влияние на насыпное ГТС.....	131
5.1.1. Развитие локальных фильтрационных нарушений.....	131
5.1.2. Механизмы влияния фильтрационных нарушений на насыпное ГТС.....	132
5.2. Внешние проявления локальных изменений фильтрационных процессов в теле насыпных ГТС.....	139
5.2.1. Проявления суффозионного выноса материала сооружения.....	139
5.2.2. Деформации поверхности полок.....	142
5.2.3. Сконцентрированный выход фильтрующихся вод.....	145
5.2.4. Фонтанирование воды.....	146
5.2.5. Проявления температурных аномалий.....	147
5.3. Результаты визуального обследования ГТС хвостохранилищ.....	148
5.3.1. Апробация геоиндикаторов при проведении визуального обследования.....	148
5.3.2. Развитие локальных фильтрационных процессов по данным визуального обследования.....	154
6. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГТС ХВОСТОХРАНИЛИЩ В ЕВРО-АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ.....	158
6.1. Создание компьютерных моделей ГТС хвостохранилищ.....	158
6.2. 3D-моделирование поэтапного возведения ограждающей дамбы.....	
6.3. Оценка устойчивости ограждающих дамб хвостохранилища АО «Кольская ГМК».....	160
6.3.1. Технологические условия эксплуатации хвостохранилища.....	170
6.3.2. Инженерно-геологические условия хвостохранилища.....	171
6.3.3. Методическое обеспечение расчетов устойчивости.....	177
6.3.4. Результаты расчетов устойчивости дамб хвостохранилищ.....	180
6.4. Исследование влияния гидрогеомеханических процессов на прочность и фильтрационную устойчивость дамб хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК».....	182
6.4.1. Ограждающая дамба № 1.....	182
6.4.2. Ограждающая дамба № 4.....	198
6.5. Оценка надежности насыпной грунтовой плотины при образовании в ее теле зоны повышенной фильтрации.....	204
6.6. Моделирование механизма формирования зоны повышенной фильтрации в ограждающей дамбе.....	208
7. ОБОСНОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ И МЕРОПРИЯТИЙ ПО МИНИМИЗАЦИИ РИСКОВ ОПАСНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГТС.....	218
7.1. Прогнозная оценка устойчивости ограждающих дамб хвостохранилища... ..	218
7.2. Способ оценки надежности ограждающей дамбы хвостохранилища на основе георадарных и компьютерных исследований.....	221
7.3. Обоснование применения противофильтрационного экрана.....	223
7.4. Обоснование комплексных инженерных решений и мероприятий по повышению устойчивости ограждающих дамб хвостохранилищ.....	226
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	231
ЛИТЕРАТУРА.....	235

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АО — акционерное общество.

БД — база данных.

БПЛА — беспилотный летательный аппарат.

ГОК — горно-обогатительный комбинат.

ГМК — горно-металлургическая компания.

ГТС — гидротехническое сооружение.

ДЗЗ — дистанционное зондирование земли.

ЗЧРСА — западная часть Российского сектора Арктики.

ОФ — обогатительная фабрика.

ПОР — поле обратного рассеяния.

РЦКМ — Региональный центр космического мониторинга.

СДМ — системы дистанционного мониторинга.

СРМ — системы регионального мониторинга.

УГВ — уровень грунтовых вод.

РФ — Российская Федерация.

GPS — Global Positioning System (система глобального позиционирования).

ВВЕДЕНИЕ

Горнодобывающая промышленность в западной части Российского сектора Арктики представлена крупными предприятиями: «Норникель» (АО «Кольская ГМК»), «Еврохим» (АО «Ковдорский ГОК»), «Фосагро» (КФ АО «Апатит»), «Акрон» (ГОК «Олений ручей» АО Северо-Западной Фосфорной Компании), «Северсталь» (АО «Олкон»), ООО «Ловозерский ГОК». Обогачительными фабриками этих предприятий, вследствие переработки добытой руды, сбрасываются отходы в специально созданные накопители — хвостохранилища. В совокупности в Кольском регионе насчитывается более 10 крупных действующих хвостохранилищ, являющихся неотъемлемой частью горнорудного производства. Изучение гидрогеомеханического состояния и мониторинг хвостохранилищ — один из ключевых элементов в вопросах эффективности и безопасности функционирования всего горнопромышленного предприятия.

Известно, что в этом существенную и определяющую роль играет информация о текущем состоянии намывных отложений и грунтов как чаши хвостохранилища, так и ограждающих его дамб. Традиционно такая информация получается на основе данных оперативной оценки и мониторинга хвостохранилища трудоемкими и времязатратными исследованиями: визуальное обследование, геофизические определения, геодезические измерения, пьезометрия, аэрофотосъемка и др. Поэтому оперативное получение информативных и детализированных данных о гидрогеомеханическом состоянии хвостохранилища, для обеспечения безопасного и эффективного его функционирования, всегда являлось и является важным и актуальным.

Следовательно, требуется развитие научно-методических основ получения надежных исходных данных на разных уровнях и масштабах, установление взаимосвязей параметров хвостохранилища с природно-техногенными нагрузками для последующей обработки и интерпретации данных, что позволит существенно повысить достоверность обследования, снизить роль субъективных факторов в процессе интерпретации.

В монографии рассматриваются методологические основы многоуровневых исследований и мониторинга хвостохранилищ, реализующие оптимальное комплексирование мультидисциплинарных методов и способов наблюдений в комбинациях на различных уровнях от дневной поверхности. Такой системный подход позволяет решать задачи диагностики и контроля гидрогеомеханического состояния исследуемого объекта в иерархии от регионального уровня до локальных его компонентов и элементов.

Краткий анализ современного состояния изучения тематики свидетельствует о следующем. Известные исследования гидрогеомеханических процессов в природных и техногенно нарушенных геологических средах в основном направлены на рассмотрение аналитических и численных геомиграционных (фильтрационных) моделей в гидрогеологии, оценку состояния подземных вод под влиянием техногенных факторов, а также на экспериментальное изучение гидрогеологических параметров. В отдельных работах рассмотрены вопросы взаимосвязи состояния горных пород и гидродинамики, найдены конкретные решения вопросов обеспечения устойчивости и безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений горных предприятий Урала и центральной части РФ. Вместе с тем опыт эксплуатации горных гидротехнических объектов имеет многочисленные примеры возникновения чрезвычайных ситуаций и аварий, наиболее известные из которых: Брумадинью (Бразилия), Качканарский ГОК (РФ), рудник Эль-Кобра (Чили), Карамкенский ГМК (РФ), углеобогательная фабрика в Буффало-Крик (Западная Виргиния, США), шахта «Преставель» (Италия), хвостохранилище в Колонтаре (Венгрия), ОАО «Аммофос» (РФ), ОАО «Уралкалий» (РФ), Красноярские золотоносные прииски, и др.

Исследования флюидодинамических процессов в природных и техногенно нарушенных геологических средах выполнялись К. С. Басниевым, И. А. Гарагашем, Ч. Джегером, Ю. П. Желтовым, Ю. А. Кашниковым, Ю. О. Кузьминым,

М. Маскетом, В. А. Мироненко, В. Мори, В. Н. Николаевским, Д. Г. Осикой, В. Г. Румыниным, М. А. Уилкинсом, Д. Фурментро, А. Э. Шейдеггером, В. М. Шестаковым, В. А. Черных и др. В ряде работ рассмотрены аналитические и численные фильтрационные модели в гидрогеологии, составляющие основу для количественных оценок текущего состояния качества подземных вод и прогнозирования изменения этого состояния под влиянием техногенных факторов, а также для экспериментального изучения гидрогеологических параметров (В. Г. Румынин, В. А. Мироненко, В. М. Шестаков и др.). Для гидротехнических сооружений горных предприятий большой вклад в решение вопросов обеспечения их устойчивости и безопасной эксплуатации внесли А. М. Гальперин, Ю. И. Кутепов, В. С. Круподеров, В. С. Кузнецов, А. А. Харионовский, В. П. Недрига, В. Г. Зотеев и др.

Вместе с тем, фундаментальная проблема изучения гидрогеомеханического состояния и мониторинга действующего хвостохранилища горнодобывающего предприятия в целях минимизации рисков катастрофических проявлений фильтрационно-деформационных процессов все еще является актуальной и имеет научное и практическое значение.

Важной методической особенностью проведенных исследований являлась их мультидисциплинарность (горное дело, геоинформатика, компьютерное моделирование, геомеханика, гидрогеология, геодезия, геофизика (в части георадарных наземных съемок и подповерхностного зондирования, сейсмотомография), GPS-геодезия, оптический и радарный мониторинг, а также комплексность с содействием специалистов разных направлений (Горный и Геологический институты Кольского научного центра РАН (КНЦ РАН), в сотрудничестве с Центром космического мониторинга Северного (Арктического) федерального университета (САФУ) им. Ломоносова и Отделением дистанционного зондирования Земли Института математики Балтийского федерального университета (БФУ) им. Канта) для достижения поставленной цели — выявление закономерностей влияния гидрогеомеханических процессов на состояние хвостохранилищ горнодобывающих предприятий западной части Российского сектора Арктики для минимизации рисков потери их устойчивости и функциональности. Основные методы изучения базируются на методах геоинформатики и информационных технологиях для задач геомониторинга; классических методах геодезии (полигонометрия и нивелирование контрольных и реперных пунктов на наблюдательных полигонах и т. п.); применении GPS-технологий для контроля пространственного и высотного положения контрольно-опорных и наблюдательных пунктов полигонов; методах геомеханики (экспериментальные определения и аналитические расчеты механической прочности и устойчивости, построение геомеханических и гидрогеомеханических моделей, компьютерное моделирование природно-техногенных объектов в сложных гидрогеологических условиях); георадарном подповерхностном зондировании хвостохранилищ, ограждающих сооружений, подстилающего геологического основания, отвалов пород; фотооптических съемках отходов и отвалов пород с использованием БПЛА; анализе и интерпретации, с применением интерферометрического метода, спутниковых радарных снимков; сейсмотомографических исследованиях контролируемых объектов; гидрогеологических исследованиях; компьютерном моделировании состояния природно-технических систем «ограждающая дамба – хвостохранилище – геологическое обоснование»; методах и информационных технологиях ситуационного моделирования сложных систем; применении ИТ- и ГИС-технологий для визуализации результатов и районирования ГТС по степени гидрогеологической нагрузки и рискам опасных фильтрационно-деформационных процессов.

Натурные исследования выполнялись на наблюдательных полигонах, оборудованных на хвостохранилищах обогатительных фабрик всех горнодобывающих предприятий Кольского полуострова, а также на подспутниковых площадках, организованных в пределах их промплощадок.

При проведении исследований использованы приборы и оборудование лаборатории: беспилотный летательный аппарат (БПЛА) «Геоскан»; георадарные комплексы: Ramac GPR/X3M (с набором антенн 100, 500, 800 МГц), «Лоза-1Н» (с комплектом 15-метровых антенн и передатчиком БФЗИ-1Н, мощностью 10МВт), «Лоза-1В» (с комплектом антенн 50, 100, 200, 300 МГц и передатчиком БФЗИ-1, мощностью 1МВт); GPS-приемники Topcon HiPer + GPS L1+L2 (3 шт.); тахеометр Topcon QS3M электронный моторизованный; нивелир Sokkia B30-35, склерометр (измеритель прочности) Beton Pro Condrol; трассодефектоискатель «Поиск-410 Мастер»; металлодетектор Minelab quattro; дозиметр гамма-излучения ДКГ-07Д «Дрозд», измеритель деформаций JSETH струнный, отражатели, нивелирные рейки, рулетки и т. п.

Обработка результатов полевых измерений производилась с использованием лицензионного программного обеспечения: Radexplorer V.1.4, «КРОТ», «РАДАР-Эксперт» — для обработки георадарных измерений, Topcon Tools — для обработки GPS-измерений, CREDO — для геодезических расчетов, а также компьютерных программ собственной разработки (на базе MS Access, MS Excel, AutoCAD и Delphi) — для ведения автоматизированной базы данных и геостатистической обработки.

Компьютерное моделирование фильтрационно-деформационных процессов хвостохранилища выполнялось с использованием лицензионного программного комплекса Plaxis 3D с решением объемных задач в упругой и упругопластической постановке.

Идея и генерация многоуровневых исследований действующих хвостохранилищ горнодобывающих предприятий Кольского региона принадлежит к. т. н. А. И. Калашнику. Им написана практически вся книга (отдельные разделы в соавторстве), выполнена компоновка и общая редакция текста. Авторами отдельных глав и разделов являются научные сотрудники: Д. А. Максимов (гл. 5, разделы 3.4.1, 7.3, 7.4), Н. А. Калашник (гл. 6, разделы 2.3–2.5, 7.2–7.3), А. Ю. Дьяков (гл. 4, раздел 3.4.1), Д. В. Запорожец (разделы 3.1, 3.2, 3.3.2, 3.3.3, 3.4.2., 7.4); а также к. т. н. М. В. Мелихов (разделы 3.3.4, 3.4.3).

Авторы выражают благодарность за активную действенную помощь и содействие в проведении исследований д. т. н. С. В. Лукичеву, д. т. н., проф. А. А. Козыреву, д. т. н. Э. В. Каспарьяну. Определенная часть геодезических работ выполнена при методической помощи сотрудников отдела геомеханики, которым авторы книги признательны.

Особо необходимо отметить, что поддержку данному научному направлению оказал академик Н. Н. Мельников, что предопределило получение значимых результатов, в том числе включенных в отчеты ОНЗ РАН, Научного совета РАН по проблемам горных наук, ФИЦ КНЦ РАН, Горного института КНЦ РАН и опубликованных в ведущих рецензируемых журналах с высоким импакт-фактором.

Комплексные многоуровневые исследования и мониторинг действующих хвостохранилищ горнодобывающих предприятий выполнены при активном содействии и помощи главных специалистов — горных инженеров: А. А. Данилкина, В. А. Сохарева, А. В. Завьялова (АО «Ковдорский ГОК»), И. А. Битюгина, Е. И. Дивисенко (АО «Кольская ГМК»), А. С. Богданова (ГОК «Олений ручей» «СЗФК»), А. В. Лебедика (АО «Апатит»), А. Г. Устинова (АО «Олкон»), которым исполнители считают своим долгом выразить благодарность.

Авторы выражают искреннюю признательность рецензентам: д. т. н. В. Н. Аминову и к. т. н. Ю. В. Федотовой, а также д. т. н. В. В. Рыбину за ценные советы, обсуждение результатов исследований и замечания, способствовавшие улучшению работы. Авторы благодарны инженеру О. В. Смирновой за помощь в подготовке рукописи книги.

1. ХВОСТОХРАНИЛИЩА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ КАК ОСОБО ОТВЕТСТВЕННЫЕ ОБЪЕКТЫ

1.1. Особенности ГТС Кольского региона

Согласно СНиП33-01-2003 [1], гидротехнические сооружения (ГТС) — это сооружения, подвергающиеся воздействию водной среды и предназначенные для использования и охраны водных ресурсов, предотвращения вредного воздействия вод, в том числе загрязненных жидкими отходами. В законодательных и нормативных документах [1–3] сказано, что ГТС включают в себя: плотины, здания гидроэлектростанций, водосбросные, водоспускные и водовыпускные сооружения, туннели, каналы, насосные станции, судоходные шлюзы, судоподъемники; сооружения, предназначенные для защиты от наводнений и разрушений берегов водохранилищ, берегов и дна русел рек; сооружения (дамбы), ограждающие золошлакоотвалы, шламохранилища и хранилища жидких отходов промышленных и сельскохозяйственных организаций; устройства от размывов на каналах, сооружения морских нефтегазопромыслов и т. п.

В Кольском регионе имеется значительное число ГТС различного назначения (рис. 1.1), объединенные в комплексы, которые в целях систематизации сведены нами в классификационную схему (рис. 1.2). Основные комплексы ГТС региона представляют собой насыпные и намывные грунтовые сооружения добывающей промышленности (горнорудной, строительной, нефтегазовой), энергетики (комплексы ГЭС, АЭС и ТЭЦ) и строительства (в основном промышленного, гражданского и дорожного), а также комплексы по складированию отходов горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, жизнедеятельности и сельского хозяйства, энергетики (в том числе отработавшего ядерного топлива). Кроме того, в регионе имеются специальные ГТС, предназначенные для регулирования и управления водными ресурсами в целях жизнехозяйственного, промышленного и водно-транспортного обеспечения, а также ГТС-защитные сооружения от неблагоприятных природных и природно-техногенных воздействий [3].

Большинство ГТС Кольского региона являются потенциально опасными объектами I и II класса, эксплуатация которых должна выполняться в строгом соответствии с требованиями промышленной безопасности, регламентируемыми Федеральным законом «О безопасности гидротехнических сооружений» [2] и Строительными нормами и правилами РФ «Гидротехнические сооружения. Основные положения» [1]. Нарушение фильтрации и функциональности, потеря устойчивости таких ГТС может привести к аварийной ситуации и значительному социально-экономическому ущербу населению, гражданским и промышленным зданиям, дорогам, инженерно-техническим коммуникациям и т. п., а также к финансовым потерям (недополученная прибыль вследствие остановки ГЭС или горного предприятия), дополнительным затратам (ремонтно-восстановительные работы плотин, дамб, пульпопроводов, дорог, линий электропередач, пьезометрических станций, устройств, механизмов и др.; ликвидация последствий аварии; восстановление окружающих природных систем) и штрафов за загрязнение окружающей среды и экологический ущерб.

Необходимо констатировать, что многоуровневые комплексные исследования с применением современных методов и средств надежности ГТС Кольского региона, за редким исключением, до настоящего времени фактически не выполнялись. Вместе с тем опасные и чрезвычайные ситуации, связанные с эксплуатацией ГТС, возникали ранее и могут возникнуть в будущем на особо проблемных объектах [4–7].

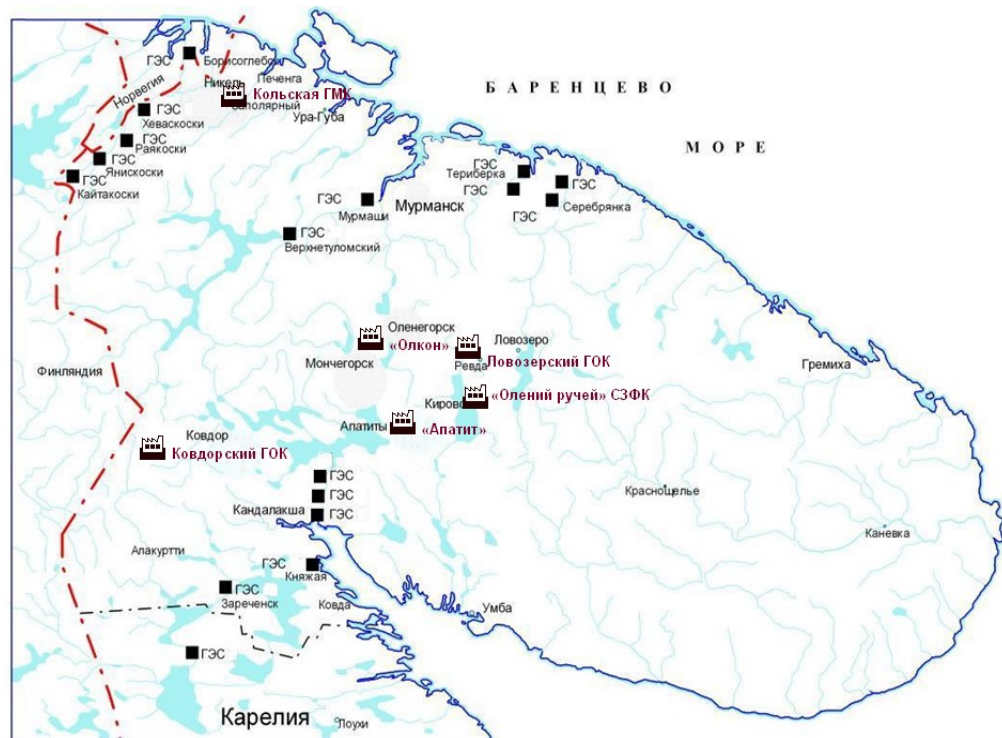


Рис. 1.1. Схема расположения ГТС Кольского региона



Рис. 1.2. Классификация гидротехнических сооружений Кольского региона

Основные гидрогеомеханические проблемы и факторы, влияющие на безопасность ГТС

Мировой опыт эксплуатации комплексов ГТС также имеет многочисленные примеры возникновения чрезвычайных ситуаций и аварий, наиболее известные из которых: плотины (Боулдерхэд (Великобритания), Фонтенель (США), Киселевское водохранилище (РФ)); дамбы (Качканарского ГОКа (РФ), рудника Эль-Кобра (Чили), Карамкенского ГМК (РФ)), углеобогадательной фабрики в Буффало-Крик (США), шахты «Преставель» (Италия), шламохранилища завода “MAL Hungarian Aluminum” в Колонтаре (Венгрия), ОАО «Аммофос» (РФ) и др. [8–11].

В таблице 1.1 приведены данные по чрезвычайным ситуациям и авариям насыпных плотин и дамб хвостохранилищ. Анализ этих и других инцидентов показывает, что основной причиной аварий стало локальное или полное разрушение ограждающих насыпных (или намывных) грунтовых сооружений вследствие скрыто формирующихся в их теле фильтрационно-деформационных зон, процессов разжижения и размыва грунтов, суффозионных процессов, формированию «гидравлических трещин» (табл. 1.2., рис. 1.3) с развитием их в водопроводящие каналы и последующего интенсивного размыва нижнего склона.

Основными причинами, вызывающими указанные в табл. 1.2 деформации, приводящие к чрезвычайным ситуациям на ГТС, могут быть следующие воздействия:

- сильное природное или техногенное землетрясение;
- неблагоприятные сезонные явления (продолжительный ливень большой интенсивности; интенсивное и обильное снеготаяние и др.);
- знакопеременное изменение температуры (процесс замерзания – оттаивания).

Таблица 1.1

Данные по чрезвычайным ситуациям и авариям насыпных грунтовых плотин и дамб ГТС

Страна, местоположение	Наименование	Хар-ка плотины/тип отходов	Год чрезвычайной ситуации/аварии	Причина и следствие чрезвычайной ситуации/аварии
Плотины				
Россия, Свердловская обл.	Киселевское водохранилище	Высота — 17 м, длина — 2 км	1993	Прорыв тела плотины при наполнении водохранилища
США, Вайоминг	Фонтенель	Высота — 50 м, длина по гребню — 2 тыс. м	1964, 1982	Протечки и оползень на низовом откосе плотины
Великобритания, Боулдерхэд	Боулдерхэд	Высота — 48 м, длина по гребню — 914 м	1967–1968	Оползни на низовом откосе и провал до 2,5 м на гребне плотины
Дамбы хвостохранилищ				
Финляндия, Кайнуу	Рудник «Талвиваара»	Отходы производства никеля, цинка, урана	2012	Сильные протечки сквозь ограждающую дамбу
Россия, Белгородская обл.	Лебединский ГОК	Отходы железорудного производства	1981	Прорыв меловой пульпы, разрушение дамбы (300 м по фронту)
Украина, Львовская обл.	Стебниковский ГХК	Отходы производства калийных удобрений	1983	Прорыв 5 млн м ³ жидкой фазы хвостов, вследствие образования ослабленной зоны в теле дамбы
ЮАР	Рудник «Бэфокинг»	Отходы платиновой промышленности	1985	Прорыв (около 3 млн м ³) и разрушение дамбы на 2/3 высоты после сильного дождя, хвосты затопили ствол шахты

Таблица 1.2

Фильтрационные деформации насыпных грунтовых плотин и дамб ГТС (по [12])

Тип деформации	Фильтрационно-деформационные процессы
Суффозия грунта (несвязного)	Перемещение и вынос из массива грунта отдельных его частиц фильтрационным потоком. Различают внутреннюю и внешнюю суффозию
Контактный суффозионный выпор (вынос)	Разрушение мелкозернистого (глинистого) грунта на контакте с крупнозернистым материалом фильтрационным потоком, направленным перпендикулярно линии контакта (выпор грунта на границе выхода фильтрационного потока в нижний бьеф или на откос плотины в зоне высачивания)
Контактный размыв	Разрушение мелкозернистого (песчаного или глинистого) грунта на контакте с крупнозернистым фундаментом фильтрационным потоком, направленным параллельно линии контакта
Отслаивание грунта	Отрыв от толщ агрегатов частиц связного грунта на контакте с крупнозернистым грунтом, в том числе на контакте с обратным фильтром
Кольматация	Отложение перемещенных фильтрационным потоком частиц в порах грунта (внутренняя кольматация) или на поверхности грунтового массива (поверхностная кольматация)
Химическая суффозия	Растворение солей, содержащихся в грунтах
«Гидравлические трещины»	Развитие ходов сосредоточенной фильтрации, связанное с неравномерными деформациями, с напряженно-деформированным состоянием и одновременным действием фильтрационных сил (т. к. грунты практически не воспринимают растягивающие напряжения)

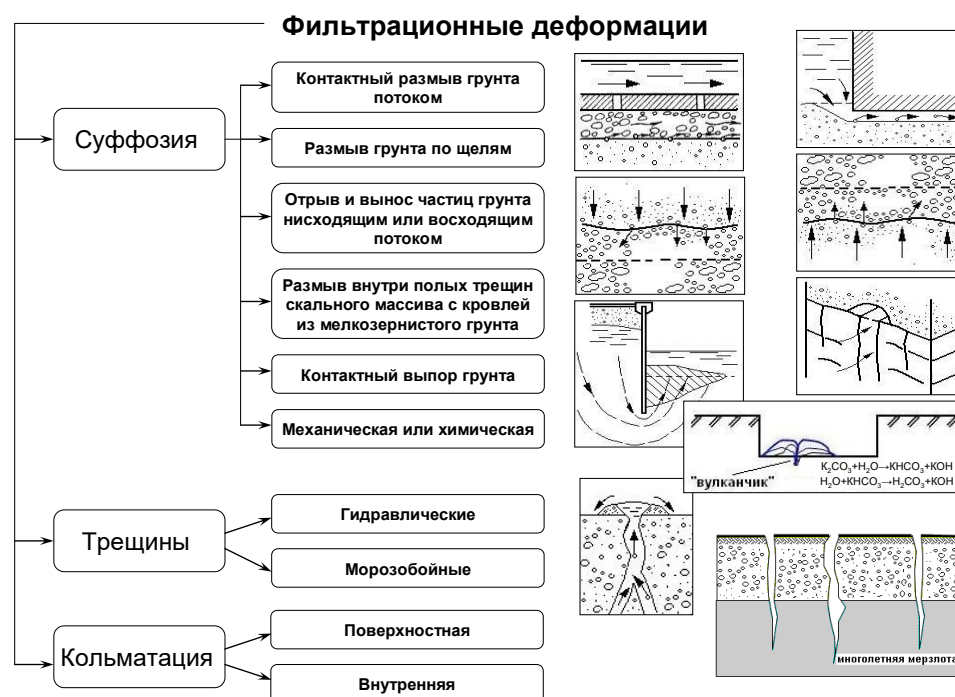


Рис. 1.3. Фильтрационные деформации (по [12])

Воздействия приводят к следующим разрушениям и потерям функциональности ГТС:

- потеря устойчивости низового откоса ограждающего сооружения;
- потеря фильтрационной прочности грунтов конструкций ГТС;
- отказ водорегулирующих систем и перелив воды (селеобразных шламов и отходов) через гребень ограждающих сооружений;
- разрушение конструкций ГТС и образование проранов.

На рисунке 1.4 приведена классификация гидравлических трещин. Во многих случаях их выявление на ранних стадиях и решение в целом проблемы предотвращения аварий ГТС осложняется тем обстоятельством, что процессы повышенной фильтрации, возникающие и развивающиеся в теле сооружений, на начальных этапах визуально и традиционными методами не фиксируются. Перерастая в дальнейшем в фильтрационно-деформационные зоны, эти процессы проявляются в виде интенсивных протечек и размывов нижнего склона, т. е. фактически создают чрезвычайную ситуацию с реальной угрозой аварии, требующую безотлагательного принятия защитных и укрепляющих мер.



Рис. 1.4. Классификация гидравлических трещин (по [12])

Устойчивость откосных сооружений (дамб) хвостохранилищ, шламохранилищ, гидроотвалов и безаварийность их строительства, эксплуатации, консервации и ликвидации определяются классом ответственности и капитальности, а также способом намыва [13]. Согласно нормативно-методическим документам [1, 2] класс капитальности этих гидротехнических объектов определяется высотой ограждающих (подпорных) сооружений (дамб, плотин), емкостью хранилища и типом пород подстилающего геологического основания. С учетом капитальности и расположения хвостохранилищ, шламохранилищ и гидроотвалов по отношению к населенным пунктам и промышленным объектам, рельефу местности, наличия водохранилища, надежности пород основания они подразделяются на особо ответственные (I), ответственные (II) и сооружения III–IV классов ответственности.

В работе [13] приведены значения нормативных коэффициентов надежности и соответствующих им нормативных рисков для земляных плотин (табл. 1.3). При этом отмечается, что фактические риски для дамб накопителей промышленных отходов (хвостохранилищ) значительно выше ($n \cdot 10^{-2} \div n \cdot 10^{-3}$).

Таблица 1.3

Сопоставительные значения нормативных рисков и обеспечивающих их коэффициентов надежности земляных плотин [13]

Класс ответственности	Коэффициент надежности K_n по СНиП 2.06.01-86	Нормативные коэффициенты надежности		Нормативные риски, ед/год	
		особое сочетание нагрузок K_{1c}^{oc}	основное сочетание нагрузок $K_{1c}^{осн}$	верхний предел $R^{осн}$	нижний предел R^{oc}
I	1,25	1,41	1,56	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
II	1,20	1,35	1,50	$5 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
III	1,15	1,30	1,44	$4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
IV	1,10	1,24	1,38	$6 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$

Основные факторы, влияющие на безопасность гидротехнических сооружений, приведены на рис. 1.5.



Рис. 1.5. Классификация основных факторов, влияющих на безопасность хвостохранилищ [13]

Кроме того, состояние хвостохранилищ определяется физико-географическими; инженерно-геологическими, гидрогеологическими и технологическими факторами (рис. 1.6).



Рис. 1.6. Классификация основных факторов, определяющих состояние хвостохранилищ [13]

1.2. Хвостохранилище — неотъемлемая часть технологической схемы горнодобывающего производства

Согласно Горной энциклопедии [14], технологическая схема горнодобывающего предприятия — это совокупность основных и вспомогательных производственных процессов в сочетании с необходимыми для их выполнения выработками, средствами механизации и автоматизации, обеспечивающая при рациональной организации работ безопасную и эффективную разработку месторождения. Основу технологической схемы горнодобывающего предприятия составляют взаимосвязанные решения вопросов вскрытия, подготовки шахтного поля, системы разработки и механизации очистных работ, транспорта, подъема, вентиляции, энергоснабжения, водоотлива. В связи с этим технологическая схема горнодобывающего предприятия реализуется в виде цепи последовательно осуществляемых процессов, которая включает ряд звеньев — основных, непосредственно создающих поток полезных ископаемых, и вспомогательных, обеспечивающих его функционирование в заданном режиме (рис. 1.7).

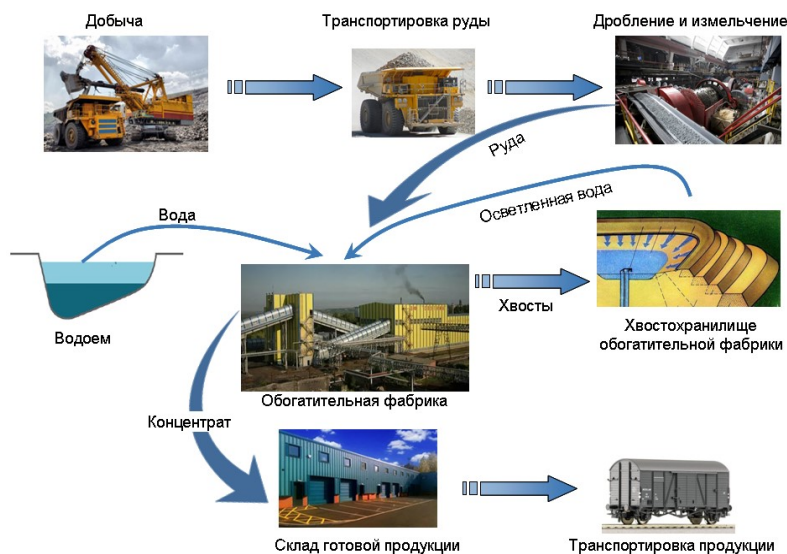


Рис. 1.7. Схематическое отображение технологической цепочки горнодобывающего производства

Хвостохранилище является не только одним из важнейших элементов производственных цепочек в технологической схеме горнодобывающего производства, но и играет огромную роль в природно-технической системе горнопромышленного предприятия (рис. 1.8). Как известно, добываемые в шахтах или рудниках полезные ископаемые сначала поступают на обогатительную фабрику, где из них в процессе обогащения получают концентрат. Но при этом образуются отходы обогащения — хвосты. Для хранения (или захоронения) хвостов строятся и постоянно заполняются (пополняются) хвостохранилища — сложный технологический комплекс из ГТС и специального оборудования (насосные установки, перекачивающие станции, водоводы, системы охраны и контроля за состоянием окружающей среды). В зависимости от способа обогащения хвосты могут быть жидкими, твердыми или представлять собой взвесь мелкодисперсных частиц. Сохранность хвостовых отложений, промышленную и экологическую безопасность обеспечивают ограждающие дамбы.

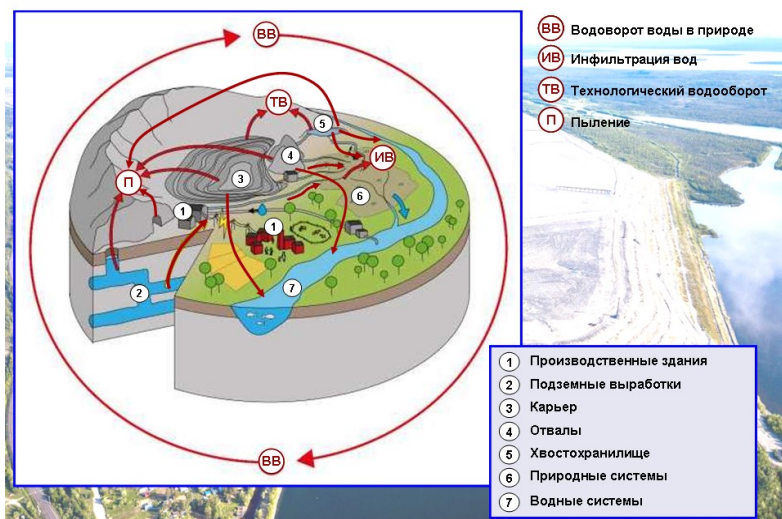


Рис. 1.8. Концептуальная схема роли ГТС хвостохранилища в природно-технической системе горнопромышленного предприятия

Таким образом, горнодобывающее производство представляет собой совокупность природно-технических объектов и процессов (рис. 1.7, 1.8) в сочетании с необходимыми для его реализации горными выработками, горнотехническими механизмами и оборудованием, одним из основных требований к которой является, наряду с главной целью добычи минерального сырья, обеспечение безопасного и экологически приемлемого горнодобывающего природопользования [15]. Основными техническими объектами горнодобывающего природопользования являются: производственные здания, подземные выработки, карьер, отвалы, хвостохранилище. Технические объекты интегрированы и сопряжены с окружающими (вмещающими) природными системами, в результате чего при горнодобывающем природопользовании формируются главные процессы: водоворот воды в природе, взаимная (из природных водоемов в горные выработки и наоборот) инфильтрация вод, технологический водоворот, пыление (выброс мелких частиц и газов в атмосферу).

При горнодобывающем природопользовании образуются огромные объемы отходов горного производства, которые складываются в отвалы, а также в накопители жидких отходов обогатительных фабрик — хвостохранилища [16]. Именно отходы горного производства, относясь к категории особо опасных объектов, требуют отдельного внимания при обеспечении промышленной и экологической безопасности горнодобывающего природопользования [16–22].

1.3. Аварии и чрезвычайные ситуации на хвостохранилищах

Произошедшие разрушения ограждающих дамб хвостохранилищ предприятий, а также негативные инциденты и крупные аварии накопителей жидких промышленных отходов (Брумадинью, Бразилия; Айка, Венгрия; Инд, Пакистан и др.), приведшие к гибели людей и огромным социально-экономическим потерям, ставят во главу угла необходимость постоянного многоуровневого контроля и диагностики состояния хвостохранилищ [22, 23]. Основные данные по авариям на ГТС хвостохранилищ приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Крупные инциденты и аварии на хвостохранилищах (по [19, 24])

Наименование, страна	Высота дамбы, м	Объем накопителя, м ³	Дата инцидента	Объем вытекшей массы, м ³	Причина инцидента
Aitik mine, Швеция	15	15 000 000	2000	1 500 000	Суффозия
Arcturus, Зимбабве	25	1,7–2,0 Mt	1978	39000 t	Переполнение
Bafokeng, Южная Африка	20	13 000 000	1974	3 000 000	Протечки
Балка Чуфичева, Россия	25	27 000 000	1981	3 500 000	Потеря устойчивости склона
Barahona, Чили	61	20 000 000	1928	2 800 000	Землетрясение (сейсмическое воздействие)
Brumadinho, Бразилия	86	Н. д.	2019	12 000 000	Разрушение хвостохранилища
Cadia, Австралия	Н. д.	Н. д.	2018	1 330 000	Разрушение хвостохранилища
Cities Service, США	15	12 340 000	1971	9 000 000	Причина не известна
El Cobre, Чили	35	4 250 000	1965	1 900 000	Землетрясение (сейсмическое воздействие)
Hierro Viejo, Чили	5	Н. д.	1965	800	Землетрясение (сейсмическое воздействие)
Kimberley, Канада	Н. д.	Н. д.	1948	1 100 000	Потеря устойчивости склона
Kolontár, Венгрия	Н. д.	Н. д.	2010	700	Потеря устойчивости склона
Los Frailes, Испания	27	15 000 000	1998	6 800 000	Неустойчивое основание
Marcopper, Филиппины	Н. д.	Н. д.	1996	2,4 Mt	Структурные неоднородности
Mariana (Fundao), Бразилия	90	Н. д.	2015	43 700 000	Разрушение хвостохранилища
Merriespruit, Южная Африка	31	10 Mt	1994	2,5 Mt	Переполнение
Mobil Chemical, США	Н. д.	Н. д.	1967	250	Причина не известна
Mount Polley mine, Канада	Н. д.	Н. д.	2014	25 000 000	Неустойчивое основание
Padcal, Luzon, Филиппины	Н. д.	80Mt	1992	80Mt	Неустойчивое основание
Sipalay, Филиппины	Н. д.	37 Mt	1982	27 Mt	Неустойчивое основание
Phelps-Dodge, Tyrone, США	66	Н. д.	1980	2 000 000	Потеря устойчивости склона
Pinchi Lake, Канада	12	Н. д.	2004	6000–8000	Суффозия
Sgurigrad, Болгария	45	1 520 000	1996	220	Потеря устойчивости склона
Stava, Италия	29	300	1985	190	Потеря устойчивости склона
Omai Mine, Гайана	44	5 250 000	1995	4 200 000	Суффозия

Примером масштабной катастрофы может служить авария на хранилище жидких промышленных отходов крупного завода Ajkai Timfoldgyar Zrt по производству алюминия в районе города Айка (Венгрия), произошедшая 4 октября 2010 г. [22]. Как выяснилось уже после произошедшего, ограждающая дамба хранилища отходов была в аварийном состоянии, а само хранилище было максимально заполнено. Как следствие, ограждающая дамба разрушилась и из хранилища произошла утечка красного шлама с ядовитыми отходами (рис. 1.9).

Проведенными после аварии исследованиями было установлено, что в окружающую среду попало примерно 1,1 млн м³ ядовитых отходов, а площадь их разлива составила порядка 440 тыс. м². Погибло 7 чел., еще около 150 пострадавших получили отравления и химические ожоги. Разлив загрязненной воды разрушил 300 домов, было эвакуировано около 800 жителей города Айка [23].

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 [22, 25, 26].



Рис. 1.9. Разрушение ограждающей дамбы хранилища жидких промышленных отходов завода Ajkai Timfoldgyar Zrt, Венгрия. (Фото: enactwi.files.wordpress.com) [23]

Основная проблема контроля и диагностики состояния хвостохранилищ горных предприятий заключается в том, что зарождение опасных фильтрационно-деформационных процессов происходит в подповерхностных ослабленных и неоднородных зонах грунтов ограждающих дамб и на начальной стадии скрыто от визуальных и наземных инструментальных наблюдений. Проявления таких процессов могут быть зафиксированы на ранней стадии только с применением исследований разного масштаба и на различных уровнях, позволяющих в том числе контролировать, как отдельные компоненты, так и все хвостохранилище в целом, а также сопряженные с ним природно-технические системы [27–29].

Для анализа причин произошедших на ГТС хвостохранилищ аварий и инцидентов составлена табл. 1.5.

Таблица 1.5

Основная информация о разрушениях хвостохранилищ (по [30])

№ п/п	Название (страна)	Высота дамбы, м	Тип дамбы (способ возведения)	Причина разрушения (количество смертей)
1	Barahona (Чили) [31]	61	В сторону верхового откоса	Землетрясение (54)
2	Dos Estrellas (Мексика) [32]	Н. д.	В сторону верхового откоса	Протечки (70)
3	Kimberley (Канада) [33]	Н. д.	В сторону верхового откоса	Протечки (н. д.)
4	Huogudu (Китай) [34]	Н. д.	В сторону верхового откоса	Провал фундамента (171)
5	El Cobre (Чили) [35]	36	В сторону верхового откоса	Землетрясение (> 300)
6	Aberfan (Великобритания) [36]	Н. д.	Намывная	Протечки (144)
7	Miroslubovka (Болгария) [37]	45	В сторону верхового откоса	Н. д. (488)
8	Mufulira (Замбия) [38]	50	Н. д.	Просадка (89)
9	Buffalo Creek (США) [39]	14–18	В сторону верхового откоса	Протечки (125)
10	Bafokeng (ЮАР) [40]	20	В сторону верхового откоса	Протечки (14)
11	GCOS (Канада) [41]	61	В сторону верхового откоса	Протечки (н. д.)
12	Mike Horse (США) [38]	18	В сторону верхового откоса	Перелив (н. д.)
13	Dashihe (Китай) [42]	37	В сторону верхового откоса	Землетрясение (н. д.)
14	Syncrude (Канада) [43]	Н. д.	Центральная отсыпка	Провал фундамента (н. д.)
15	Mochikoshi Nos. 1 и 2 (Япония) [44]	28, 19	В сторону верхового откоса	Землетрясение (1)
16	Arcturus (Зимбабве) [45]	25	В сторону верхового откоса	Перелив (1)
17	Union Carbide (США) [24]	43	В сторону верхового откоса	Протечки (н. д.)
18	Stava (Италия) [46]	29,5	В сторону верхового откоса	Протечки (268)
19	Chenzhou (Китай) [47]	Н. д.	В сторону верхового откоса	Перелив (49)
20	Cerro Negro No. 4 (Чили) [48]	40	В сторону верхового откоса	Землетрясение (н. д.)
21	Huangmeishan (Китай) [32]	Н. д.	В сторону верхового откоса	Протечки (19)
22	Lixi (Китай) [49]	40	В сторону верхового откоса	Перелив (20)
23	Sullivan (Канада) [50]	21	В сторону верхового откоса	Протечки (н. д.)
24	Marsa (Перу) [32]	Н. д.	В сторону верхового откоса	Перелив (6)
25	Tapo Canyon (США) [51]	24	В сторону верхового откоса	Землетрясение (н. д.)
26	Merriespruit (ЮАР) [52]	31	В сторону верхового откоса	Перелив (17)
27	Omai (Гайана) [53]	44	В сторону верхового откоса	Протечки (н. д.)
28	Surigao (Филиппины) [16]	Н. д.	В сторону верхового откоса	Провал фундамента (12)
29	Porco (Боливия) [54]	Н. д.	В сторону верхового откоса	Перелив (н. д.)
30	Sgurigrad (Болгария) [55]	45	В сторону верхового откоса	Протечки (107)
31	Los Frailes (Испания) [56]	27	В сторону верхового откоса	Провал фундамента (н. д.)
32	Baia Mare and Baia Borsa (Румыния) [57]	7	В сторону низового откоса	Перелив (н. д.)
33	San Marcelino Zambales (Филиппины) [58]	Н. д.	Н. д.	Перелив (н. д.)
34	Pinchi Lake (Канада) [19]	12	Намывная	Н. д.
35	Karamken tailing plant (Россия) [59]	20	Н. д.	Н. д. (1)
36	Ajka (Венгрия) [60]	22	В сторону низового откоса	Протечки (10)
37	Kayakari (Япония) [61]	Н. д.	Н. д.	Землетрясение (н. д.)
38	Padcal No.3 (Филиппины) [62]	Н. д.	В сторону верхового откоса	Перелив (н. д.)
39	Mount Polley (Канада) [63]	40	Н. д.	Провал фундамента (н. д.)
40	Fundao (Бразилия) [64]	90	В сторону верхового откоса	Протечки (19)

Анализ доступных мировых данных позволил выявить следующее:

– число аварий и инцидентов на ГТС хвостохранилищ, начиная с 1960 г., составляет от 35 до 57 в год (рис. 1.10);

– основными причинами разрушений явились: протечки, перелив, проседание (провал, размыв подстилающего основания), потеря устойчивости и размыв низового откоса, землетрясения (рис. 1.11, 1.12). Частота их проявлений примерно одинакова и, возможно, они связаны (дополняют) друг друга;

– наибольшее число разрушений произошло на хвостохранилищах с высотой ограждающих дамб до 30 м (рис. 1.13) (прежде всего, в силу того обстоятельства, что подавляющее количество таких дамб в мире имеет высоту именно до 30 м.

Распределение разрушений по способу возведения ограждающих дамб хвостохранилища представлено на рис. 1.14.

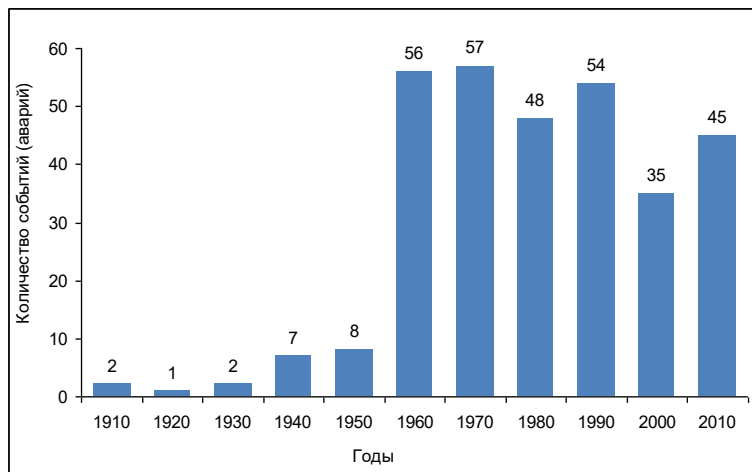


Рис. 1.10. Распределение аварий и инцидентов на ГТС хвостохранилищ по времени [16–21, 65, 66]

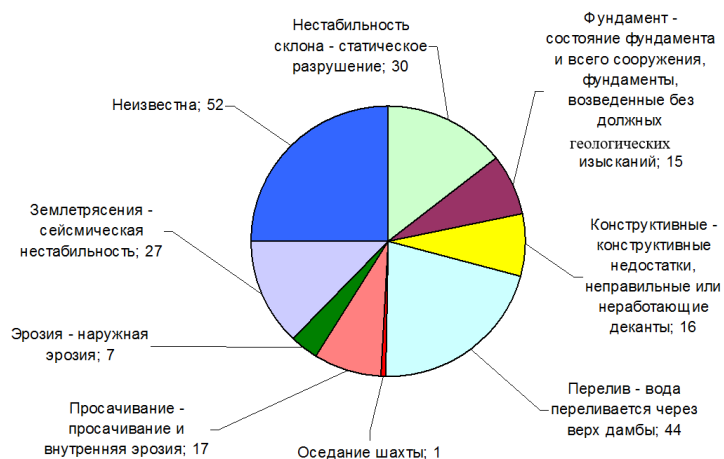


Рис. 1.11. Основные причины разрушения хвостохранилищ в 1915–2016гг. (209 инцидентов) [67]



Рис. 1.12. Распределение разрушений по причинам аварий [16–21, 65, 66]

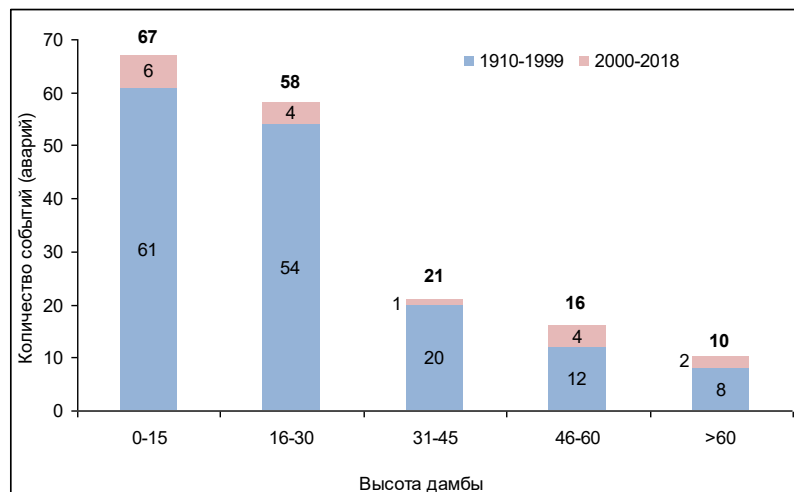


Рис. 1.13. Распределение разрушений по высоте хвостохранилища [16–21, 65, 66]

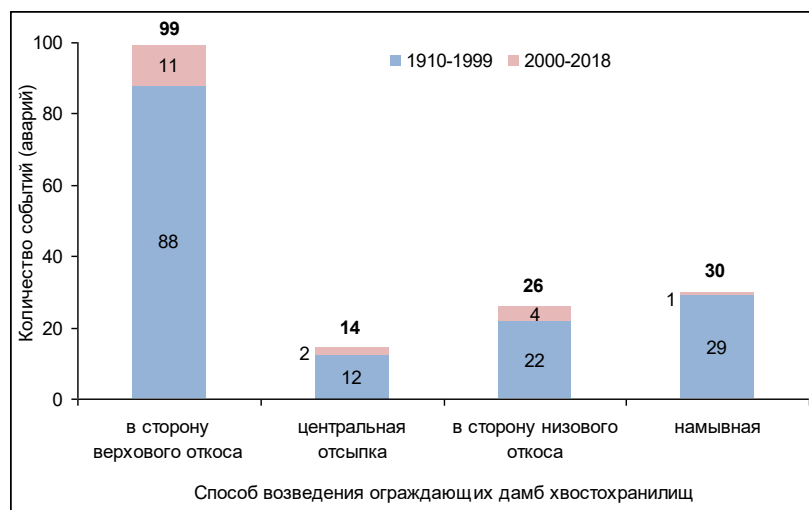


Рис. 1.14. Распределение разрушений по способу возведения ограждающих дамб хвостохранилища [16–21, 65, 66]

1.4. Подходы к оценке риска аварий на ГТС

Ранее нами были рассмотрены методологические подходы к анализу и оценке риска аварий на опасных объектах горнодобывающего производства [5, 27–29]. Было обосновано, что достоверность анализа и оценки риска заключается в систематическом использовании всей доступной информации на основе регулярных мониторинговых наблюдений и измерений. Результаты используются при декларировании промышленной безопасности ГТС хвостохранилищ, экспертизе промышленной безопасности, обосновании технических решений по обеспечению безопасности, страховании, экономическом анализе безопасности по критериям «стоимость – безопасность – выгода», оценке воздействия ГТС хвостохранилищ на окружающую природную среду и при других процедурах, связанных с промышленной и экологической безопасностью [68–72].

Основные определения, связанные с рисками, согласно работ [69–74]:

- оценка риска аварии — процесс, используемый для определения вероятности (или частоты) и степени тяжести последствий реализации опасностей аварий для здоровья человека, имущества и/или окружающей природной среды. Она включает анализ вероятности (или частоты), анализ последствий и их сочетания;

- приемлемый риск аварии — риск, уровень которого допустим и обоснован исходя из социально-экономических соображений. Риск эксплуатации объекта является приемлемым, если ради выгоды, получаемой от эксплуатации объекта, общество готово пойти на него [75];

- риск аварии — мера опасности, характеризующая возможность возникновения аварии на опасном производственном объекте и тяжесть ее последствий. Основными количественными его показателями являются:

- технический риск — вероятность отказа технических устройств с последствиями определенного уровня (класса) за определенный период функционирования опасного производственного объекта;

- индивидуальный риск — частота поражения отдельного человека в результате воздействия исследуемых факторов опасности аварий;

- потенциальный территориальный риск (или потенциальный риск) — частота реализации поражающих факторов аварии в рассматриваемой точке территории;

- коллективный риск — ожидаемое количество пораженных в результате возможных аварий за определенный период времени;

- социальный риск, или F/N кривая — зависимость частоты возникновения событий F , в которых пострадало на определенном уровне не менее N человек, от этого числа N . Характеризует тяжесть последствий (катастрофичность) реализации опасностей;

- ожидаемый ущерб — математическое ожидание величины ущерба от возможной аварии за определенный период времени.

Требования промышленной безопасности — условия, запреты, ограничения и другие обязательные требования, содержащиеся в федеральных законах и иных нормативных правовых актах РФ, а также в нормативных технических документах, которые принимаются в установленном порядке и соблюдение которых обеспечивает промышленную безопасность.

Ущерб от аварии — потери (убытки) в производственной и непроизводственной сфере жизнедеятельности человека, вред окружающей природной среде, нанесенные в результате аварии на опасном производственном объекте и исчисляемые в денежном эквиваленте.

Основные задачи этапа оценки риска (рис. 1.15) связаны с:

- определением частот возникновения инициирующих и всех нежелательных событий;

- оценкой последствий возникновения нежелательных событий;

- интегральной оценки риска.

Оценка риска в соответствии с международными стандартами является итерационным процессом. То есть общая его оценка должна позволять сделать вывод о том, достигнут ли допустимый риск. В случае если он не достигнут после применения мер безопасности (защитных мер), то процесс оценки должен быть повторен. И так до тех пор, пока не будет достигнут указанный допустимый риск.

В соответствии со статьей 14 Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» № 116-ФЗ [71] все организации, эксплуатирующие опасные производственные объекты (ОПО) с обращением большого количества опасных веществ (не ниже порогового значения, установленного в приложении 2 к закону [71]), обязаны разрабатывать декларации

промышленной безопасности, включающие «...всестороннюю оценку риска аварий». Речь идет о техногенном риске, под которым в общем случае понимается мера опасности, характеризующая вероятность (ожидаемую частоту) возникновения аварий на опасном производственном объекте и тяжесть их последствий (ущерба).

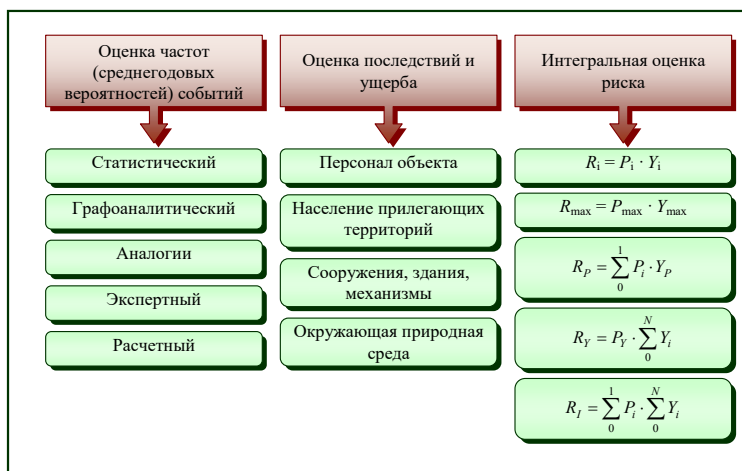


Рис. 1.15. Оценка риска аварий (инцидентов) на ГТС хвостохранилищ [68]

Для анализа техногенного риска эксплуатации хвостохранилищ как за рубежом, так и в России используют достаточно широкий набор методических подходов и аналитических инструментов, которые на самом верхнем уровне классификации можно разделить на две большие категории: методы качественного и методы количественного анализа риска.

Федеральным законом РФ № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» предписано разрабатывать для (ОПО) декларацию промышленной безопасности, которая должна включать «...всестороннюю оценку риска аварий» [68]. Принимая во внимание весь мировой опыт аварий и техногенных катастроф, представляется целесообразным и необходимым рассматривать прежде всего природно-техногенные риски, т. к. любой ОПО связан в первую очередь с геологической средой и, так или иначе, взаимодействует с окружающими природными системами и физическими полями. Под природно-техногенными рисками в общем случае следует понимать интегральную меру опасности, характеризующую вероятности развития опасных естественных или техногенно-индуцированных процессов, приводящих к формированию чрезвычайных ситуаций и возникновению аварий на объектах с учетом сопутствующего социально-экономического и экологического ущерба.

В нашей стране и за рубежом для оценки и анализа природно-техногенного риска принимаются ряд методических подходов и методик, основные из которых можно классифицировать следующим образом [68, 69]:

- методы качественного анализа опасностей риска: метод предварительного анализа опасностей (РНА); анализ опасностей и работоспособности (HAZOP); анализ видов отказов и последствий (FMEA); метод перебора аварийных ситуаций (WHAT IF); метод контрольного перечня (Cheeklist); индексы пожаро- и взрывоопасности — индексы Доу – Монда;
- методы количественного анализа риска: метод анализа с построением дерева отказов (FTA); метод анализа с построением дерева событий (ETA); метод причинно-следственного анализа (CCD); анализ надежности человека (HRA); полная количественная оценка риска (QRA).

Каждый из вышеперечисленных методов имеет свои особенности и целевые условия применения (решения задачи). В соответствии с этапом «жизни» (жизненного цикла) ОПО (обоснование инвестиций; ОВОС; предварительное, техническое и рабочее проектирования; обустройство; строительство; эксплуатация; реконструкция; консервация) такими целями могут быть: выбор места размещения (площадки для относительно компактных или трассы для протяженных (линейных)) как самого объекта, так и инженерно-обеспечивающих подсистем; размещение оборудования на площадке (или по трассе); оценка промышленной безопасности; сравнение вариантов проекта; исследование природных систем в окрестности ОПО и т. п.

Следует полностью согласиться с авторами работы [68], что качественные методы могут использоваться как самостоятельно, так и «...в составе полномасштабных алгоритмов количественного анализа риска (КолАР) для “отработки” стандартного этапа “Идентификация опасностей” — одного из важнейших начальных звеньев алгоритмической цепочки КолАР».

Методы количественного анализа риска логически более структурированы и имеют математическую основу [68], их применение позволяет, наряду с выявлением опасностей, получать количественные (численные) оценки, в том числе:

- оценки вероятностей (частот) опасных ситуаций, процессов и событий (с использованием методов статистики при отработке имеющихся данных или построением деревьев отказов и событий — методами FTA и ETA);
- оценки социально-экономического и экологического ущерба (на основе применения соответствующего метода оценки);
- количественной оценки собственно природно-техногенного риска — как интегральной меры опасности, являющейся функцией вероятности реализации нежелательных событий и их последствий или ущерба (рис. 1.16).

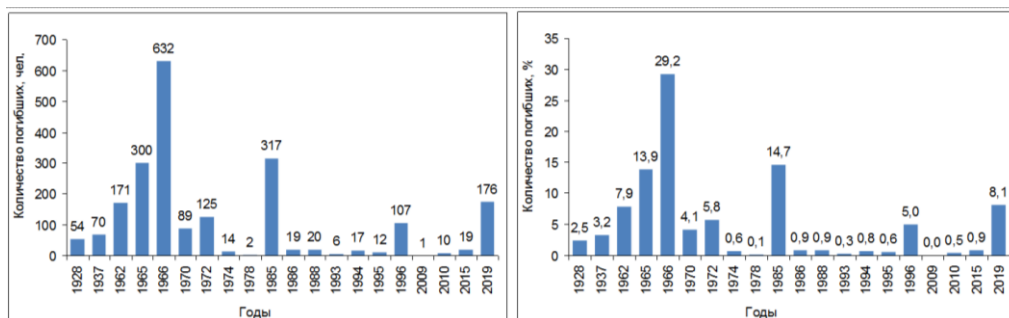


Рис. 1.16. Распределение числа и частоты погибших по времени при авариях на хвостохранилищах [16–21, 65, 66]

В таблицах 1.6 и 1.7 представлены матрица «частота — тяжесть последствий» для ранжирования возможных сценариев возникновения чрезвычайных ситуаций и развития аварий техноприродных систем, генезис которых напрямую связан с геодинамическим риском, и категорирование по уровню риска возможных аварий [68, 69, 72, 76–78].

Основными внешними причинами, способными вызывать чрезвычайные ситуации на ГТС хвостохранилища, могут быть следующие природные и техногенные воздействия:

- сверхрасчетное землетрясение;
- сверхрасчетные неблагоприятные природные явления (ливень большой интенсивности и протяженности; обильное снеготаяние и др.);
- изменение температуры в зимний период (процесс замерзания — оттаивания).

Таблица 1.6

Матрица «частота – тяжесть последствий» для ранжирования возможных сценариев возникновения и развития аварий ГТС хвостохранилищ [76–78]

Вероятность аварии	Среднегодовая частота, 1/год	Последствия аварий техноприродной системы				
		несущественные	малые	средние	значительные	катастрофические
Почти несомненна	> 1	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>
Весьма возможна	$1 - 10^{-2}$	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>A</i>
Вероятна	$10^{-2} - 10^{-4}$	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>A</i>
Вряд ли	$10^{-4} - 10^{-6}$	<i>D</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>A</i>
Редко	$< 10^{-6}$	<i>D</i>	<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>	<i>B</i>

Примечание. Обозначение уровней риска аварии: *A* — высокий; *B* — существенный; *C* — средний; *D* — низкий.

Таблица 1.7

Категорирование по уровню риска возможных аварий [69, 73, 76–78]

Категория аварии	Уровень риска	Тяжесть последствий аварии			Рекомендации по анализу риска	Разработка мер безопасности
		для персонала и населения	для объектов и иных материальных ценностей	для окружающей природной среды		
<i>A</i>	Высокий	Гибель людей	Существенный ущерб техноприродной системы и имуществу третьих лиц	Невосполнимые экологические потери	Обязателен детальный анализ риска	Требуется высокоответственные меры для снижения риска
<i>B</i>	Существенный	Угроза жизни людей, травмы персонала и населения	Значительные разрушения техноприродной системы и имущества третьих лиц	Существенные экологические потери	Желателен детальный анализ риска	Требуется специальные меры безопасности для снижения риска
<i>C</i>	Средний	Потери маловероятны	Незначительные повреждения техноприродной системы, потери имущества третьих лиц	Незначительные экологические потери	Рекомендованный анализ риска	Рекомендуется принятие мер безопасности
<i>D</i>	Низкий	Потери маловероятны	Несущественные повреждения техноприродной системы, потери имущества третьих лиц маловероятны	Несущественные экологические потери	Анализ риска не требуется	Принятие мер безопасности не требуется

К внутренним причинам аварий дамбы относятся:

- потеря фильтрационной прочности грунтов тела дамбы;
- перелив воды через гребень дамбы;
- потеря устойчивости низового откоса дамбы.

Выполненный анализ факторов, обуславливающих возможные аварии, и результаты оценки проектных решений конструкций сооружений позволили идентифицировать следующие сценарии возникновения и развития аварий, способных привести к чрезвычайным ситуациям [76, 79].

На рисунке 1.17 представлен логический причинно-следственный граф — «дерево отказов» для сценария А1 (отказ ограждающей дамбы), построенный с учетом практически всех возможных внешних воздействий и внутренних опасностей хвостохранилища.



Рис. 1.17. Блок-схема причин формирования аварий (инцидентов) на ГТС хвостохранилища (по [76])

Внешние воздействия учтены в «дереве отказов» в виде событий, связанных со сверхрасчетным снеготаянием и интенсивными осадками. Развитие аварийного процесса по сценарию А1 характеризует максимальную по уровню риска аварию хвостохранилища

Развитие аварийного процесса по сценарию А2 в конечном итоге приводит к сценарию А1, то есть к разрушению ограждающей дамбы, поэтому схема аварийного процесса по сценарию А2 совмещена со схемой сценария А1, а в «дереве отказов» для сценария А1 включены все возможные отказы конструкций и отдельных элементов системы гидротранспорта, приводящие к возникновению аварии.

Качественная оценка риска различных сценариев возникновения и развития аварий ограждающей дамбы хвостохранилища ГОК «Олений ручей» выполнена на основе анализа факторов, обуславливающих возможные аварии на рассматриваемом объекте. Проведенный экспертным путем анализ позволил на качественном уровне ранжировать по уровню риска основные сценарии возможных аварий. Наиболее вероятной и имеющей максимальные последствия является авария, связанная с разрушением ограждающей дамбы (сценарий А1), вызванная нарушением фильтрационной прочности тела дамбы, потерей устойчивости ее откосов или переливом воды через ее гребень.

Вероятность реализации наиболее опасного по последствиям сценария возникновения и развития аварии (сценарий А1) определялась по методу аналогии (в качестве аналога использовалась ограждающая дамба хвостохранилища «ГМК Печенганикель»). На основе этого метода получены значения среднегодовых вероятностей отказов ограждающей дамбы хвостохранилища месторождения «Олений ручей» по трем основным причинам:

1. потеря устойчивости откосов дамбы $P_{SS} \approx 10^{-4}$ (1/год);
2. нарушение фильтрационной прочности тела дамбы;
3. нарушение фильтрационной прочности грунтов основания дамбы

$P_{FE} \approx 10^{-5}$ (1/год).

Очевидно, что из трех основных возможных причин отказа ограждающей дамбы наиболее вероятными являются нарушение фильтрационной прочности тела дамбы и потеря устойчивости откосов дамб, как имеющие наибольшую ожидаемую частоту аварий в год.

В качестве окончательной величины среднегодовой вероятности аварии по сценарию А1 (отказ ограждающей дамбы) принимается суммарная величина, которая ниже среднегодовой допускаемой вероятности аварий для сооружений II класса, принятой равной $5 \cdot 10^{-4}$ (1/год) [76].

Проведенная качественная и количественная оценки риска возможных аварий на хвостохранилище позволяет сделать следующие выводы:

- наиболее вероятной и наиболее опасной, то есть имеющей максимальные последствия, является авария, связанная с разрушением ограждающей дамбы хвостохранилища горнодобывающего предприятия вследствие нарушения фильтрационной прочности тела дамбы, потери устойчивости откосов или перелива через гребень ограждающей дамбы;
- поскольку факторы, влияющие на вероятность возникновения аварии, рассматривались равновесными, вероятности реализации аварии по причинам нарушения фильтрационной прочности тела дамбы, потери устойчивости откосов или перелива через гребень дамбы являются величинами одного порядка, близкими по значению друг другу;
- среднегодовая частота реализации возможной аварии составляет $P_{A1} = 10^{-4}$ (1/год), что меньше нормируемой среднегодовой вероятности аварий для сооружений II класса, которая составляет $5 \cdot 10^{-4}$ (1/год).

Для управления рисками могут быть предложены следующие принципы:

- нормированности — принцип приемлемого риска;
- целесообразности — исходя из соотношения «затраты – выгоды»;
- сбалансированности — оптимальное использование доступных ресурсов.

Разработка рекомендаций по уменьшению риска является заключительным этапом анализа риска. В рекомендациях представляются обоснованные меры по уменьшению риска, основанные на результатах его оценок [68, 69, 75, 76] (рис. 1.18).

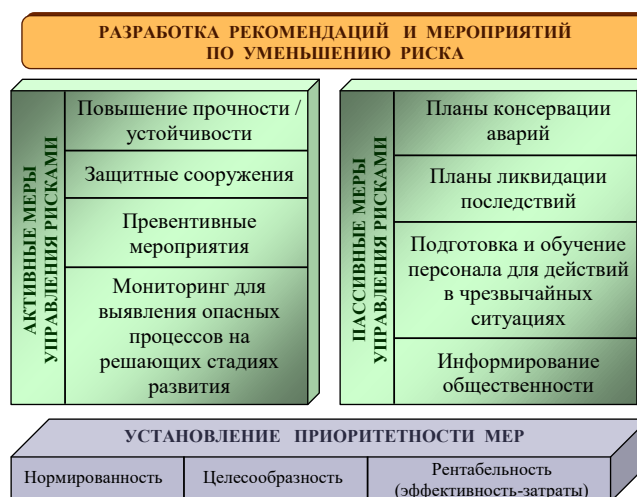


Рис. 1.18. Разработка рекомендаций по уменьшению риска

Меры по уменьшению риска могут иметь технический и (или) организационный характер. В выборе типа меры решающее значение имеет общая оценка действенности и надежности мер, оказывающих влияние на риск, а также размер затрат на их реализацию.

На стадии эксплуатации опасного производственного объекта организационные меры могут компенсировать ограниченные возможности для принятия крупных технических мер по уменьшению риска.

При разработке мер по уменьшению риска, необходимо учитывать, что вследствие возможной ограниченности ресурсов в первую очередь должны разрабатываться простейшие и связанные с наименьшими затратами рекомендации, а также меры на перспективу.

В большинстве случаев первоочередными мерами обеспечения безопасности, как правило, являются меры предупреждения аварии. Выбор планируемых для внедрения мер безопасности имеет следующие приоритеты:

1) меры уменьшения вероятности возникновения аварийной ситуации, включающие:

- меры уменьшения вероятности возникновения инцидента,
- меры уменьшения вероятности перерастания инцидента в аварийную ситуацию;

2) меры уменьшения тяжести последствий аварии, которые, в свою очередь, имеют следующие приоритеты:

- меры, предусматриваемые при проектировании опасного объекта (например, выбор несущих конструкций, запорной арматуры);
- меры, относящиеся к системам противоаварийной защиты и контроля (например, применение газоанализаторов);
- меры, касающиеся готовности эксплуатирующей организации к локализации и ликвидации последствий аварий.

При необходимости обоснования и оценки эффективности предлагаемых мер уменьшения риска рекомендуется придерживаться двух альтернативных целей их оптимизации:

1) при заданных средствах обеспечить максимальное снижение риска эксплуатации опасного производственного объекта;

2) обеспечить снижение риска до приемлемого уровня при минимальных затратах.

Для определения приоритетности выполнения мер по уменьшению риска в условиях заданных средств или ограниченности ресурсов следует:

- определить совокупность мер, которые могут быть реализованы при заданных объемах финансирования;
- ранжировать эти меры по показателю «эффективность – затраты»;
- обосновать и оценить эффективность предлагаемых мер.

1.5. Подходы к идентификации проблемных участков хвостохранилищ

Для идентификации проблемных участков ГТС, требующих повышенного внимания, контроля и мониторинга, необходимо рассмотреть условия, определяющие механическую прочность и фильтрационную устойчивость прежде всего ограждающих ГТС сооружений.

Известно, что основной формой нарушения прочности массивов горных пород является сдвиг по некоторой площадке под действием касательных напряжений [80, 81]. Многочисленные испытания образцов песчано-глинистых пород

показали, что в статических условиях, т. е. без учета скорости деформирования, условие предельного равновесия хорошо описывается законом Кулона [82], который устанавливает линейную зависимость между касательными (τ) и эффективными нормальными (σ) напряжениями на плоскости скольжения:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (1.1)$$

где φ и c — расчетные значения угла трения и удельного сцепления.

В работе Шестакова [83]¹ достаточно детально показано, что в глинистых породах (грунтах) на характер сдвиговых деформаций существенно влияет проявление реологических свойств, обуславливающих сдвиговую ползучесть грунтов и вязко-пластические перемещения оползневых тел (рис. 1.19). В процессе нагружения грунты проходят две стадии деформирования: 1) стадию неустойчивой ползучести, на которой заканчивается переориентация частиц и полностью разрушаются хрупкие контакты, суммарная прочность новых вязких контактов возрастает, так что деформация постепенно замедляется, (участок I на кривой a , рис. 1.19); 2) стадию установившейся ползучести, на которой соотношение суммарных прочностей разрушающихся старых и вновь возникающих контактов остается примерно одинаковой, так что скорость деформации почти постоянна (участок II на кривой a , рис. 1.19).

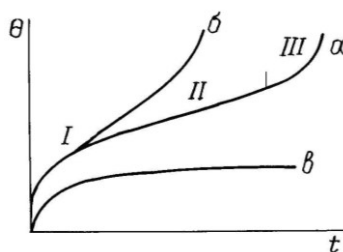


Рис. 1.19. Развитие типовых сдвиговых деформаций грунтов (по [83])

Дальнейшее развитие деформаций протекает двояко: либо вследствие постепенного изменения свойств (уплотнение или «старение» пород в процессе ползучести) деформация прекращается (затухающая ползучесть), либо же в результате прогрессирующего убывания суммарной прочности ненарушенных старых и новых контактов ползучесть примет незатухающий (прогрессирующий) характер и приведет к разрушению (участок III на кривой a , рис. 1.19). Время, протекающее до момента разрушения, уменьшается при прочих равных условиях с увеличением нагрузки. В этом смысле можно говорить о длительной прочности горной породы как о прочности, которая определяется временем действия нагрузки.

Нужно оговорить, что стадия установившейся ползучести может отмечаться лишь в определенном диапазоне напряжений, при превышении которого она носит незатухающий характер на всех этапах деформирования (кривая $б$, рис. 1.19). Наоборот, при меньших напряжениях стадия неустойчивой ползучести заканчивается практически полным прекращением деформаций (кривая $в$, рис. 1.19). Период установившейся ползучести обычно имеет большое значение для относительно слабых глинистых пород: наоборот, для сдвиговых деформаций плотных глин основное практическое значение имеет период неустойчивой ползучести.

¹ Здесь и далее в этом разделе использованы положения книги В. М. Шестакова «Гидрогеомеханика», 1998 г. [83].

При практической оценке общей устойчивости откосов предполагается, что ее нарушение происходит по некоторой поверхности скольжения, на которой при нарушении равновесия выполняется условие прочности, определяемое уравнением (1.1) Кулона.

Для сравнительно однородного откоса обычно предполагается, что нарушение его устойчивости происходит путем сдвига по *цилиндрической поверхности*, контуром которой является дуга, описываемая из некоторой точки O — центра скольжения (рис. 1.20). Условия устойчивости при этом определяются коэффициентом устойчивости $K_{уст}$ как отношение моментов удерживающих и сдвигающих сил ($M_{уд}$ и $M_{сдв}$) относительно центра поверхности скольжения [83]:

$$K_{уст} = \frac{\sum M_{уд}}{\sum M_{сдв}}. \quad (1.2)$$

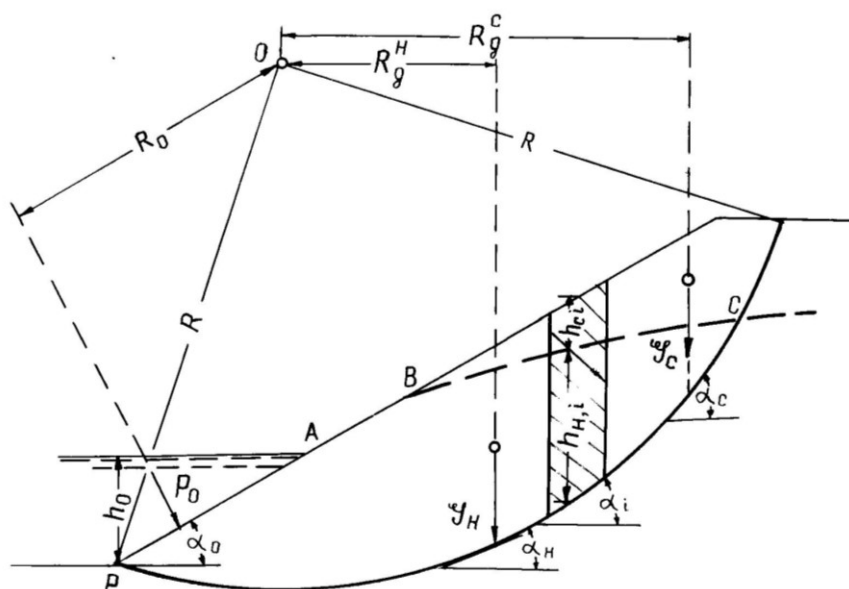


Рис. 1.20. Схема к оценке устойчивости откоса по методу кругло-цилиндрической поверхности скольжения [83]

Основными действующими силами здесь являются объемные (гравитационные и фильтрационные) силы тяжести и гидродинамического воздействия. Согласно В. М. Шестакову [83], фильтрационные силы в единице объема равны градиенту гравитационного потенциала и совпадают с ним по направлению, так что в объеме потока V :

$$\Phi = \int_V J_\varphi dV = \int_V grad \varphi dV = \int_V grad p dV + \vec{\gamma} V, \quad (1.3)$$

где $\vec{\gamma}$ — единичный вектор силы тяжести воды, равный ее объемному весу и направленный вертикально вниз.

Вместе с тем, для расчетов устойчивости при кругло-цилиндрической поверхности скольжения удобнее (по предложению Н. М. Герсевича [84]) использовать другой способ учета гидродинамических (фильтрационных) сил, основанной на теореме Гаусса — Остроградского, согласно которой входящий в выражение (1.3) объемный интеграл можно заменить интегралом по поверхности тела:

$$\int_V \text{grad} p dV = \int_S \vec{p}_n dS, \quad (1.4)$$

где $\vec{p}_n$ — вектор давления, прилагаемого по поверхности тела S , направленный по нормали к этой поверхности [85].

Фильтрационная сила Φ должна векторно накладываться на силу веса, задаваемую с учетом действия взвешивающей силы, так что сила веса будет $G_B = \vec{\gamma}_B V$, где $\vec{\gamma}_B$ — единичный вектор силы веса, численно равный объемному весу грунта, взвешенного в воде. Сложение сил G_B и Φ приводит к векторной сумме [85]:

$$G_B + \Phi = \int_S \vec{p}_n dS + \vec{\gamma}_B V, \quad (1.5)$$

где $\vec{\gamma}_B = \vec{\gamma}_B + \vec{\gamma}$ — единичный вектор силы тяжести насыщенного водой грунта.

Как видно, в таком приеме расчета суммарное действие гидродинамической (фильтрационной) и гравитационной сил может учитываться двумя операциями: заданием объемного веса грунта, насыщенного водой, и приложением нормально к поверхности рассматриваемого потока давящей силы. При этом $p = 0$ на участках высачивания AB и свободной поверхности BC (без учета влияния капиллярной зоны), на участке поверхности скольжения CD действует нормальная к ней сила P_n , определяемая суммой сил давления на этом участке, а на затопленном, участке откоса AD , действует нормальная сила $P_0 = 0,5\gamma h_0^2 \text{ctg}\alpha_0$.

Тогда момент сдвигающих сил будет определяться силами веса G_n в насыщенной зоне (с объемным весом γ_n) и в сухой зоне G_c (с объемным весом γ_c) [85]:

$$M_{сдв} = G_n R_g^n + G_c R_g^c. \quad (1.6)$$

Удерживающие силы по поверхности скольжения $T_{пс}$ определяются в соответствии с законом Кулона: $T_{пс} = (N_g^n + N_g^c - P) \text{tg}\varphi + C$, где N_g^n и N_g^c — нормальные к поверхности скольжения составляющие сил веса G_n и G_c , C — сила сцепления на поверхности скольжения. Учитывая, кроме того, удерживающее действие силы P_0 , получим момент удерживающих сил [85]:

$$M_{уд} = T_{пс} R_0 + P_0 R_0 = [(N_g^n + N_g^c - P) \text{tg}\varphi + C] R + P_0 R_0. \quad (1.7)$$

Если подставить (1.6) и (1.7) в (1.1), то получится выражение для коэффициента устойчивости:

$$K_{уст} = \frac{(N_g^n + N_g^c - P) \text{tg}\varphi + C + P_0 R_0 / R}{G_n R_g^n / R + G_c R_g^c / R}. \quad (1.8)$$

Величины N_g^H и N_g^C в первом приближении могут рассчитываться по проекциям сил G_H и G_C под точками их приложения (центрами тяжести зон): $N_g^H = G_H \cos \alpha_H$, $N_g^C = G_C \cos \alpha_C$ (рис. 1.20). При этом все геометрические размеры (площади зон потока и плечи действия сил) для практических задач можно получать графическим путем.

Наиболее ответственной операцией при прогнозах устойчивости откосов и склонов является задание прочностных характеристик (параметров) пород откоса (склона) с учетом их изменения под действием различных факторов. В принципе, условия сдвиговых испытаний должны увязываться с ожидаемым характером напряженно-деформированного состояния породы в массиве, рекомендации по этому вопросу даны Н. Н. Масловым [86]. В частности, прочность пород может существенно ухудшаться за счет влияния обводненности откоса (склона), способного существенно ухудшать прочность пород. При этом следует внимательно выявлять пути «быстрого» поступления инфильтрации осадков с поверхности откоса (склона) на поверхность скольжения. Такие пути возникают обычно в зонах повышенной трещиноватости в верхней части оползневого тела или в области питания грунтового потока, подтапливающего оползневое тело.

При переменных прочностных характеристиках, а также желании более точно определить нормальные составляющие сил веса используют способ разделения области тела скольжения на вертикальные отсеки (один из таких отсеков заштрихован на рис. 1.20). При этом удерживающая сила (трения и сцепления) по подошве отсека будет [83]:

$$T_i = [(\gamma_H h_{H,i} + \gamma_C h_{C,i}) \cos \alpha_i - p_i + c / \cos \alpha_i] / l_i, \quad (1.9)$$

где l_i — толщина отсека.

Расчет ведется при различных поверхностях скольжения, задаваемых положением центра скольжения O и радиуса окружности R , и находится минимальная величина коэффициента устойчивости, которая и характеризует степень устойчивости откоса.

Плоская поверхность скольжения характерна для условий падения слоев пород в сторону откоса (особенно, если среди этих слоев в теле откоса имеются глинистые слои, обладающие слабой прочностью и создающие вместе с тем барьер для разгружающегося фильтрационного потока). В этом случае может образоваться контактный оползень скольжения по ослабленному слою (ПС на рис. 1.21). Коэффициент устойчивости при этом определяется соотношением удерживающих сил $F_{уд}$, составляемых по закону Кулона из сил трения и сцепления, и сдвигающих сил $F_{сдв}$ [83]:

$$K_{уст} = \frac{F_{уд}}{F_{сдв}} = \frac{N \operatorname{tg} \varphi + c l_{пс}}{T}, \quad (1.10)$$

где N и T — нормальные и касательные проекции действующих сил на поверхность скольжения; c — удельное сцепление на поверхности скольжения, причем:

$$N = G \cos \alpha - P + P_0 \cos(\alpha_0 - \alpha), \quad T = G \sin \alpha, \quad (1.11)$$

где G — вес пород тела скольжения (насыщенного водой под свободной поверхностью СП фильтрационного потока); P — сила давления воды на поверхности скольжения; P_0 — сила давления воды на поверхности откоса.

В расчетах устойчивости откосов по методу *ломаной поверхности скольжения* последняя проводится обычно по контакту тела скольжения с подстилающими его коренными породами (рис. 1.22). При этом все тело скольжения делится на блоки в пределах каждого участка с разным уклоном плоскости скольжения, а различие способов расчета обуславливается разными путями учета силового взаимодействия блоков [82, 85, 87].

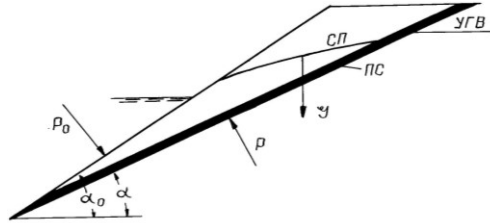


Рис. 1.21. Схема к оценке устойчивости откоса по методу плоской поверхности скольжения [83]

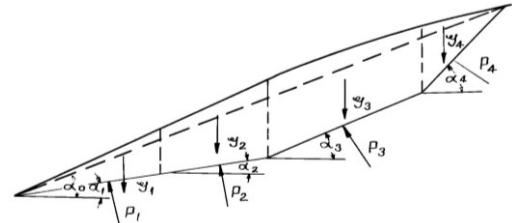


Рис. 1.22. Схема к оценке устойчивости откоса по методу ломаной поверхности скольжения [83]

В работе [83] рассмотрен один из вариантов такого расчета, в котором коэффициент устойчивости определяется по соотношению суммы проекций удерживающих и сдвигающих сил на генеральное направление поверхности скольжения (на рис. 1.22 она показана пунктиром). При этом выражение для коэффициента устойчивости будет [83]:

$$K_{уст} = \vec{F}_{сдв} / \vec{F}_{уд}, \quad (1.12)$$

где $\vec{F}_{сдв}$ и $\vec{F}_{уд}$ — сумма проекций сдвигающих и удерживающих сил на генеральное направление поверхности скольжения.

В. М. Шестаковым предложены выражения для сдвигающих сил, учитывающие влияние фильтрационных сил посредством задания давления воды по поверхности обводненной части тела скольжения, а также с учетом сейсмического воздействия, принимая его направленным вдоль поверхности откоса [83]:

$$\vec{F}_{сдв} = G(\sin \alpha_0 + k_c) + \sum_{i=1}^n P_i \sin(\alpha_i - \alpha_0) - P_0 \sin \alpha_0, \quad (1.13)$$

где G — суммарный вес пород тела скольжения, определяемый с объемным весом γ_n в пределах насыщенной водой породы; k_c — коэффициент сейсмичности; P_i — силы давления воды на поверхности скольжения (в i -м блоке); P_0 — сила давления воды на подтопленной части поверхности откоса. При небольших уклонах потока распределение давления воды можно считать гидростатическим, определяя его при глубине потока h , как $p = \gamma h$.

Выражения для проекций удерживающих сил в каждом блоке номера i базируются на условии достижения в каждом блоке предельного равновесия, определяемого уравнением Кулона (1.1), учитывая влияние фильтрационного потока заданием сил давления воды по поверхности скольжения [83]:

$$\vec{F}_{уд} = \sum_{i=1}^n [(G_i \cos \alpha_i - P_i) \tan \varphi_i + c_i l_i] \cos(\alpha_i - \alpha_0), \quad (1.14)$$

где G_i — вес пород i -го блока, при расчетах которого в части блока под свободной поверхностью воды принимается объемный вес γ_n ; P_i — суммарная сила давления по поверхности скольжения i -го блока, причем в нижнем блоке, находящемся под уровнем воды, из силы давления P_i следует вычесть величину $P_0 \cos(\alpha_0^0 + \alpha_0 - \alpha_1)$; c_i — удельное сцепление на i -м участке поверхности скольжения длиной l_i .

Ломаная поверхность скольжения образуется также при формировании оползней выдавливания [88], в которых оползневое тело захватывает часть основания склона и сдвигается по ослабленным слоям, залегающим под оползневыми накоплениями, с выдавливанием нижней части оползневого тела (рис. 1.23). В этом случае генеральной поверхностью скольжения можно считать близкую к горизонтальной плоскость подошвы оползневых накоплений (ПП на рис. 1.23).

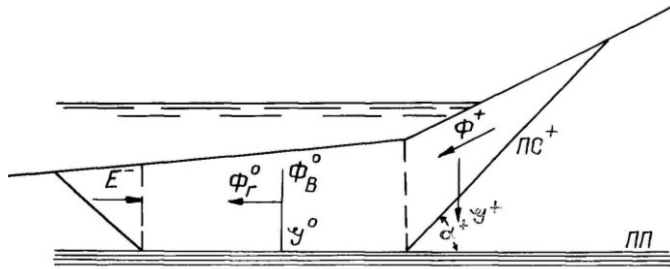


Рис. 1.23. Схема к оценке устойчивости откоса при формировании оползней выдавливания по методу ломаной поверхности скольжения [83]

В этом случае, для коэффициента устойчивости, учитывая фильтрационные силы как объемные, используется выражение [83]:

$$K_{уст} = \frac{(G^0 - \Phi_B^0) \operatorname{tg} \varphi^0 + E^- + c^0 l^0}{E^+ + \Phi_\Gamma^0}, \quad (1.15)$$

где G^0 — вес низового блока оползневого тела (с учетом взвешивания породы в воде); φ^0, c^0 — прочностные характеристики пород в подошве блока; Φ_B^0 и Φ_Γ^0 — вертикальная и горизонтальная проекции фильтрационных сил в низовом блоке; E^- — давление со стороны низового блока выдавливания; E^+ — сдвигающая горизонтальная сила со стороны верхового блока; l^0 — длина контура плоскости подошвы оползневого тела.

Величина E^+ определится как разница горизонтальных проекций сдвигающих и удерживающих сил в верховом блоке [83]:

$$E^+ = G^+ \sin \alpha^+ \cos \alpha^+ + \Phi_\Gamma^+ - G^+ \cos \alpha^+ \operatorname{tg} \varphi^+ - c^+ l^+ \quad (1.16)$$

где G^+ — вес верховой части тела скольжения (с учетом взвешивания водой в области фильтрационного потока); Φ_Γ^+ — горизонтальная проекция фильтрационных сил в верховом блоке (определяемая в каждом единичном объеме по величине градиента фильтрационного потенциала); φ^+ и c^+ — прочностные характеристики пород на участке плоскости скольжения в верховом блоке длиной l^+ .

Таким же образом можно составить выражение для величины E^+ , задавая ломаную плоскость скольжения в пределах верхового блока.

Величина E^- может определяться как сила пассивного отпора для подпорной стенки высотой h_n [85, 88]:

$$E^- = 0,5 \gamma_B h_n^2 \operatorname{tg}^2(45^\circ + \varphi_n/2) + 2c_n \operatorname{tg}(45^\circ + \varphi_n/2) \quad (1.17)$$

где φ_n и c_n — прочностные параметры в зоне отпора.

Имеется ряд более сложных способов расчетов устойчивости откосов при ломаной плоскости скольжения, отличающихся различными способами учета сил взаимодействия между блоками тела скольжения [85, 87, 89].

Оползни-потоки образуются в глинистых и обломочно-глинистых породах на склонах крутизной 12–15° и более. Обычно оползни-потоки заполняют эрозионные ложбины на склоне, в которых накапливаются обломочно-глинистые массы и куда стекают поверхностные и отчасти подземные воды. Они имеют большую протяженность, незначительную ширину и малую мощность. Основной причиной их формирования является избыточное увлажнение (до 50–60 %) обломочно-глинистых пород поверхностными или подземными водами, что приводит к резкому снижению их прочности и переходу в текучее состояние.

Анализ механизмов оползней-потоков показал [90], что на разных стадиях их развития обломочно-глинистые массы могут быть рассмотрены в расчетных схемах как различные реологические тела: упругие — отвечающие начальной фазе развития оползня-потока, когда образуются трещины усадки и растяжения; вязкопластические — отвечающие началу движения, когда существенно сказывается структурная прочность и начальное сопротивление сдвига; вязкие — в сформировавшихся движущихся оползнях-потоках, когда величиной начального сопротивления сдвигу можно пренебречь. В первых двух случаях возможна оценка устойчивости неподвижного оползневого тела с некоторой долей условности с помощью широко известных традиционных расчетных способов. Для движущихся оползней-потоков определяются скорость их движения и дальность перемещения, исходя из модели оползневого тела, как вязкопластической жидкости.

Вышесказанное имеет отношение прежде всего к механической устойчивости откосов сооружений ГТС. Для оценки фильтрационной устойчивости необходимо учитывать действие гидродинамических сил, которое приводит к формированию различных форм местного нарушения устойчивости, возникающих в небольших по размерам зонах [83].

Фильтрационный выпор представляет собой взвешивание некоторой части грунта под действием восходящего фильтрационного потока, — оно реально может проявляться в основаниях сооружений и горных выработок, особенно при наличии слабопроницаемого слоя, экранирующего выход фильтрационного потока.

Расчетную схему фильтрационного выпора Шестаков В.М. [83] представляет, рассматривая условия равновесия столба породы единичной площади в плане и мощностью m_{π} в восходящем фильтрационном потоке с градиентом напора $J_B = \Delta H_B / m_{\pi}$, предполагая также наличие фильтрующей пригрузки мощностью m_{π}^0 .

В этом случае уравнение равновесия запишется из условия равенства силы веса породы с пригрузкой и фильтрационной силы, имея в виду, что удельные фильтрационные силы (в единице объема породы) определяются градиентом гидродинамического потенциала: $\gamma_B m_{\pi} + \gamma_B^0 m_{\pi}^0 = \gamma m_{\pi} J_{B_{\text{взв}}}$, где γ_B и γ_B^0 — объемный вес породы и пригрузки с учетом взвешивания их водой, откуда получается выражение для взвешивающего градиента напора [83]:

$$J_{\text{взв}} = \frac{\gamma_B}{\gamma} + \frac{\gamma_B^0}{\gamma} \frac{m_{\pi}^0}{m_{\pi}}. \quad (1.18)$$

Гидродинамическое оплывание песчаного откоса — под гидродинамическим оплыванием понимают нарушение устойчивости песчаного откоса в пределах участка высачивания за счет действия гидродинамических сил фильтрационного и стекающего по поверхности откоса потоков [83].

В. М. Шестаковым [83] предложено учитывать прежде только воздействие фильтрационных сил, исходя из анализа устойчивости единичного объема породы на поверхности откоса, на который действует, кроме силы веса, численно равной объемному весу γ_B взвешенной в воде породы, еще фильтрационная сила, равная γJ_B , где J_B — выходной градиент напора на участке высачивания. Рассмотрев условие устойчивости в точке высачивания, где градиент напора $J_B = \sin \alpha$ направлен вдоль откоса, им записано условие предельной устойчивости как равенство проекций действующих активных сил силе трения $\gamma_B \sin \alpha + \gamma \sin \alpha = \gamma_B \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi$, что дает соотношение [83]:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\gamma_B}{\gamma_B + \gamma} \operatorname{tg} \varphi \cong 0,5 \operatorname{tg} \varphi, \quad (1.19)$$

т. е. уклон устойчивого откоса в точке высачивания вдвое меньше естественного уклона песчаного откоса.

Влияние гидродинамических сил стекающей по откосу воды нередко приводит к значительному (в несколько раз) его выколаживанию, причем известны случаи, когда размеры «языка» оплывания $l_{\text{опл}}$ достигают нескольких десятков метров.

Для определения среднего уклона языка оплывания предложена формула [91]:

$$J_{\text{опл}} = \chi \frac{\gamma_B}{\gamma_B + \gamma} \operatorname{tg} \varphi, \quad (1.20)$$

где величина χ , отражающая влияние стекающего по откосу потока, определяется в зависимости от удельного расхода фильтрационного потока q_0 и расчетного диаметра зерен песка d по задаваемым данным [91].

Оплывание откоса в пределах участка высачивания ведет к осыпанию сухой его части, которая при этом сдвигается на расстояние Δl , размер которой находится из баланса оплывшей и осыпавшейся песчаных масс; размер Δl для откоса высотой h будет: $\Delta l = 0,5 m \cdot h_B^2 / h$.

Если над песчаным пластом с языком оплывания располагаются глинистые породы, то над ним образуется «козырек» глинистых пород и это может стимулировать нарушение общей устойчивости всего откоса.

Процесс оплывания идет относительно равномерно лишь, когда перед откосом имеется площадка для размещения оплывающих масс песка. Если же водоупор подрезан так, что поверхность его кровли пересекает линию откоса в точке, лежащей выше основания уступа, то оплывание характеризуется резко выраженной неравномерностью и приводит к деформациям более сложного типа: процесс локализуется на отдельных участках, где он протекает весьма интенсивно (образуются промоины, а при устойчивых сводах — в песках, обладающих сцеплением, — пещеры), в то время как на остальной части откоса он выражен сравнительно слабо. Естественно, что в таких случаях какие-либо расчеты неприменимы и приходится ориентироваться лишь на данные наблюдений, а для проектируемых объектов — принимать решение по данным аналогов [91].

Механическая суффозия. В дисперсных породах под суффозией принято понимать вынос мелких частиц из порового пространства крупных частиц [12]. Реально такие деформации могут проявляться только в разнородных песчано-гравийных породах с коэффициентом неоднородности $d_{60} / d_{10} > 10-20$. В подобных породах для обеспечения суффозионной устойчивости (по экспериментальным данным В. С. Истоминой) допустимый градиент напора составляет 0,2 при $10 < d_{60} / d_{10} < 20$ и 0,1 при $d_{60} / d_{10} > 20$ [91].

Особая форма контактной суффозии может возникать по контакту мелко- и крупнозернистых пород, а также дисперсных пород с трещинами и с бетонным сооружением. Форма контактной суффозии и оценки возможностей их проявления рассмотрены В. Н. Жиленковым [92].

Неопределенность оценок суффозионных процессов привела Р. Р. Чугаева к предложению проверять фильтрационную прочность оснований гидросооружений по среднему (контролирующему) градиенту напора в основании, сопоставляя его с допустимыми значениями, которые устанавливаются по данным анализа состояния построенных сооружений [91].

В закарстованных карбонатных породах при водоотборе проявляются карстово-суффозионные процессы, представляющие собой вынос заполнителя карстовых полостей под действием гидродинамических сил нисходящего фильтрационного потока и увеличения гравитационных сил при осушении этих полостей [93, 94].

Оценка карстово-суффозионных процессов может базироваться на расчетах равновесия заполнителя карстовых полостей под действием гидродинамических и гравитационных сил, которому сопротивляются силы трения и сцепления по стенкам полостей (см., например, [94]). Однако реальные возможности такой оценки весьма ограничены из-за неясности структуры их строения, особенно в части, определяющей условия выноса заполнителя. Поэтому практическое изучение карстово-суффозионных процессов сводится к установлению (главным образом геофизическими методами, например, георадарным зондированием) наличия карстовых полостей с заполнителем с оценками возможных проявлений таких процессов по объектам-аналогам.

В Plaxis для определения значений показателя надежности предусмотрен расчет Safety (безопасность, надежность, устойчивость, несущая способность) [95]. Для вычисления этого коэффициента используется метод ϕ -reduction (снижение параметров прочности грунта) — прочностные характеристики грунта « $\tan \phi$ » 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 [95]:
$$\sum Msf = \frac{\tan \phi_{input}}{\tan \phi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} = \frac{S_{u,input}}{S_{u,reduced}}.$$

В приведенном выражении параметры прочности с индексом “input” относятся к свойствам, заданным в наборах данных по материалам, а параметры с индексом “reduced” — к сниженным значениям параметров, формирующихся в грунтах в результате выполнения расчетов.

Для определения значения показателя надежности сооружения (или его элемента) должно быть выполнено следующее условие [95]:

$$SF = \frac{\text{существующая прочность}}{\text{прочность при разрушении}} = \text{величина } \sum Msf \text{ при разрушении.}$$

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

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.

Далее в качестве примеров приведены картины приращения перемещений и расчетных значений показателя надежности, полученные авторами (рис. 1.24–1.26).

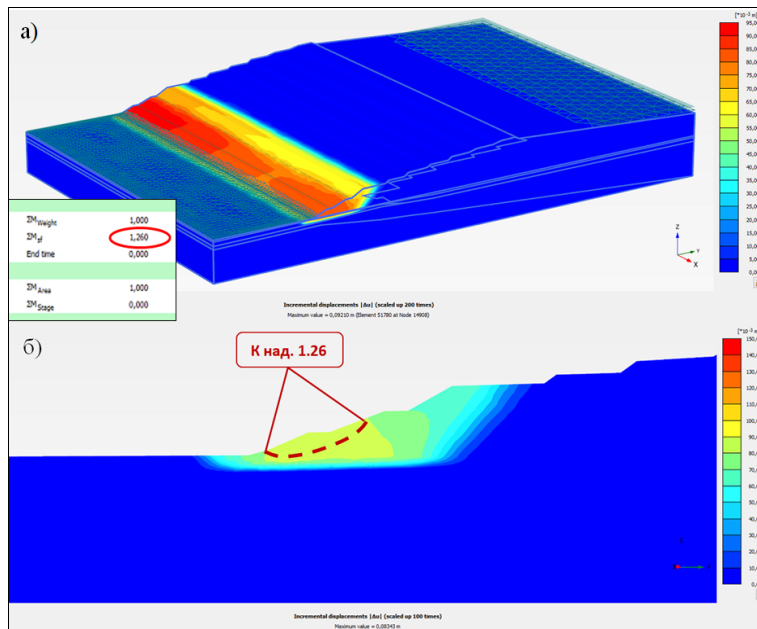


Рис. 1.24. Картины приращений перемещений (a) и расчетного значения показателя надежности (б) для ограждающей дамбы хвостохранилища при низком водонасыщении грунтов

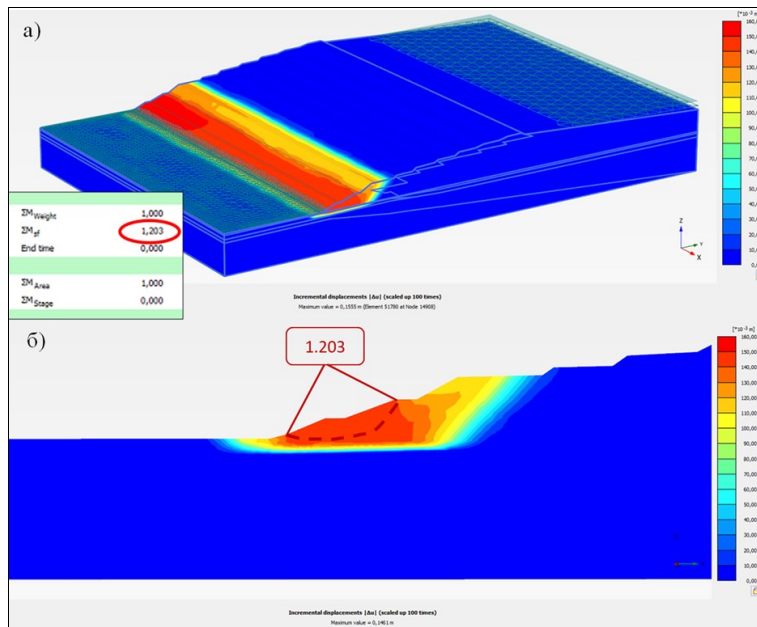


Рис. 1.25. Картины приращений перемещений (a) и расчетного значения показателя надежности (б) для ограждающей дамбы хвостохранилища при среднем водонасыщении грунтов

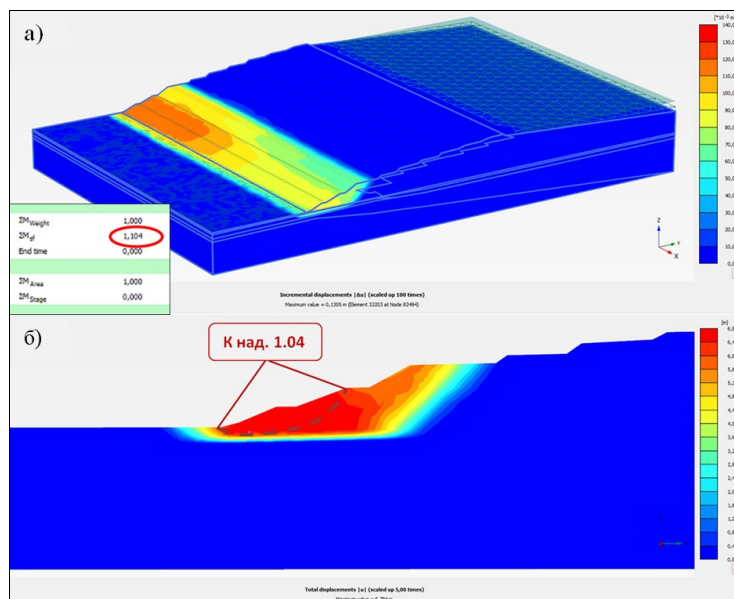


Рис. 1.26. Картины приращений перемещений (а) и расчетного значения показателя надежности (б) для ограждающей дамбы хвостохранилища при повышенном водонасыщении грунтов

Таким образом, выполненный анализ показывает, что потеря механической прочности и фильтрационной устойчивости может быть присуща как отдельным элементам и локальным участкам, так и в целом всему ГТС; опасные фильтрационно-деформационные процессы могут проявляться как на поверхности ГТС, так и быть скрытыми на начальных этапах, что и предопределяет необходимость применения многоуровневого мониторинга, комплексующего на различных уровнях мультидисциплинарные методы и наблюдения.

1.6. Опыт исследований и мониторинга хвостохранилищ

Анализ современного состояния решаемой научно-технической проблемы показывает, что для мониторинга ГТС необходим систематический и, по-возможности, оперативный сбор информации о параметрах их состояния в целях выявления тенденций их изменения. Современные подходы предусматривают, в дополнение к традиционным полевым обследованиям, использование аэро- и космических снимков, а также комплексирование нескольких методов, в том числе и междисциплинарных. Съемка с БПЛА подходит для мониторинга относительно небольших площадей с целью получения ортофотопланов и решения задач геодезии и топографии, при мониторинге чрезвычайных ситуаций и ликвидации их последствий. В последние годы очень активное развитие получили спутниковые системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Примеры информационных систем доступа к сверхбольшим архивам спутниковых данных приводятся в работе (А. А. Прошин и др. [96]) со ссылкой на веб-порталы Google Earth Engine (Gorelick [97]), EOSDIS [NASA] (Ramapriyan et al. [98]) и ESA [99], примерами российских систем являются Объединенная система доступа к архивам данных центров НИЦ «Планета» (А. В. Антонов и др. [100]; М. А. Бурцев и др. [101]; Е. А. Лузян, О. Е. Милехин и др. [102]), Центр коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (ЦКП ИКИ «Мониторинг») и геопортал «Роскосмоса» [103], Ю. И. Носенко и др. [104]. Отмечается, что современные технологии позволяют реализовывать принципиально новые возможности организации работы со спутниковой информацией, обеспечивающие эффективное коллективное использование достаточно дорогостоящих вычислительных ресурсов центров сбора, обработки и представления данных дистанционного зондирования (Е. А. Лузян и др. [105]).

Работы по созданию технологий построения систем дистанционного мониторинга (СДМ) в России активно ведутся в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) (Е. А. Лупян и др. [106–108]; И. В. Балашов и др. [109]), в статье (Е. А. Лупян и др. [110]) приведен пример анализа возможностей использования специализированного информационного сервиса «ВЕГА» для решения задач регионального дистанционного мониторинга.

Известны примеры выполнения работ по картографированию и оценке состояния экосистем окрестностей города Мирный с использованием дистанционных методов на основе высокдетальной космической съемки (С. Г. Мышляков и др. [111]). Методы ДЗЗ и интерферометрической обработки радарных космоснимков применяются для мониторинга Гайского медно-колчеданного месторождения (В. А. Горбунов, Ю. И. Кантемиров [112]). Объектами обследования были борты и уступы карьеров, отвалы горных пород, гидротехнические сооружения хвостохранилищ и др. В ходе обследования была установлена стабильность деформаций гидротехнических сооружений хвостохранилища, выявлено уплотнение в нем пород-хвостов, проявляющееся в оседании поверхности. На этой основе исследователи рекомендуют технологию радарной интерферометрии в качестве одного из методов наблюдений за смещениями и деформациями земной поверхности и сооружений.

Материалы дистанционного зондирования использовались и при мониторинге на Михайловском ГОКе (Курская область) (О. В. Зеркаль [113]). На горнодобывающих предприятиях Кольского полуострова также применяются современные технологии дистанционного мониторинга. Так, компанией «СОВЗОНД» выполняется проект «Мониторинг смещений земной поверхности на территории рудников и хвостохранилищ АО «Апатит» с использованием технологии космической радарной интерферометрии» [114]. Целью работы — выявление потенциально опасных очагов деформаций и смещений контролируемых объектов на территориях подземной добычи полезных ископаемых для обеспечения промышленной безопасности.

Актуальность использования цифровых космических материалов на региональном и локальном уровнях для оперативной количественной оценки состояния природной среды в зонах деятельности предприятий горнопромышленного комплекса подчеркивается в работе (Г. В. Калабин и др. [115]). Разрабатывается методика и анализируются результаты инструментального определения природного и техногенно измененного напряженно-деформированного состояния массива на Качканарском ГОКе, выполненные с использованием технологий спутниковой геодезии (А. Д. Сашурин и др. [116]). О комплексировании в исследованиях визуального наблюдения, глобальных навигационных спутниковых систем с аналитической оценкой результатов говорится в работе (С. В. Усанов и др. [117]). Методика и результаты многолетнего мониторинга процесса сдвижения земной поверхности при отработке Узельгинского и Талганского месторождений представлены в работе (А. А. Панжин и др. [118]), итоги мониторинга деформационных процессов методами высокоточной геодезии, гравиметрии, радарной интерферометрии на Саянском полигоне — в исследовании (Ю. В. Васильев и др. [119]).

И. А. Санфиловым и др. [120], А. А. Баряхом [121, 122] предложен комплекс мониторинга, в который входят сейморазведочные работы методом отраженных волн в модификации общей глубинной точки, электроразведочные работы методами естественного поля и симметричного электропрофилирования и метод георадиолокационного зондирования в целях оценки возможности выделения мелкомасштабных особенностей строения плотин. Кроме того, для обеспечения

сейсморазведочных исследований данными о контрольных значениях средних и пластовых скоростей в пределах объекта выполнены скважинные каротажные наблюдения по методу вертикального сейсмического профилирования. Алгоритмическое и программное обеспечение многоуровневой системы комплексного геодинамического мониторинга удароопасного массива горных пород для условий Дальнего Востока рассмотрены в работах (А. В. Гладырь и др., [123], И. Ю. Рассказов и др. [124]), в том числе экологический мониторинг природно-горнотехнических систем на основе данных дистанционного зондирования (М. Б. Бубнова и др. [125]).

Вопросы горной информатики и проблем «больших данных» в построении комплексных мониторинговых систем безопасности недропользования рассмотрены в работах (И. В. Бычков, В. Н. Опарин, В. П. Потапов [126]). Предлагается принципиально новый подход к обработке пространственных данных для решения задач геомеханического мониторинга, основанный на сервисе распределенных данных (DataDistributedService-DDS), реализуемых через туманные вычисления в рамках облачных систем (В. Н. Опарин и др. [127]).

Методологические основы построения информационно-мониторинговых систем геодинамической безопасности на горнодобывающих предприятиях рассмотрены в работах (А. В. Нероба и др. [128], А. В. Леонтьев [129]), учитывающие фактор неопределенности в познании особенностей конкретной обстановки, а также возможности ее имитирования на базе современных информационных технологий.

Анализ состояния исследований по данному направлению показывает, что имеются для регионов, отличающихся тектонофизическими, геологическими, гидрогеологическими и природно-климатическими условиями. А. М. Гальпериным [130], В. В. Мосейкиным работы со схожей тематической направленностью, но выполняемые [131] рассматриваются вопросы удаленного автоматизированного контроля откосных сооружений на горных предприятиях, при этом большое внимание уделяется развитию технических средств и способов гидрогеомеханического мониторинга. И. В. Бычковым, В. Н. Опариным, В. П. Потаповым [126] предложены подходы создания распределенных геомониторинговых систем.

Ю. А. Кашниковым [132] развернут ряд маркшейдерско-геодезических систем мониторинга состояния дневной поверхности в районах разработки месторождений полезных ископаемых Урала и Сибири. А. А. Козыревым, Э. В. Каспарьяном [133] рассмотрены вопросы проведения наблюдений за изменениями напряженно-деформированного состояния обрабатываемых месторождений скальных пород с помощью геодезических и сейсмических методов. Н. Н. Мельниковым, А. И. Калашниковым [27, 134] разрабатывается многоуровневая комплексная система мониторинга западного сектора Севера России в целях минимизации рисков техногенных катастроф и экологических последствий горнодобывающей и нефтегазовой деятельности с применением новых современных методов и средств получения информации о геомеханико-геодинамическом состоянии природно-технических систем. В работах О. Л. Гиниятуллиной, В. О. Михайлова, Ж. Е. Мусагалиевой, Ж. Т. Кожеева [135–138] приведены результаты интерферометрической обработки снимков Sentinel-1A.

А. М. Алабяном, В. А. Зеленцовым [139] разрабатывается интеллектуальная информационная технология оперативного мониторинга и упреждающего моделирования наводнений с использованием космической съемки и доступом к результатам через геопорталы.

Современным проблемам дистанционного зондирования Земли из космоса посвящены одноименные конференции Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) и издаваемый им журнал. В последние годы в Военно-космической академии им. Можайского проведены конференции, посвященные развитию радиолокационных исследований различных природных сред.

Таким образом, можно констатировать, что к настоящему времени накоплен значительный опыт проведения мониторинга ГТС в различных сочетаниях и комплексировании методов. Отдельно необходимо выделить опыт организации систем мониторинга опасных природно-технических систем.

ФГУП «Гидроспецгеология» [140] совместно с Федеральным агентством по недропользованию [141] предложена организация объектного мониторинга при создании и эксплуатации полигонов захоронения токсичных промышленных отходов различного агрегатного состояния, а совместно с Институтом физической химии и электрохимии [142] и АО «Сибирский химический комбинат» — система мониторинга подземного хранилища радиоактивных отходов «Сибирского химического комбината» и водозаборов подземных вод централизованного водоснабжения города Северска [143]. Геофизическим центром РАН [144] и НПО «Радон» [145] создана система мониторинга горизонтальных деформаций земной поверхности на полигоне радиоактивных отходов МосНПО, основу которого составляет использование спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС. Методические подходы к организации горно-экологического мониторинга экосистем зоны влияния хранилищ токсичных отходов добычи и переработки твердых полезных ископаемых созданы совместно Институтом горного дела ДВО РАН [146], Институтом водных и экологических проблем ДВО РАН [147], Дальневосточным федеральным университетом [148] и ФНЦ Биоразнообразия ДВО РАН [149]. Согласно их предложениям, в качестве опорных точек мониторинга могут рассматриваться существующие и проектируемые гидрометеорологические посты и станции, а также пункты наблюдения за природной средой (Росгидромета [150] и других организаций).

Безопасностью насыпных ГТС занимается большое количество организаций во всем мире. К ним можно отнести специализированные научно-технические, например, Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева (А. Г. Василевский, Д. Д. Сапегин, В. Б. Судаков, М. Г. Лопатина, В. С. Кузнецов, В. Н. Дурчева, А. М. Швайштейн и др.). Кроме них, такие исследования, проводятся и в организациях смежных направлений — в научно-исследовательских институтах горного профиля, например, Горном институте КНЦ РАН (А. И. Калашник, Н. Н. Абрамов, Д. А. Максимов, Н. А. Калашник, Д. В. Запорожец и др.).

Подобный обширный спектр предприятий, занимающихся безопасностью насыпных ГТС, обуславливает целесообразность их объединения в специализированные научные сообщества, что способствует обмену опытом, накоплению знаний в узкоспециализированных направлениях (например, изучении локальных фильтрационных нарушений) и другим целям. При этом существуют сообщества, которые объединяют организации, работающие в одной стране, например, Australian National Committee on Large Dams (S. O'Brien, R. Fell, B. Cooper, J. Williams, P. Allan, G. Bell, etc.). Самые же крупные сообщества объединяют организации, занимающиеся безопасностью насыпных ГТС, по всему миру. Таким сообществом, например, является International Commission on Large Dams (V. Marley, C. Viotti, J. Laasonen, J.-J. Fry, M. Limbach, G. Dounias, D. Jawardi, etc.).

Кроме того, в крупных международных сообществах выделяются группы, занимающиеся отдельными аспектами безопасности насыпных ГТС. Так, например, в международной организации The Interagency Committee on Dam Safety существует отдельная группа, решающая вопросы, связанные с локальной внутренней эрозией тела насыпных ГТС — Task Group on Internal Erosion. Схожим вопросам посвящена и работа European Working Group on Internal Erosion, входящая в состав International Commission on Large Dams. Вопросами, связанными с локальными фильтрационными нарушениями, приводящими к внутренней эрозии сооружений, занимаются М. А. Foster, М. Spannagle, R. Fell, J. L. Sherard, M. Smith, K. Radzicki, A. Nilsson, F. Mercier, D. Marot, S. Johansson, S. J. Garner.

2. РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ МНОГОУРОВНЕВЫХ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МОНИТОРИНГА ХВОСТОХРАНИЛИЩ

2.1. Методические подходы к проведению многоуровневых комплексных исследований

Строительство хвостохранилищ обогатительных фабрик горнодобывающих предприятий западной части Российского сектора Арктики производилось, как правило, на относительно слабых грунтах в оврагах или котловинах рек [27, 151, 152]. Основные данные по ним в привязке к действующим здесь горнодобывающим предприятиям приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Основные данные по хвостохранилищам западной части Российского сектора Арктики

Горнопромышленное предприятие	Хвостовые отходы обогатительных фабрик	Площадь		Высота дамб, м	Объем		Количество, млн т	Класс опасности
		тыс. м ²	га		тыс. м ³	л		
КФ АО «Апатит»	АНОФ-1	1200	120	0–30	59500	$59,5 \cdot 10^9$	136,8	Н. д.
КФ АО «Апатит»	АНОФ-2	16500	1650	60–70	318400	$318,4 \cdot 10^9$	732,3	I
КФ АО «Апатит»	АНОФ-3	11500	1150	52	77600	$77,6 \cdot 10^9$	178,5	I
АО «Кольская ГМК», Печенганикель	ОФ 1	9000	900	15–45	151400	$151,4 \cdot 10^9$	348,2	I
	ОФ 2	1300	130	Н. д.	7900	$7,9 \cdot 10^9$	18,1	I
	Металлургическое производство	900	90	Н. д.	30200	$30,2 \cdot 10^9$	69,4	Н. д.
АО «Кольская ГМК», Североникель	Металлургическое производство	900	90	Н. д.	30900	$30,9 \cdot 10^9$	71,1	Н. д.
АО «Ковдорский ГОК»	АБОФ	12300	1230	50–63	160000	$160 \cdot 10^9$	367,9	II
АО «Олкон»	ОФ	10500	1050	30–50	211800	$211,8 \cdot 10^9$	487,0	II
ГОК «Олений ручей» АО «СЗФК»	ОФ	2800	280	10–20	9500	$9,5 \cdot 10^9$	21,8	II

Как следует из табл. 2.1, площадь хвостохранилищ может достигать 16,5 млн м² (1650 га), с объемом заполненной чаши — более 318 млн м³ ($318,4 \cdot 10^9$ л), и весом общей массы хвостовых отложений — до 732 млн т. Высота ограждающих дамб достигает 70 м, что превышает высоту 5-этажного дома почти в 5 раз. Хвостохранилища региона относятся к категории особо опасных объектов, с классом опасности I–II.

Вследствие этого, гидрогеологический режим месторасположения хвостохранилищ как в силу высокого уровня естественных грунтовых вод, так и постоянных водонасыщенных пульповых складирований хвостов обогатительных фабрик значительно ухудшился [152]. Прежде всего, это привело к формированию повышенного порового давления воды в грунтах всех ГТС хвостохранилища. В результате, эффективное напряжение в грунтах оказывается низким, и для надежной эксплуатации хвостохранилища, и для обеспечения устойчивости дамбы должны быть приняты периоды времени, в течение которых происходит промежуточное уплотнение грунтов за счет их консолидации [19, 30, 130, 152]. Вследствие консолидации, за счет уплотнения грунтов, избыточное поровое давление воды рассеивается и снижается, а грунт может приобрести «скелетную» жесткость, обеспечивающую сдвиговую прочность, необходимую для эксплуатации дамбы [152, 153].

Произошедшие разрушения дамб/плотин на золотоносном прииске в Красноярском крае, а также негативные инциденты и крупные аварии гидротехнических сооружений в других странах (Брумадинью, Бразилия; Айка, Венгрия; Инд, Пакистан и др.), приведшие к гибели людей и огромным социально-экономическим потерям [21, 22, 64], ставят во главу угла необходимость постоянного всестороннего контроля и диагностики состояния таких сооружений. При этом основная проблема заключается в том, что зарождение опасных фильтрационно-деформационных процессов происходит в подповерхностных ослабленных и неоднородных зонах грунтов, первоначально скрытых от визуальных и наземных наблюдений. Проявления этих процессов могут быть зафиксированы на ранней стадии только с применением исследований разного масштаба и на различных уровнях, позволяющих в том числе контролировать все гидротехническое сооружение в целом, а также сопряженные с ним природно-технические системы.

Для этих целей были разработаны методические подходы к проведению многоуровневых комплексных исследований и мониторинга [133, 154–159], интегрирующие, с одной стороны, необходимые современные методы постоянного контроля и диагностики гидротехнических сооружений как открытых динамических природно-технических систем и ориентированные, с другой стороны, на оперативное выявление на ранних стадиях геоиндикаторов потери прочности и устойчивости, снижения надежности сооружения в целом (рис. 2.1).

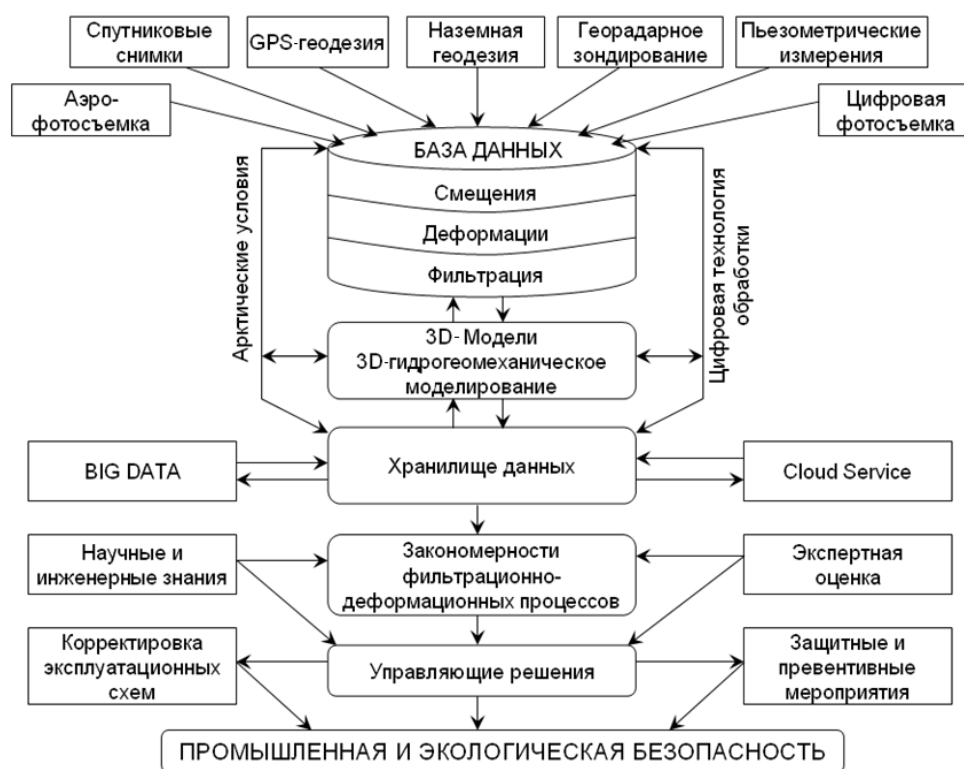


Рис. 2.1. Структура методологических основ комплексных многоуровневых исследований гидротехнических сооружений горнодобывающих предприятий западной части Российского сектора Арктики

Методология мониторинга гидрогеомеханического состояния ГТС хвостохранилища основана на комплексировании, с учетом арктических условий, мультидисциплинарных режимных наблюдениях на различных уровнях, соотнесенных с земной поверхностью: подповерхностном, наземном, воздушном, спутниковом, компьютерном (рис. 2.2). В основу положен принцип комбинирования мультидисциплинарных исследований, включающих в себя: наземные и GPS-геодезические, гидрогеологические, геофизические и геотехнические измерения, а также подповерхностные, поверхностные (наземные), воздушные и спутниковые георадарные съемки. Мониторинг базируется на проведении режимных измерений на различных уровнях: подповерхностном (гидрологические измерения, георадарное зондирование, сейсмотомография), наземном (геодезические наблюдения, лазерное и радарное сканирование), воздушном (тепловая и радарная аэрофотосъемки с применением БПЛА), дистанционном (GPS-геодезия, оптические, спектральные и радарные снимки), компьютерном (3D-модели, гидрогеомеханическое моделирование).



Рис. 2.2. Структура комплексных исследований и мониторинга ГТС хвостохранилища горнодобывающего предприятия [152]

Методологические основы комплексного многоуровневого мониторинга гидрогеомеханического состояния гидротехнических сооружений горнодобывающих предприятий западной части Российского сектора Арктики включают в себя: многоуровневые мультидисциплинарные наблюдения, цифровую обработку, систематизацию и критериальный анализ, обоснование принятия управляющих решений по обеспечению промышленной и экологической безопасности.

Мониторинговыми наблюдениями формируется база данных основных нормируемых показателей: смещения, деформации, фильтрации. Комплексирование и, в некоторых случаях, синхронизация методов и наблюдений обеспечит эффект иерархичности: от микрочастиц и миллиметрового уровня до гидротехнической системы в целом размером в десятки километров.

Выявляются закономерности фильтрационно-деформационных процессов, анализ и интерпретация которых с использованием научно-технических знаний (нормативно-методических документов) и экспертных оценок дает основу для принятия управляющих решений. В случае потенциально опасных процессов возможна как корректировка эксплуатационных схем, так и применение защитных и превентивных мероприятий, что позволит обеспечить промышленную и экологическую безопасность ГТС хвостохранилища.

Это позволяет решать оперативные и прогностические задачи диагностики и контроля в масштабной иерархии: от всего контролируемого объекта (десятки километров) до локальных компонентов (сотни метров) и фрагментов (сантиметры). Созданные методологические основы комплексного многоуровневого мониторинга гидротехнических сооружений реализованы на горнодобывающих предприятиях Кольского полуострова: АО «Ковдорский ГОК», АО «Кольская ГМК», КФ АО «Апатит», ГОК «Олений ручей».

2.2. Комплексирование мультидисциплинарных методов

Мониторинг гидротехнических сооружений базируется на комплексировании мультидисциплинарных режимных исследований на различных уровнях, соотнесенных с земной поверхностью: подповерхностном (гидротехнические измерения, пьезометрические и скважинные регистрации, георадарное подконтурное сканирование [160–163], сейсмотомография [164, 165]), поверхностном (визуальные наблюдения, фотофиксация, геодезические съемки и измерения, лазерное и радарное поверхностное сканирование); надповерхностном (фото, тепловая и радарная аэрофотосъемки с применением БПЛА); удаленном (GPS-геодезия, оптические, спектральные и радарные снимки космических аппаратов [166]), компьютерном (3D-модели, геомеханическое, гидродинамическое и фильтрационно-деформационное моделирование, консолидация [167–169]) (рис. 2.2, 2.3).

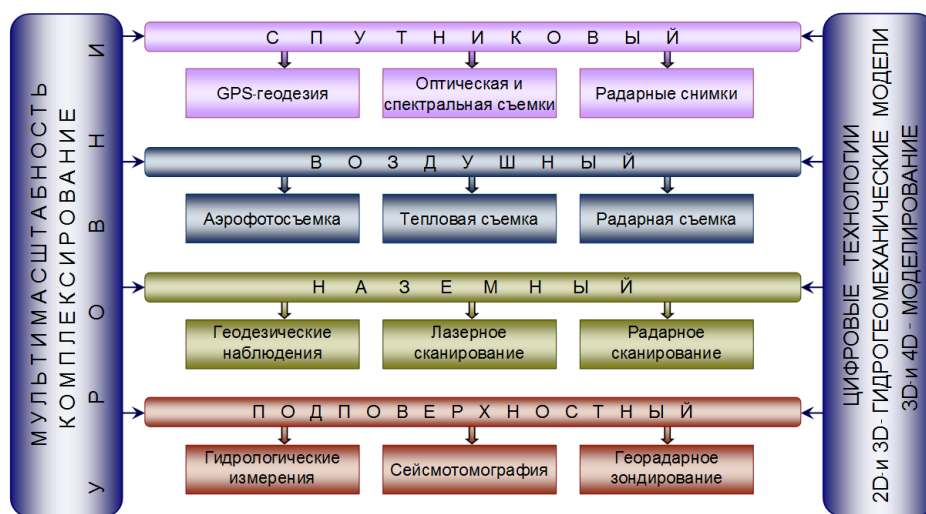


Рис. 2.3. Концепция комплексирования мультидисциплинарных методов и средств наблюдений для целей мониторинга ГТС хвостохранилища

Комплексирование таких методов и средств при мониторинге обеспечивает эффект мультимасштабности: от микрочастиц, зерен, скелета грунта (миллиметровый уровень) до отдельных сооружений и гидротехнической системы в целом и (метры и километры) (рис. 2.4).

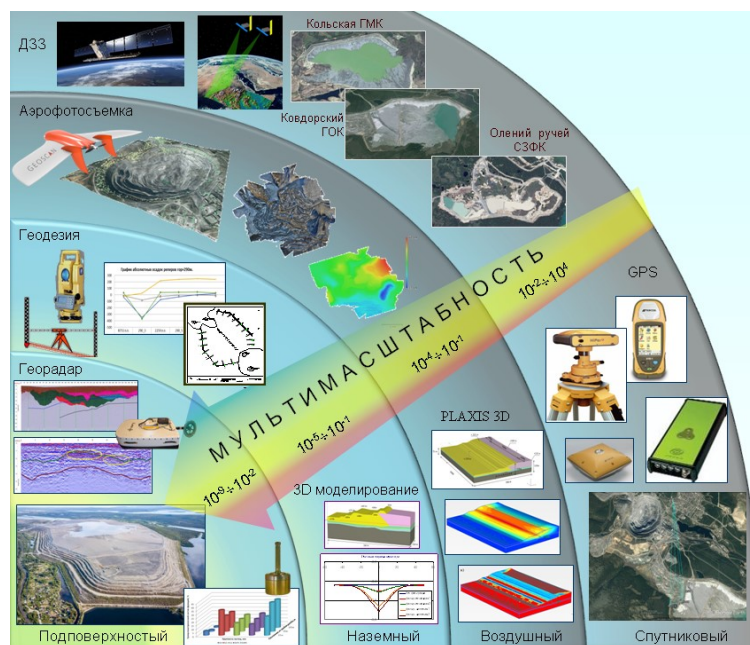


Рис. 2.4. Эффект мультимасштабности при комплексировании междисциплинарных методов и средств мониторинга ГТС хвостохранилища

Методологические подходы к комплексированию междисциплинарных методов и средств для целей мониторинга апробированы применительно к гидротехническим сооружениям основных горнопромышленных предприятий Кольского полуострова.

Комплексные многоуровневые геофлюидомеханические исследования и мониторинг хвостохранилищ выполняются в рамках тематики НИР на регулярной основе для основных горнопромышленных предприятий Мурманской области: АО «Ковдорский ГОК» («Еврохим»), АО «Кольская ГМК» («Норникель»), КФ АО «Апатит» («ФосАгро»), ГОК «Олений ручей» «СЗФК» («Акрон»), АО «ОЛКОН» («Северсталь»). Наряду с традиционными методами исследований и контроля внедряется комплексный подход к оценке безопасности гидротехнических сооружений, основанный на комбинировании георадарного зондирования, GPS-съемки, анализе спутниковых оптических и радарные снимков, компьютерном 4D-моделировании (с учетом фактора времени). Такой подход позволяет реализовать принципы мультимасштабности (от миллиметров — размеры зерен хвостовых отложений, до километров и десятков километров — все хвостохранилище в целом) и многоуровневости (данные по отношению к дневной поверхности: подповерхностные, поверхностные, надповерхностные (воздушные и космические)). Тем самым решаются оперативные и прогностические задачи диагностики и контроля в масштабной иерархии: от всего контролируемого объекта (десятки километров) до локальных компонентов (сотни метров) и фрагментов (сантиметры).

2.3. Методические подходы к компьютерному моделированию хвостохранилищ

В исследованиях по теме в качестве аппарата расчета методом конечных элементов были использованы лицензионные программные комплексы Plaxis 2D и Plaxis 3D. Проведение расчетов Plaxis позволяет вычислять напряжения и давление воды (флюида) в породах (грунтах), рассчитать общие и ориентированные по осям координат перемещения (деформации), оценить поведение водонасыщенного массива пород и грунтов под воздействием прилагаемой нагрузки и др.

Основные возможности расчетного комплекса Plaxis [95, 170]:

- создавать расчетные схемы в режиме черчения CAD с учетом неоднородности строения массива горных пород, геометрии сооружения, действующих нагрузок и граничных условий;
- автоматически выполнять разбивку расчетной области на конечные элементы высокого порядка (6- или 15-узловые треугольные элементы) с возможностью общего и локального измельчения сетки;
- моделировать этапы возведения, условий работы конструкции и вмещающего массива;
- моделировать геологическую среду с применением моделей, апробированных в современных геотехнических расчетах (упругопластическая модель Кулона–Мора, модель слабых пород типа Cam–Clay, реологическая модель с учетом ползучести пород, упругопластическая модель упрочняющихся пород, упругопластическая модель анизотропных пород);
- создавать оперативные базы данных по физико-механическим характеристикам пород и конструкционных материалов, использованных в проектах;
- рассчитывать напряжения, деформации и давление воды в элементах системы «массив горных пород – сооружение»;
- оценивать несущую способность и устойчивость водонасыщенных сооружений (дамб, плотин, насыпей);
- рассчитывать избыточное поровое давление в процессе консолидации водонасыщенных грунтов;
- рассчитывать напорную и безнапорную фильтрации воды при установившемся и неустановившемся режиме;
- проводить оперативный визуальный анализ развития напряженного и деформированного состояний в любом элементе расчетной схемы на любом этапе расчетов с помощью графических материалов (таблицы, эпюры, изолинии, графики, анимационное представление) [170].

Пользовательский интерфейс программы Plaxis состоит из 4 подпрограмм: *Input* (Программа ввода данных), *Calculations* (Программа расчета), *Output* (Программа вывода данных) и *Curves* (Кривые).

Процесс моделирования в программе Plaxis можно условно разделить на несколько этапов: построение геометрической модели, задание нагрузок, граничных условий и параметров пород, построение сетки конечных элементов, определение начальных условий, расчеты и просмотр выходных данных.

При проведении исследований в качестве основных были приняты модели на основе следующих теорий механики грунтов: линейного деформирования грунта, фильтрационной консолидации, предельного напряженного состояния, нелинейного деформирования (пластического течения) [171].

Теория линейного деформирования грунта базируется на предположении, что при однократном нагружении (или разгрузке) зависимость между напряжениями и деформациями в грунтах линейна. Кроме того, при нагружении рассматривается лишь общая деформация грунта без разделения ее на упругую и пластическую составляющие. Первое допущение обеспечивает возможность использования для расчетов напряжений в массиве грунта аппарата теории упругости, а второе — при известных напряжениях рассчитывать конечные деформации основания. Использование теории линейного деформирования грунта всегда требует установления предела ее применимости.

В этом случае уравнения состояния модели теории линейного деформирования записываются в виде обобщенного закона Гука [171]:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] & \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy}; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] & \gamma_{yz} &= \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{yz}; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] & \gamma_{zx} &= \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{zx},\end{aligned}$$

где E — модуль общей линейной деформации; ν — коэффициент поперечного линейного расширения (коэффициент Пуассона).

Теорию линейного деформирования иногда называют теорией упругости грунтов. Формально это справедливо, так как она использует ее математический аппарат. Однако она рассматривает общие деформации, не разделяя их на упругие и пластические. Кроме того, нагружение и разгрузка грунта в теории линейного деформирования происходят по разным законам и описываются различными по величине характеристиками деформируемости грунта.

Модель теории линейного деформирования грунта обоснована трудами Н. П. Пузыревского [172], К. Терцаги [173], В. А. Флорина [174], Н. М. Герсевича [84], Н. А. Цытовича [82]. Она наиболее распространена в инженерной практике благодаря своей простоте и возможности использования хорошо разработанного математического аппарата теории упругости для описания напряженно-деформированного состояния грунтов.

Теория фильтрационной консолидации описывает деформирование во времени полностью водонасыщенного грунта (грунтовой массы). Принимается, что полное напряжение, возникающее в элементе грунта от приложенной нагрузки, разделяется на напряжения в его скелете (эффективные напряжения) и давление в поровой воде (поровое давление). В различных точках массива грунта под действием нагрузки возникают разные значения порового давления. Вследствие этого образуется разность напоров в поровой воде и происходит ее отжатие в менее нагруженные области массива. Одновременно под действием эффективных напряжений происходят перекомпоновка частиц и уплотнение грунта.

Математическое описание этого процесса базируется на основной предпосылке о неразрывности среды, сформулированной академиком Н. Н. Павловским [175], т. е. считается, что уменьшение пористости грунта (его уплотнение) пропорционально расходу воды (оттоку воды из его пор). Следствием этого является важное положение о том, что скорость деформации грунта будет находиться в прямой зависимости от скорости фильтрации в нем поровой воды. Поэтому основной его характеристикой, определяющей время протекания процесса фильтрационной консолидации, является коэффициент фильтрации. В теории фильтрационной консолидации скелет грунта принимается линейно деформируемым.

Следует отметить, что в инженерной практике используются сложные модели теории консолидации, учитывающие трехкомпонентный состав грунта, сжимаемость поровой воды, ползучесть скелета и другие процессы, возникающие в грунте при его деформациях. Такие модели описаны в трудах Н. М. Герсевича [84], В. А. Флорина [174], М. А. Био [176], Ю. К. Зарецкого [177], З. Г. Тер-Мартirosяна [178], В. А. Черных [179], В. Н. Николаевского [180–182], Дж. Гирсма, Ю. О. Кузьмина [183] и др.

Теория предельного напряженного состояния грунта рассматривает такое напряженное состояние, когда в массиве грунта от действующих нагрузок сформировались значительные по размерам замкнутые области, в каждой точке которых устанавливается состояние предельного равновесия. Потому эту теорию часто называют теорией предельного равновесия грунта.

Она позволяет определить предельную нагрузку на основание (его предельная несущая способность), но при этом невозможно определить деформации грунта. Решения теории предельного равновесия используются также для общих расчетов устойчивости сооружений и оснований, откосов и склонов, определения давления грунта на ограждения. В основе современных решений теории предельного равновесия лежат фундаментальные работы В. В. Соколовского [184].

Теории нелинейного деформирования грунтов применяются для расчетов напряженно-деформированного состояния и оценки прочности оснований и грунтовых сооружений, когда связь между напряжениями и деформациями существенно нелинейна, поэтому они часто называются теориями пластичности грунтов.

Значительное распространение в инженерной практике получила деформационная теория пластичности, основанная на теории малых упругопластических деформаций академика А. А. Ильюшина [185–187]. В наиболее простом виде эта теория исходит из допущения, что объемная и сдвиговая деформации зависят только от среднего нормального напряжения и интенсивности касательных напряжений соответственно, т. е. $\varepsilon_V = \psi(\sigma_m)$; $\gamma_i = f(\tau_i)$. Однако деформационная теория пластичности не учитывает некоторые процессы, происходящие в грунте. Более точные решения можно получить с помощью теории пластического течения. Однако это приводит к усложнению экспериментов для определения параметров уравнения состояния и расчетного аппарата анализа. Теорию пластического течения применяют при решении сложных задач гидротехнического строительства.

Различные модификации теорий нелинейного деформирования грунтов представлены в работах С. С. Вялова [188, 189], А. Л. Гольдина [190], Ю. К. Зарецкого [191], А. Л. Крыжановского [192, 193], В. Г. Федоровского [194], В. И. Соломина [195], В. Н. Николаевского [181, 182] и др.

Программный комплекс Plaxis 3D имеет ряд встроенных моделей породных грунтов, которые были разработаны для выполнения расчетов реальных геотехнических задач. В связи с этим он используется в первую очередь как инструмент геотехнического моделирования. Модели породного грунта рассматриваются как качественное представление его поведения, а входящие в них параметры используются для количественной оценки поведения породного грунта. Разработчики программы Plaxis и входящих в нее моделей грунтов отмечают, что моделирование реальных условий является некоторым приближением, включающим в себя определенные погрешности моделей и вычислений [196, 197]. Кроме того, с ними следует согласиться, что точность расчетов существенно зависит от профессионального опыта исследователя в вопросах моделирования реальных инженерных задач, понимания моделей грунтов и их ограничений, выбора расчетных параметров и критической оценки результатов вычислений.

Ниже приведено краткое описание использованных нами моделей Plaxis 3D (по [196–197]).

Линейно-упругая модель (модель LE). Она основана на законе Гука для изотропной упругости и использует два основных параметра: модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν . Как правило, линейно-упругая модель применяется для моделирования скальных пород, а также жестких объемных тел, находящихся в породном грунте (или сопряженных с ним), например, бетонные стены, фундаменты, скальные включения, основания и т. п.

Модель Мора–Кулона (модель MC). Упруго-идеально-пластическая модель Мора–Кулона использует 5 входных параметров (2 параметра жесткости и 3 параметра прочности): модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν — параметры упругости грунта, угол внутреннего трения φ и коэффициент сцепления c — параметры пластичности грунта и угол дилатансии ψ . Модель Мора–Кулона представляет собой приближение первого уровня для описания поведения грунта или горной породы. Как правило, данная модель применяется при первичном расчете рассматриваемой задачи. При этом для каждого выделенного слоя определяется постоянная средняя жесткость. Вследствие этого, так как жесткость постоянна, расчеты выполняются относительно быстро, и исследователь может получить предварительное представление о деформациях исследуемого объекта.

Упругопластическая модель с упрочнением грунта (модель HS). Она представляет собой усовершенствованную модель. Здесь, как и в модели Мора–Кулона, предельное напряженное состояние описывается с помощью угла трения φ , сцепления c и угла дилатансии ψ . Жесткость грунта задается 3 различными входными показателями: жесткость при трехосном нагружении E_{50} , жесткость при разгрузке E_{ur} и жесткость при нагружении в одометре E_{oed} . В качестве значений по умолчанию предлагаются соотношения $E_{ur} \approx 3E_{50}$ и $E_{oed} \approx E_{50}$. Однако мягкие и жесткие грунты, как правило, характеризуются другими отношениями E_{oed} и E_{50} , которые могут быть заданы исследователем.

В отличие от модели Мора–Кулона, упругопластическая модель с упрочнением грунта учитывает также зависимость модуля жесткости от напряжений. Это означает, что все параметры жесткости увеличиваются с повышением давления. Таким образом, все 3 входных показателя жесткости относятся к определенному эталонному напряжению, которое обычно принимается равным 100 кПа (1 бар).

Кроме упомянутых выше параметров модели, важную роль при решении большинства задач, связанных с деформацией грунтов, играет исходное состояние грунта, который может находиться, например, в состоянии переуплотнения. Это может быть учтено при генерации начальных напряжений.

Упругопластическая модель с упрочнением грунта и жесткостью при малых деформациях (модель HSsmall). Она представляет собой модификацию рассмотренной выше упругопластической модели с упрочнением грунта, учитывающую увеличение его жесткости при малых деформациях. При низких уровнях деформации большинство грунтов проявляют жесткость, превышающую жесткость при условной («инженерной») деформации, причем эта жесткость нелинейно меняется в зависимости от деформации. Такое поведение описано в модели HSsmall с использованием дополнительного параметра, отражающего динамику изменения деформации, и 2 дополнительных параметров материала G_0^{ref} и $\gamma_{0,7}$. Параметр G_0^{ref} представляет собой модуль сдвига при малых деформациях, а параметр $\gamma_{0,7}$ — уровень деформации, при котором модуль сдвига снизился до 70 % от величины модуля сдвига при малых деформациях. В случаях эксплуатационных нагрузок модель HSsmall дает более точные значения перемещений, чем модель HS. При использовании в динамических задачах модель HSsmall позволяет учесть гистерезисное демпфирование материала.

Модель слабого грунта (модель SS). Она представляет собой модель типа Cam–Clay, специально предназначенную для моделирования первичного сжатия нормально уплотненных глинистых грунтов. Хотя ее возможности уступают упругопластической модели с упрочнением грунта, тем не менее она используется в настоящей версии программы и позволяет получать достоверные результаты.

Модель слабого грунта с ползучестью (модель SSC). Рассмотренная выше упругопластическая модель с упрочнением грунта (модель HS) подходит для всех типов грунтов, но она не учитывает эффект ползучести и релаксацию напряжений. Фактически, все грунты проявляют некоторую ползучесть, т. е. за первичным сжатием следует определенное вторичное уплотнение.

Последнее доминирует в основном в слабых грунтах — в нормально уплотненных глинах, илах и торфе. В связи с этим в Plaxis была включена модель слабого грунта с ползучестью (Soft Soil Creep Model). Она является достаточно новой и предназначена для решения задач, связанных с осадкой фундаментов, насыпей и т. п. В задачах, связанных со снятием нагрузки, что обычно имеет место при строительстве туннелей или разработке грунта, модель ползучести слабых грунтов сопоставима с относительно простой моделью Мора–Кулона. Как и для упругопластической модели упрочняющегося грунта, для модели ползучих грунтов весьма важными являются соответствующие начальные условия грунта. Эти условия включают в себя данные по напряжениям предварительного уплотнения, так как она учитывает эффект переуплотнения грунта.

Модель трещиноватой скальной породы (модель JR). Общепринято, что ненарушенная горная порода характеризуется полностью упругим поведением с постоянными параметрами жесткости E и ν . В Plaxis 3D модель трещиноватой породы представляет собой анизотропную упругопластическую модель, специально предназначенную для моделирования поведения горной породы с учетом стратификации и направлений разломов. То есть она является анизотропной моделью первого порядка, содержащей лишь ограниченное количество характеристик реального поведения горных пород. Пластические свойства могут иметь место максимум в трех направлениях (плоскостях) сдвига. Каждая из плоскостей имеет свои параметры прочности на сдвиг ϕ_i и c_i и параметр прочности на растяжение t_i . Максимальное напряжение сдвига линейно зависит от нормального напряжения и не выражается реальной кривой. В направлении стратификации (напластования) могут быть заданы пониженные упругие свойства.

Модифицированная модель Cam–Clay (модель MCC). Она хорошо известна из международной литературы по вопросам моделирования поведения грунтов (например, [197]). Эта модель критического состояния грунта может быть использована для моделирования поведения нормально уплотненных слабых грунтов. Она предполагает наличие логарифмической зависимости между относительной объемной деформацией и средним эффективным напряжением. Предназначена в основном для моделирования нормально уплотненных глинистых грунтов.

Модель Хука–Брауна (модель HB). Она представляет собой изотропную упруго-идеально-пластическую модель, основанную на критерии разрушения [198]. Этот критерий, нелинейно зависящий от напряжений, описывает разрушение при сдвиге и разрушение при растяжении с помощью непрерывной функции и хорошо известен геологам и горным инженерам. Кроме упругих параметров (E и ν), модель содержит также следующие параметры: прочность ненарушенной породы при одноосном сжатии (σ_{ci}), геологический индекс прочности (GSI) и коэффициент нарушения (D).

Кроме перечисленных выше встроенных моделей, возможно самостоятельное создание так называемых пользовательских моделей.

На основании вышесказанного можно сделать выводы, что программный комплекс Plaxis 3D имеет в своем арсенале модели породного грунта разной степени сложности, которые могут быть применены для решения современных геотехнических задач.

Преимущество простых моделей заключается в меньшем количестве используемых входных параметров, а также в простоте и ясности определяющих уравнений. Однако результаты моделирования в этом случае могут быть достаточно грубыми и плохо согласующимися с реальными данными. Сложные, усовершенствованные модели позволяют описать поведение породного грунта более точно, но они требуют более широкого набора его характеристик, а также достаточной осведомленности и опытности при выборе модели, ее параметров и анализе полученных результатов расчетов.

Наиболее используемая в Plaxis 3D из встроенных моделей породных грунтов — модель Кулона–Мора. Эта нелинейная модель базируется на параметрах породных грунтов, которые в большинстве случаев известны. Она может применяться, например, для вычислений реальных конечных нагрузок, а также для расчета запаса прочности. Модель рыхлых грунтов используется для нелинейного анализа сжатия нормально консолидированного рыхлого грунта. Модель мягких ползучих грунтов — это усовершенствованная версия модели мягких грунтов, включающая моделирование второй стадии ползучести. Упругая модель, а также модель Кулона–Мора могут применяться для условно более «твердых» грунтов таких, как сверхконсолидированные глины и пески (упругопластическое деформирование).

Применение функциональных возможностей программного комплекса Plaxis 3D

Для решения задач фундаментальных и прикладных исследований нами использованы следующие функциональные возможности Plaxis 3D: поэтапное возведение, расчет пластичности, консолидация, усовершенствованный анализ Лагранжа, расчет коэффициента устойчивости, контроль длины дуги. При этом расчетные фазы (варианты) для каждого проекта (исследуемого объекта) определялись как вначале моделирования, так и непосредственно перед выполнением вычислений по варианту.

Поэтапное возведение. Нами в исследованиях была использована возможность моделировать процесс строительства ограждающей дамбы и процесс заполнения хвостохранилища. Это позволило получить достаточно реалистическую оценку соответствующего нарастания напряжений и перемещений, вызванных строительством дамбы и последующим заполнением хвостохранилища. Кроме того, моделирование поэтапного строительства было использовано для оценки изменений в распределении порового давления воды в грунтах.

Расчет пластичности. В этих расчетах использовались дополнительные коэффициенты нагрузки для активизации установленных нагрузок (сосредоточенных или распределенных), установленных перемещений, веса и усадки грунта (применялись для моделирования состояния ограждающих дамб хвостохранилища).

Консолидация. В исследованиях выполнялся анализ консолидации в целях оценки тенденций снижения избыточного порового давления воды во времени в зависимости от коэффициента проницаемости для различных слоев грунта, а также для зон повышенной фильтрации. При этом применялась процедура автоматического пошагового изменения времени.

Усовершенствованный анализ Лагранжа. Эта опция использовалась в некоторых моделируемых вариантах (например, зоны повышенной фильтрации, недренируемые грунтовые слои малой мощности) для постоянной корректировки сетки конечных элементов во время расчета.

Расчет коэффициента устойчивости. Обычно для оценки устойчивости используется коэффициент запаса, который определяется как отношение разрушающей нагрузки к действующей нагрузке. Представляется, что такой расчет применим для скальных пород, но для насыпных сооружений и природно-технических грунтовых систем необходим несколько иной подход. Для указанных конструкций более подходит используемое в механике грунтов понятие «коэффициент устойчивости», который определяется в Plaxis как отношение действующей силы к минимальной требуемой для равновесия. Нами выполнены расчеты коэффициента устойчивости для различных дамб.

Контроль длины дуги. Это функция позволяет точно рассчитать разрушающие нагрузки и выявить механизм разрушения. В обычных расчетах контролируемых нагрузок процедура итерации прекращается, когда возрастающая нагрузка превысит пиковую. При использовании метода контроля длины дуги приложенная нагрузка понижается до такого уровня, чтобы зафиксировать пиковую нагрузку и любые остаточные нагрузки. Нами эта функция использована в тестовом расчете.

2.4. Разработка компьютерных 3D-моделей хвостохранилищ

Принимая во внимание, что ГТС хвостохранилища представляет собой огромную природно-техническую систему, площадью сотни миллионов квадратных метров и протяженностью ограждающих дамб десятки километров, построение гидрогеомеханических 3D-моделей ГТС хвостохранилищ базировалось на методических подходах к моделированию линейных протяженных объектов. В случае с ГТС хвостохранилища такими линейными протяженными объектами являются ограждающие дамбы. Поэтому для имитирования системы «хвостохранилище – ограждающая дамба – подстилающее геологическое основание» выбирались наиболее характерные (типовые) фрагменты системы, для которых создавались компьютерные 3D-гидрогеомеханические модели (рис. 2.5).

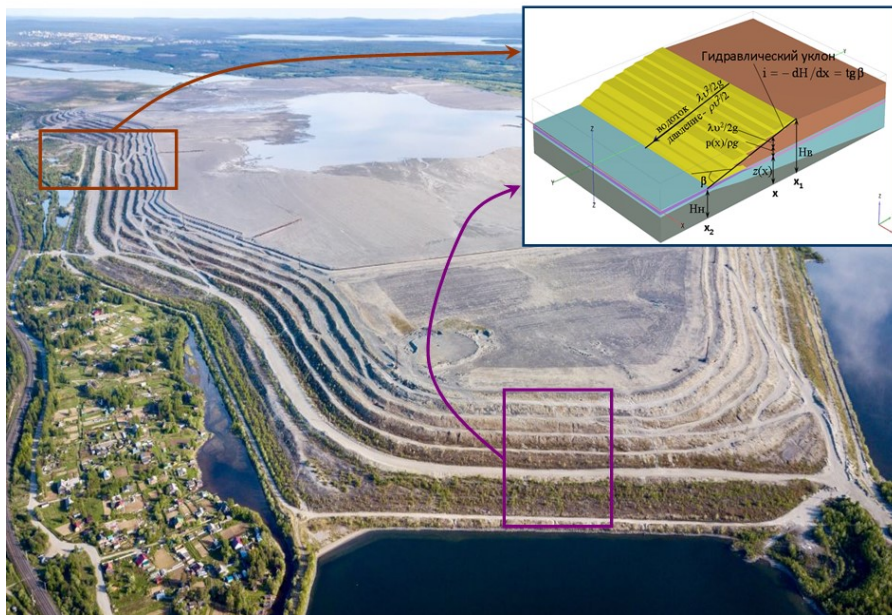


Рис. 2.5. Методический подход к построению гидрогеомеханических 3D-моделей ГТС хвостохранилища (по фото В. Петкевича)

При выполнении исследований разработана гидрогеомеханическая 3D-модель ГТС хвостохранилища горнорудного предприятия как открытой природно-технической системы, подвергающейся как экзогенным, так и эндогенным нагрузкам. Отличительной особенностью модели от известных является возможность реализации совместных фильтрационно-деформационных расчетов, в которых учитываются гидростатические (степень водонасыщения грунтов, разность напоров на верховом и низовом склонах дамбы), 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. 2.6).

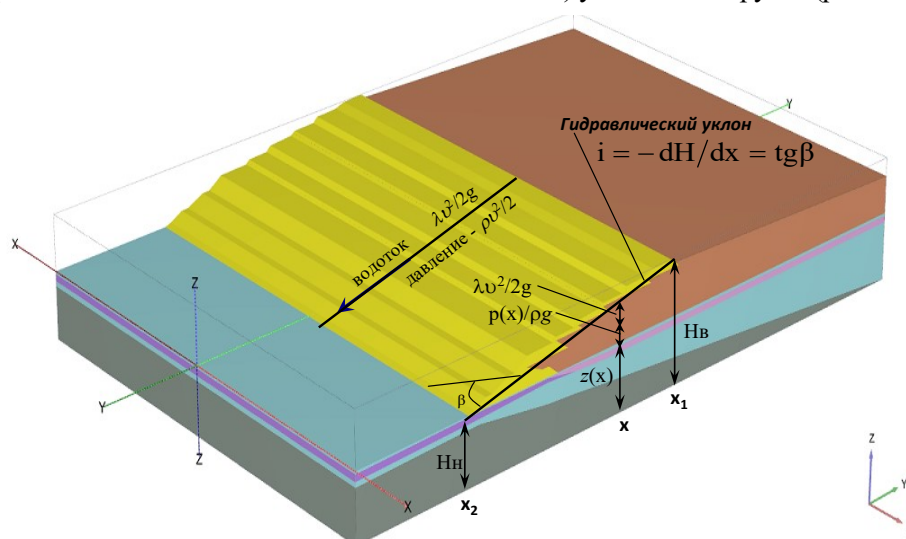


Рис. 2.6. Гидрогеомеханическая 3D-модель ГТС хвостохранилища горнодобывающего предприятия: H_v и H_n — высота уровня воды на верховом и низовом склонах дамбы соответственно; $z(x) = H_v - H_n$ — геометрический напор в сечении x ; $p(x)/\rho g$ — пьезометрический напор; $\lambda v^2/2g$ — скоростной напор фильтрации; λ — коэффициент гидравлического сопротивления; v — скорость фильтрации воды; g — ускорение силы тяжести; β — угол гидравлического уклона; ρ — плотность воды; x — рассматриваемое сечение

Построение модели выполнялось в следующей последовательности:

- создание геометрии фрагмента хвостохранилища;
- построение расчетной модели инженерно-геологического строения основания, насыпных грунтов и хвостовых отложений;
- задание свойств грунтов и пород (параметры деформационных, прочностных и фильтрационных свойств);
- задание граничных условий и нагрузок от веса пород и воды;
- разбивка геометрической модели на конечные элементы;
- проведение компьютерного тестового моделирования (расчетов);
- обработка полученных тестовых результатов с возможностью получения данных для интерпретации;
- корректировка модели по данным натурных наблюдений;
- подтверждение адекватности созданной модели натурному объекту.

Геометрическая 3D-модель фрагмента системы «хвостохранилище – ограждающая низовая дамба – геологическое основание» (рис. 2.7) создавалась на основе данных буровых колонок и результатов инженерно-геологических изысканий.

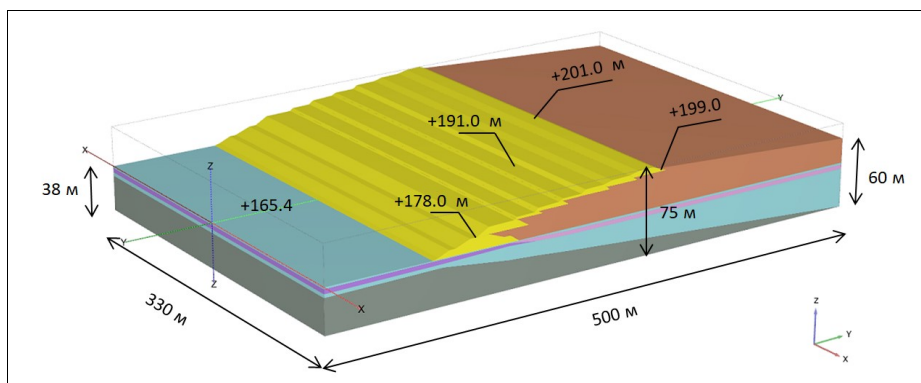


Рис. 2.7. Геометрическая 3D-модель фрагмента хвостохранилища (на примере ОФ ГОК «Олений ручей»)

На следующем этапе создавалась инженерно-геологическая модель с выделением основных слоев грунтов прежде всего в основании дамбы, и заданием для них параметров физико-механических свойств (рис. 2.8).

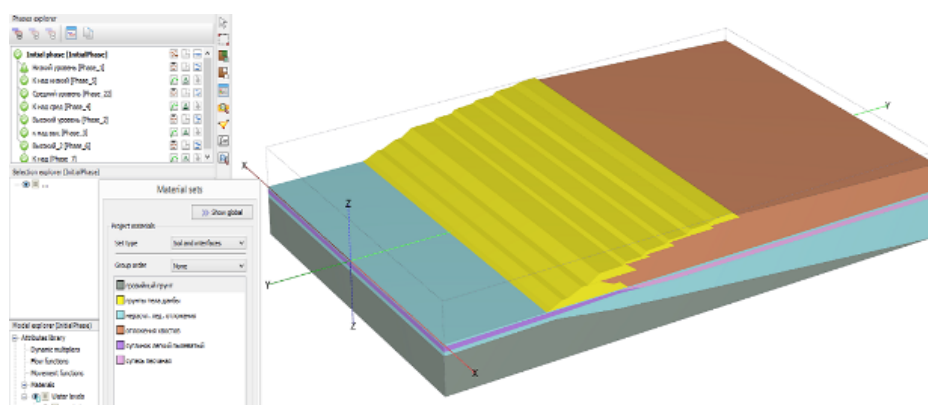


Рис. 2.8. Инженерно-геологическая 3D-модель фрагмента хвостохранилища (на примере ОФ ГОК «Олений ручей»)

Расчетные характеристики физико-механических свойств техногенных грунтов дамб и отложений естественного основания приняты по результатам геологического бурения и фильтрационных испытаний, выполненных Горным институтом в июне 2020 г. (табл. 2.2).

По принятым параметрам задавался стратиграфический разрез грунтов по геологическим колонкам (рис. 2.9).

Далее выполнялась разбивка гидрогеомеханической 3D-модели на конечные элементы (рис. 2.10).

Для целей исследования степени заполнения чаши хвостохранилища водой (с учетом ширины намывного пляжа, заполнение водой с отсутствием намывного пляжа, максимальное заполнение чаши) задавались соответствующие отметки уровня воды в хвостохранилище и выхода на низовом склоне (рис. 2.11).

Далее выполнялось компьютерное тестовое моделирование (расчеты) с обработкой полученных тестовых результатов и с возможностью получения данных для интерпретации. Проводилась корректировка модели по данным натурных наблюдений с подтверждением адекватности созданной модели натурному объекту.

Таблица 2.2

Параметры физико-механических характеристик грунтов,
принятые в гидрогеомеханической 3D-модели

Параметры	Ед. измерения	Хвосты (намывной грунт)	Грунты тела дамбы	Нерасчлененные ледниковые 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/m ³]	17,0	19,0	19,4	15,2	16,2	21,8
γ_{sat} (уд. вес насыщ. грунта)	[kN/m ³]	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/m ²]	30 000	50 000	50 000	1000	16700	34000
ν (коэф. Пуассона)	[-]	0,32	0,30	0,35	0,3	0,3	0,3
c_{ref} (сцепление)	[kN/m ²]	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

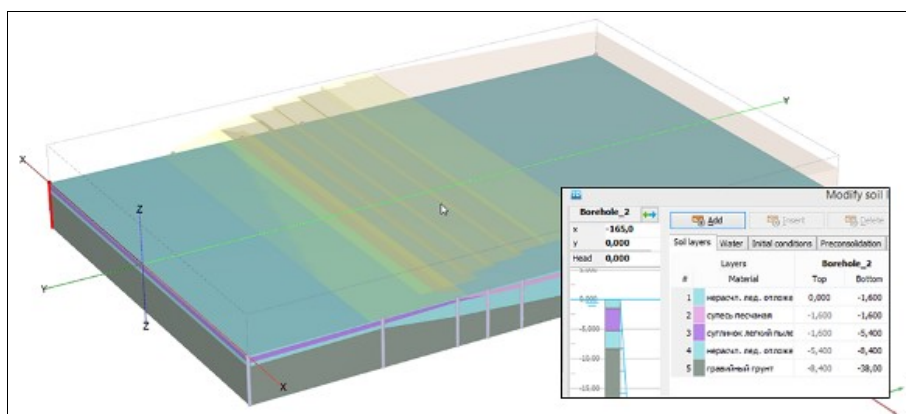


Рис. 2.9. Задание стратиграфического разреза грунтов по геологическим колонкам (на примере ОФ ГОК «Олений ручей»)

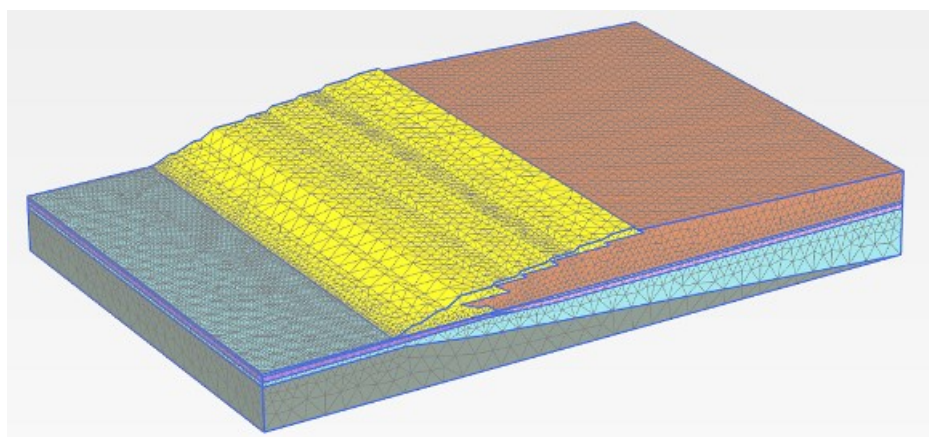


Рис. 2.10. Расчетная конечно-элементная 3D-модель фрагмента хвостохранилища (на примере ОФ ГОК «Олений ручей»)

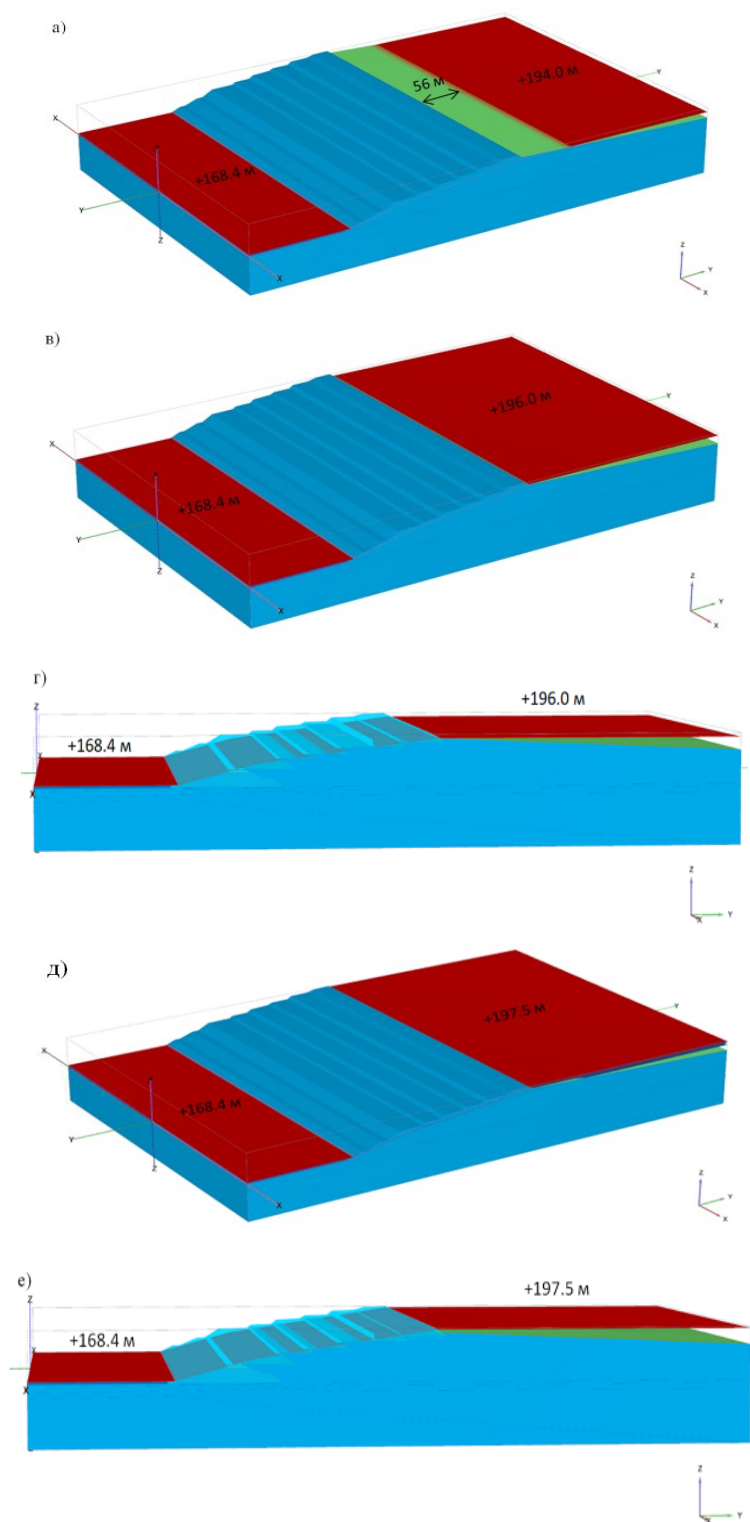


Рис. 2.11. Моделируемые уровни воды в хвостохранилище: а, б — с намытым пляжем; в, г — без пляжа; д, е — максимальное заполнение

В результате выполненных исследований созданы методические основы построения трехмерной гидрогеомеханической модели хвостохранилища обогатительной фабрики горнодобывающего предприятия, отличающиеся от известных учетом фактора времени в фильтрационно-деформационных расчетах и позволяющие исследовать трансформацию гидростатического состояния в стационарную фильтрацию, а при определенном сочетании параметров механической и фильтрационной устойчивости грунтов — в гидродинамику водотока и размыва дамбы [199, 200].

На основе разработанных методических основ созданы гидрогеомеханические 3D-модели ГТС хвостохранилищ АО «Ковдорский ГОК», АО «Кольская ГМК» (площадка в городе Заполярный), ГОК «Олений ручей», АО «Оленегорский ГОК», АНОФ-2 КФ АО «Апатит».

2.5. Моделирование ситуационного и прогнозного гидрогеомеханического состояния хвостохранилищ

Как правило, возведение ограждающих дамб при строительстве хвостохранилища обогатительной фабрики (ОФ) горнодобывающего предприятия производится на относительно слабых грунтах площадок в оврагах или котловинах рек. Естественный высокий уровень грунтовых вод на таких площадках обуславливает формирование повышенного порового давления в теле дамбы. В результате, эффективное напряжение в грунтах оказывается низким и для надежной эксплуатации хвостохранилища и обеспечения устойчивости дамбы должны быть приняты периоды времени, в течение которых происходит промежуточное уплотнение грунтов дамб. Вследствие этого, за счет уплотнения грунтов избыточное поровое давление рассеивается и снижается, а грунт может приобрести «скелетную» жесткость, обеспечивающую сдвиговую прочность, необходимую для эксплуатации дамбы.

Для того чтобы проанализировать процесс развития и рассеивания избыточного порового давления в водонасыщенных грунтах дамбы как функцию времени (автоматическая дискретизация по времени), было выполнено компьютерное моделирование деформационных и фильтрационных процессов (консолидация) с использованием программы Plaxis 3D на примере хвостохранилища ОФ одного из горнодобывающих предприятий Кольского полуострова. Расчеты консолидации были выполнены с использованием программных модулей, которые позволяют имитировать реалистичный процесс путем введения различных граничных условий для нагрузок и порового давления, а также заданием дополнительного параметра — временного интервала.

Для проведения исследований в среде Plaxis была создана гидрогеомеханическая 3D-модель фрагмента хвостохранилища, ограждающей дамбы и подстилающего геологического основания, адекватная геометрическим размерам, показанным на рис. 2.12.

Выполнено компьютерное параметрическое 4D-моделирование деформационных и фильтрационных процессов в ограждающей дамбе хвостохранилища по 11 вариантам с прогнозированием гидрогеомеханической ситуации вследствие консолидации грунтов на 1, 3, 5, 10, 15, 20, 30 и 50 день [167, 199].

На основе результатов выполненных вариантов компьютерного моделирования фильтрационно-деформационных процессов выявлены зависимости перемещения грунтов насыпной и намывной частей ограждающей дамбы от времени консолидации (рис. 2.13).

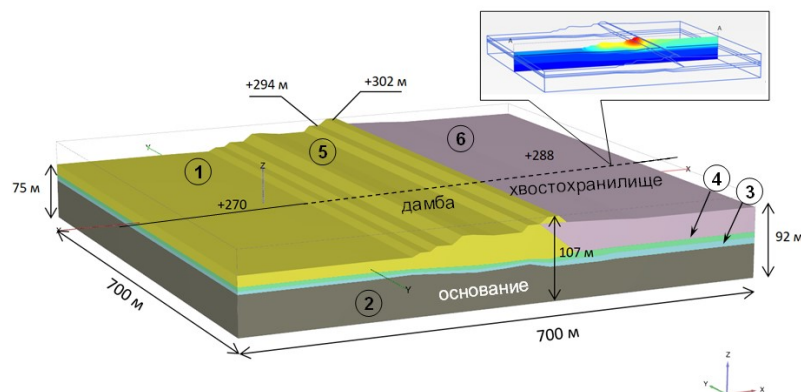


Рис. 2.12. Гидрогеомеханическая 3D-модель фрагмента хвостохранилища (на примере ОФ АО «Ковдорский ГОК»): 1 — техногенные грунты; 2 — основание — гранитогнейсы прочные; 3 — гравийно-галечники и пески; 4 — супеси и суглинки; 5 — грунты тела дамбы; 6 — хвостовые отложения

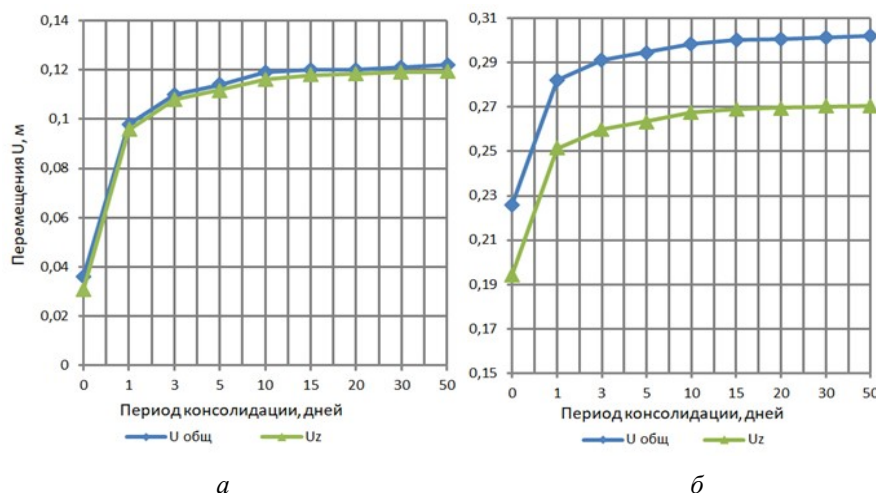


Рис. 2.13. Зависимости общих и вертикальных перемещения грунтов насыпной (а) и намывной (б) дамбы от времени консолидации

Установлено, что наиболее интенсивное уплотнение грунтов происходит непосредственно в первый день — значения перемещений грунтов увеличиваются практически в 2 раза. Затем в течение следующих 8–10 дней деформационные процессы постепенно затухают и далее гидрогеомеханическая ситуация полностью стабилизируется.

Следует отметить, что расчетные значения абсолютных перемещений намывной части хвостохранилища составляют 0,10–0,15 м, при этом это фактически полностью вертикальная усадка, которая может достигать 0,08–0,12 м (рис. 2.14). Для насыпной части (гребень и низовой откос) ограждающей дамбы общие перемещения грунтов составляют 0,27–0,32 м, при этом уплотнение до 5 см могут быть в вертикальном и до 2 см — в горизонтальном направлении. Такое распределение процессов консолидации объясняется тем, что из намывных грунтов происходит более интенсивное «отжатие» воды, и тем самым снижается активное поровое давление, частички грунтов более активно уплотняются вертикально, а насыпная часть ограждающей дамбы дополнительно испытывает субгоризонтальное давление со стороны намывных хвостовых отложений.

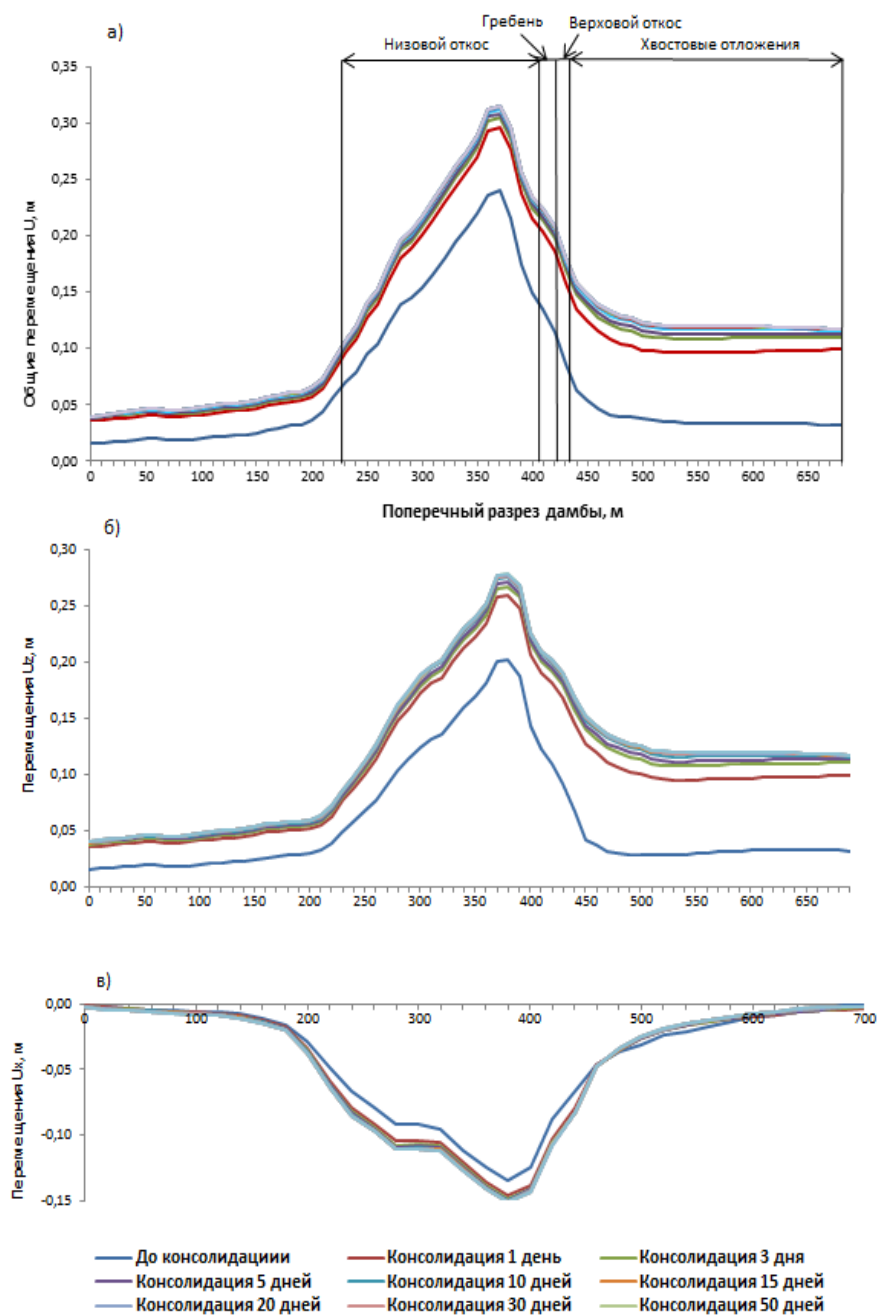


Рис. 2.14. Зависимости уплотнения грунтов по центральному сечению хвостохранилища от времени консолидации: *а* — общих (полных) $U_{\text{общ}}$; *б* — вертикальных U_z ; *в* — горизонтальных U_x

Принимая во внимание, что важной характеристикой консолидации грунтов является скорость их уплотнения, был выполнен соответствующий анализ, результаты которого представлены на рис. 2.15.

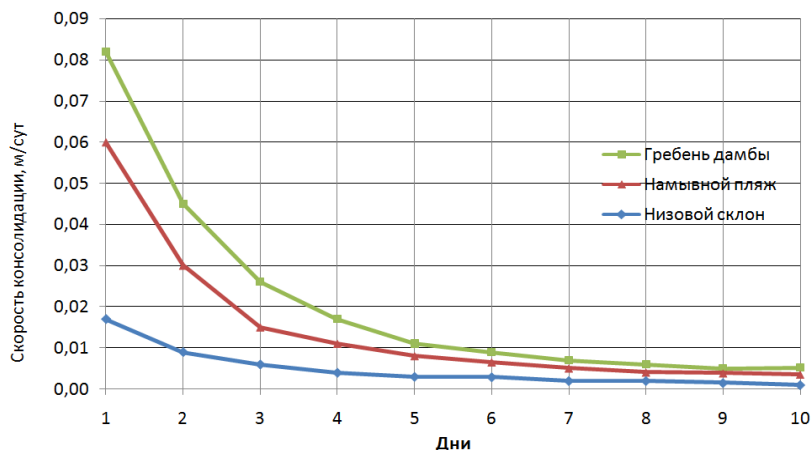


Рис. 2.15. Скорость консолидации грунтов ограждающей дамбы

Было выявлено, что скорость консолидации грунтов гребня насыпной дамбы, намывного пляжа и низового откоса насыпной дамбы имеют практически идентичный характер, с большей интенсивностью в гребне и в намывной части дамбы. Скорость консолидации грунтов низового склона ограждающей дамбы, где изначально уплотнение меньше, значительно ниже. Согласно результатам всех вариантов моделирования и характеру кривых на рис. 2.15, можно констатировать, что основное консолидирование грунтов произойдет в течение первых 10 дней, с последующим общим затуханием к 80-му дню. Выявленные закономерности предоставляют основу для практических рекомендаций по срокам следующего этапа наращивания дамб, т. е. следующий ярус дамбы необходимо наращивать не ранее 80 дней от завершения намыва (сброса пульпы) хвостовых отложений.

С использованием лицензионной программы Plaxis 3D было выполнено компьютерное моделирование и исследование разработанной гидрогеомеханической 3D-модели в целях выявления закономерностей формирования кривой депрессии (депрессионной плоскости) и прогнозирования уязвимых зон ГТС хвостохранилища (на примере ГОК «Олений ручей»).

Геомеханическое состояние исследуемого фрагмента ГТС хвостохранилища, характеризующее общими и поперечными перемещениями грунтов, представлено на рис. 2.16.

Результаты компьютерного моделирования по выявлению закономерностей формирования депрессионной плоскости, а также депрессионной кривой в поперечном сечении для принятых трех расчетных случаев представлены на рис. 2.17.

Выявленные закономерности позволяют выполнить сравнительный анализ рассчитанных значений градиента напора и коэффициента устойчивости с критериальными и нормативными для ГТС I класса опасности (рис. 2.18).

На примере ГТС хвостохранилища ГОК «Олений ручей» дана оценка фильтрационной устойчивости ограждающей дамбы для рассмотренных условий в зависимости от изменения уровня воды в чаше хвостохранилища. Выявлено, что рассчитанные значения градиента напора практически повсеместно ниже критического, за исключением случая максимального уровня и выхода воды на низовой склон. Рассчитанные значения коэффициента устойчивости больше нормативного при условии выхода дренирующейся воды на основание ограждающей дамбы. Следовательно, фильтрационная устойчивость ограждающей дамбы не будет обеспечиваться при превышении уровня воды в хвостохранилище отметки +195,6 м.

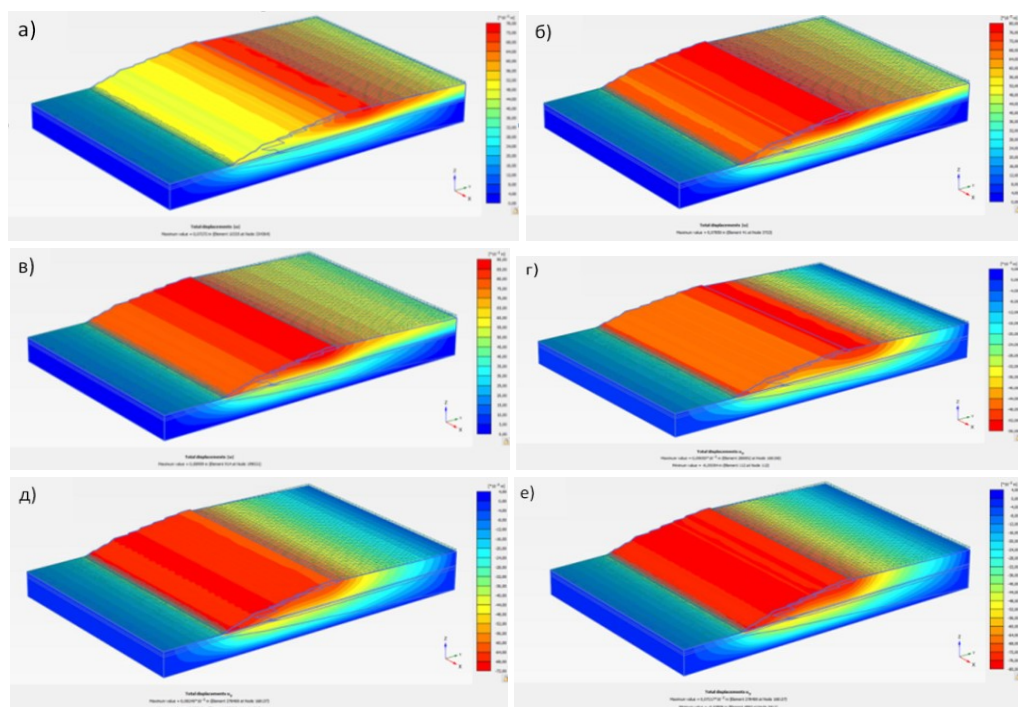


Рис. 2.16. Картины общих перемещений (а, б, в) и перемещений грунтов вкостр простирающей (поперек) оградяющей дамбы (г, д, е) для трех расчетных случаев: а, г — с намывным пляжем; б, д — без пляжа; в, е — максимальное заполнение

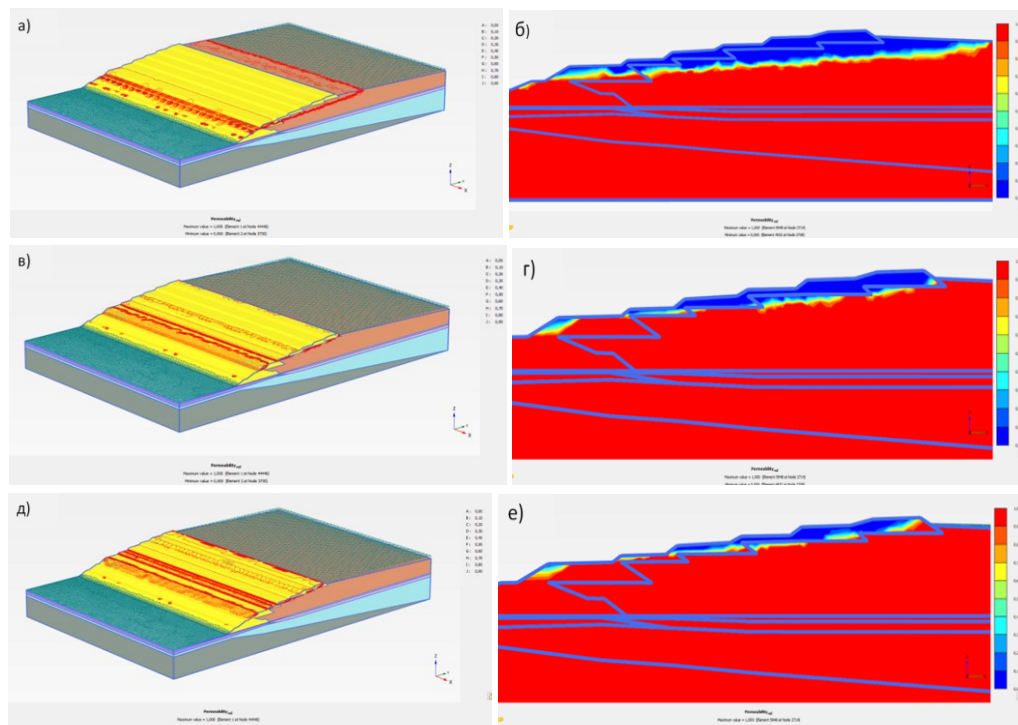


Рис. 2.17. Закономерности формирования депрессионной плоскости (а, в, д) депрессионной кривой в поперечном сечении (б, г, е) для принятых трех расчетных случаев: а, б — с намывным пляжем; в, г — без пляжа; д, е — максимальное заполнение

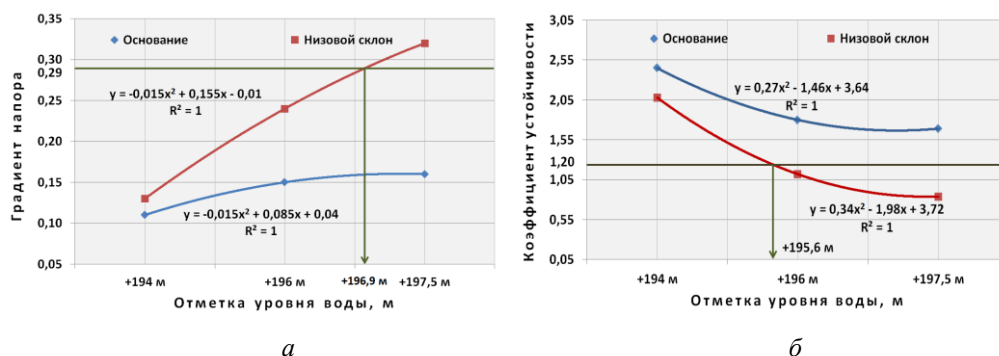


Рис. 2.18. Модельные закономерности распределения градиента напора (а) и коэффициента устойчивости (б) для случаев выхода дренирующей воды на основание дамбы или на ее низовой склон

Разработанные в данном исследовании гидрогеомеханические 3D-модели позволяют исследовать трансформацию гидростатического состояния в стационарную фильтрацию и, при определенном сочетании параметров механической и фильтрационной устойчивости грунтов, — в гидродинамику водотока и размыва дамбы. На основе многовариантных совместных фильтрационно-деформационных расчетов установлена зависимость устойчивости дамбы от степени фильтрации (рис. 2.19).

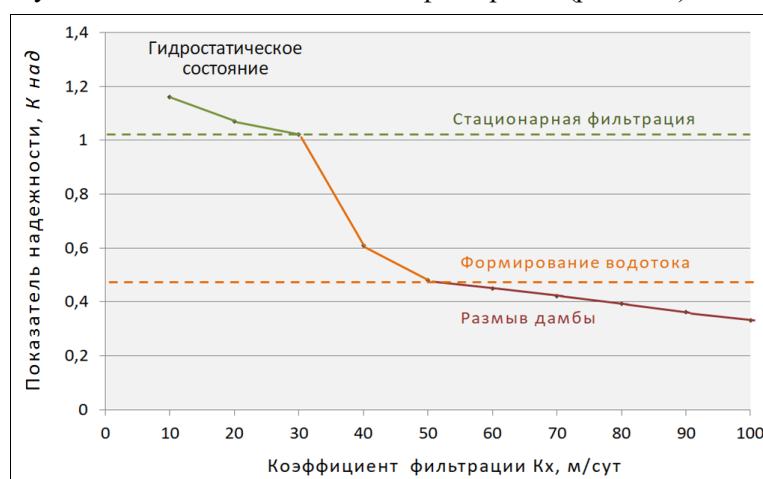


Рис. 2.19. Трансформация гидростатического состояния в стационарную фильтрацию, формирование водотока и размыв дамбы

Эта зависимость позволяет определить условия трансформации гидростатического состояния ($K_{\text{над}} > 1,2$) в стационарную фильтрацию ($1,2 > K_{\text{над}} > 1$) и, при определенном сочетании параметров механической и фильтрационной устойчивости грунтов, — в гидродинамику водотока ($1 > K_{\text{над}} > 0,5$) и размыва дамбы ($K_{\text{над}} < 0,5$). Дальнейшее снижение показателя надежности незначительно, в силу резкой трансформации гидростатических давления и стационарной фильтрации непосредственно в водоток.

В результате формирования водотоков (зон повышенной фильтрации) дополнительно генерируется гидродинамическое воздействие, которое имеет скоростные $v^2/2g$ и динамические $\rho v^2/2$ 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.

Для исследования образования зоны повышенной фильтрации (водотока) в ограждающей дамбе на сопряжении ее нижней части и основания хвостохранилища в модели задавалась трапециевидальная зона с размерами: нижняя граница — 10 м, верхняя — 6 м, высота — 3,5 м (далее — минимальная фильтрация) — с последующим ее полуторным (средняя фильтрация) и практически двукратным увеличением (максимальная фильтрация) [200, 201]. Следует отметить, что водоток пересекал по нормали ограждающую дамбу, при этом его вертикальный размер во всех рассмотренных вариантах не превышал 1/10 высоты дамбы.

По результатам компьютерного моделирования для рассмотренных вариантов были определены напряжения и деформации, реализующиеся в перемещениях грунтов в теле ограждающего сооружения и основания (рис. 2.20), а также выявлены закономерности особенностей изменения напряженно-деформированного состояния. Проведение гидравлических расчетов позволило выявить особенности влияния образовавшейся зоны фильтрации и изменение ее размеров на надежность накопителя.

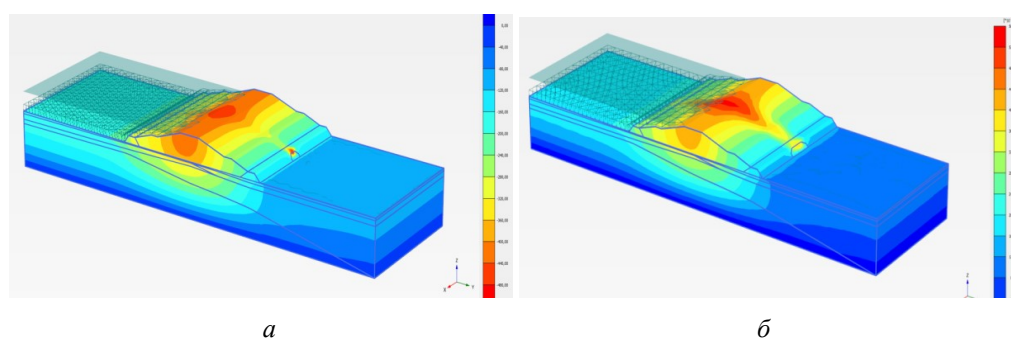
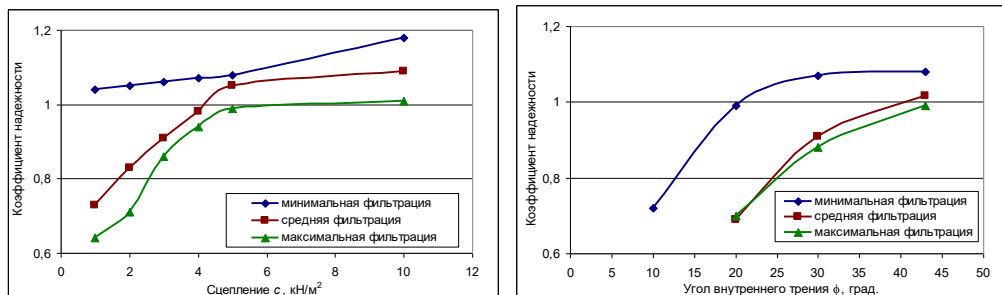


Рис. 2.20. Палитры фильтрационно-деформационного состояния фрагмента ГТС хвостохранилища при минимальном (а) и максимальном (б) размерах водотока

В последующих вариантах гидромеханического компьютерного моделирования исследовалось параметрическое влияние основных деформационных свойств грунтов ограждающей дамбы: сцепления c и угла внутреннего трения φ . На первом этапе, при прочих равных условиях, задавалось изменение значений сцепления c от 1 до 10. Показатель надежности рассчитывался для трех вариантов рассматриваемых размеров водотока и соответствующей фильтрации: минимальной, средней и максимальной (рис. 2.21 а).

Анализ рассчитанных значений показателя надежности в зависимости от сцепления грунтов c ограждающей дамбы позволяет сделать следующие выводы. При минимальной фильтрации снижение сцепления приводит к незначительному уменьшению показателя надежности. Для средней фильтрации снижение сцепления до 5 и ниже обуславливает значения показателя надежности менее 1, с последующим пропорциональным снижением. В случае с максимальной фильтрацией только значение сцепления $c = 10$ обеспечивает показатель надежности чуть выше 1. Снижение сцепления приводит к соответствующему снижению надежности вплоть до значения 0,64.

Аналогично выполнен анализ зависимости показателя надежности от угла внутреннего трения грунтов φ . Для этого при прочих равных условиях задавалось изменение φ от 10 до 43. Показатель надежности также рассчитывался для трех вариантов размеров зоны фильтрации: минимальной, средней и максимальной (рис. 2.21 б).



a

б

Рис. 2.21. Зависимость надежности ограждающей дамбы от сцепления (*a*) и от угла внутреннего трения (*б*) грунтов

Анализ рассчитанных значений показателя надежности в зависимости от угла внутреннего трения грунтов ϕ позволяет сделать следующие выводы. При минимальной фильтрации снижение угла внутреннего трения приводит к уменьшению показателя надежности, и при $\phi \leq 20$ показатель надежности становится меньше 1. Для средней фильтрации снижение угла внутреннего трения до 30 и ниже обуславливает значения показателя надежности менее 1 с последующим пропорциональным снижением. В случае с максимальной фильтрацией даже принятое максимальное значение угла внутреннего трения $\phi = 43$ не обеспечивает надежность выше 1. Снижение угла внутреннего трения приводит к соответствующему снижению надежности вплоть до значения 0,69.

3. МНОГОУРОВНЕВЫЕ КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МОНИТОРИНГ ХВОСТОХРАНИЛИЩ

3.1. Наблюдательные полигоны на ГТС хвостохранилищ

За период с 2016 по 2022 гг. авторами, при поддержке ведущих специалистов предприятий, дооборудованы созданные ими же ранее наблюдательные полигоны на ГТС хвостохранилищ АО «Ковдорский ГОК», ГОК «Олений ручей» «СЗФК», АО «Кольская ГМК», а также созданы и оборудованы новые наблюдательные полигоны на отдельных ГТС КФ АО «Апатит».

Наблюдательный полигон для ГТС хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК» оборудован непосредственно на ограждающей дамбе № 1 (рис. 3.1). На полигоне имеются опорные и контрольные марки, пьезометры, геодезические знаки, закрепленные профили георадарных определений и трассы аэрофотосъемки.

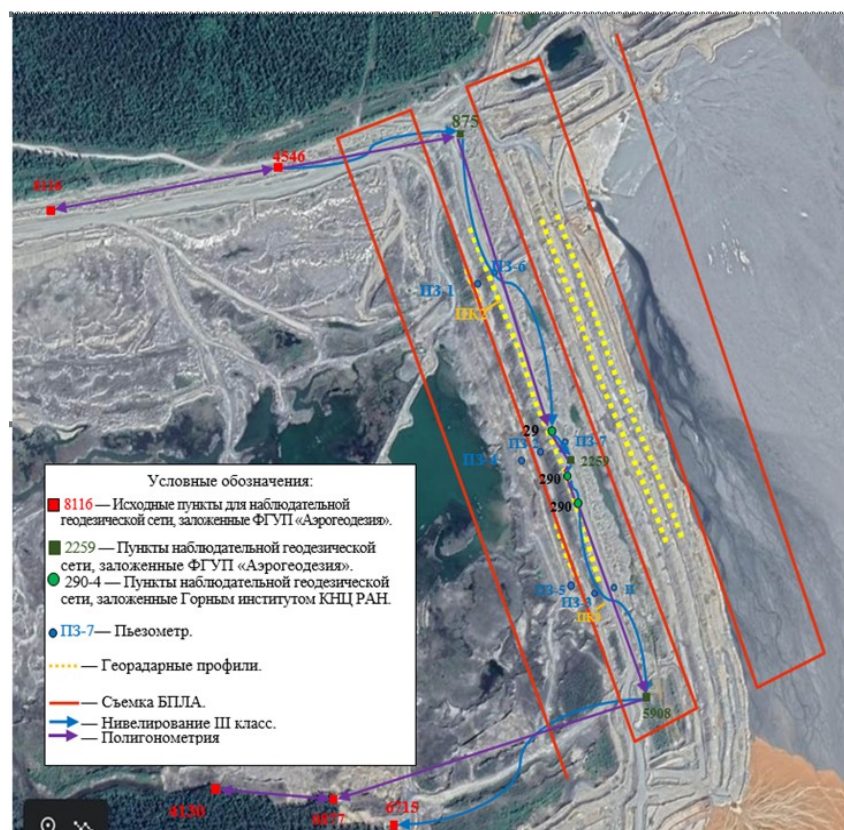


Рис. 3.1. Схема комплексных многоуровневых мониторинговых наблюдений, выполняемых на ГТС хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК»

Комплексные многоуровневые мониторинговые наблюдения, выполняемые на хвостохранилище АО «Ковдорский ГОК», включают в себя: визуальные обследования и фотофиксацию, георадарные определения, пьезометрические измерения, наземную и GPS-геодезию, аэрофотосъемку, спутниковые оптические снимки.

Наблюдательный полигон на ГТС хвостохранилища ОФ ГОКа «Олений ручей» включает в себя три линии, расположенные на ограждающих дамбах: верховой, низовой и вторичного отстойника (рис. 3.2). Линии соединены в единую систему, что позволяет выполнять «уравнивание» геодезических измерений в целях минимизации систематических и случайных ошибок.

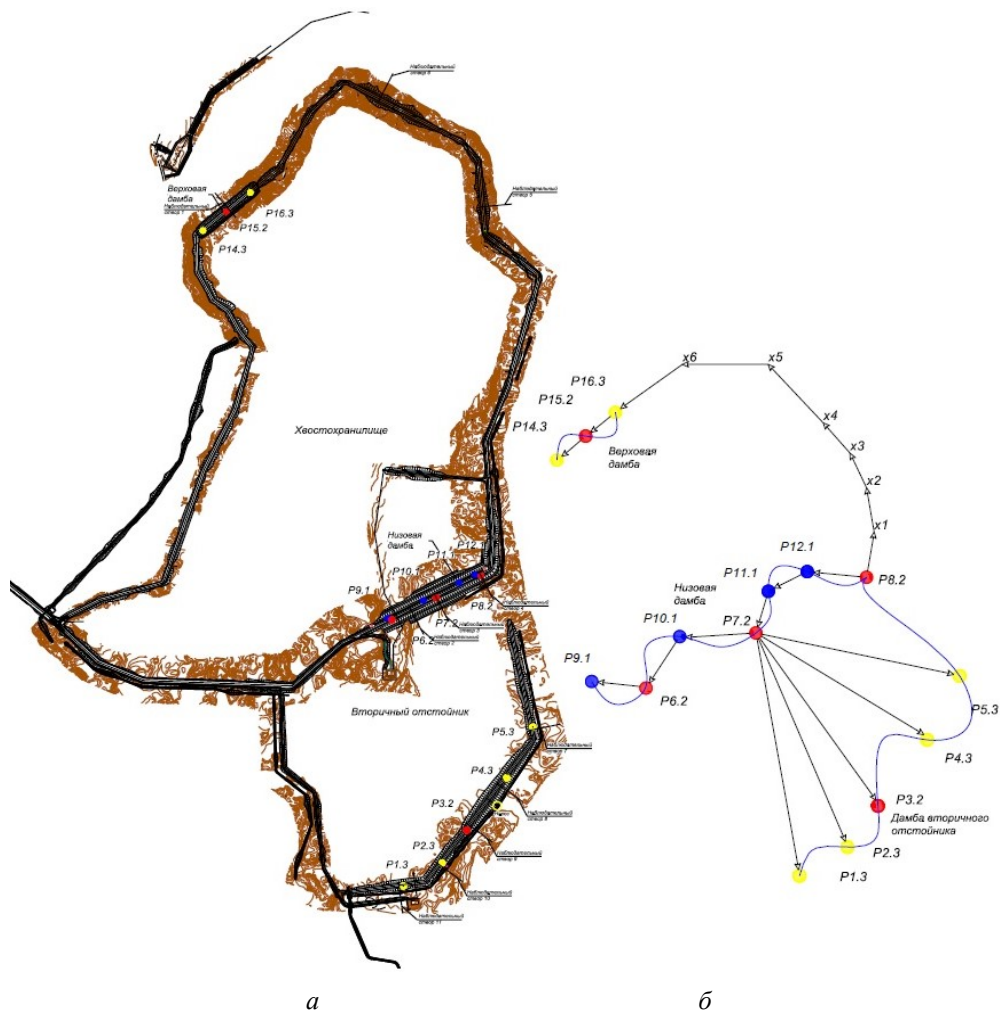


Рис. 3.2. Наблюдательный полигон на ГТС хвостохранилища ГОК «Олений ручей» (а), соединение линий наблюдательного полигона для геодезических измерений (б)

Комплексные многоуровневые мониторинговые наблюдения, выполняемые на хвостохранилище ОФ ГОК «Олений ручей», включают в себя: визуальные обследования и фотофиксацию, георадарные определения, пьезометрические измерения, наземную и GPS-геодезию, измерения объемов воды прудка-отстойника и геометрических размеров намывных пляжей, спутниковые оптические снимки.

Наблюдательный полигон на ГТС хвостохранилища ОФ АО «Кольская ГМК», существенно дооборудованный за отчетный период, включает в себя также три линии, расположенные на ограждающих дамбах: одна — на Северной, и две — на Южной (рис. 3.3). Линии также объединены в единую систему, что позволяет выполнять «уравнивание» геодезических измерений в целях минимизации систематических и случайных ошибок.

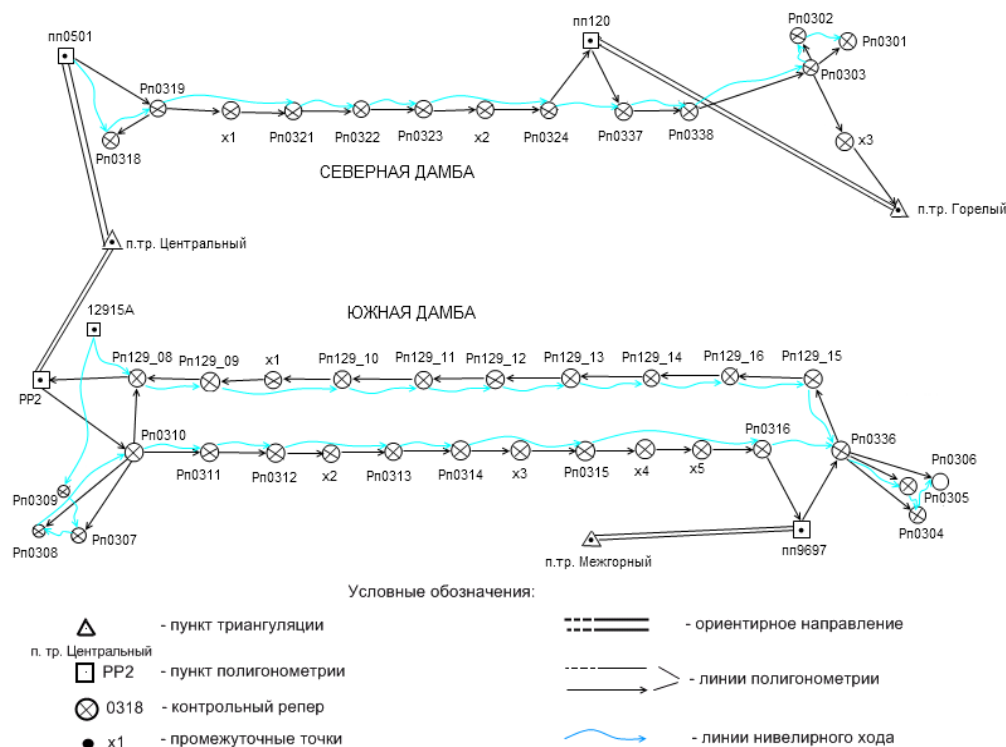


Рис. 3.3. Наблюдательный полигон на ГТС хвостохранилища ОФ АО «Кольская ГМК»

Комплексные многоуровневые мониторинговые наблюдения, выполняемые на хвостохранилище ОФ ГОК «Олений ручей», включают в себя: визуальные обследования, отбор проб намывных отложений и исследование физико-механических характеристик (в лабораторных условиях), георадарные определения, пьезометрические измерения, наземную и GPS-геодезию, топографическую съемку, техническое и высокоточное нивелирование, измерения объемов воды прудка-отстойника и геометрических размеров намывных пляжей, спутниковые оптические снимки.

Наблюдательный полигон на ГТС Коашвинских отстойников Восточного рудника КФ АО «Апатит» был оборудован авторами на ограждающих плотинах № 10–12 (рис. 3.4).

Комплексные многоуровневые мониторинговые наблюдения, выполняемые на ГТС Коашвинских отстойников Восточного рудника КФ АО «Апатит», включают в себя: визуальные обследования, георадарные определения, пьезометрические измерения, наземную геодезию, топографическую съемку, техническое нивелирование, спутниковые оптические снимки.

На описанных выше наблюдательных полигонах мониторинговые наблюдения выполняются авторами на регулярной основе, ежегодно, с периодичностью от 1 до 6 месяцев. Вместе с тем для решения оперативных задач мониторинга, создавались временные полигоны на ГТС рудника «Северный» АО «Кольская ГМК», рудника «Железный» АО «Ковдорский ГОК», хвостохранилища ОФ АО «ОЛКОН».

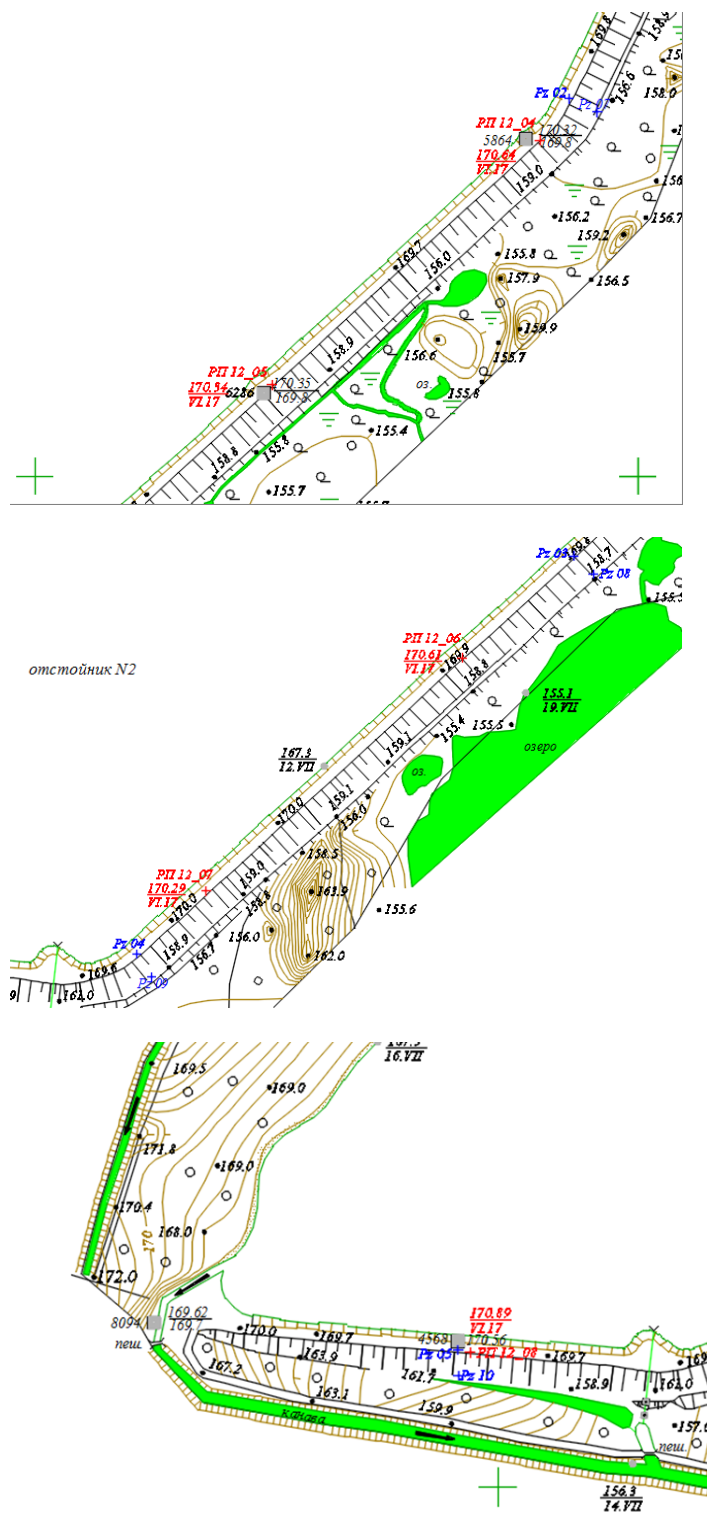


Рис. 3.4. Наблюдательный полигон на ГТС Коашвинских отстойников Восточного рудника КФ АО «Апатит»

3.2. Особенности мониторинговых наблюдений на ГТС горнодобывающих предприятий в евро-арктических условиях

Для определения расстояний, горизонтальных и вертикальных углов, превышений между точками и других геодезических работ авторы используют оптические приборы (нивелиры, теодолиты, тахеометры). Их важным преимуществом является то, что они работают с высокой точностью и на больших дистанциях в зависимости от погодных условий.

Основные технические характеристики электронных тахеометров находятся, как правило, в следующих пределах: угловая точность — от 1" до 7", точность измерения расстояния — 3–10 мм, (при этом дальность измерения расстояния при одной установленной призме достигает 5 км, при нескольких призмах — более 5 км). На характеристики геодезического прибора влияет воздействие внешних факторов окружающей среды: влажность, температура, давление и пр. Наибольшая точность измерений будет достигнута в безветренную пасмурную погоду, в месте, защищенном от вибрации работающих механизмов. В электронных тахеометрах учитываются поправки за колебание температур и давление.

Современные нивелиры в зависимости от точности замеров делятся на высокоточные, точные и технические. Высокоточные — самые точные нивелиры, обеспечивают определение превышений с погрешностью, не превышающей 1 мм на 1 км двойного хода. Такие приборы должны иметь: зрительную трубу с увеличением не менее 30 крат и цилиндрический уровень с ценой деления до 10" на 2 мм или компенсатор с чувствительностью до 0,3". Для достижения заданной точности нивелир необходимо использовать вместе с рейкой, имеющей инварные полосы с ценой деления до 0,5 мм и максимальное отклонение длины метрового интервала — 0,1 мм. Расстояние между нивелиром и рейкой не должно превышать 50 м. У точных нивелиров допустимая погрешность составляет 2–3 мм, а расстояние между нивелиром и рейкой может достигать 75–100 м. Ошибка измерений технических нивелиров может превышать 10 мм. Такие приборы обычно используются в работах, не требующих высокой точности. Рабочее расстояние может достигать 150 м.

Климатические условия влияют на сроки и продолжительность геодезических работ. Так как состояние климатических условий определяется показателями отдельных метеорологических элементов, то рассмотрим их влияние на производство полевых геодезических работ на Кольском полуострове.

Кольский полуостров находится на северо-западе Европейской части России, в Мурманской области. Омывается Баренцевым и Белым морями. Климат арктически-умеренный, морской, однако на него оказывает влияние ветвь теплого течения Гольфстрим, поэтому он относительно мягкий [202]. Лето короткое и прохладное, зима длинная и холодная. На севере полуострова, где почти полтора месяца не показывается солнце, средняя температура зимой — -14° , столько же, только со знаком плюс, — летом, когда солнце не покидает небосвод. В центре и на юге полуострова в зимние месяцы морозы достигают -40 — -50° . Современные геодезические приборы (тахеометры, нивелиры) могут работать в полевых условиях только с использованием аккумулятора. Продолжительность работы батарей в холодное время сокращается, аккумуляторы в зависимости от уровня разрядки могут замерзать даже при температуре от -5 до -10° . Вместе с тем лето здесь суше и значительно теплее. Наиболее теплый участок области — Южное Прибеломорье.

Очень высокие и очень низкие температуры воздуха приводят к деформации инструментов. В этих случаях приходится вводить температурные поправки при высокоточных геодезических измерениях (например, при базисных измерениях), а также при барометрическом нивелировании. Высокие дневные температуры

воздуха летом приводят к сильным турбулентным вертикальным потокам воздуха. Это вызывает «дрожание» изображения рейки в объективе оптического нивелира, что снижает точность отсчетов по рейке. Использование цифрового нивелира позволит значительно повысить точность измерений. Считывание отсчетов осуществляется автоматическим способом по специальной штрихкодовой рейке, что устраняет вероятность неверной интерпретации результатов оператором.

Среднегодовая норма осадков в Мурманской области — около 400 мм. Чаще они выпадают в виде снега, который держится 250 дней, а в холодные годы — значительно дольше. Снег лежит в среднем с середины — конца октября до середины мая (в горных районах с конца сентября — начала октября до середины июня). Заморозки и выпадение снега возможны в летний период. Количество осадков могут повлиять на работу светоотражательных сигналов от призмы до тахеометра. Чем интенсивней осадки, тем больше ослабление отражательного сигнала. Очень высокая относительная влажность, а также осадки способствуют появлению ржавчины на инструментах. В свою очередь, очень низкая относительная влажность может привести к высыханию смазки и растрескиванию их частей. Следует принимать соответствующие профилактические меры для сохранения инструментов и материалов в рабочем состоянии.

На побережье и горных плато часты сильные ветра (до 45—60 м/с), зимой — затяжные метели. В восточных районах Кольского полуострова климат суровее, там наблюдается наибольшее число дней со штормами. Сильный ветер влияет на устойчивость инструментов и реек. Пыль и песчаные бури снижают видимость. При работе на горных геодезических знаках приходится вводить поправку на ветер, так как даже при сравнительно небольшой скорости он приводит к ошибочным снятиям отсчетов с реек, вследствие чего снижается точность геодезических измерений.

Атмосферное давление и особенно его распределение на земной поверхности является важнейшим условием, определяющим направление переноса различных воздушных масс. Наиболее высокое давление приходится на май, а самое низкое — на январь. В отдельные годы в зависимости от повторяемости и интенсивности циклонов или антициклонов средняя месячная и суточная величины атмосферного давления могут значительно колебаться. Наиболее значительные колебания средней месячной и суточной величин давления наблюдаются зимой (ноябрь — март), наименее значительные — летом (июнь — август). Развитие или ослабление различных барических систем (циклонов, антициклонов, гребней, ложбин и др.) вызывают резкие изменения погоды. С прохождением антициклонов обычно связана малооблачная тихая погода со значительными, особенно летом, суточными колебаниями ряда метеорологических элементов, с прохождением циклонов, наоборот, — ухудшение погоды: увеличение облачности, усиление ветра (нередко до шторма), выпадение дождя или снега и резкие колебания температуры при смене его направления. Облачность может помешать выполнению геодезических работ таких, как аэрофотосъемка. Наличие дымки ухудшает качество фотографического изображения на больших расстояниях, так как ее яркость накладывается на яркость фотографируемого объекта и фона, уменьшая контраст между ними.

Полярная ночь на широте Мурманска длится со 2 декабря по 11 января. Продолжительность полярного дня в Мурманской области колеблется от 17 суток в южной части, до 72 — в северной. В Мурманске солнце не заходит за горизонт с 22 мая по 22 июля. Так как световой день не продолжительный, некоторое электронные тахеометры оснащены лазерным створоуказателем — это видимый свет, подсказывающий оператору призмы правильное направление. Например, створоуказатель моргает быстро, когда цель захвачена, или медленно, когда цели нет. Это позволяет работать в условиях недостаточной видимости.

Как следует из данных табл. 3.1, для производства полевых геодезических работ в евро-арктических условиях благоприятный период составляет 3 месяца в году (июнь, июль, август), когда нет снежного покрова, температура и осадки позволяют провести достоверные наблюдения. Неблагоприятный период длится 6 месяцев, из-за чего полевые геодезические работы невозможно провести совсем без погрешностей и ущерба для исполнителя и оборудования. В удовлетворительный период (май, сентябрь, октябрь) при подготовке к полевым геодезическим работам следует предварительно изучить и проанализировать прогноз погоды в целях получения результатов с такой точностью, которую требуют нормативные акты, законы и техническое задание. Все погодные факторы важно учитывать при производстве полевых геодезических работ и минимизировать их негативное влияние на результат.

Таблица 3.1

Классификация календарных месяцев на периоды, влияющие на мониторинговые наблюдения в евро-арктических условиях [202]

Месяц	Температура воздуха, t°С	Осадки, мм	Вид осадков	Высота снежного покрова, см	Погодные условия
Январь	–5,8 до –12,5	30–85	Снег	7–28	Усиление ветра в порывах до 25–31 м/с, метель, ухудшение видимости до 100–1000 м, понижение температуры до –22 — –34,9°
Февраль	–4,5 до –9,2	21–63	Снег, мокрый снег	27–40	Метель, усиление ветра, сильный снег, понижение температуры до –22 — –27°
Март	–2,9 до –6,3	28–70	Снег, мокрый снег	50–70	Интенсивный снегопад, усиленный ветер с порывами, метель, ухудшение видимости до 100–500 м, понижение температуры до –21 — –27°
Апрель	0,0 до –2,5	19–66	Снег, мокрый снег	15–23	Сильный ветер с порывами до 24–26 м/с, метель, ухудшение видимости до 100–500 м, понижение температуры до –19 — –21°
Май	+2,0 до +5,6	12–85	Дождь, снег	5–12	Усиленный ветер в порывах до 20–25 м/с, метель, ухудшение видимости до 500–1000 м, понижение температуры до –2 — –8°
Июнь	+8,6 до +15,9	12–74	Дождь	–	Ветер, первые грозы, заморозки до –1°
Июль	+13,0 до +16,3	26–108	Дождь	–	Ветер, гроза
Август	+10,1 до +13,9	49–112	Дождь	–	Ветер
Сентябрь	+7,0 до +9,6	29–72	Дождь	–	Сильный ветер, местами грозы, заморозки до –1 — –4°
Октябрь	+0,9 до +4,0	45–104	Дождь, мокрый снег	1–16	Часто туманы, понижение температуры до –6°
Ноябрь	–2,4 до +1,9	24–107	Дождь, ледяной дождь, снег	5–18	Туман, сильный порывистый ветер, понижение температуры до –15°, образование устойчивого снежного покрова
Декабрь	–2,9 до –8,9	15–49	Мокрый снег	8–32	Преимущественно облачная, понижение температуры до –25°

Примечания: ■ — неблагоприятный период; ■ — благоприятный период; ■ — удовлетворительный период.

На Кольском полуострове отмечается тенденция увеличения годового количества осадков: 2019 г. стал рекордным, а 2020 г. — шестым в ряду наблюдений с 1936 г. В среднем по области годовая сумма осадков составила 117 % от климатической нормы (рис. 3.5) [202]. Это также сказывается на особенностях ведения здесь мониторинговых работ.

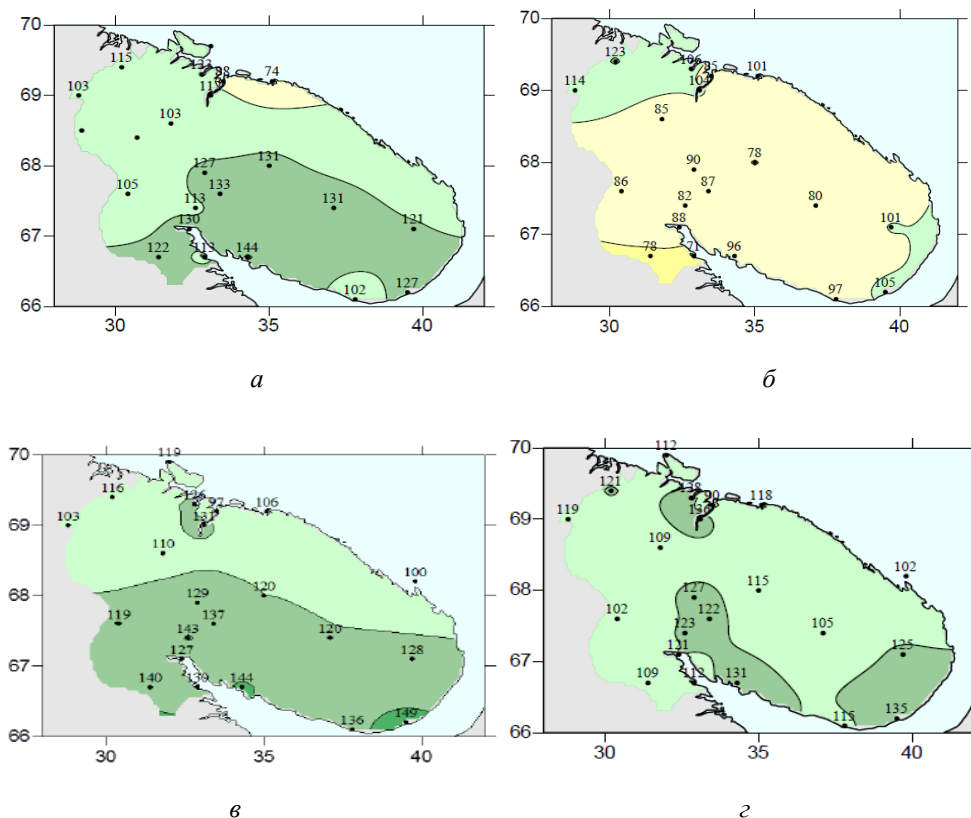


Рис. 3.5. Объемы годовых осадков в % от климатической нормы для Кольского полуострова: а — 2017 г.; б — 2018 г.; в — 2019 г.; г — 2020 г. (Из Докладов о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области за 2017–2020 гг.)

3.3. Комплексные уровневые исследования

3.3.1. Подповерхностные определения (подповерхностный уровень)

Подповерхностные определения (подповерхностный уровень в системе многоуровневого мониторинга) производились с использованием методов и средств, обеспечивающих получение информации о внутреннем строении и водонасыщенности объектов ГТС. В первую очередь, авторы выделяют георадарное зондирование, микросейсмическое профилирование, измерения уровня воды в пьезометрах, наблюдательных гидрогеологических скважинах и в прудках/водохранилищах.

Технологии и оборудование, применяемые для подповерхностных определений, достаточно подробно были изложены в опубликованных работах авторов [161, 203].

Результаты георадарного продольного профилирования по длинной оси ограждающей дамбы № 1 хвостохранилища ОФ АО «Ковдорский ГОК» приведены на рис. 3.6.

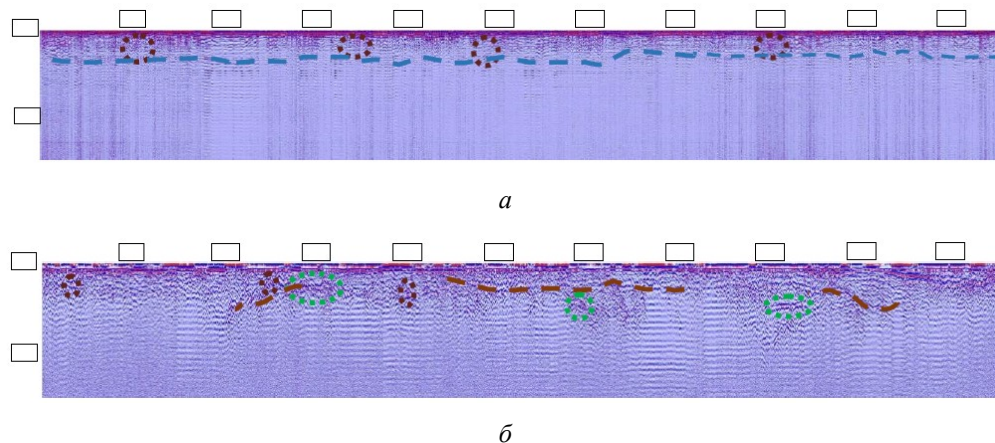


Рис. 3.6. Интерпретированные радарограммы продольного профилирования дамбы № 1 ГТС хвостохранилища ОФ АО «Ковдорский ГОК»: *а* — летний период; *б* — дождливый

На радарограммах фиксируются четко выраженные дифрагирующие объекты, зоны неоднородности и различной водонасыщенности грунтов. Для летнего периода (рис. 3.6 *а*) по всей длине профиля прослеживается (на глубине от 3,5 до 4,5 м) уровень грунтовых вод, образующий депрессионную кривую. Для периода с повышенными осадками (рис. 3.6 *б*) радарограмма характеризуется наличием переотражений и шумов на всем протяжении профиля, что свидетельствует о сильной обводненности грунтов дамбы. В этом случае депрессионная кривая локализуется нечетко, размыто, в силу наслоения приповерхностного водонасыщения осадками и поверхностными водами («верховодка») на грунтовые воды.

Георадарные исследования позволяют выявить в теле дамбы зоны неоднородности, в том числе связанные с фильтрационно-деформационными процессами, и проследить динамику формирования суффозионного размыва. Так, в 2012 г. георадарными определениями были выявлены несколько зон неоднородностей в теле дамбы. На рис. 3.7 приведены радарограммы, на которых идентифицирована и прослежена в динамике развития зона суффозионного размыва.

Первоначальными измерениями 2 ноября (рис. 3.7 *а*) было определено, что структура данного участка дамбы является относительно однородной и уровень грунтовых вод располагался на глубине 4,5–5,0 м. Спустя неделю, 9 ноября (рис. 3.7 *б*), измерениями выявлено изменение картины ниже уровня грунтовых вод, а 16 ноября (рис. 3.7 *в*) установлено общее изменение волновой картины, к наиболее существенным отличиям которой следует отнести «прерывистость» или «размытость» уровня грунтовых вод на интервале около 10 м. Последующими определениями (рис. 3.7 *г–з*) была прослежена общая динамика формирования суффозионного размыва шириной до 10 м, захватывающего участок дамбы фактически от поверхности до глубины около 8 м.

По данным георадарного зондирования строятся графики динамики депрессионной кривой (рис. 3.8) и проводится сопоставительный анализ с данными измерений в пьезометрах и наблюдательных гидрогеологических скважинах.

По данным измерений в пьезометрических скважинах также выполняется анализ динамики депрессионной кривой грунтовых вод по максимальным, минимальным и средним показателям. В частности, такой анализ выполнен по данным 116 пьезометров ГТС хвостохранилища ОФ АО «Кольская ГМК» за 10 лет (рис. 3.9).

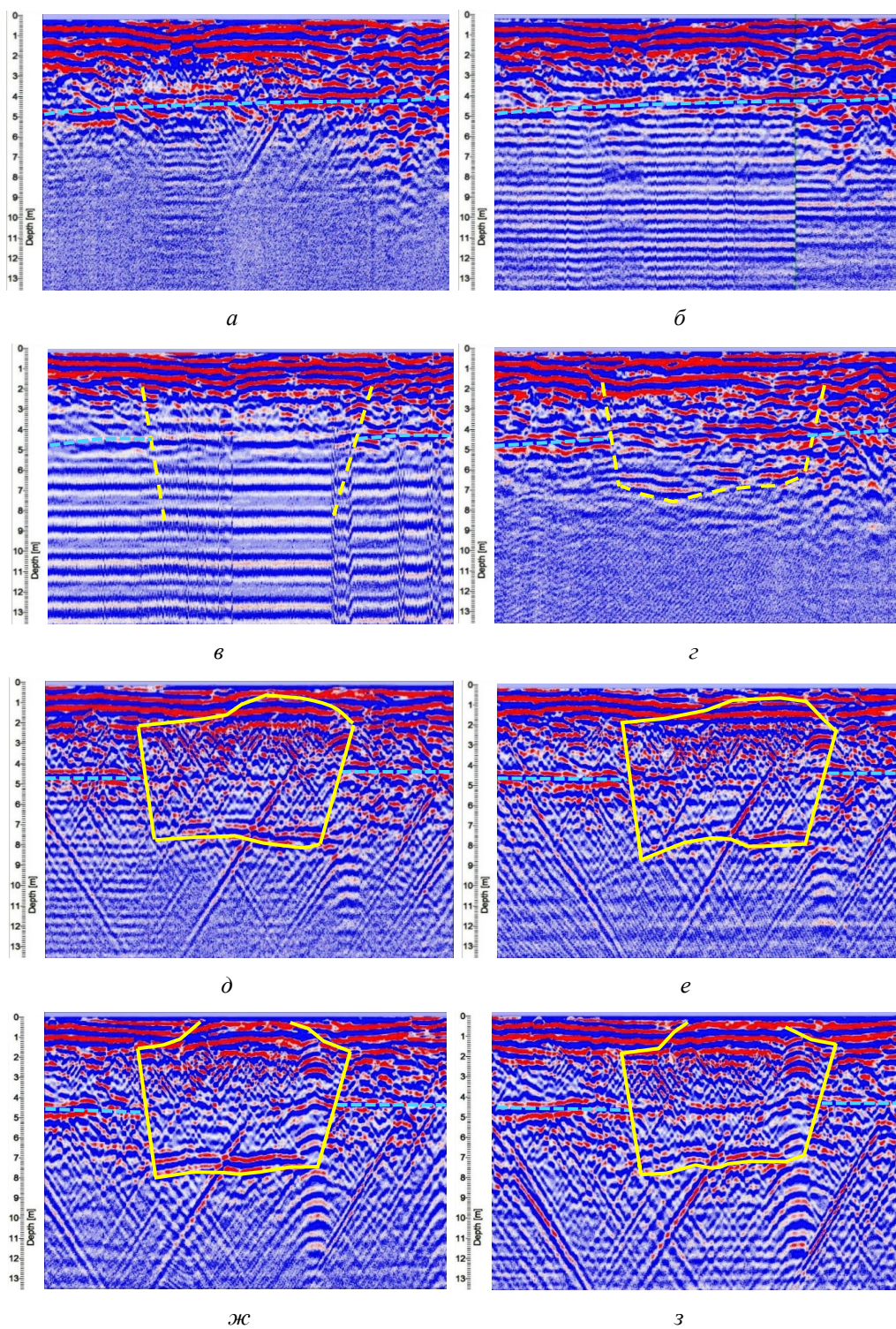


Рис. 3.7. Фрагменты продольных профилей на интервале от ПК6-35 до ПК6: *a* — 2 ноября; *б* — 9 ноября; *в* — 16 ноября; *г* — 27 ноября; *д* — 4 декабря; *е* — 11 декабря; *ж* — 18 декабря; *з* — 24 декабря 2012 г.

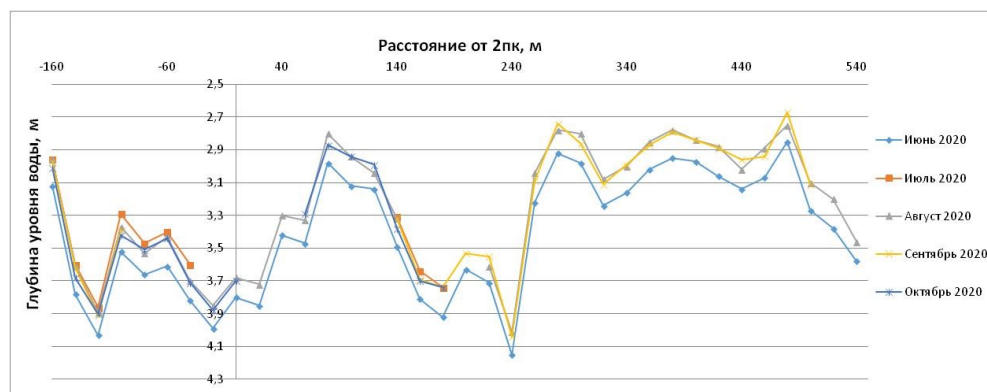


Рис. 3.8. Динамика депрессионной кривой грунтовых вод по циклам георадарных определений

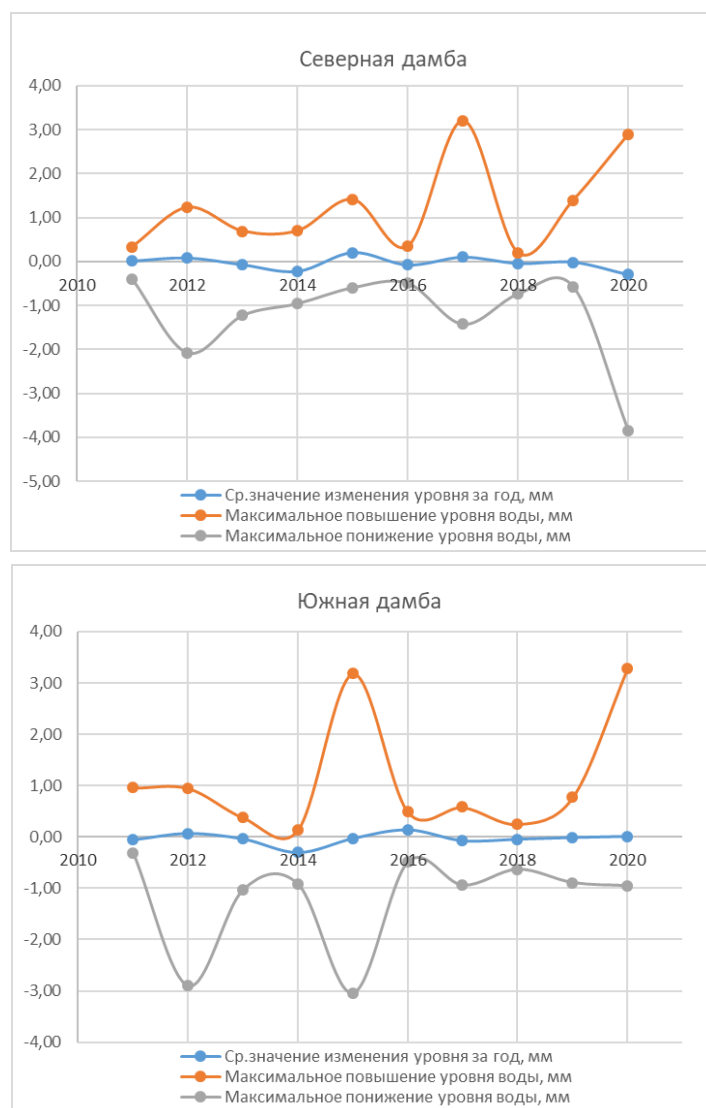


Рис. 3.9. Динамика изменения уровня воды в пьезометрах на Северной и Южной дамбах хвостохранилища АО «Кольская ГМК»

Анализ показывает, что на Северной дамбе средние значения изменений уровня воды по годам находятся в диапазоне от $-0,3$ м до $0,13$ м, максимальное повышение уровня зафиксировано в 2017 г. и составило $3,2$ м, а максимальное понижение — $3,85$ м в измерениях 2020 г. На Южной дамбе средние значения изменения отметок воды в пьезометрах варьируют от $-0,3$ м до $0,2$ м, максимальное повышение зафиксировано в 2020 г. и составило $3,28$ м, а максимальное понижение в 2015 г. — $3,04$ м.

По Северной дамбе графики иллюстрируют значительные изменения уровня воды в 2012, 2017 и 2020 гг. В 2012 г. максимальное понижение, которое составило $-2,07$ м, было зафиксировано на пьезометре 2П05. Максимальное повышение уровня $3,2$ м в 2017 г. показал пьезометр 8П04. В 2020 г. было зафиксировано как значительное повышение уровня воды (на $2,9$ м, пьезометр 3П03), так и максимальное понижение за весь период (на $-3,85$ м, пьезометр 3П02). По Южной дамбе с максимальным повышением уровня воды (до $3,0$ м) выделяются 2015 и 2020 гг., а с максимальным понижением (до $-3,0$ м) — 2012 и 2015 гг. Диапазоны изменения уровня воды в пьезометрах Северной дамбы представлены на рис. 3.10.

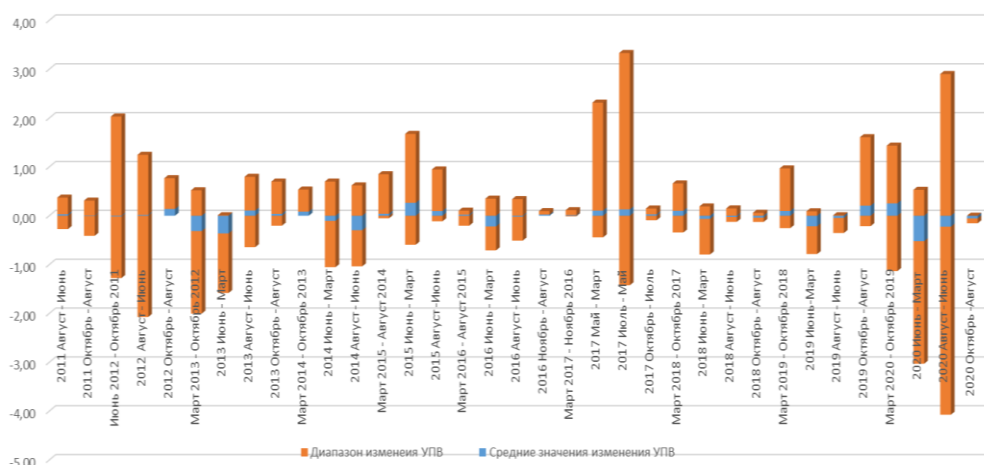
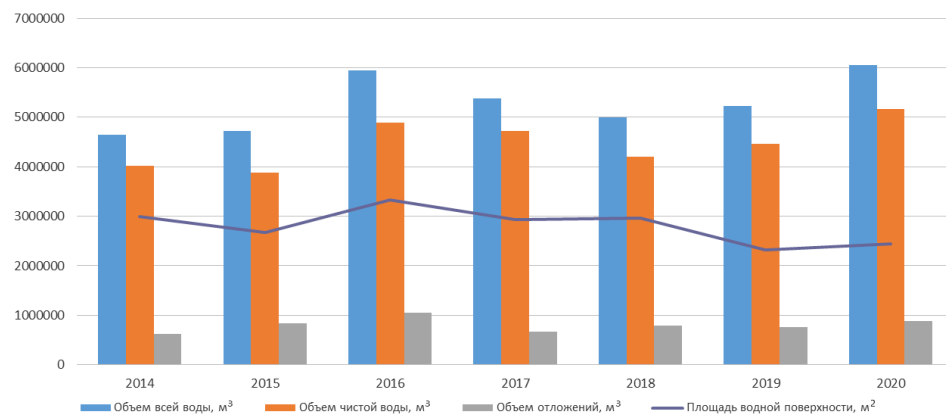


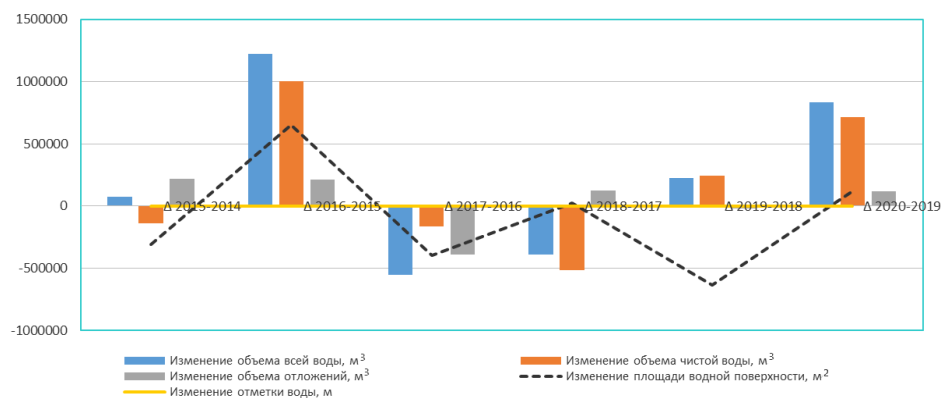
Рис. 3.10. Диапазоны изменения уровня воды в пьезометрах Северной дамбы

В подповерхностный уровень также подпадают измерения объемов воды в прудке-отстойнике/водохранилище ГТС хвостохранилища. В частности, проанализированы данные об изменениях объема воды в прудке-отстойнике хвостохранилища ОФ АО «Кольская ГМК» (уровень воды, площадь водной поверхности, объем условно чистой воды, объем взвешенного осадка, общий объем воды) за последние 7 лет (рис. 3.11).

Наряду с контролем таких показателей, как объем воды, площадь водной поверхности, изменение уровня воды в пьезометрах, было уделено внимание перераспределению объема воды между Южной и Северной дамбами хвостохранилища, а также контролю длин намывных пляжей с целью недопущения превышений критериальных значений. При анализе изменений длин намывных пляжей прослеживается обратно пропорциональная зависимость с плановым смещением реперов на дамбах хвостохранилища (рис. 3.12–3.13).



a



б

Рис. 3.11. Динамика объемов воды (*a*) и их изменений (*б*) в прудке хвостохранилища АО «Кольская ГМК» за 2014–2020 гг.

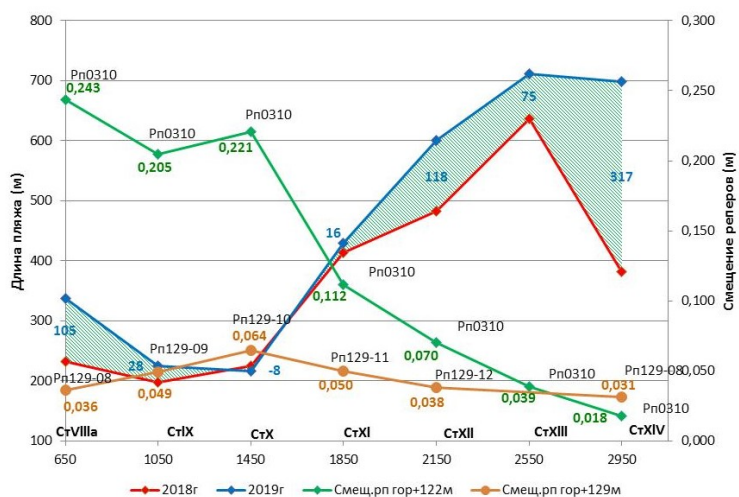


Рис. 3.12. График изменения длин пляжей Южной дамбы хвостохранилища с 2018 по 2019 гг., объединенный с графиком планового смещения реперов за этот же период

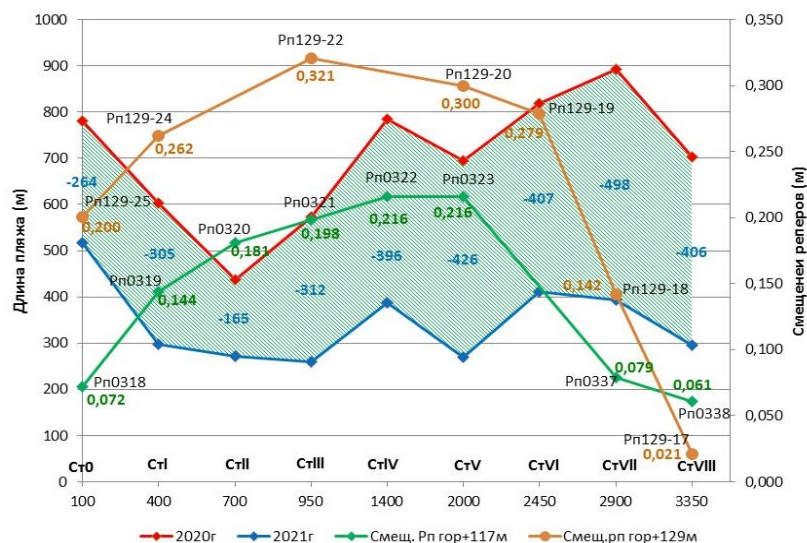


Рис. 3.13. График изменения длин пляжей Северной дамбы хвостохранилища с 2020 по 2021 гг., объединенный с графиком планового смещения реперов за этот же период

3.3.2. Наземные наблюдения и измерения (поверхностный уровень)

Наземные наблюдения и измерения (поверхностный уровень) включают в себя визуальные наблюдения, фотофиксацию и наземные геодезические измерения и съемки.

Визуальные наблюдения относятся к одним из основных методов контроля состояния насыпных ГТС. Так, СП 58.13330.2019 «Свод правил. Гидротехнические сооружения. Основные положения» предписывает: «При проектировании гидротехнических сооружений надлежит обеспечивать и предусматривать... постоянный инструментальный и визуальный контроль за состоянием гидротехнического сооружения и вмещающего массива горных пород, а также природными и техногенными воздействиями на них...» [1].

В соответствии с ПБ-03-438-02 «Правила безопасности гидротехнических сооружений накопителей жидких промышленных отходов» при визуальных наблюдениях должно контролироваться соответствие объекта проектным параметрам и решениям по широкому перечню наблюдаемых параметров и элементов сооружения (от соответствия ГТС проектным параметрам до санитарного состояния окружающей территории) [204].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что нормативные акты предписывают проведение визуального наблюдения за насыпными ГТС, при этом очерчивая крайне широкий круг контролируемых параметров. Однако подобный широкий их охват предопределяет слабые стороны такого обследования, а именно отсутствие индикаторов отдельных процессов, происходящих в теле сооружения. Отсутствие подобных индикаторов, прописанных в нормативных документах, нивелируется рекомендациями, выпускаемыми ведущими научными и производственными организациями. Так, «Рекомендации по проведению визуальных наблюдений и обследований на грунтовых плотинах», разработанные АО «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева» [205] дают широкий спектр визуальных индикаторов процессов, происходящих в теле плотин. В соответствии с ними выделяются 35 проявлений на поверхности сооружений, конструкций и других элементах ГТС, которые необходимо фиксировать при проведении визуальных наблюдений. Вместе с тем, данных рекомендаций оказывается недостаточно при наблюдении отдельных явлений, например, для идентификации локальных фильтрационных нарушений.

В соответствии со сказанным выше, при выполнении данной научно-исследовательской работы, проводилось визуальное обследование насыпных ГТС горнорудного профиля, используя как существующие требования и методики, так и с разрабатываемые в рамках данной работы системы индикаторов. При выполнении визуального обследования насыпного ГТС составлялся абрис наблюдаемых явлений, а также их фотофиксация. На камеральном этапе работ составленные абрисы нарушений с их местоположением наносились на план ГТС. На рис. 3.14 представлен абрис участка ограждающей дамбы хвостохранилища горнорудного предприятия с наблюдаемыми нарушениями и процессами.



Рис. 3.14. Абрис ограждающей дамбы хвостохранилища горнорудного предприятия

Предписываемое нормативными актами визуальное обследование насыпных ГТС сопровождается фотофиксацией наблюдаемых процессов и явлений. Она производится с нескольких ракурсов: с вышележащей полки и с разных точек, находящихся на полке наблюдаемого явления. При этом фотофиксация каждого явления предпочтительно производится с одних и тех же точек в разные периоды наблюдения. Такая схема позволяет на камеральном этапе работ, сопоставляя полученные снимки, проследить развитие наблюдаемых процессов в разные периоды времени. На рис. 3.15 представлено сопоставление фотоснимков, выполненных на одном участке насыпного ГТС горнорудного профиля в разные периоды времени.

При сопоставлении фотоснимков на рис. 3.15 видно постепенное развитие деформаций на данном участке. При этом фотофиксация с разных точек позволяет получать более детальную информацию по наблюдаемым явлениям, например, на рис. 3.15 на фотографии, выполненной с полки +280, видно развитие оперяющих трещин отрыва, которые не видны на снимке с вышележащей полки.

Наземные геодезические наблюдения выполняются по определенным временным интервалам и поэтому носят режимный характер. Прежде всего выполняются рекогносцировочные обследования исходных пунктов ГТС, которые включают в себя проверку наличия, соответствия ведомостям исходных координат и положению на топографических планах предыдущих лет; визуальное их обследование; проверку механической устойчивости; определение видимости как между пунктами, так и между пунктами и контрольными реперами. Выполняется оценка возможности проложения полигонометрических и нивелирных ходов.

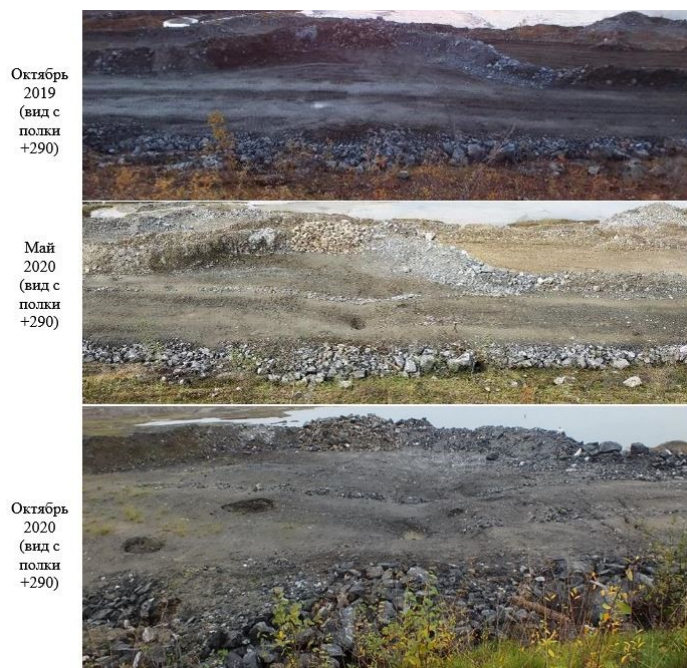


Рис. 3.15. Фотофиксация и сравнение фотоснимков участка насыпного ГТС

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 составляющая (осадка дамбы) и горизонтальная составляющая (смещение), определение которых выполнено геодезическими методами. Методика проведения и точность наблюдений определена проектом производства работ, а также при этом использованы рекомендации по проведению натурных наблюдений за осадками грунтовых плотин [206].

Привязку опорных реперов в горизонтальной плоскости осуществляли методом полигонометрии от ближайших (исходных) ее пунктов. Относительная линейная невязка теодолитного хода не должна превышать 1:2000. Измерение углов проводят тахеометром, точность измерения горизонтальных углов 1" или 0,3 mgrad. Точность измерения расстояний составляет $\pm (2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$, при измерении длин измеряют температуру воздуха и вводят соответствующие поправки.

Высотную привязку и контроль неподвижности опорных реперов проводили от пунктов маркшейдерской нивелирной сети нивелированием IV класса.

Ежегодно выполняется полигонометрия I разряда и нивелирование III класса по контрольным реперам ограждающих дамб ГТС хвостохранилища.

Вертикальные смещения определялись методом геометрического нивелирования III класса. Нивелирные ходы, в соответствии с требованиями, изложенными в инструкции [207], выполнялись в прямом и обратном направлениях. 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 100 м.

Оценка качества выполненных работ производилась путем сравнения полученных невязок с допустимыми невязками $m_{\text{доп}} = \pm 10 \text{ mm} \sqrt{L}$, где L — длина хода в км.

Данные нивелирования записывались в полевой журнал измерений. При обработке данные оцифровывались в таблицы Excel для дальнейших расчетов. Для выполнения нивелирных работ исполнителями использовался нивелир Sokkia B30 и нивелирные рейки РН-3, поверенные Метрологическим центром ООО «Автопрогресс-М».

Горизонтальные смещения определялись методом прокладки ходов полигонометрии 1 разряда. Точность определения координат контрольных реперов установлена проектом производства работ, исходя из требований, предъявляемых к сооружениям данного типа.

Для полигонометрических измерений использовался тахеометр Topcon QS3M, поверенный Метрологическим центром ООО «Геостройизыскания».

Точность измерения горизонтальных углов составляет 1" или 0,3 mgrad. Точность измерения расстояний составляет $\pm (2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$. Наблюдения заключаются в измерении углов между направлениями и расстояний до определяемых пунктов.

Оценка качества выполненных работ производилась путем сравнения полученных невязок с допустимыми:

- угловая невязка хода, угловые секунды, не более $10\sqrt{n}$, где n — число углов в ходе;
- относительная погрешность хода, не более 1:10000.

Измерение углов и расстояний производилось по трехштативной системе. 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 отражатели в прямом и обратном направлении. Результат измерения расстояния между двумя направлениями получен как среднее арифметическое из пятикратных повторений в прямом и обратном направлениях. Все измерения записывались в полевой журнал и фиксировались в памяти инструмента. Наблюдения проводились при благоприятных условиях видимости.

Камеральная обработка инженерно-геодезических работ и уравнивание измерений производилось на ПК с использованием программного комплекса Microsoft Excel.

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.

Вычисление плановых координат и высотных отметок контрольных реперов, уравнивание и оценка точности производилась отдельно по Южной и Северной дамбе. Результаты уравнивания, оценка точности и технические характеристики ходов будут приведены в техническом отчете.

Нивелировка дамб обвалования по оси гребня ограждающих дамб, общей протяженностью около 16 км, производилась с определениями через 50 м в привязке к пикетажу, указанному на распределительном трубопроводе.

Для нивелирования использовались нивелир фирмы SOKKIA и 2 шашечные рейки РН-3 длиной 3 м. Отчеты снимались по черной и красной сторонам реек и заносились в полевой журнал, с оперативным контролем получаемых превышений.

Полученные данные обработаны, оцифрованы в Microsoft Excel, вычислены высотные отметки, составлены ведомости высотных отметок по оси гребня дамб обвалования для ограждающих дамб ГТС хвостохранилища.

Выполняется комплекс топографических работ для проведения мониторинга заполнения пруда отстойника. Проложен ход полигонометрии между исходными пунктами (реперами) в виде замкнутого полигона по периметру хвостохранилища с точностью полигонометрии 1 разряда.

Высотная характеристика опорных пунктов геодезической сети определена проложением хода геометрического нивелирования, выполненного по методике нивелирования III класса.

После анализа топографической изученности участка работ установлено, что при создании планово-высотного съемочного обоснования для выполнения съемочных работ в масштабе 1 : 5000 количество опорных пунктов плановой геодезической сети обеспечивает точность создаваемого плана.

При производстве тахеометрической съемки плановое положение характерных точек местности определялись полярным способом с точек планово-высотного обоснования, а высотное — тригонометрическим и геометрическим нивелированием. В процессе топографической съемки определялся урез водной поверхности прудка. При ведении тахеометрической съемки был осуществлен контроль сохранения ориентирования лимба прибора. По окончании работ на точке ориентировка прибора была проверена. Изменение ориентирования за период съемки с данной точки не превышал допусков, т. е. не более 1,5'.

После камеральной обработки полевых материалов количество отметок характерных высот разряжалось на плане М 1:5000, что, в конечном итоге, не превышает допуска 5–15 точек на 1 дм² согласно требованиям к условным знакам для топографических планов масштаба: 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500 («Условные знаки для топографических планов масштаба 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500». Москва, 2007 г.).

Создание топографического плана в цифровом виде проводилось в несколько этапов:

- 1) камеральная обработка тахеометрических данных производилась в специализированном программном продукте Topcon TopSurv Robotic Station;
- 2) результаты измерений электронного тахеометра импортировались в табличный редактор Microsoft Excel;
- 3) результаты камеральной обработки и расчетов импортировались в систему автоматизированного проектирования AutoCAD;
- 4) построение по полученным данным цифровой модели местности с последующим оформлением графического плана и выводом его на печать.

В результате проведенных работ составлена электронная версия инженерно-топографического плана прудка хвостохранилища в масштабе 1 : 5000, с сечением рельефа горизонталями через 2,0 м.

Замеры длин намывных пляжей производились в следующем порядке:

- 1) тахеометр устанавливался на гребне дамб обвалования по пикетажу, нанесенному на распределительный пульпопровод;
- 2) на границе намывных отложений у уреза водной поверхности перпендикулярно от пикета, на котором установлен тахеометр, выставлялась вешка с отражателем;
- 3) тахеометром производилось измерение расстояния до отражателя;
- 4) лазерной рулеткой определялись расстояние от тахеометра до границы между нижней кромки дамбы обвалования и намывным пляжем и высота установки прибора на штативе.

Все полученные данные заносились в электронную память тахеометра и в полевой журнал.

В процессе камеральной обработки данные из журналов переносились в Microsoft Excel, в котором производились дальнейшие расчеты и составление ведомости длин пляжей.

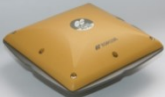
На основании значений длин намывного пляжа, полученных в результате расчетов, в программном комплексе AutoCAD производилось построение топографического плана намывных пляжей хвостохранилища.

Результаты топографических съемок и нивелирований по гребням дамб в дальнейшем использованы при построении продольных и поперечных разрезов (профилей).

Одновременно по наблюдательным пунктам проведены наблюдения методом спутниковой геодезии (GPS-измерения). Для GPS-наблюдений использовалось оборудование фирмы Javad и Topcon (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Оборудование для проведения GPS-измерений

Оборудование	Особенности	Точность базовой линии (постобработка)
Lexion GGD (5шт.) 	20-канальный двухчастотный GPS/ГЛОНАСС приемник, с интерфейсом MinPad	Гориз.: 3 мм + 1 ppm для L1 + L2; 5мм + 1,5 ppm для L1. Вертик: 5 мм + 1,5 ppm для L1 + L2; 6 мм + 1,5 ppm для L1. Обрабатываемые сигналы: L1/L2 C/A и P код и фаза
Антенна JNS Choke Ring (5 шт.) 	Рабочие полосы частот: 1565–1620 MHz (L1), 1215–1265 MHz (L2)	
Приемник Topcon GRS-1 	GPS/ГЛОНАСС 72-канальный интегрированный GPS+ приемник	3 мм + 0,5 мм/км (L1 + L2) (при использовании внешней антенны)
Внешняя антенна для Topcon GRS-1 PG-A1 	PG-A1 является высокоточной двухсистемной (GPS/ГЛОНАСС) двухчастотной антенной геодезического класса с «прецизионной технологией микроцентрирования»	
Topcon Hiper+ (2шт.) 	40-канальный GPS/ГЛОНАСС, L1+L2, с редукцией «многолучевости» AMR, встроенная GPS/ГЛОНАСС антенна	Гориз.: 3мм + 0,5мм/км (L1 + L2). Вертик. 5 мм + 0,5мм/км (L1 + L2)

Процесс GPS-измерений заключался в регистрации с интервалом в 5 сек псевдодальностей до спутников системы GPS NAVSTAR на двух несущих частотах L1 и L2, и по двум кодам C1 и P2. Угол минимального возвышения спутников над горизонтом при измерениях принят 13°. Регистрация и слежение за сигналами производится автоматически под управлением микропрограммного обеспечения приемников. Район работ, наблюдаемые пункты и определяемые векторы для ГТС хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК» показаны на рис. 3.16.

Обработка и уравнивание полученных данных осуществлялась с использованием программного пакета Topcon Tools 8.2.



Рис. 3.16. Схема проведения GPS-измерений на ГТС хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК»

3.3.3. Аэрофотосъемка (воздушный уровень)

Эксплуатация гидротехнических сооружений требует непрерывного и систематического контроля их устойчивости. В комплексе натурных наблюдений за состоянием ГТС геодезические методы являются достаточно точными и позволяют надежно оценить фактическое состояние сооружения, выявить недопустимые деформационные процессы. Современные технологии воздушных съемок, мощные вычислительные системы и программные продукты позволяют выполнять аэрофотосъемку с применением БПЛА. Аэрофотосъемочные комплексы могут использоваться как отдельно, так и в рамках многоуровневого анализа данных геодезического мониторинга.

В результате выполнения аэрофотосъемочных работ с помощью автоматической обработки материалов создаются ортофотопланы, матрицы высот и детальные трехмерные модели местности. 3D-модели формируются при совмещении аэрофотосъемки с БПЛА и тахеометрической съемки местности, которая производится на дневной поверхности. Наблюдения с помощью БПЛА позволяют получить всю необходимую информацию о рельефе и геометрии исследуемой поверхности ГТС с точной координатной привязкой по всей территории съемки, а не только в местоположении контрольно-наблюдательных реперов. Благодаря наблюдениям БПЛА можно выявлять деформации объекта мониторинга по результатам регулярных съемок. Ежегодная аэрофотосъемка объекта мониторинга может быть осуществлена в одно и то же время и с той же точки, так как маршрут и координаты точек съемки сохраняются с помощью программного обеспечения БПЛА. Более того, аэрофотосъемка обеспечивает возможность визуального контроля объекта на всех этапах работ.

Для выполнения аэрофотосъемки ГТС хвостохранилища с целью получения аэрофотоснимков авторами использована съемочная аппаратура, смонтированная на борту беспилотного комплекса GeoScan. На рис. 3.17 представлен общий вид летательного аппарата.



Рис. 3.17. БПЛА GeoScan 101

Данный БПЛА оснащен системой автоматического управления (автопилотом), инерциальной навигационной системой, контроллером управления полезными нагрузками, цифровым каналом связи для передачи командно-телеметрической информации, цифровой модернизированной беззеркальной камерой Sony $\alpha 6000$. За 1 ч полета GeoScan 101 выполняет съемку 3 км^2 с разрешением 2,6 см/пикс, максимальная площадь съемки — 9 км^2 , с разрешением 10 см/пикс. Полеты БПЛА отслеживаются с помощью наземной станции управления (НСУ) Geoscan Planer, предназначенной для подготовки полетного задания, контроля и управления БПЛА и отображения телеметрической информации, поступающей от него. БПЛА выполняет взлет, полетное задание и посадку в автоматическом режиме, при этом оператор имеет возможность оперативно изменить полетное задание. Запуск с катапульты и посадка с помощью парашюта (рис. 3.18) позволяет использовать БПЛА без какого-либо стороннего оборудования или инфраструктуры.



Рис. 3.18. Запуск БПЛА с катапульты (слева) и посадка с помощью парашюта (справа)

Для аэрофотосъемки исследуемого объекта в Geoscan Planer была выбрана площадная аэрофотосъемка — съемка полигонов. Полигон — это область, ограниченная многоугольником. Оператор задает его вершины, а программа автоматически рассчитывает маршрут обхода (рис. 3.19). Длина заданного маршрута составила 18,4 км, общей площадью $0,55 \text{ км}^2$, целевое превышение аэрофотосъемки — 202 м, продольное перекрытие — 50 %, поперечное — 70 %. При построении маршрута, если разница высот соседних точек превышает 30 м, набор высоты и снижение БПЛА отображаются в виде цилиндров. Если БПЛА набирает высоту, то цилиндр залит оранжевым цветом, иначе — синим (рис. 3.20).

После посадки БПЛА Geoscan Planner формирует отчет о полете с геодезически привязанными фотографиями (рис. 3.20).

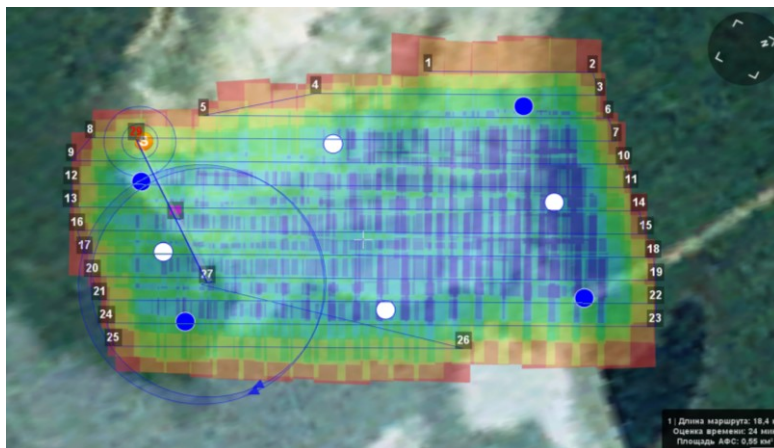


Рис. 3.19. Полигон аэрофотосъемки с использованием БПЛА

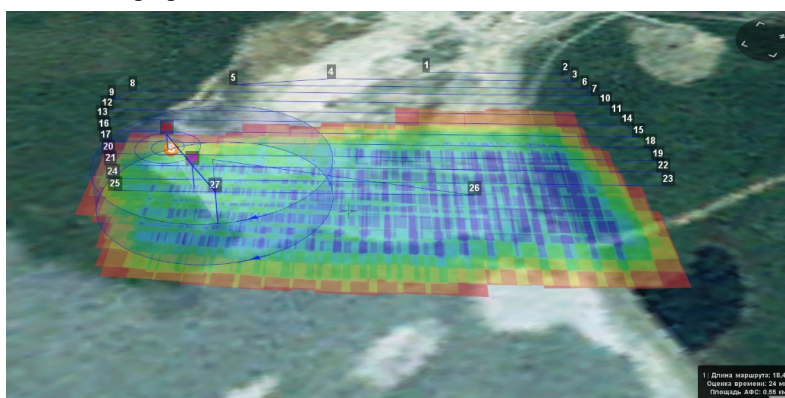


Рис. 3.20. Отображение цилиндров набора БПЛА высоты и снижения

Полученные данные и результаты импортировались для камеральной обработки в программу Agisoft Metashape, предназначенную для фотограмметрической обработки данных аэрофотосъемки.

Обработка данных аэрофотосъемки включает в себя следующие основные этапы.

1. Выравнивание фотографий. На этом этапе загружаются снимки и координаты центров фотогафрирования (рис. 3.21), выполняется поиск общих точек на снимках, определение элементов взаимного ориентирования и формирование первичной модели местности (разреженного облака точек) (рис. 3.22, 3.23).

Разреженное облако точек не используется на дальнейших стадиях обработки (кроме режима построения модели на основе разреженного облака точек) и служит только для визуальной оценки качества выравнивания фотографий.

2. Привязки модели в требуемой системе координат. Привязка выполнялась по координатам точек наземной опорной сети. Положение опорных точек определяется через их проекции на исходных фотографиях. Для определения положения маркеров в трехмерном пространстве необходимо указать их положение как минимум на 3 фотографиях. Чем большее число фотографий используется для указания проекций маркера, тем выше точность позиционирования. Для корректной привязки исследуемого объекта использовалось 8 прямоугольных ($1 \times 1,5$ м), маркированных цветом контрольных точек местности, пространственно разнесенных по территории участка. Координаты контрольных точек местности получены с помощью электронного тахеометра Topcon QS3M.



Рис. 3.21. Полученные аэрофотоснимки объекта мониторинга

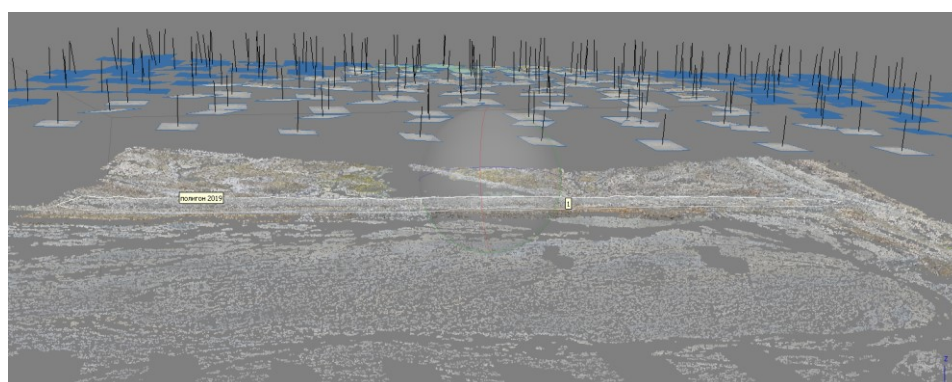


Рис. 3.22. Проекция центров выровненных снимков

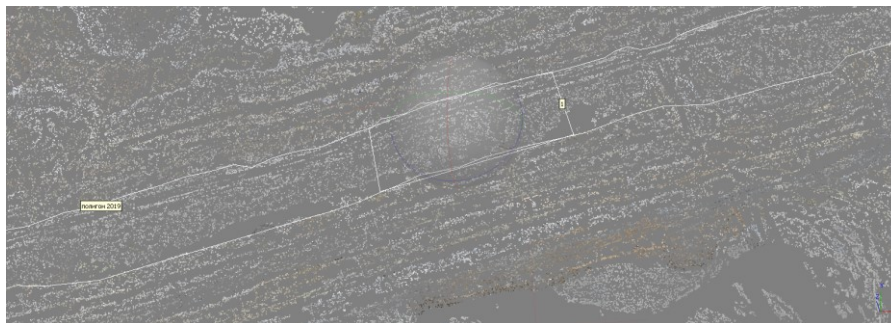


Рис. 3.23. Первичная модель местности (разреженное облако точек)

3. Построение плотного облака точек. На этом этапе выполняется повторный поиск общих точек и определение их положения в наиболее детальном режиме работы, анализируется каждый пиксель исходных фотографий.

Полученное плотное облако точек затем преобразовывается в карту высот.

По результатам воздушного исследования далее дешифрируются все элементы дамбы хвостохранилища: съезды, уступы, насыпи, строения, длину намывного пляжа и линию уреза воды в прудке-отстойнике.

3.3.4. Дистанционный контроль (спутниковый уровень)

На территории Кольского полуострова находятся более 127 тыс. водных объектов, из них 20,6 тыс. — водотоков и 107 тыс. — водоемов, включая крупные (озера Имандра, Умбозеро, Ловозеро, Верхнетуломское водохранилище). В регионе существует проблема загрязнения природных водоемов промышленными и хозяйственно-бытовыми сточными водами, а также загрязняющими веществами, поступающими из атмосферы. Большая часть загрязненных сточных вод поступает от предприятий металлургической, горно-химической промышленности и жилищно-коммунального хозяйства. Характерными загрязняющими веществами являются соли тяжелых металлов. Наиболее высокие уровни загрязнения вод отмечаются в зоне деятельности горно-металлургических предприятий (города Мончегорск и Заполярный, поселок Никель) и в городе Мурманске. В Кольский залив сточные воды сбрасывают не менее 72 гражданских предприятий, что ежегодно составляет 98,6 млн. м³ неочищенных стоков [208]. Следовательно, система регионального мониторинга для дистанционного контроля и оперативного выявления опасных гидрогеомеханических процессов в перспективе должна охватывать все поднадзорные объекты и территории.

Приоритетные направления государственной региональной политики в данной сфере определены в документах стратегического планирования федерального уровня и указах Президента РФ. Согласно Постановлению № 570-ПП «Об утверждении государственной программы Мурманской области “Природные ресурсы и экология”» от 11.08.2020 г., ими являются предотвращение негативного воздействия хозяйственной или иной человеческой деятельности на природную среду и ликвидация их последствий, а также сохранение биологического разнообразия и образовательно-просветительская деятельность.

В рамках реализации программы основными приоритетными направлениями в организационно-техническом обеспечении являются:

- развитие государственного мониторинга окружающей среды на постоянной основе, включая использование комплексных автоматизированных систем;
- повышение эффективности государственного экологического надзора и производственного экологического контроля в области охраны окружающей среды за счет внедрения инновационных технологий.

В основе технического обеспечения системы регионального мониторинга лежит использование спутниковых технологий (спутниковой геодезии и ДЗЗ) и информационно-аналитических систем на базе пространственно-временных данных, интегрируемых в электронные картографические произведения и содержащих результаты моделирования и интерактивного анализа.

Разработка методов непрерывного контроля опасных природно-техногенных процессов, оценка их влияния и прогнозирование развития в рамках ключевых проектов основано на решении ряда практических задач [209–211]: формирование единой БД по мониторингу об объективном состоянии окружающей среды и природных ресурсов, антропогенных источниках загрязнения и воздействующих на нее факторах; оценка, выявление динамики и прогнозирование изменений состояния окружающей среды, природных ресурсов; разработка рекомендаций, направленных на защиту окружающей среды от воздействий антропогенной деятельности; обеспечение данными потребителей для проведения анализа эффективности принимаемых управленческих решений; разработка модели неограниченно масштабируемых потоков пространственно-временных данных от разнородных источников; разработка комплекса алгоритмов для построения пространственных моделей природно-хозяйственных систем в режиме реального времени; разработка на основе полученных с различных источников данных методов оперативного картографирования, наблюдения и анализа, позволяющих проводить комплексную оценку ситуации на исследуемой территории; интеграция данных регионального непрерывного мониторинга и системы оперативного геоинформационного картографирования для обеспечения информационного единства и т. д.

Особую роль в решении проблем в области промышленной безопасности играет космическая отрасль. В рамках действующей Федеральной космической программы РФ на 2016–2025 гг. и реализации проекта «Цифровая Земля» предусмотрено создание на базе госкорпорации «Роскосмос» единого Национального центра данных дистанционного зондирования Земли (НЦ ДЗЗ) [212, 213]: от разработки технологических решений и проведения системных исследований до производства тематических продуктов для государственных и коммерческих потребителей. Цель его создания — обеспечить использования и интеграции результатов космической деятельности на всех уровнях государственного и муниципального управления и во всех секторах экономики при рациональном сочетании программно-технологической независимости РФ и ее интересов в сфере международного сотрудничества. Также проектом предусмотрено создание Единого сплошного многослойного динамического покрытия (ЕСМДП) данными ДЗЗ различного пространственного разрешения всей территории Земли.

В настоящее время на территории РФ функционирует Единая территориально-распределенная информационная система данных ДЗЗ (ЕТРИС ДЗЗ) (рис. 3.24–3.26), ставшая общефедеральным проектом по интеграции в единое геоинформационное пространство всех информационных ресурсов ДЗЗ на территории страны для обеспечения государственных и других потребителей данными ДЗЗ и геоинформационными продуктами, созданными на их основе. ЕТРИС ДЗЗ состоит из 13 крупных центров, которые оптимально расположены на всей территории РФ, включая Мурманскую область (в Заполярье внедрено и функционирует 15 отраслевых региональных интеллектуальных информационных систем [214]).

Проект объединил унифицированными техническими стандартами в рамках новой иерархии всю наземную инфраструктуру, обеспечивающую управление целевым применением российских космических аппаратов ДЗЗ, прием информации, ее обработку и передачу потребителям. Координация работы ранее разнородных и разобщенных центров, принадлежащих различным министерствам, ведомствам и отдельным организациям, позволяет рационально распределять задачи в соответствии с техническими возможностями каждого элемента единой системы.

В рамках ЕТРИС ДЗЗ также был создан генеральный каталог хранимых данных ДЗЗ, который объединил все существующие российские архивы космической съемки. В состав ЕТРИС ДЗЗ входят: единый банк геоданных, геопортал госкорпорации «Роскосмос», региональные банки данных ДЗЗ из космоса, аппаратно-программные средства фонда данных ДЗЗ, специальное программное обеспечение и технологии обработки данных, система обмена данными и соответствующая телекоммуникационная сеть.



Рис. 3.24. Развертывание ЕТРИС ДЗЗ на территории РФ [215]

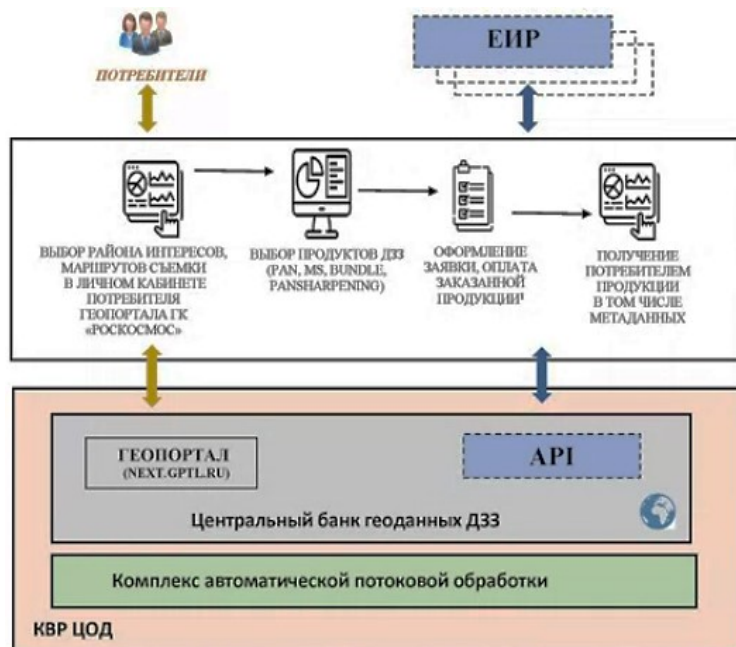


Рис. 3.25. Функциональная схема ФФД ДЗЗ [215]

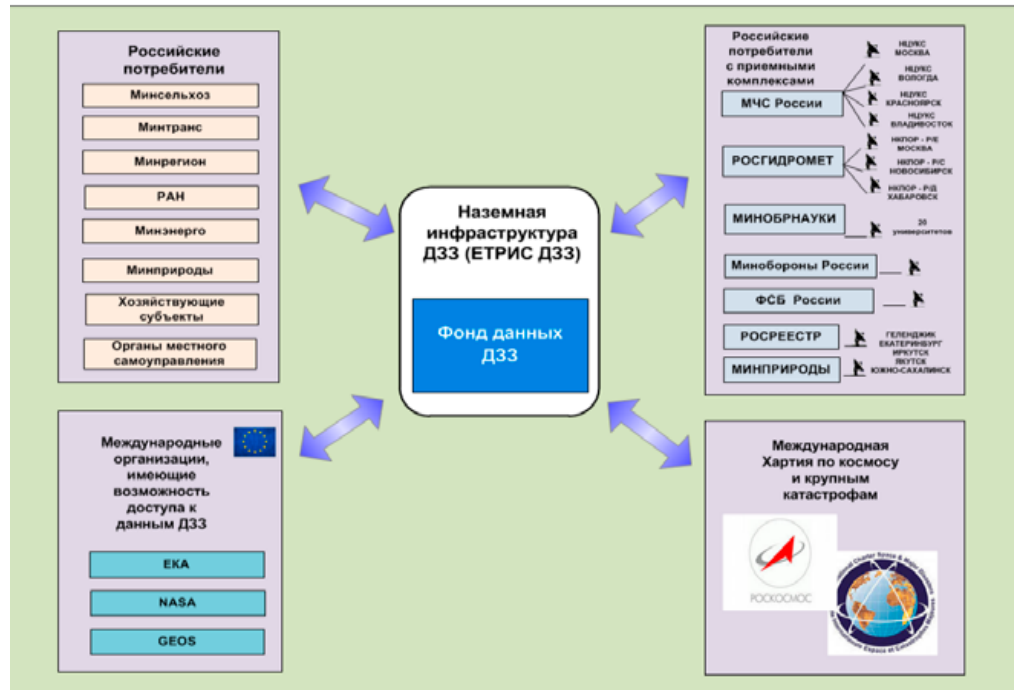


Рис. 3.26. Структура взаимодействия потребителей с ЕТРИС ДЗЗ [215]

Космический мониторинг поднадзорных промышленных объектов и территорий в регионе может осуществляться как на базе российских, так и международных геоинформационных ресурсов. Спутниковая съемка с получением пространственной информации о земной поверхности осуществляется в оптико-электронном и радарном диапазонах длин электромагнитных волн. Оптико-электронные спутниковые системы ДЗЗ способны распознавать пассивное отраженное излучение земной поверхности в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. В таких системах излучение попадает на соответствующие датчики, генерирующие электрические сигналы в зависимости от интенсивности излучения. В свою очередь, радарная космическая съемка выполняется в ультракоротковолновой (сверхвысокочастотной) области радиоволн, подразделяемой на X-, C- и L-диапазоны. Радиолокатор направляет луч электромагнитных импульсов на объект. Часть импульсов отражается от объекта, и датчик измеряет характеристики отраженного сигнала и расстояние до объекта. Выбор метода обусловлен решением конкретной практической задачи.

Основной российской цифровой платформой является геопортал «Роскосмоса», который разработан в АО «Научно-исследовательский институт точных приборов» и эксплуатируется в Научном центре оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) АО «Российские космические системы». Данный ресурс сочетает в себе средство просмотра космоснимков и средство поиска данных ДЗЗ с российских спутников по наиболее полному каталогу. С его помощью пользователь может не только оформить заявку (рис. 3.27) на архивные данные, но и заказать новую съемку, задав требуемые параметры. Ежедневно в каталоге размещается до 50 маршрутов съемки с российских спутников. Основными потребителями данных являются органы государственной власти РФ (МЧС, Минприроды, Росгидромет и др.).

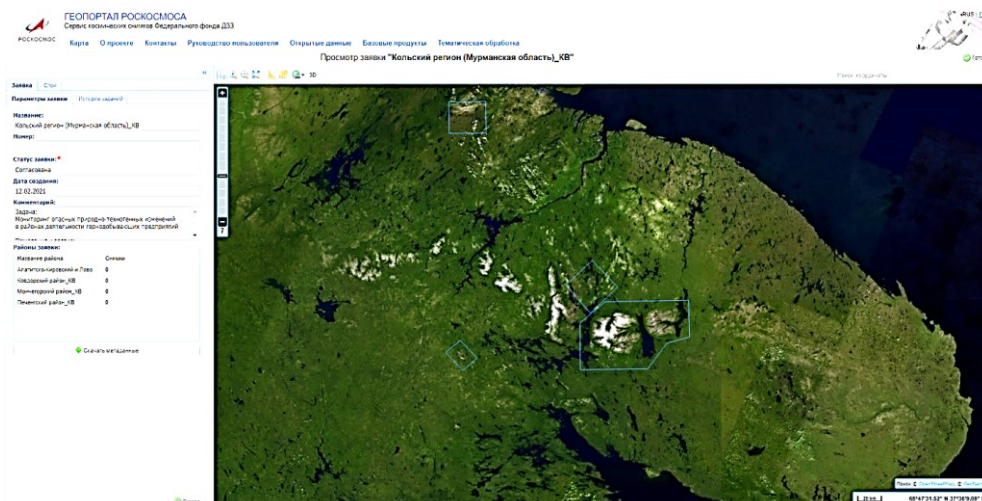


Рис. 3.27. Оформление и подача онлайн-заявки Горным институтом КНЦ РАН на ежегодную космическую съемку через геопортал «Роскосмоса»

В настоящее время в составе российской орбитальной группировки имеется:

- 3 космических аппарата «Ресурс-П» (рис. 3.28), которые ведут съемку с пространственным разрешением 1 м в панхроматическом и 3–4 м — в мультиспектральном режиме;
- 1 космический аппарат «Канопус-В», ведущий съемку с пространственным разрешением 2,1 м в панхроматическом и 10,5 м - в мультиспектральном режиме.

Ресурс-П №1, №2, №3 ^



КА «Ресурс-П» предназначены для дистанционного зондирования земной поверхности с целью получения в масштабе времени, близком к реальному, высокоинформативных изображений в видимом диапазоне спектра. Оптико-электронная аппаратура высокого разрешения дополнена гиперспектральной съемочной аппаратурой (ГСА) и комплексом широкозахватной мультиспектральной съемочной аппаратуры высокого разрешения (ШМСА-ВР) и среднего разрешения (ШМСА-СР). КА «Ресурс-П» №2 выведен из эксплуатации 26 ноября 2018 г.

Основные характеристики космического аппарата

Параметр		Значение
Дата запуска:		25 июня 2013 г. («Ресурс-П» №1). 26 декабря 2014 г. («Ресурс-П» №2). 13 марта 2016 («Ресурс-П» №3)
Оператор:		НЦ ОМЗ ОАО «Российские космические системы» (Россия)
Разработчик:		АО «РКЦ «Прогресс» (Россия)
Стартовая площадка:		космодром Байконур (Россия)
Средство выведения:		РН «Союз-2» (Россия)
Орбита	Тип:	Круговая солнечно-синхронная
	Высота:	475 км
	Наклонение:	97,3 град
Расчетный срок функционирования:		5 лет

Рис. 3.28. Описание и основные характеристики отечественной спутниковой системы «Ресурс-П» (№ 1–3)

Практическое приложение методов спутниковой съемки позволяет дистанционно выявить территориальные количественные и качественные изменения: рельефа, природных ресурсов (растительности, воды, почвы, горных пород), снежного покрова и атмосферы. Пример реализации комплексной многоцелевой задачи по обнаружению природно-техногенных изменений в Апатитско-Кировском горнопромышленном районе приведен на рис. 3.29 на примере использования программного обеспечения Европейского космического агентства ESA на базе спутниковых систем Sentinel. Возможности использования различных цифровых платформ в разной степени были апробированы применительно ко всем крупным горнопромышленным площадкам региона: АО «Апатит», АО «СЗФК», АО «Ковдорский ГОК», АО «ОЛКОН», АО «Кольская ГМК», ООО «Ловозерский ГОК» и др.

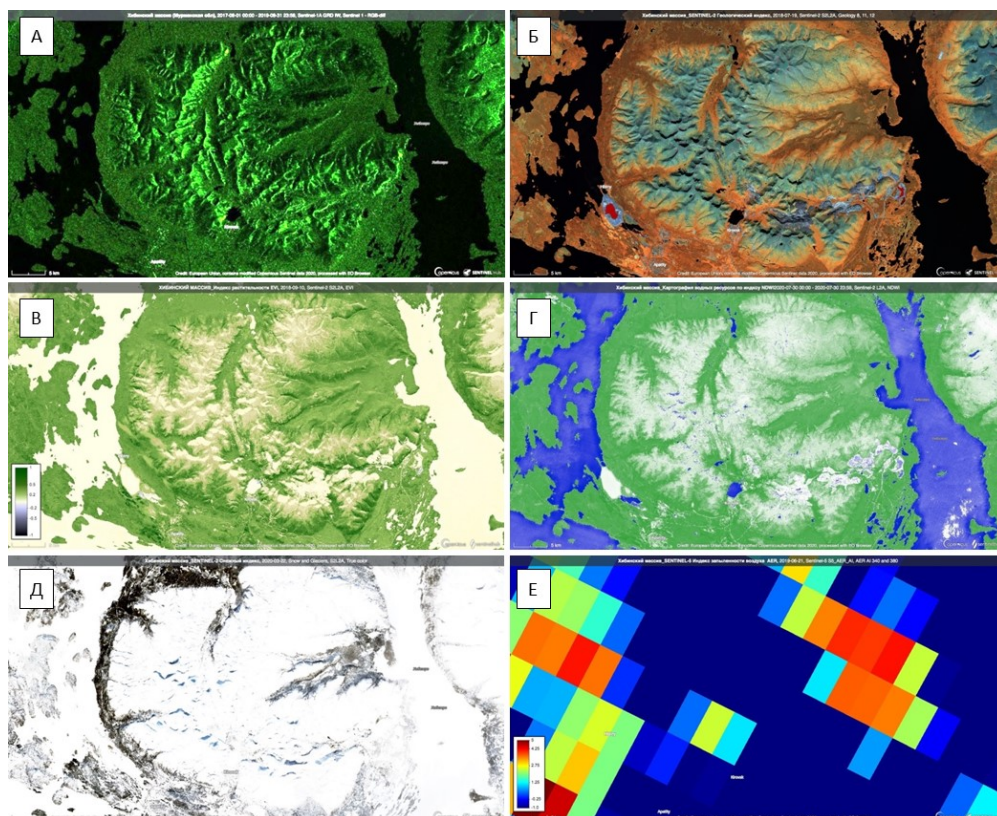


Рис. 3.29. Результаты многоцелевого космического мониторинга Апатитско-Кировского горнопромышленного района с помощью цифровой платформы Европейского космического агентства ESA Sentinel: *а* — природно-техногенных изменений рельефа; *б* — геологии; *в* — растительного покрова; *г* — водных ресурсов; *д* — снежного покрова; *е* — атмосферы

В горной промышленности в последние десятилетия на ряде крупных горных предприятиях успешно внедрены и функционируют системы локального мониторинга с применением автоматизированных технологий в решении различных производственных задач, например: маркшейдерская съемка с помощью дронов; сбор, хранение и передача гидрогеологической, инженерно-геологической и геомеханической информации, которая в дальнейшем используется при моделировании горных объектов (бортов карьера, дамб хвостохранилищ и др.) и процессов производства (формирование отвалов, напряженно-деформированное состояние породного массива и т. д.) [216–220].

Определенные риски проявления опасных техногенных процессов при разработке месторождений полезных ископаемых в регионе связаны со строительством, эксплуатацией и рекультивацией ГТС на горнодобывающих предприятиях, которые имеют своей особенностью сопряженность с природно-охраняемыми системами и крайне низкую конструктивную устойчивость к глобальным (динамическим) изменениям. Широкий опыт в области мониторинга состояния различных ГТС в России имеют следующие организации: Горный институт КНЦ РАН, Горный институт НИТУ «МИСиС», НПФ Карбон, ООО «Капстрой-Коммуникации», ВСЕГИНГЕО, ВИОГЕМ, ВНИМИ-СПбГИ (ТУ), МГТУ и др.

Разработанные и зарекомендовавшие себя в прошлом методы контроля деформаций «традиционными» геодезическими методами, безусловно, могут находить применение для решения определенных задач контроля стабильности объектов и сегодня. Но данные методы, даже в случае использования современных геодезических приборов с автоматической регистрацией и обработкой результатов измерений, являются достаточно трудоемкими и, в части обеспечения безопасности объектов инфраструктуры, не оперативными. При использовании «традиционных» технологий деформационного мониторинга геодезическими методами имеется временной разрыв между измерениями деформаций и получением результатов обработки. Кроме того, они дискретны. По этой причине всегда существует вероятность возникновения аварийных ситуаций в тот момент, когда данные о деформациях и их анализ относительно допустимых величин отсутствуют. Может возникнуть ситуация появления критических для данного объекта деформаций, но очередной цикл наблюдений по установленному графику проводится через контрольные сроки [221]. Отсутствие системного подхода в информатизации горных компаний и при сборе первичных сведений о состоянии отдельных элементов горнотехнических систем часто приводит к разрозненности данных и значительной избыточности, т. к. одни и те же параметры объектов определяются разными видами замеров и не учитывается корреляционная связь между ними [222].

В обеспечении промышленной безопасности ГТС следует рассматривать комплексный многоуровневый подход, который должен быть ориентирован в том числе на применение инновационных автоматизированных систем дистанционного контроля (АСДК) для системного и оперативного выявления опасных гидрогеомеханических процессов, как правило, возникающих в сооружениях данного типа.

Внедрение АСДК на производстве с целью мониторинга ГТС позволяет:

- в режиме реального времени получать и анализировать информацию о характеристиках исследуемых объектов (уровне водоносных горизонтов в отвалах, откосах, дамбах гидроотвалов и хвостохранилищ; величины деформаций откосных сооружений и др.);
- прогнозировать изменения состояния объектов во времени;
- своевременно обосновывать и проводить противоаварийные мероприятия по управлению устойчивостью их откосов, вместимости отвальных насыпей, намывных сооружений и т. д.

На рисунке 3.30 приведена общая схема автоматизированного сбора и обработки данных, а также удаленного контроля и управления объектами через сотовую связь стандарта GSM в нескольких режимах (GPRS, SMS и т. д.) [130], обладающих высокой временной изменчивостью. Данные устройства позволяют обеспечивать оперативный контроль за гидростатическим давлением в теле ограждающих дамб

намывных сооружений и избыточным давлением в поровой воде тонкодисперсных отложений намывных массивов с передачей аварийных сигналов при достижении критических значений давления и т. д. Представленная технология сбора и передачи данных также используется на большинстве горных предприятиях и строительных площадках при проведении инженерно-геологического, гидрогеологического или геомеханического мониторинга [221, 222].

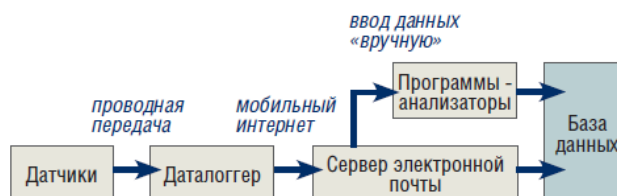


Рис. 3.30. Общая схема сбора и передачи информации о состоянии горнопромышленного объекта при использовании АСДК [222]

В качестве иллюстрации на рис. 3.31 приведены мультиспектральные оптические спутниковые снимки крупных хвостохранилищ горных предприятий на территории Мурманской области, полученные со спутниковых систем CNEC/Airbus, Landsat/Copernicus и Maxar Technologies.

Таким образом, в решении проблемы оценки и прогнозирования состояния опасных производственных объектов, в частности ГТС на горнодобывающих предприятиях, необходим комплексный многоуровневый подход, объединяющий методы «традиционной» геодезии, спутниковые технологии и АСДК с целью обеспечения надлежащего контроля и своевременного выявления опасных гидрогеомеханических процессов для обеспечения экологической и промышленной безопасности в регионе.

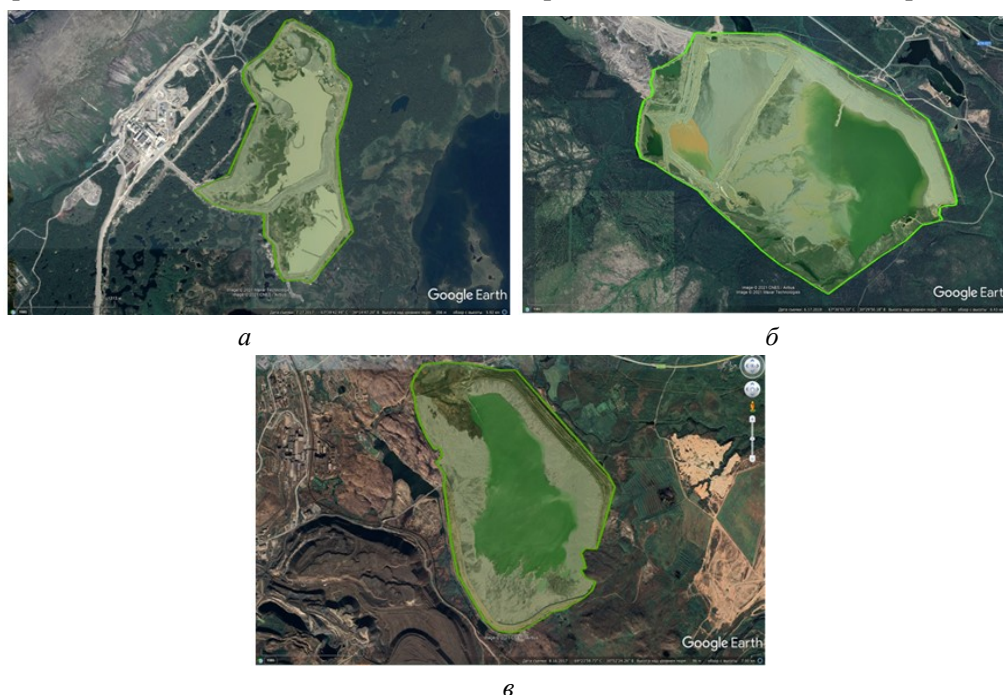


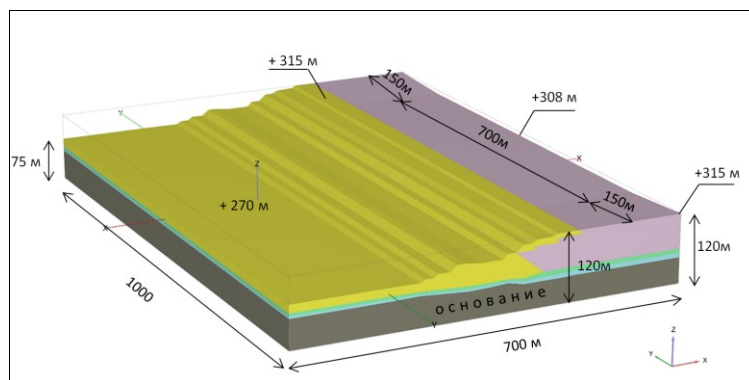
Рис. 3.31. Оптические мультиспектральные спутниковые снимки ГТС хвостохранилищ горных предприятий на территории Мурманской области: *а* — ГОК «Олений ручей»; *б* — АО «Ковдорский ГОК»; *в* — АО «Кольская ГМК» («Печенганикель»)

3.3.5. Компьютерное моделирование (виртуальный уровень)

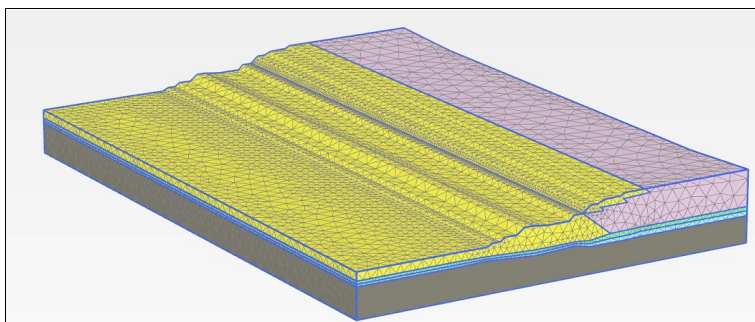
Компьютерное моделирование может выделяться как в отдельный уровень (виртуальный), так и интегрироваться с другими уровнями комплексного мониторинга. Во втором случае оно позволяет ввести теоретическое обоснование для выявленных натурными наблюдениями особенностей и закономерностей фильтрационно-деформационных процессов, а также решать задачи среднесрочного прогноза тенденций изменения гидрогеомеханического состояния ГТС хвостохранилища.

Методические основы построения гидрогеомеханических 3D-моделей ГТС хвостохранилищ и модельные закономерности трансформации гидрогеомеханического состояния ГТС хвостохранилищ изложены в разделах 2.4 и 2.5. В данном разделе отчета приведены результаты компьютерного гидрогеомеханического 3D-моделирования, иллюстрирующие наиболее характерные модельные результаты. При этом в качестве образчика была взята гидрогеомеханическая 3D-модель ГТС хвостохранилища ОФ АО «Ковдорский ГОК», имеющая следующие отличительные особенности (рис. 3.32):

- увеличение размеров до $1000 \times 700 \times 120$ м (длина $\times$ ширина $\times$ высота);
- изменение рельефа чаши хвостохранилища от плоского к чашеобразному.



а



б

Рис. 3.32. гидрогеомеханическая 3D-модель ГТС хвостохранилища ОФ АО «Ковдорский ГОК»: а — геометрическая схема; б — конечно-элементная сетка

Исследование модели в программном комплексе Plaxis 3D позволило получить результаты, отражающие геомеханическое (рис. 3.33) и гидрогеомеханическое (рис. 3.34, 3.35) состояние ГТС хвостохранилища. Геомеханическое состояние определялось только гравитационным нагружением (вес грунтов, без воды в чаше хвостохранилища), гидрогеомеханическое — совместным гравитационным (вес грунтов и воды) и гидравлическим (гидростатические и гидродинамические нагрузки).

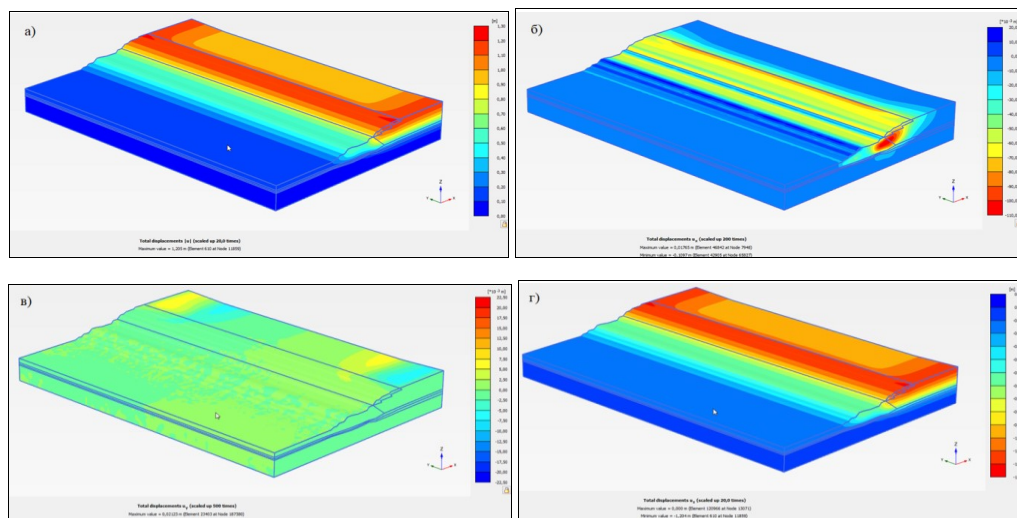


Рис. 3.33. Картины распределения перемещений грунтов ГТС хвостохранилища при исходных геомеханических условиях (гравитационное нагружение): *а* — общие $U_{\text{общ}}$; *б* — субгоризонтальные U_x ; *в* — субгоризонтальные U_y ; *г* — вертикальные U_z

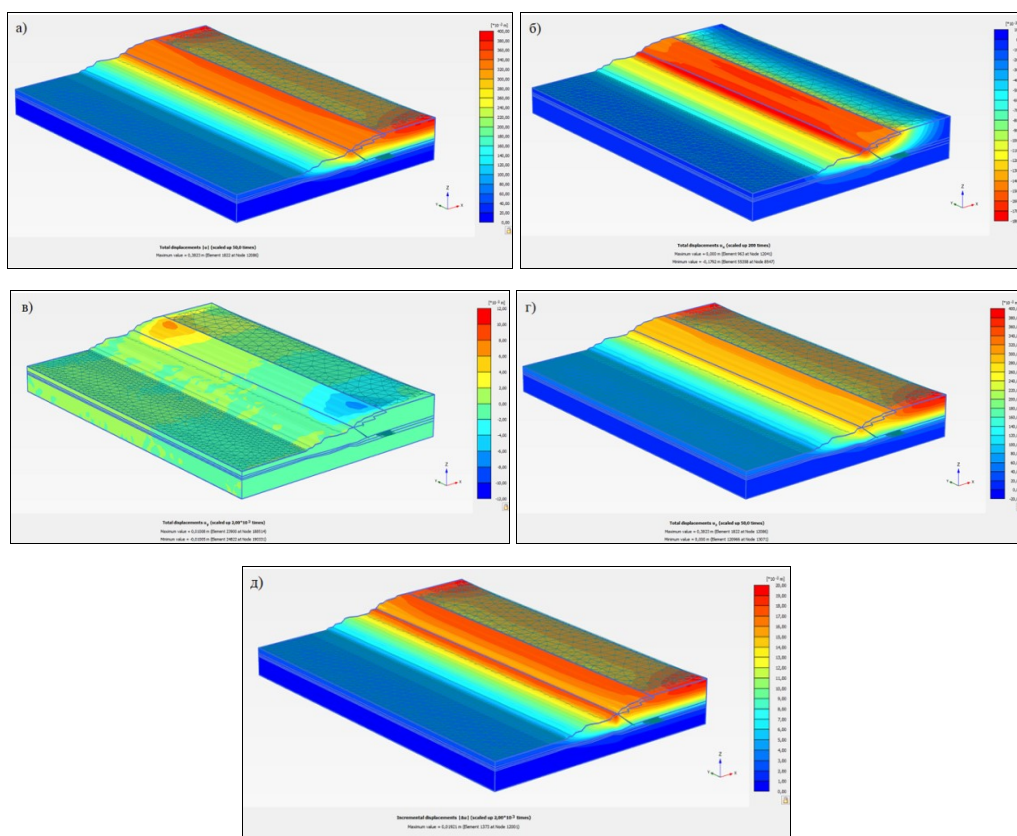


Рис. 3.34. Картины распределения перемещений грунтов ГТС хвостохранилища при эксплуатационном заполнении водонасыщенной пульпой: *а* — общие $U_{\text{общ}}$; *б* — субгоризонтальные U_x ; *в* — субгоризонтальные U_y ; *г* — вертикальные U_z ; *д* — приращения перемещений ΔU

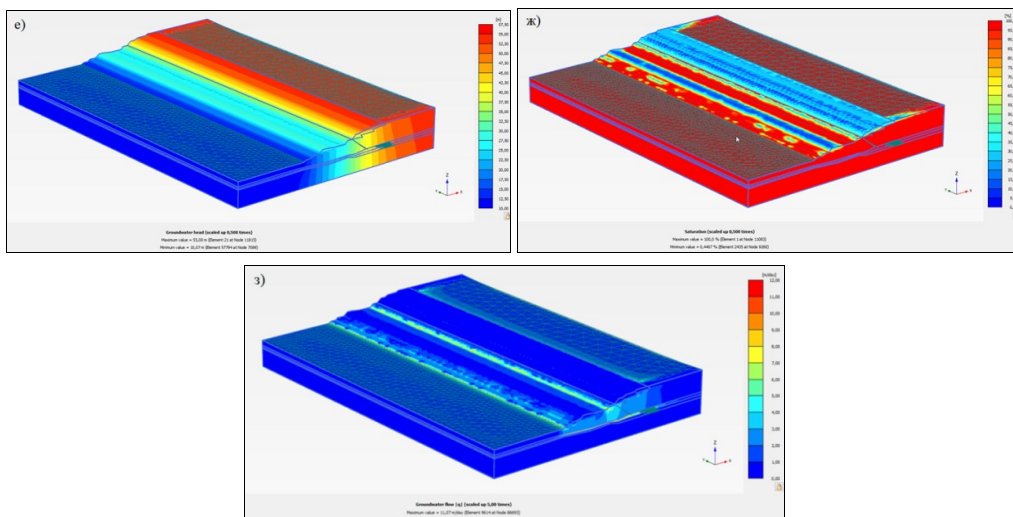


Рис. 3.35. Картины гидрогеомеханического состояния грунтов ГТС хвостохранилища при эксплуатационном заполнении водонасыщенной пульпой: *е* — уровень грунтовых вод (*Groundwaterhead*); *ж* — степень фильтрации *Saturation*; *з* — скорость фильтрации грунтовых вод (*Groundwaterflow*)

Важными расчетными результатами являются также геомеханическое и гидрогеомеханическое состояние исследуемых ГТС в поперечном сечении (рис. 3.36 и 3.37) и определение депрессионной кривой (рис. 3.38).

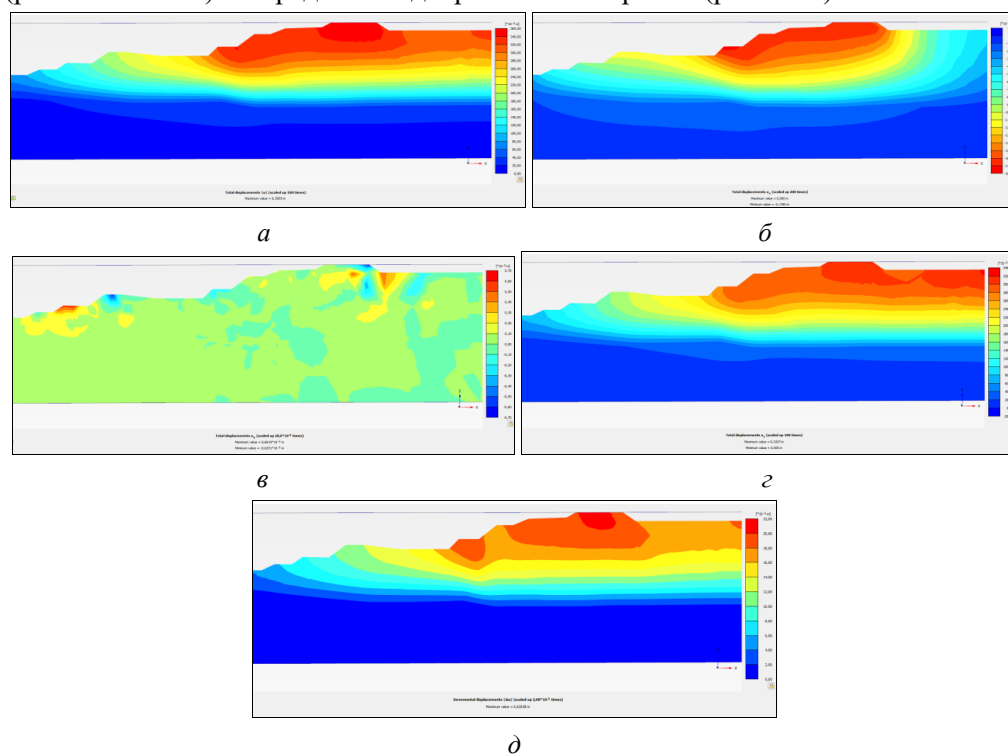


Рис. 3.36. Картины перемещений (геомеханического состояния) грунтов ГТС хвостохранилища при эксплуатационном заполнении водонасыщенной пульпой: *а* — общие $U_{\text{общ}}$; *б* — субгоризонтальные U_x ; *в* — субгоризонтальные U_y ; *г* — вертикальные U_z ; *д* — приращения перемещений ΔU

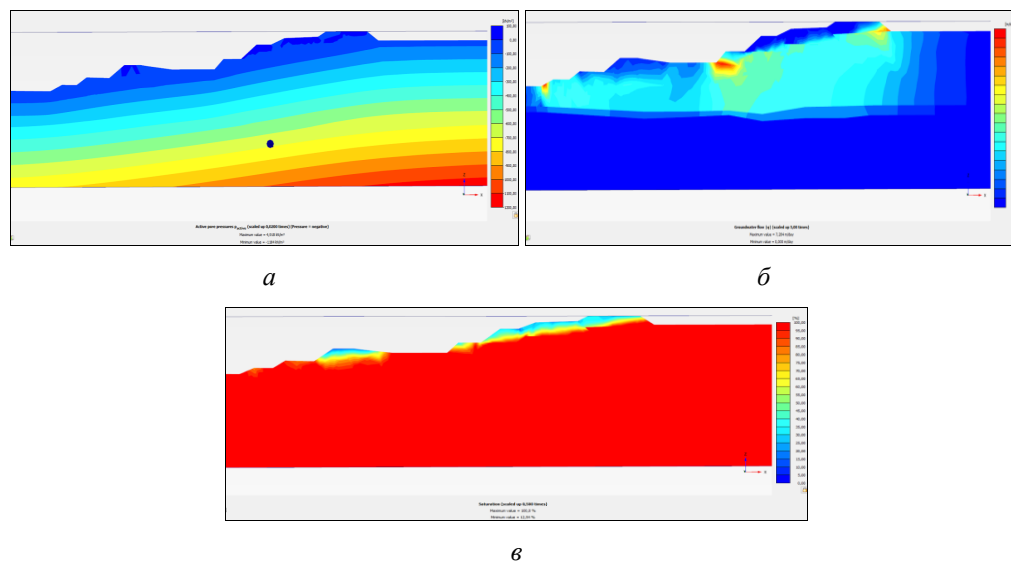


Рис. 3.37. Картины гидрогеомеханического состояния грунтов ГТС хвостохранилища при эксплуатационном заполнении водонасыщенной пульпой: *а* — активное поровое давление (*Active porepressures P_{active}*); *б* — степень фильтрации *Saturation*; *в* — скорость фильтрации грунтовых вод (*Groundwaterflow*)

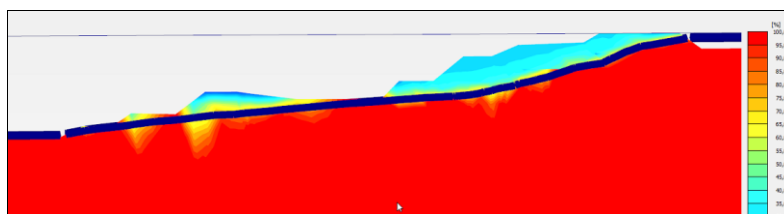


Рис. 3.38. Интерпретация депрессионной кривой по картине распределения водопроницаемости *Saturation* грунтов ГТС хвостохранилища

3.4. Комплексирование мультидисциплинарных методов различных уровней

3.4.1. Визуальные наблюдения, фотофиксация и георадарное зондирование

Комплексирование мультидисциплинарных исследований является ключевым элементом в формировании многоуровневого мониторинга геогидромеханического состояния горнотехнических объектов, где, например, для объектов хвостохранилищ применение визуального и георадарного методов позволяет эффективно использовать их преимущества и нивелировать недостатки при решении задач мониторинга локальных нарушений фильтрационных процессов в теле насыпных гидротехнических сооружений. Важной особенностью комплексирования этих методов является возможность непосредственной привязки наведенного электромагнитного поля к текущей ситуации на ГТС (деформации, зоны водопроявления и т. д.).

В качестве примера рассмотрены результаты комплексирования визуальных наблюдений, фотофиксации и георадарного зондирования на наблюдательном полигоне ГТС хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК» с целью уточнения внутренней структуры и локализации зон различного водонасыщения грунтов (рис. 3.39). Комплексные исследования проводились ежегодно в осенний период.

По георадарным данным выявлено значительное намокание грунтов в теле дамбы. Радарограмма практически повсеместно характеризуется низкими скоростными значениями $V = 7,75\text{--}8,05$ см/нс (синяя палитра) с большей локализацией в интервале глубин 280–287 м (рис. 3.39 б). Сопоставительный анализ с данными визуального обследования и фотофиксации позволяет прийти к выводу, что зона низких скоростей на радарограмме, в интервале длины 400–420 м, проявилась вследствие возникновения нарушений фильтрационных процессов в теле дамбы, которые и привели к ее деформации (рис. 3.39 в–д). Состояние обследуемого участка на момент измерений по георадарным данным находится в потенциально опасном состоянии, которое может повлечь за собой значительные деформационные проявления при дальнейшей эксплуатации.

Таким образом, совместный анализ результатов визуальных наблюдений, фотофиксации и георадарного зондирования участка насыпного грунтового ГТС показывает, что комплексирование данных методов может эффективно использоваться как для обнаружения, так и для мониторинга развития локальных фильтрационных процессов.

3.4.2. Аэрофотосъемка, наземная и GPS-геодезия

Технологии проведения мониторинговых наблюдений с использованием аэрофотосъемки, наземной и GPS-геодезии описаны в разделах 3.2 и 3.3 данной монографии. Их комплексирование необходимо прежде всего для полетного задания БПЛА (GPS-привязка полетных галсов), интерпретации и обработки полученных фотографий, а также для построения ортофотопланов.

Аэрофотосъемочные комплексы могут использоваться как отдельно, так и в рамках многоуровневого анализа данных геодезического мониторинга. В результате выполнения аэрофотосъемочных работ с помощью автоматической обработки материалов создаются ортофотопланы, матрицы высот и детальные трехмерные модели местности. 3D-модели формируются при совмещении аэрофотосъемки с БПЛА и тахеометрической съемки местности, которая производится на дневной поверхности. Наблюдения с помощью БПЛА позволяют получить всю необходимую информацию о рельефе и геометрии исследуемой поверхности ГТС с точной координатной привязкой по всей территории съемки, а не только в местоположении контрольно-наблюдательных реперов.

Привязки полученных БПЛА фотографий осуществляется с применением наземной и GPS-геодезии в требуемой системе координат. Положение опорных точек определяется через их проекции на исходных фотографиях. Для определения положения маркеров в трехмерном пространстве необходимо указать их положение как минимум на 3 фотографиях (рис. 3.40, 3.41). Чем большее число фотографий используется для указания проекций маркера, тем выше точность позиционирования. Для корректной привязки исследуемого объекта использовалось 8 прямоугольных ($1 \times 1,5$ м) маркированных цветом контрольных точек местности, пространственно разнесенных по территории участка. Их координаты получены с помощью электронного тахеометра Topcon QS3M.

Результаты комплексных наблюдений с использованием аэрофотосъемки, наземной и GPS-геодезии приведены на рис. 3.42, 3.43.

По результатам комплексирования аэрофотосъемки, наземной и GPS-геодезии можно дешифровать все элементы ГТС хвостохранилища: съезды, уступы, насыпи, строения на ограждающих дамбах, длину намывного пляжа и линию уреза воды в прудке-отстойнике.



Рис. 3.40. Размещение маркеров на аэрофотоснимке

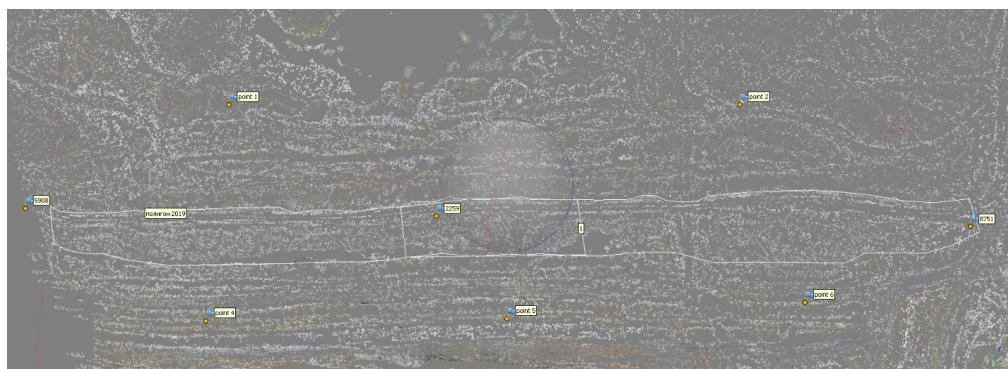


Рис. 3.41. Схема полной расстановки маркеров на объекте мониторинга

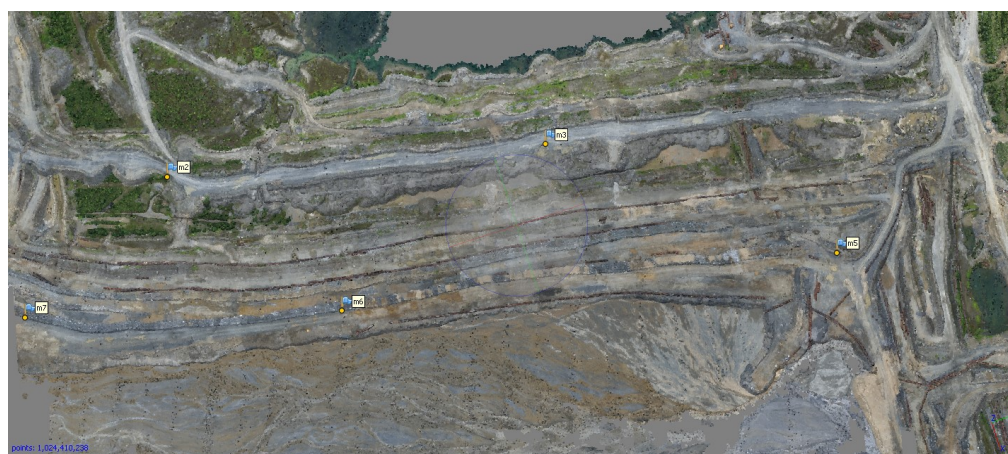


Рис. 3.42. Плотное облако точек по объекту мониторинга — ограждающей дамбы ГТС хвостохранилища

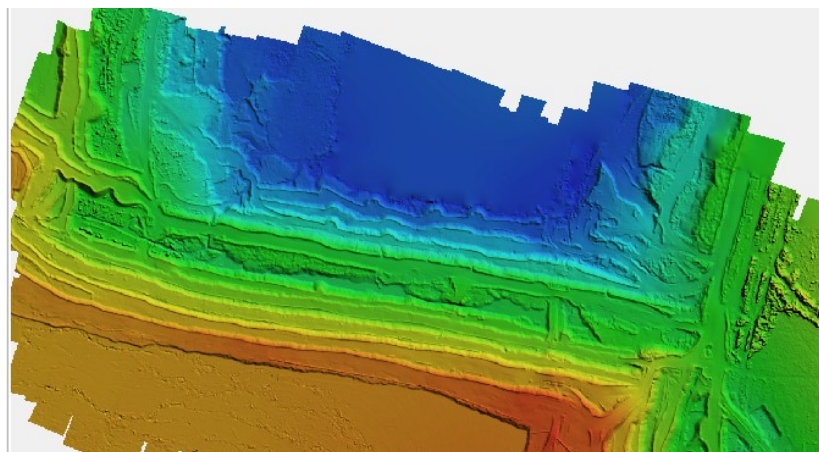


Рис. 3.43. Карта высот объекта мониторинга — ограждающей дамбы ГТС хвостохранилища

3.4.3. Визуальные наблюдения, георадарное зондирование и спутниковые снимки

На основе комплексирования данных георадарных, гидрогеологических, геофизических и инженерно-геологических исследований и спутниковых снимков раскрыт механизм инфильтрации из отстойника промышленных вод в основной карьер АО «Ковдорский ГОК», реализующийся в формировании в теле ограждающей насыпной дамбы трех линзообразных зон с повышенными фильтрационными характеристиками. Установление механизма и локализация зон повышенной инфильтрации позволили обосновать инженерно-технические противофильтрационные решения, которые были включены в основу проекта по обеспечению безопасности ведения открытых горных работ и модернизации сети промышленного гидрогеологического мониторинга.

В настоящее время на горнодобывающем предприятии АО «Ковдорский ГОК» рассматриваемый отстойник промышленных вод используется в качестве основного технологического звена в системе оборотного водоснабжения восточного ряда водопонижения карьера. Общий объем откачиваемой воды из карьера в отстойник (куда, помимо карьерного водоотлива, попадают производственные сточные воды теплоэлектроцентрали, ливневые сточные воды с территории промплощадки после локальной очистки от нефтепродуктов) достигает до 1,5–2,5 тыс. м³/ч. Действующая система водопонижительных скважин перехватывает до 0,57 тыс. м³/ч, а ориентировочный объем утечки воды из отстойника в карьер по разным оценкам составляет 0,25–0,3 тыс. м³/ч. Поступление промышленных вод из отстойника обратно в карьер обуславливает осложнение как с технической, так и экономической точки зрения технологических процессов, приводит к снижению устойчивости обводненных обнажений породного массива в районе рудно-дробильного конвейерного комплекса, размещенного на Восточном борте карьера.

С целью выявления зон повышенной инфильтрации из отстойника промышленных вод в основной карьер проведено визуально-инструментальное обследование сложноструктурной ограждающей насыпной дамбы и акватории отстойника (рис. 3.44). В основе обследования применен метод комплексирования результатов георадарного обследования, архивных оптических спутниковых снимков за период 2006–2019 гг., результатов геофизических исследований ЗАО «ГЕОВИСТ» инженерно-геологических исследований грунтов АО «Мурманская ГРЭ», а также данных о размещении подземно-наземных инженерных сооружений в районе заложения георадарных профилей.

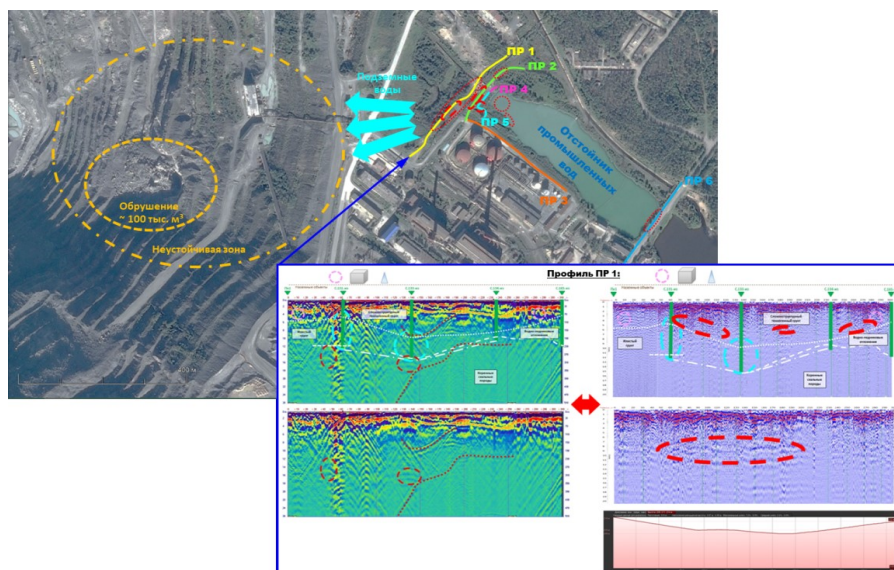


Рис. 3.44. Результаты комплексных исследований по оперативному выявлению зон повышенной инфильтрации из отстойника промышленных вод в основной карьер АО «Ковдорский ГОК»: (нижний рисунок — результаты обработки георадарных данных 1-го и 2-го циклов наблюдений, полученных с помощью комплексов «Лоза-1В» и RamacGPR/X3Mc экранированными антеннами 50 и 100 МГц соответственно: где , и — пространственное местоположение наземно-подземных коммуникаций и сооружений (зданий, воздушных линий электропередач и подземных/наземных трубопроводов); — геологические скважины; — выявленные обводненные зоны по данным геологических скважин; — граница дислокации грунтов по электрофизическим свойствам; ПР1;...; 6 — обозначение георадарных профилей; и — зоны наиболее вероятной и повышенной инфильтрации)

По результатам комплексных исследований раскрыт механизм инфильтрации из отстойника промышленных вод в основной карьер, реализующийся посредством формирования 3 зон с повышенными фильтрационными характеристиками непосредственно в теле ограждающей насыпной дамбы и, кроме того, 2 зон наиболее вероятной инфильтрации в северо-западной части акватории отстойника и 4 зон — в теле Восточной и Западной дамб, и развития процесса инфильтрации под нарушенным слоем донных илистых и техногенных (насыпных) грунтов на границе их контакта с водно-ледниковыми отложениями в локализованных глубинных интервалах с распространением подземных вод в карьер по естественным системам трещин коренных пород.

Результаты комплексных исследований были включены в основу проекта по обеспечению безопасности ведения открытых горных работ и модернизации сети промышленного гидрогеологического мониторинга.

3.4.4. Компьютерное гидрогеомеханическое моделирование и натурные многоуровневые наблюдения

Для целей мониторинга хвостохранилища разработана концепция комплексирования междисциплинарных методов для наблюдений на нескольких уровнях по отношению к дневной поверхности, реализующих иерархический подход (см. разделы 2.2, 2.3) (рис. 3.45). Концепция комплексирования включает, с одной стороны, доступные современные методы контроля и диагностики горнотехнических объектов как открытых динамических природно-технических систем и, с другой, — цифровые технологии при проведении натурных наблюдений, первичной обработке и в единой обработке разноформатных цифровых данных [133, 152].

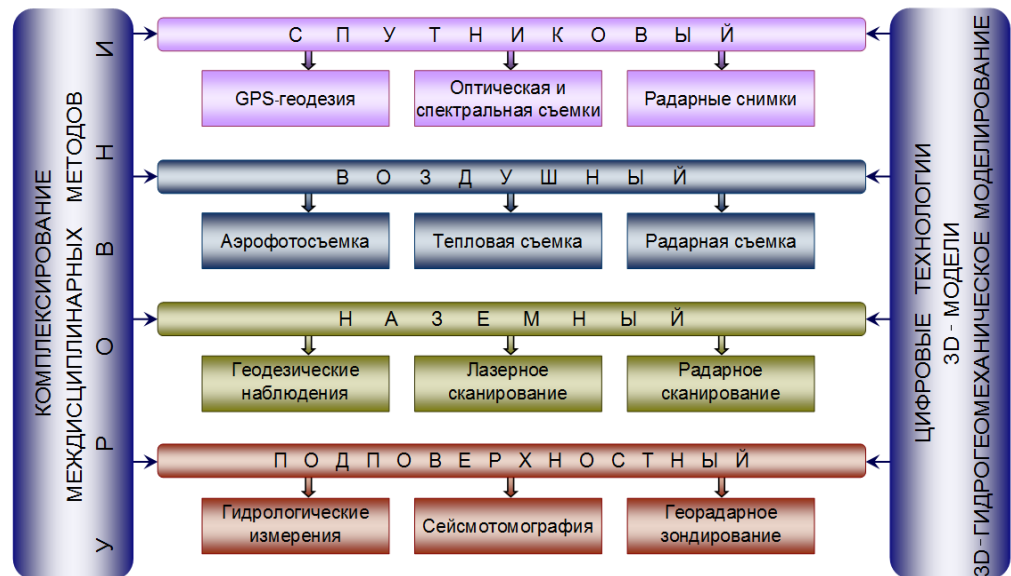


Рис. 3.45. Концепция оптимального комплексирования мультидисциплинарных методов и способов наблюдений при многоуровневых исследованиях и мониторинге

Мониторинг ГТС хвостохранилища базируется на комплексировании междисциплинарных наблюдений на различных уровнях, соотнесенных с земной поверхностью (рис. 3.46): спутниковом (GPS-геодезия, оптические, спектральные и радарные снимки космических аппаратов) [115, 133, 135, 152, 223–227]; воздушном (аэрофотосъемка различного вида с применением БПЛА) [133, 152]; наземном (визуальные наблюдения, фотофиксация, геодезические съемки и измерения, лазерное и радарное поверхностное сканирование) [152]; подповерхностном (гидрологические измерения, пьезометрические и скважинные регистрации уровня подземных вод, сейсмотомография, георадарное подповерхностное сканирование) [163, 228]. Это позволяет решать мультимасштабные задачи мониторинга: от локальных участков и компонентов гидротехнических сооружений (от миллиметров до метров) до хвостохранилища в целом (от сотен метров до десятков километров). Важным условием комплексирования междисциплинарных методов является построение 3D-моделей и гидрогеомеханическое моделирование, а также применение цифровых технологий обработки [169, 229].

Применение и непосредственная взаимосвязь методов мониторинга гидрогеомеханического состояния ГТС хвостохранилища западной части Российского сектора Арктики и цифровых технологий показана на рис. 3.46. 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, сопоставления с имеющимися научно-техническими и экспертными знаниями (нормативно-методические документы) в базе.



Рис. 3.46. Цифровые технологии в междисциплинарных методах и подходах мониторинга гидрогеомеханического состояния ГТС хвостохранилища

В таблице 3.3 приведены программные комплексы и методы, применяемые для первичной обработки и интерпретации получаемых данных по методам и способам наблюдений и измерений. В настоящее время их перечень составляет 18 современных лицензированных (или сертифицированных — в случае условно бесплатных и свободно распространяемых) пакетов.

Весь комплекс перечисленных выше методов и наблюдений применяется для мониторинга ГТС хвостохранилища на АО «Ковдорский ГОК» (с 2012 г.), АО «Кольская ГМК» («Печенганикель») (с 2014 г.), АО «СЗФК» (с 2015 г.). На ГТС хвостохранилищ созданы наблюдательно-контрольные полигоны, оборудованные геодезическими реперами и поверхностными марками, гидротехнической контрольно-измерительной аппаратурой, постоянными отражателями и опорными точками для аэрофотосъемки и привязки спутниковых снимков. Мониторинговые наблюдения выполняются ежемесячно, за исключением декабря — января (период полярной ночи в условиях Арктики), в пространственно-временной увязке и, в некоторых случаях, синхронизируются комплексированием визуальных наблюдений, фотофиксации, георадарного зондирования и гидрогеологических измерений. В летние месяцы (в условиях полярного дня) к перечисленным наблюдениям добавляются геодезические наземные и GPS-измерения по контрольно-наблюдательным реперам, аэрофотосъемка и данные спутниковых оптических и радарных снимков. Прогноз изменения гидрогеомеханического состояния хвостохранилища с учетом паводковых и внепроектных нагрузок выполняется на основе результатов многовариантного компьютерного моделирования в Plaxis 3D [169].

Методические подходы к созданию объемных гидрогеомеханических 3D-моделей ГТС хвостохранилища горнодобывающего предприятия изложены в разделе 2.3. Модели разрабатывались на основе имеющихся данных инженерно-геологических изысканий и данных натурных наблюдений, выполненных исполнителями отчета.

Таблица 3.3

Программное обеспечение
для цифровой обработки мониторинговых наблюдений и измерений

Методы и способы наблюдений и измерений	Программные комплексы (методы) для цифровой обработки
ДЗЗ оптические и спектральные снимки	Goggle Earth. SNAP Desktop
ДЗЗ радарные снимки	Метод интерферометрии постоянных отражателей. Geo Network. СУБД Postgre SQL
Аэрофотосъемка	Agisoft Metashape Professional. Agisoft Photo Scan Pro. ГИС Спутник
GPS-геодезия	Topcon Toposurv Robotic Station
Наземная (классическая) геодезия	Topcon Tools. CREDO. AutoCAD
Георадарное зондирование/профилирование	Radexplorer V.1.4. «КРОТ». «ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ»
Цифровая фотосъемка	ACD See
Пьезометрические измерения	MS Excel
Компьютерное 3D- и 4D-моделирование	Plaxis 3D

Следует отметить, что отличительной особенностью разработанных гидрогеомеханических 3D-моделей является принцип интегрирования геолого-геометрических (инженерно-геологические и пространственные характеристики породных грунтов), геомеханических (механические свойства и действующие нагрузки) и гидрологических (гидростатические и гидродинамические параметры) условий (рис. 3.47). Это позволяет, наряду с геомеханическими расчетами (определение напряжений и деформаций в исследуемом объекте), выполнять и гидравлические (изменение уровня и давления дренирующейся воды, формирование зон повышенной фильтрации и развитие их во времени: увеличение поперечных размеров, повышение скорости и давления фильтрационного потока). Также принципиально отличительной особенностью разработанных гидрогеомеханических 3D-моделей является дифференцированное использование для различных породных грунтов и степени их водонасыщения соответствующей модели их деформирования (поведения под нагрузкой): LE — Linear Elastic (линейно-упругая); MC — Mohr–Coulomb (Мора–Кулона); HB — Hoek–Brown (Хука–Брауна); MCg — Mohr–Coulomb для связного грунта; HS — Hardening Soil (упругопластическая с упрочнением грунта); SS — Soft Soil (слабого грунта); SSC — Soft Soil Creep (слабого грунта с ползучестью); CC — Cam–Clay (модифицированная (шатровая) модель) [95].

Граничные условия для модели описываются известными уравнениями Бернулли (рис. 3.47), где: H_v и H_n — высота уровня воды на верховом и низовом склонах дамбы соответственно; $z(x) = H_v - H_n$ — геометрический напор в сечении x ; $p(x)/\rho g$ — пьезометрический напор; $\lambda v^2/2g$ — скоростной напор фильтрации; λ — коэффициент гидравлического сопротивления; v — скорость фильтрации воды; g — ускорение силы тяжести; β — угол гидравлического уклона; ρ — плотность воды; x — рассматриваемое сечение.

Для адекватного применения граничных условий и моделей деформирования (поведения под нагрузкой) для различных слоев грунтов выполнялась тарировка по данным комплексных натурных наблюдений.

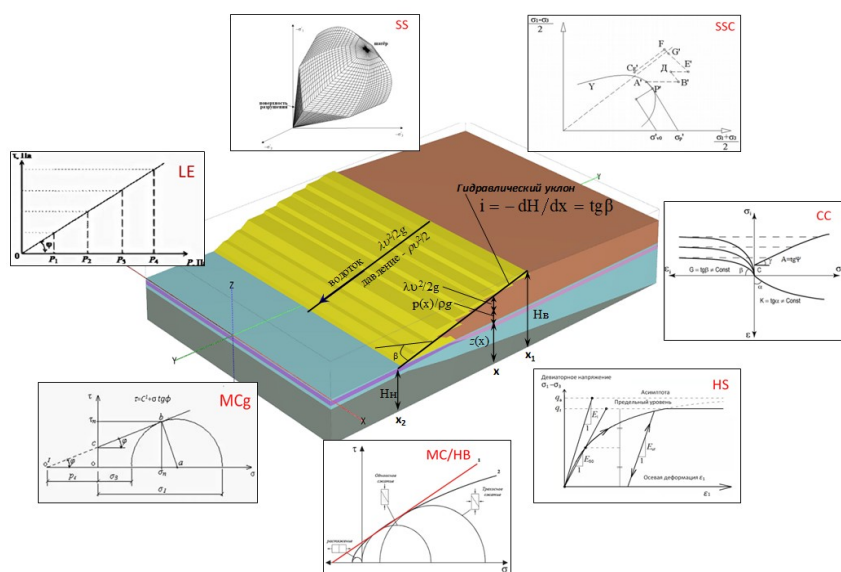


Рис. 3.47. Гидрогеомеханическая 3D-модель ГТС хвостохранилища горнорудного предприятия по [95]

Верификация расчетных значений компьютерного моделирования выполнялась на основе сопоставительного их анализа с данными комплексных натурных наблюдений. Экспериментальные (полевые) наблюдения за формированием и взаимосвязью геомеханических и гидродинамических процессов в ГТС хвостохранилища выполнялись с использованием георадарных, пьезометрических, наземных и спутниковых геодезических систем. Полученные результаты имеют хорошее подтверждение данными комплексных натурных наблюдений и ежемесячного мониторинга.

Созданные трехмерные гидрогеомеханические модели ГТС хвостохранилища горнорудного предприятия получили подтверждение их адекватности комплексными экспериментальными наблюдениями на ГТС хвостохранилища ОФ ГОК «Олений ручей», АО «Ковдорский ГОК», АО «Кольская ГМК», АНОФ-2 КФ АО «Апатит».

На основе полученных данных установлены главные закономерности гидрогеомеханического состояния ГТС хвостохранилищ, выявлены тенденции его изменения вследствие постоянного заполнения, созданы адаптивные 3D-модели. В частности, выполнены оценки фильтрационной устойчивости ограждающих хвостохранилища дамб, выявлены и локализованы потенциально опасные фильтрационно-деформационные процессы, определены механизмы повышенной фильтрации, формирования фильтрационных каналов (рис. 3.48). Результаты уровневых 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) дополняются компьютерным гидрогеомеханическим 3D-моделированием.

Полученные на каждом уровне данные (рис. 3.48) позволили перейти в иерархии от всего хвостохранилища (спутниковые снимки) к ограждающей дамбе (снимки аэрофотосъемки), ее поверхностным деформациям (наземные геодезические измерения) и к фильтрационно-деформационным процессам (георадарные, сейсмические и гидрологические наблюдения). Гидрогеомеханическое компьютерное

моделирование при этом направлено на решение задач оценки устойчивости ограждающих дамб на текущий момент и на среднесрочную перспективу. В частности, на основе комплексирования результатов многоуровневых наблюдений был раскрыт механизм инфильтрации воды из отстойника хвостохранилища в карьер, реализующийся в формировании в теле ограждающей насыпной дамбы зон механической суффозии с повышенными фильтрационными характеристиками.

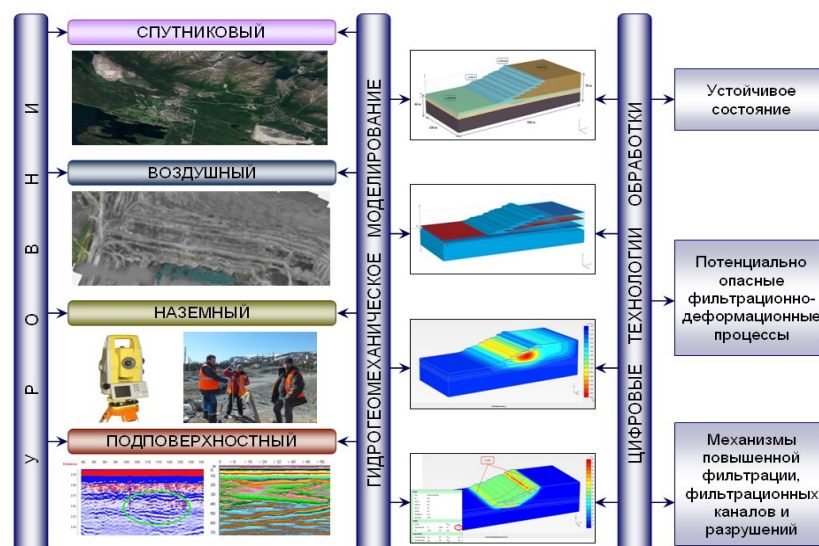


Рис. 3.48. Применение цифровых технологий в системе многоуровневого мониторинга хвостохранилища и раскрытия механизма формирования потенциально опасных фильтрационно-деформационных процессов

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

На основе результатов мониторинга разработаны защищающие и превентивные мероприятия, что позволило предотвратить и избежать разрушений. За время мониторинговых наблюдений выявлены несколько опасных участков, которые были оперативно укреплены (подсыпка крупнообломочного грунта на низовой откос, подсыпка мелкодисперсным грунтом и уплотнение полков ограждающей дамбы).

Кроме того, был решен ряд оперативных задач для ГТС АО «Апатит» (2016–2019 гг.) и АО «ОЛКОН» (2015–2021 гг.). На ГТС отстойников Восточного рудника АО «Апатит» выполнены режимные мониторинговые исследования, в результате которых получена детальная информация о структуре и состоянии ограждающих сооружений. Особенностью мониторинговых работ на хвостохранилище АО «ОЛКОН» было определение притока и оттока воды в бассейне ГТС, составление водного баланса хвостохранилища и выявление его значимости.

Приобретенный опыт показал, что применение цифровых технологий как непосредственно в методах наблюдений, так и при обработке разноформатных данных повышает информативность и эффективность получаемых результатов при комплексном многоуровневом мониторинге ГТС хвостохранилища горнодобывающего предприятия. Показано и доказано, что цифровые технологии позволили более достоверно и надежно выполнять оценку состояния хвостохранилища, способствовали раскрытию механизма формирования потенциально опасных фильтрационно-деформационных процессов в ограждающих хвостохранилище дамбах.

4. ИНТЕГРИРОВАНИЕ ГЕОРАДАРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В МНОГОУРОВНЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1. Применение георадаров на горнодобывающих предприятиях

Интегрирование георадарных технологий в комплексные междисциплинарные исследования является одним из ключевых элементов в формировании многоуровневого мониторинга геогидромеханического состояния горнотехнических объектов, где, например, использование классических георадаров (Ramac, «Лоза» и др.), позволяет оперативно в режиме *in situ* получать подповерхностные данные о структуре и состоянии массива пород [161]. Принцип действия аппаратуры подповерхностного георадарного зондирования (в общепринятой терминологии — георадара) основан на излучении сверхширокополосных (наносекундных) импульсов, как правило, метрового и дециметрового диапазона электромагнитных волн и приеме сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства [161]. В свою очередь, применение стационарных интерферометрических георадаров (IDS, Groundprobe и др.) позволяет на безопасном расстоянии вести мониторинг смещений массива пород с высокой точностью в круглосуточном режиме. Измерения, выполняемые стационарным радаром, основаны на использовании эффекта интерференции электромагнитных волн или, другими словами, наложении электромагнитных волн. Радар является активным датчиком и посылает импульс в направлении земной поверхности с частотой 17,1–17,3 ГГц. Импульс взаимодействует с земной поверхностью, частично поглощается и частично отражается в сторону радара. Интерферометрический анализ позволяет получить данные о смещении объекта путем сравнения информации, собранной в разное время, о сдвиге фаз отраженного от объекта сигнала [230]. И если традиционные методы геодезии, методы космической геодезии и космические радарные измерения можно отнести к региональным системам мониторинга, то георадарные технологии относятся к локальным. Такой вид мониторинга с использованием наземных интерферометрических радаров в настоящее время применяется на различных горных предприятиях как в России, так и за рубежом [230–232].

На мировом рынке имеется лишь несколько компаний, которые реализовывают данное оборудование: IDS (Италия), Groundprobe (Австралия), Routhtech (ЮАР), LISA (JRC-Lislab) и GPRI (Gamma Remote Sensing). Радары IDS и Groundprobe получили наибольшее распространение в России [231, 232].

На сегодняшний день радарные технологии активно применяются на следующих зарубежных месторождениях: рудник Geita (Танзания), карьер Palabora (Южная Африка), Siilinjärvi (Финляндия), SadiolaGoldmine (Мали) и SunriseDamGoldmine (Австралия), TurtleMountain (Канада) и многие др. Одно из самых крупных обрушений, произошедшее в Bingham-Canyon, было спрогнозировано при помощи интерферометрических радаров [231, 232].

Одним из первых горнорудных предприятий в России, использующих стационарные георадары, стал АО «Ковдорский ГОК», где с 2014 г. на борту карьера «Железный» был установлен радар IBIS-FM производства компании IDS (Италия). За период с октября 2018 г. по ноябрь 2019 г. было зафиксировано 5 случаев потери устойчивости участка карьера: из них 3 случая представляют собой локальные обрушения в массиве скальных пород; 2 обрушения — оползни, произошедшие в грунтовом массиве. Практически все случаи потери устойчивости имели объем 100 м³ и менее. На сегодняшний день радарная система мониторинга насчитывает уже 4 радара и покрывает практически все участки борта карьера [232].

Также стоит отметить опыт использования георадара IBIS-FM в условиях «Михайловского ГОКа», где с 2019 г. ведется мониторинг устойчивости бортов карьера, их участков и уступов. Установлены предварительные критерии безопасности для Южного борта карьера «Михайловского ГОКа» при проведении наблюдений с использованием георадара. В качестве ориентировочных значений были приняты величины, основанные как на накопленном опыте маркшейдерских измерений специалистами комбината, так и на основании литературных данных на аналогичных месторождениях. Сопоставление результатов измерений георадара с измерениями, выполняемыми с использованием GPS-приемников, по реперам, которые расположены на бермах, выявило общие тренды сдвижения массива пород [231, 232].

Основным назначением интерферометрических георадаров является выявление деформационных смещений горных пород на ранних стадиях с целью своевременного предупреждения критических ситуаций в случае обнаружения потенциально опасных зон с быстроразвивающимися деформационными процессами. Таким образом, использование интерферометрических радарных систем для дистанционного мониторинга устойчивости бортов и уступов открытых горных выработок, отвалов и дамб хвостохранилищ с целью повышения промышленной безопасности при выполнении горных работ может существенно дополнить существующую систему комплексного многоуровневого мониторинга на горнорудном предприятии [230–232]. Однако в России георадары такого типа используются пока еще не так активно и слабо распространены, ввиду их высокой стоимости и отсутствия нормативно-методической базы по их применению. И здесь на первый план выходят мобильные классические георадары для исследования подповерхностных структур, позволяющие оперативно выявить потенциально опасные зоны на обследуемых участках [161].

4.2. Современные тенденции георадарных исследований

На уровне подповерхностного георадарного исследования важнейшей стоит задача избавления от субъективной интерпретации получаемых данных, а также поиск обоснованных геофизических признаков для выявления потенциально опасных зон на горнотехнических объектах. Во многих случаях, при отсутствии должной априорной информации об объекте исследования, происходит «притягивание» данных к «нужному» результату, что в дальнейшем очень сильно сказывается на репутации метода для этих задач. Поэтому специалисты, использующие его, вынуждены привлекать другие методы исследования, комплексировать, например, с электропрофилированием или использовать сейсмический метод, посредством которого уже установлены взаимосвязи параметров среды. С одной стороны, все это приводит к значительному удорожанию работ, а с другой, утрачивается одна из самых востребованных особенностей метода — оперативность и возможность получать информацию в так называемом режиме *in situ* (на месте). Полученные на одном объекте значения параметров среды по георадиолокационным данным в большинстве случаев не подходят для использования на другом. Разнообразие пород и грунтов со своими отличными признаками слагаемой ими среды вынуждает специалистов в области георадиолокации искать новые пути решения, основываясь на созданных другими исследователями методических подходах по выявлению различных критериев [161].

Изучением подповерхностных структур в техногенно нарушенных массивах пород и грунтов с использованием различных подходов занимаются: А. И. Калашник, А. Ю. Дьяков [233], П. Н. Александров, Ю. А. Морозов, А. Л. Кулаковский, М. А. Матвеев, А. И. Смольская [234], Д. Н. Мусалев, Н. Н. Прохоров, А. М. Клубук [228], А. А. Жуков, А. М. Пригара, И. Ю. Пушкарева, Р. И. Царев [235], J. Rey, J. Martínez, V. Montiel, F. Cañadas, N. Ruiz [236], A. Benter, W. Moore, M. Antolovich [237].

Отмечена оперативность получения информации в так называемом режиме *in situ* посредством анализа отраженных волн от дифрагирующих объектов (M. Elkarmotya, C. Colla, E. Gabrielli, P. Papeschi, S. Bonduà, R. Bruno, M. Loewer, J. Igel, N. Wagner [238, 239]), однако в подавляющем большинстве случаев отсутствуют обоснованные геофизические признаки для интерпретации полученных данных. Исследования носят узкоспециализированный или экспериментальный характер и не применимы на других объектах.

Представлены методики георадарного зондирования для исследований подповерхностных объектов в условиях ограниченного пространства (С. Yuan, Н. Cai [240]). Установлены особенности волновых полей (время регистрации, вариации амплитудных значений дифрагированных и отраженных волн), позволяющие достоверно проводить оценку геокриологических условий разработки месторождений криолитозоны (Л. Л. Федорова, Е. Э. Соловьев, К. О. Соколов, Г. А. Куляндин [241]).

Рассмотрены вопросы сезонного изменения электрофизических свойств горных пород, методики проведения полевых исследований. Показана эффективность комплексирования методов георадиолокации и электротомографии (Е. Э. Соловьев, Д. В. Саввин, Л. Л. Федорова [242]). Комплексирование методов, использующих разную природу волновых полей, позволяет существенно повысить достоверность полевых определений, показывает эффективность применения для грунтовых сооружений (N. N. Abramov, A. Yu. Dyakov, A. I. Kalashnik [165]).

Стоит отметить много усовершенствований в части увеличения глубинности и информативности получаемых данных за счет понижения частоты излучаемого сигнала и увеличения мощности передатчика, которые значительно усилили возможности получения полевых результатов (A. I. Berkut, D. E. Edemsky, V. V. Kopeikin, P. A. Morozov, I. V. Prokhorovich, A. V. Popov [243, 244]).

Существенно возросло число новаций и в камеральной обработке георадарных данных, прежде всего с реализацией трехмерных систем (M. Kang, N. Kim, S. Im, J. Lee, Y. An [245]).

Уделено большое внимание повышению информативности и точности оценки строения пород и грунтов на основе совершенствования алгоритмов обработки данных с использованием методов статистического анализа, процедур декомпозиции сигнала, а также применения различного вида фильтров (D. Kumlu, I. Eger [246, 247], B. Maruddani, E. Sandi [248]).

В то же время основным недостатком применения георадиолокации является сложность получения распределенных скоростных данных (А. Ю. Дьяков, А. И. Калашник [249]). Интерпретация в подавляющем большинстве случаев производится на основе детального анализа амплитудных, частотных и фазовых характеристик электромагнитного сигнала, сопоставления осей синфазности сигнала внутри выделенных на радарограмме участков или областей, которые отличаются друг от друга характером картины, поверхностями угловых несогласий, интенсивностью отражающих горизонтов (А. Ю. Дьяков [250]).

Среди новых технологий обработки данных георадиолокации можно выделить автоматическое и полуавтоматическое определение скоростных характеристик из локализованных гиперболических отражений (A. Ristić, Ž. Bugarinović, M. Vrtunski, M. Govedarica [251], S. Jazayeri, A. Saghafian, S. Esmaeili, C. Tsokos [252], Y. Wang, G. Cui, J. Xu [253]). Стоит отметить инновационную технологию автоматизированного анализа поля обратного рассеяния (ПОР) электромагнитных волн, реализованную

в программе «ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ», позволяющую существенно улучшить качественные и количественные показатели результирующих параметров (Р. Р. Денисов, В. В. Капустин [254]). Однако ряд исследователей (А. Л. Марченко, М. Л. Владов, М. С. Судакова, А. В. Старовойтов [255]) считают, что автоматический алгоритм расчета скоростей по гиперболам дифракции не содержит расчета необходимых атрибутов, отражающих кинематические и динамические особенности осей синфазности дифрагированных волн и интерактивной фильтрации результатов по их значениям. На основе разработанного авторами алгоритма предложена технология автоматического определения параметров дифрагированных волн, реализованная в программе Desk_123, которая может применяться для экспресс-анализа распределения скоростей на временных разрезах, в том числе в полевых условиях.

Практика применения атрибутного анализа волнового поля для решения различных задач показала существенное повышение качества интерпретации данных георадиолокации и может являться эффективным средством для своевременного определения зон неоднородностей в массивах пород и грунтов [256, 257]. Таким образом, комплексный анализ динамических и кинематических характеристик волнового поля является важнейшим инструментом для исследования закономерностей волновых процессов в техногенно нарушенных водонасыщенных массивах пород и грунтов, решения различных задач георадиолокацией (Н. Е. Фоменко, Д. А. Гапонов, В. В. Капустин, В. В. Попов, Л. Н. Фоменко [258], С. В. Андрианов [259]).

4.3. Комплексирование георадарного и сейсмического зондирования дамбы хвостохранилища

Рассматривая подповерхностные георадарные исследования как один из этапов многоуровневого мониторинга, стоит отметить, что в настоящее время основными тенденциями геофизики при исследовании техногенно нарушенных водонасыщенных массивов пород и грунтов является повышение информативности и надежности получаемых данных. Существование большого количества методов геофизики свидетельствует об отсутствии какого-то одного стандартного геофизического метода, способного обеспечить оперативное и качественное получение требуемой информации о горно-геологической среде, ввиду сложности и неоднозначности получаемых данных. Вместе с тем использование различных по природе волновых методов электромагнитного (георадарного) и сейсмического зондирования позволяет получать оперативную информацию о структурных особенностях сооружения и степени водонасыщенности слагающих их грунтов [260, 261]. Поэтому рациональный выбор и комплексирование геофизических методов позволяет повысить уровень и надежность данных при решении различных задач.

Большое количество промышленных объектов, в том числе гидротехнические сооружения, отнесены к категории опасных и технически сложных объектов, которые требуют регулярных обследований. Одними из них являются хвостохранилища с системами ограждающих насыпных сооружений, нарушение устойчивости и функциональности которых может привести к нештатной ситуации в технологической горнопромышленной цепочке или даже к аварии.

Так, на хвостохранилище АО «Ковдорский ГОК» в различные периоды времени произошли интенсивные протечки и размывы нижнего склона ограждающей дамбы, приведшие к необходимости дополнительных исследований гидротехнического сооружения [5, 27, 28, 163, 262–263].

Для оценки состояния и структуры техногенно нарушенных водонасыщенных пород комплексированием волновых методов на наблюдательном полигоне дамбы хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК» в целях уточнения границ вариаций контрольных геофизических показателей при локализации зон водонасыщения и намокания грунтов выполнено два цикла наблюдений сейсмическим и георадарным методами, где в качестве показателей результатов приняты: V_s/V_p — для сейсмического метода; V — скорость прохождения электромагнитной волны для георадарного метода наблюдений. Основные результаты выполненных синхронных исследований представлены в виде радарограммы скорости электромагнитной волны V (а) и сейсмотомограммы соотношения сейсмических скоростей V_s/V_p (б) (рис. 4.1, 4.2). На палитрах, выделенных по вышеуказанным показателям зон, визуально отмечается подобие в распределениях исследуемых разрезов, что отражает структурные особенности обследуемого участка. Для количественного сопоставления результатов построены графики изменчивости контролируемых показателей по трассам зондирования в отдельных разрезах на двух пикетах (рис.4.3, 4.4).

Интерпретация результатов первого цикла (рис. 4.1) позволяет сделать следующие выводы. Анализ палитры выделенных зон по вышеуказанным критериям показал визуальное несоответствие в распределениях скоростей исследуемых разрезов, отражающих структурные особенности обследуемого участка. По данным георадиолокации приповерхностная зона на глубину до 2 м представлена увлажненными грунтами на двух интервалах 400–430 и 470–480 м, в свою очередь, по данным сейсмического метода приповерхностная зона увлажнена только очень небольшими локальными участками до 5 м шириной и только в конце профиля 470 м совпадает с данными георадиолокации.

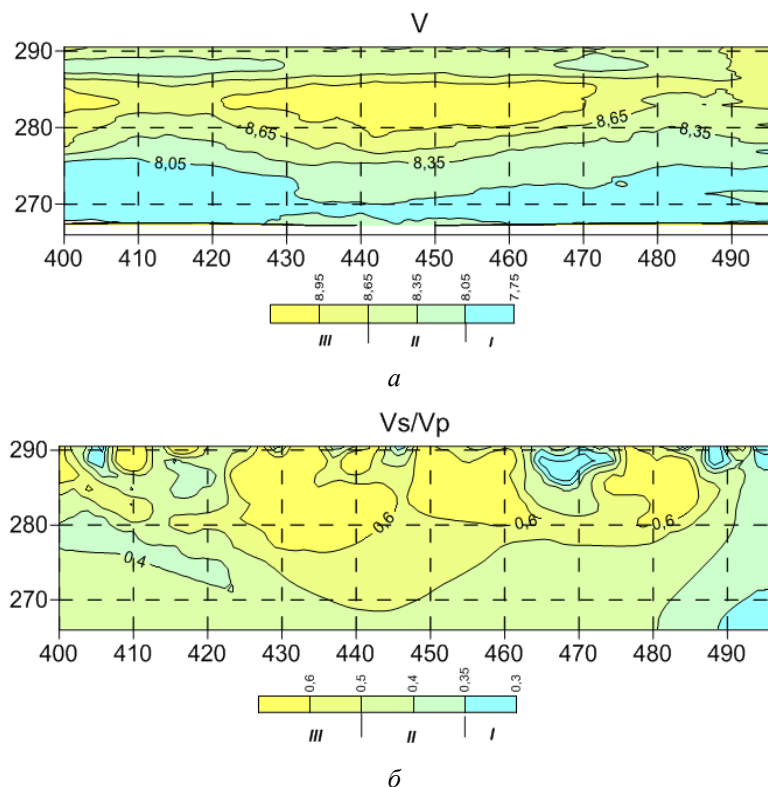


Рис. 4.1. Результаты первого цикла измерений зондирования дамбы георадарным (а) и сейсмическим (б) методами

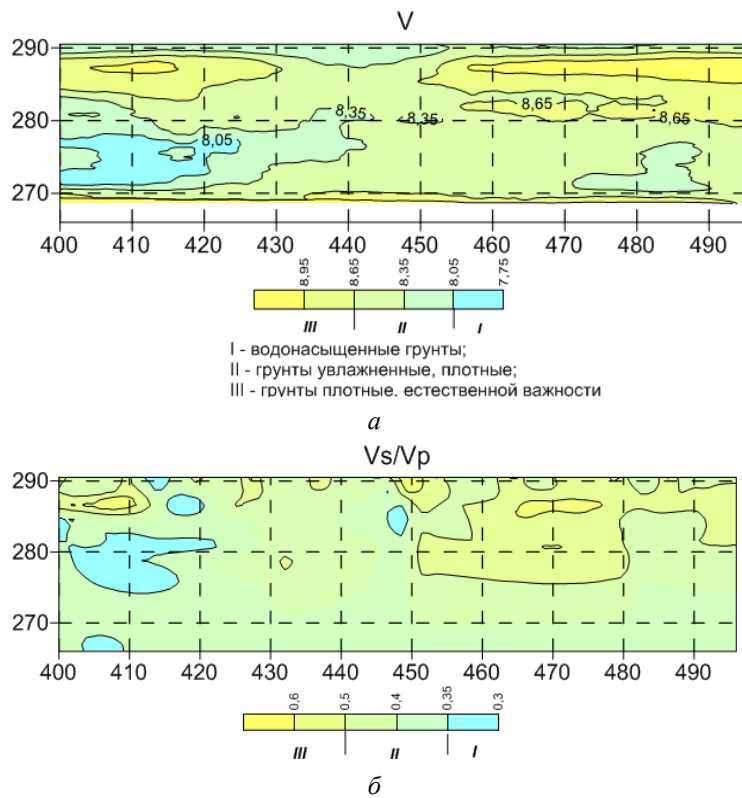


Рис. 4.2. Результаты второго цикла измерений зондирования дамбы георадарным (а) и сейсмическим (б) методами

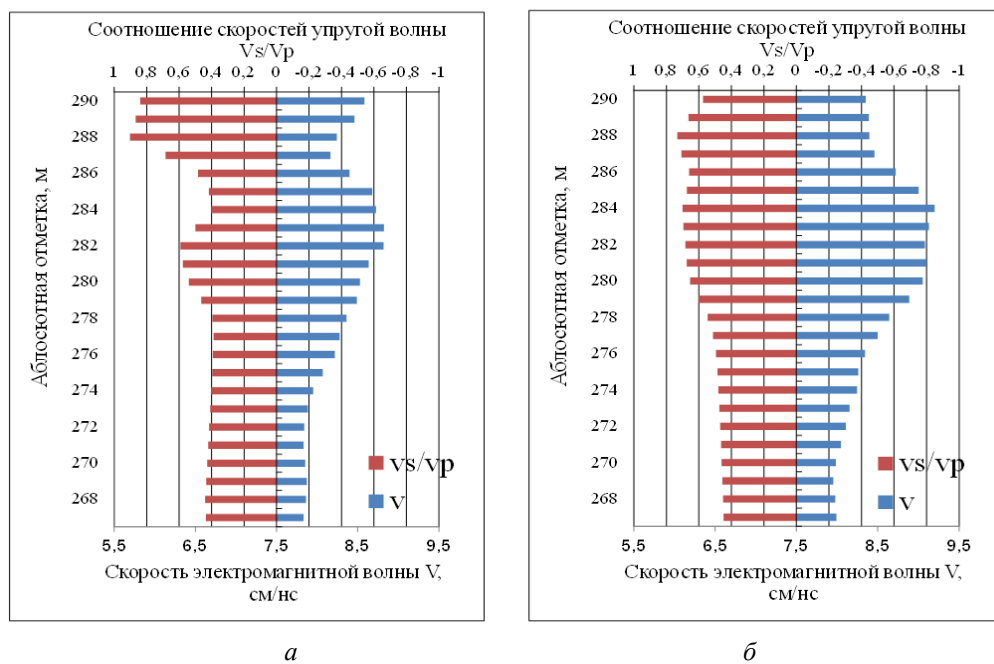


Рис. 4.3. Сопоставление результатов наблюдений первого цикла измерений георадарным (V) и сейсмическим (V_s/V_p) зондированием по трассам в сечениях дамбы: а — ПК4 + 10 м; б — ПК4 + 60 м

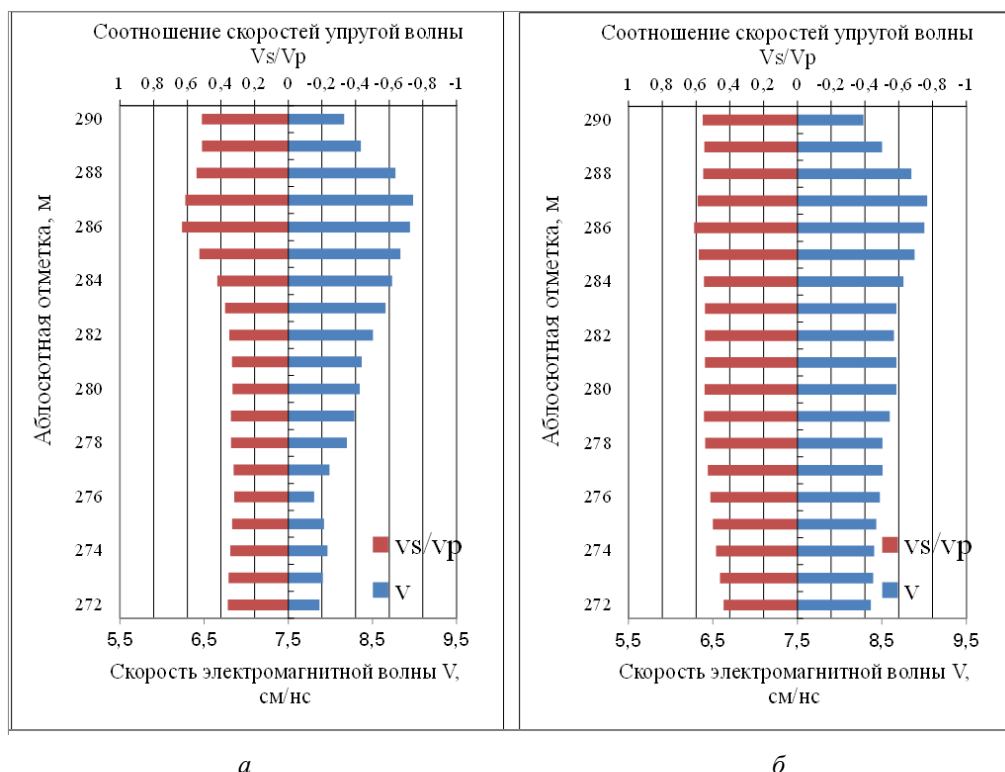


Рис. 4.4. Сопоставление результатов наблюдений второго цикла измерений георадарным (V) и сейсмическим (V_s/V_p) зондированием по трассам в сечениях дамбы: *а* — ПК4 + 10 м; *б* — ПК4 + 76 м

По данным сейсмического метода водонасыщенные грунты выделяются в самом конце профиля на интервале 485–498 м на всю глубину разреза, а по данным георадиолокации водонасыщенные грунты определяются по всей длине профиля на абсолютной отметке 270–275 м. Такие изменения можно объяснить не единовременным комплексированием методов, разница во времени измерений составила несколько дней, а также влиянием природных (обильные осадки) и техногенных факторов (сброс воды с фабрики), которые тоже нельзя исключить. Однако в центральной части профиля данные имеют очень хорошую повторяемость, здесь повсеместно плотные грунты естественной влажности. Для более конкретного сопоставления результатов представлены графики (рис. 4.3) изменчивости контролируемых показателей в отдельных разрезах на двух пикетах.

Интерпретация анализируемых результатов второго цикла (рис. 4.2) позволяет сделать следующие выводы. Приповерхностная зона до 289,5–289 м (1–1,5 м), подверженная проникновению осадков, характеризуется начальной невысокой скоростью $V = 8,1\text{--}8,22$ см/нс с дальнейшим резким ее нарастанием до $V = 8,36\text{--}8,71$ см/нс на глубине 282,5–280 м (8–10 м), что обусловлено, скорее всего, ростом плотности и снижением влажности грунтов. В интервале высотных отметок 280–270 м фиксируется зона резкого падения величин скоростей до значений $V = 7,35\text{--}7,71$ см/нс. Глядя на подобные изменения показателя V_s/V_p на этих же отметках и составляющего 0,30–0,35 по сейсмограмме (рис. 4.2 *б* — голубая палитра), можно заключить, что грунты здесь подвержены значительному намоканию. Для более конкретного сопоставления результатов представлены графики (рис. 4.4) изменчивости контролируемых показателей в отдельных разрезах на двух пикетах.

Сравнение данных георадарного и сейсмического зондирования, двух циклов измерений показало наличие уверенной корреляции (сходимости) полученных результатов. Однако данные второго цикла имеют более тесную связь (рис. 4.5), что связано с комплексированием данных методов в пространственно-временной увязке.

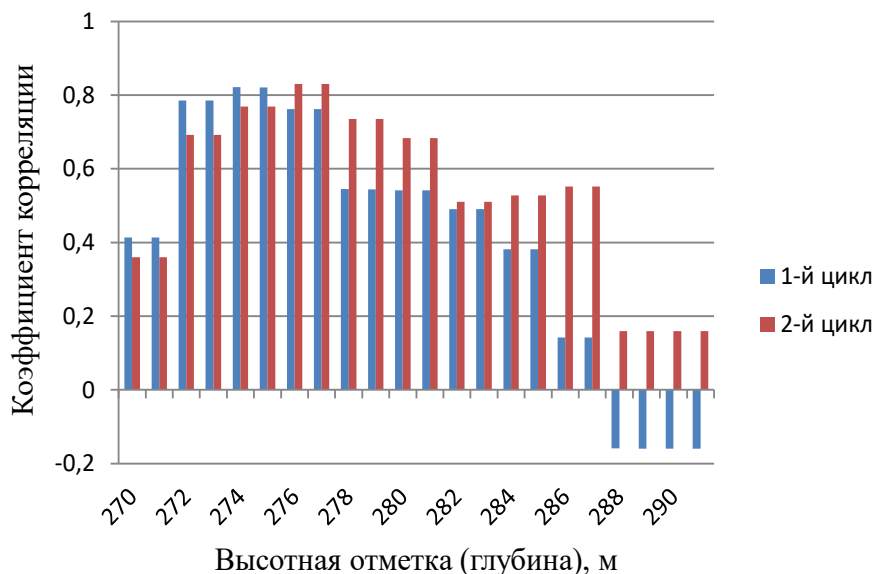


Рис. 4.5. Коэффициент корреляции связи скоростей электромагнитных волн V и соотношения скоростей упругой волны V_s/V_p двух циклов измерений

Проведенные работы с использованием комплексирования волновых методов позволили оценить состояние дамбы и выявить локальные зоны повышенного водонасыщения и фильтрации. Установлено, что слагающие дамбу грунты находятся во влажном и водонасыщенном состоянии. Выявлена зональная фильтрационная неоднородность слагающих дамбу грунтов, уточнена структура ограждающей дамбы и подстилающего основания. На основе вычисленного коэффициента корреляции значений скоростей электромагнитной и сейсмической волны выявлено, что синхронизация геофизических исследований позволяет существенно повысить достоверность полевых определений, а также получить более надежные данные. Результаты проведенных исследований представляют собой основу для прогнозирования наиболее уязвимых мест (зон) насыпного грунтового гидротехнического сооружения, а также локализацию водонасыщенных участков в теле грунтовых сооружений с большей надежностью и технологичностью.

4.4. Компьютерное моделирование как инструмент прогнозирования в георадарных исследованиях

Развитие информационных технологий в последнее десятилетие подвигло большое количество специалистов-теоретиков в области георадиолокации на создание различных проектов по решению задач в этой области, например, MatGPR и GPRMAX.

Одним из методов расчета является конечно-разностное моделирование, основанное на решении уравнений Максвелла. Изучение особенностей волновых процессов в техногенно нарушенных породах и грунтах с установлением взаимосвязи волновых характеристик электромагнитного сигнала с состоянием нарушенного (трещиноватого) массива скальных пород позволяет получить основу для количественной интерпретации данных георадарных исследований.

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 решении ищется не только для дальней зоны, но и для ближней и переходной. Для расчета радарограмм в основном используется двухмерное приближение как более быстрое. Трехмерное моделирование используется, когда надо предсказать диаграмму направленности антенны в сложных случаях дисперсионной среды, нахождения границы или объекта в ближней или переходной зоне [261].

Для изучения особенностей формирования волновых характеристик электромагнитного сигнала выполнено моделирование электромагнитного поля, индуцированного георадарным зондированием в породах, включающих группу наклонных структурных неоднородностей, которые, в свою очередь, влияют на процессы ведения горных работ, сдвигание, обвалы и другие проявления горного давления. Расчеты выполнены методом конечных разностей во временной области с использованием программы MATGPR [264–269].

На рисунках 4.6–4.8 представлена геометрическая схема модели, процесс и результат компьютерного моделирования электромагнитного поля, индуцированного георадарным зондированием (имитация работы георадара с антенной 100 МГц), в массиве пород, включающем группу наклонных структурных неоднородностей, находящихся под углом 22° к дневной поверхности. Геометрическая схема модели среды участка пород (рис. 4.6) представлена в виде вертикального разреза размером 25×10 м, включающем в себя группу из 4 наклонных неоднородностей мощностью 0,1 м; 3 параллельных, залегающих на глубине от 4 до 8 м в начале модели длиной 3 м и выходящей на поверхность длиной 15 м. Значение диэлектрической проницаемости вмещающих монолитных пород в модели было принято равным 9 ед. (согласно справочным данным физических свойств горных пород [270]), а структурной нарушенности (в целях контрастности получаемых данных) в 2 раза больше — 18 ед.

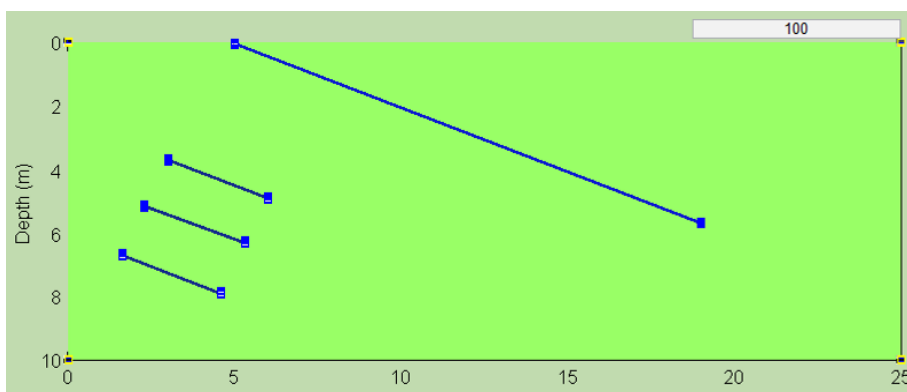


Рис. 4.6. Геометрическая схема модели

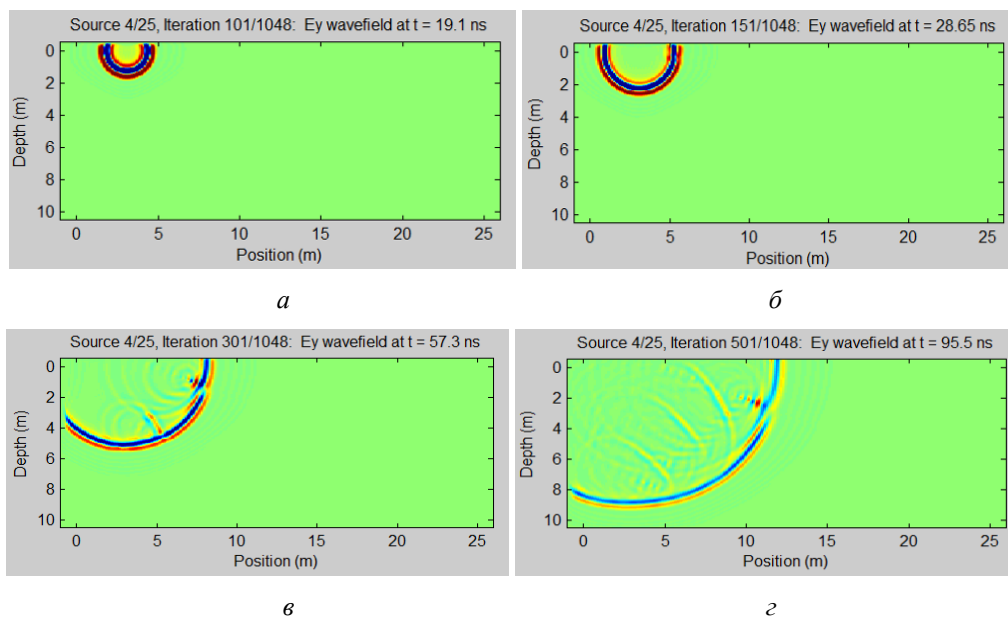


Рис. 4.7. Прохождение излученной (*а, б*) и отраженной (*в, г*) электромагнитной волны от структурных неоднородностей на различных этапах итераций

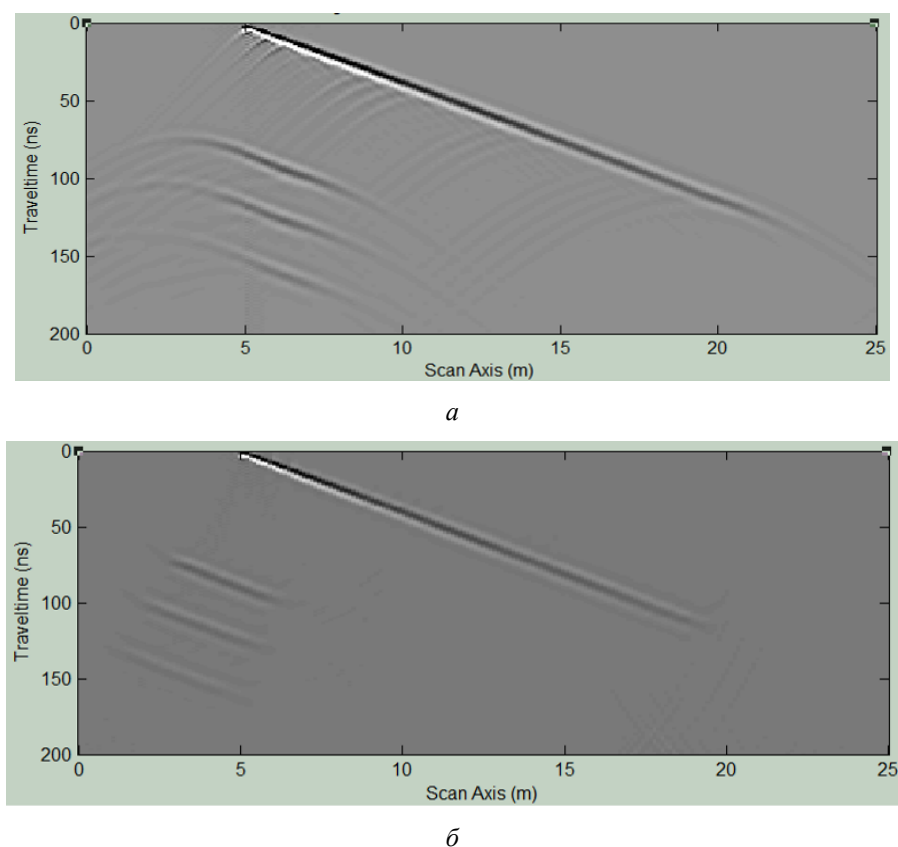


Рис. 4.8. Синтетическая радарограмма с использованием антенны 100 МГц: *а* — необработанная; *б* — с использованием процедур обработки

На рисунке 4.7 наглядно представлен процесс прохождения электромагнитной волны в созданной геометрической модели, где *а, б* — прохождение от источника излученной электромагнитной волны на временном интервале 19,1 нс и 28,65 нс; *в, г* — формирование отраженных волн от структурных неоднородностей на временном интервале 57,3 нс и 95,5 нс в одной точке измерений.

Анализ необработанной модельной радарограммы (рис. 4.8 *а*) позволил выявить амплитудные изменения волновой формы сигнала, отраженного от границ неоднородностей. Образовалось большое количество вторичных волн — гиперболических отражений, не позволяющие определить истинные размеры неоднородности. Отражения от краев неоднородностей в левой и правой части в виде гипербол пересекались, вследствие чего интерпретация данных значительно усложняется. Так как фронт волны распространения электромагнитной волны имеет сферическую форму, то локальные объекты, размеры которых сопоставимы или меньше длины волны в среде, будут являться точечными источниками вторичных волн. Такие объекты будут регистрироваться в виде гипербол, плоские же отражающие поверхности, размеры которых больше длины волны, в среде будут сохранять свою форму на радарограммах.

Для идентификации истинного положения объектов применена процедура миграции, которая заключается в том, чтобы все волны (не видимые 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 [271]. На рис. 4.8 *б* представлена обработанная радарограмма, где радиообраз объекта в несколько раз превышает истинные размеры, что связано с использованием низкочастотной антенны 100 МГц и, соответственно, большой длиной волны. Чтобы устранить этот эффект, применяется процедура деконволюции [271], которая служит для сжатия импульсов сигнала и повышения разрешающей способности. Также стоит отметить, что объекты, расположенные глубже, имеют менее контрастное отражение, которое связано с затуханием сигнала.

Таким образом, можно сделать вывод, что, приближаясь георадаром к наклонной неоднородности в массиве скальных пород, на получаемой на экране радарограмме заблаговременно проявляются отражения в виде «хвостов» гипербол от углов неоднородности. По результатам компьютерного моделирования электромагнитного поля, индуцированного георадарным зондированием, установлена волновая картина осей синфазности и амплитудных характеристик георадиолокационного сигнала на радарограмме скального массива пород, ослабленного группой структурных неоднородностей.

4.5. Пример натурального георадарного исследования

Использование компьютерного моделирования как инструмента прогнозирования в составе георадарных исследований позволило при интерпретации полученных данных комплексно оценить состояние подповерхностной структуры в массиве исследуемых пород. Данный подход был апробирован и использован для выявления структурных нарушений при интерпретации зон водонасыщенности массива пород в окрестности рудника «Карнасурт». Георадарные исследования выполнены в Ловозерском горном массиве, где расположены действующий рудник «Карнасурт» и закрытый затопленный рудник «Умбозеро». Георадарное обследование участка массива скальных пород выполнено по руслу ручья Аллуайв в интервале высотных отметок 475–500 м. Идентификация зон водонасыщенности массива пород выполнена с применением георадарных комплексов «Лоза-1В» и «Лоза-1Н», оснащенными неэкранированными антеннами 50, 100 и 10 МГц соответственно.

Стоит отметить, что применение в георадиолокации различных антенн обусловлено выбором глубинности и необходимой разрешающей способности исследования (минимальное расстояние по глубине, на котором могут быть различимы два отражающих объекта или их детали). В табл. 4.1 представлено соотношение частоты антенны георадара с длинной волны, интервалы глубин не указаны, т. к. они очень сильно зависят от свойств исследуемой среды, а именно от ее диэлектрической проницаемости.

Таблица 4.1

Соотношение частоты антенны георадара с длинной волны

Частота антенны	10 МГц	50 МГц	100 МГц	200 МГц	300 МГц	500 МГц	800 МГц
Тип волны	Короткие волны	Ультракороткие волны					
Диапазон	Декаметровые	метровые				дециметровые	
Длина волны	30 м	6 м	3 м	1,5 м	1 м	0,6 м	0,375 м
Разрешающая способность	0,6 м	0,2 м	0,1 м	0,1 м	0,05 м	0,04 м	0,02 м

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 зондирования 15–5 м.

Схема обследования участка и ее общий вид представлены на рис. 4.9, 4.10. Всего выполнено 3 профиля общей протяженностью 664 м. Измерения начинались по сухому руслу ручья, далее отмечалось место, где вода уходила вглубь массива, и затем измерения выполнялись непосредственно параллельно текущему ручью по направлению с запада на восток. Глубина проникновения сигнала георадара составляла 2 тыс. нс («Лоза-1В») и 4 тыс. нс («Лоза-1Н»), что соответствует ориентировочным глубинам 100 и 200 м. Вдоль линий измерений геофизических профилей почвенный слой отсутствовал (измерения непосредственно по руслу ручья), далее в его окрестности был незначителен. Для пересчета временных разрезов в глубину в месте измерений выполнено построение годографа по методу общей глубинной точки с вычислением значения диэлектрической проницаемости скальных пород. Стоит отметить, что подобного рода измерения проводятся исключительно на открытой ровной местности, в грунтах с параллельными горизонтальными слоями. Отсутствие горизонтальных границ в массиве пород и изменение рельефа по профилю годографа не позволили получить достоверные данные о параметрах среды. Значение диэлектрической проницаемости для пересчета временных разрезов в глубину принято равным 9 ед., что соответствует среднему значению для скальных пород [270].

Профиль № 1 проходил параллельно руслу ручья на расстоянии 20 м в начале, затем постепенно приближался к нему и со 140 м шел непосредственно рядом с ручьем. Выбор маршрута геофизического профиля обуславливался отсутствием возможности проведения работ непосредственно по каменистому руслу ручья из-за больших размеров антенн георадара «Лоза-1Н» — 30 м. На рис. 4.11 представлено проведение георадарных исследований на местности. Анализ данных георадарного зондирования, полученных антенной 10 МГц (рис. 4.12), с глубиной зондирования ориентировочно

200 м не выявил каких-либо существенных отличий в подповерхностной структуре. Волновая картина равномерна, радарограмма состоит из нескольких блоков, которые резко отличаются смещением сигнала по глубине, что связано со значительным перепадом высот рельефа во время съемки, где приемная и передающая антенна значительно отклоняются от горизонтали. На радарограмме можно выделить 2 наклонных отражения, которые не связаны с внутренней структурой, первое — 55 м глубины в начале профиля (70 м, с учетом рельефа) с выходом к поверхности на расстоянии 100 м, глубина — 20м; второе — из этой точки на глубину 55 м в конце профиля. Данные изменения волновой картины связаны с возникновением паразитного отражения, так называемая воздушная помеха от железобетонной конструкции, установленной на поверхности рис. 4.13.

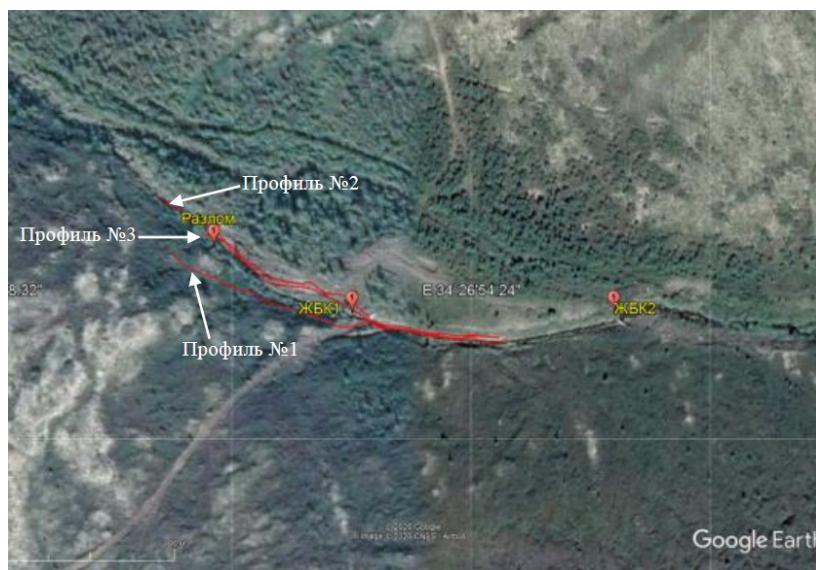


Рис. 4.9. Схема обследования участка массива скальных пород по руслу ручья Алтуайв



Рис. 4.10. Общий вид участка геофизических исследований относительно рудника «Умбозеро»

Профиль № 2 получен георадаром «Лоза-1В» с антенной 50 МГц (рис. 4.14), проходит непосредственно по руслу ручья Аллуайв. Первые 50 м профиля проходят по каменистому участку, где отсутствует вода, затем до 150 м — левее ручья на расстоянии 2–3 м по небольшому почвенному слою, далее справа — в непосредственной близости к воде. На радарограмме (рис. 4.15), расстояние 0–50 м, выделяется слой, выходящий на поверхность мощностью 3–5 м, который интерпретируется границей каменистого русла ручья, далее с отметки 50 м (место, где вода уходит в коренные породы) прослеживается четкое отражение, уходящее под углом 22° вглубь массива и интерпретированное как структурное нарушение, по которому уходит вода. Также в интервале 20–90 м выделяются предположительно 2 нарушенные структуры протяженностью 50 м на глубине 42–55 и 62–75 м с тем же углом падения.



Рис. 4.11. Проведение геофизических исследований на местности, георадар «Лоза-1Н» (антенна 10 МГц)

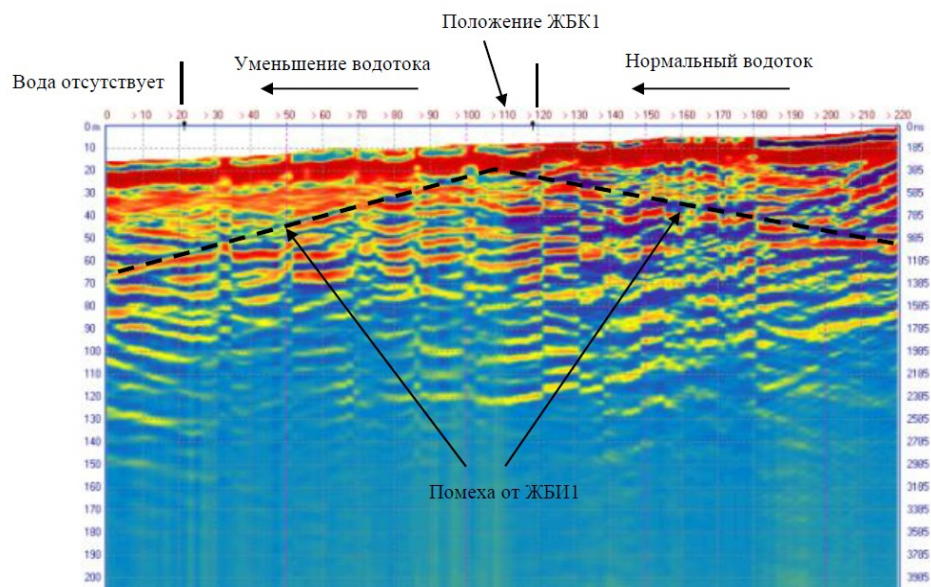


Рис. 4.12. Радарограмма, полученная георадаром «Лоза-1Н» с антенной 10 МГц



Рис. 4.13. Железобетонная конструкция (ЖБИ 1)



Рис. 4.14. Проведение геофизических исследований на местности: *а* — георадар «Лоза-1В» (антенна 50 МГц); *б* — общий вид ручья

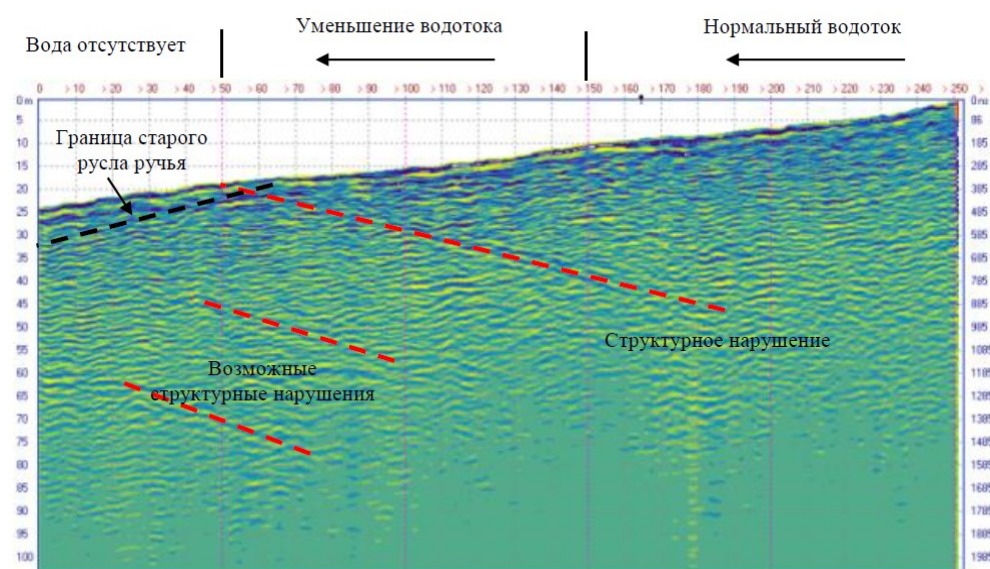


Рис. 4.15. Радарограмма, полученная георадаром «Лоза-1В» с антенной 50 МГц

Профиль № 3 получен георадаром «Лоза-1В» с антенной 100 МГц (рис. 4.16) и, как профиль № 2, проходит непосредственно по руслу ручья Аллуайв, однако начало профиля находится ближе на 32 м к месту, где вода уходит в коренные породы. На радарограмме (рис. 4.17) на расстоянии 18 м от начала (место, где вода уходит в коренные породы) прослеживается четкое отражение, уходящее под углом 22° вглубь массива, интерпретированное как структурное нарушение, по которому уходит вода. Данное отражение повторяет результаты, полученные с помощью антенного блока 50 МГц. Также в интервале 0–25 м выделяются предположительно три нарушенные структуры протяженностью 25 м на глубине 42–48, 52–60 и 65–72 м с тем же углом падения. Наличие трех структур в начале профиля № 3 объясняется лучшей разрешающей способностью антенн 100 МГц. Средняя разрешающая способность антенн 100 МГц — 10 см, 50 МГц — 20 см, таким образом, можно предположить, что мощность третьей структуры — в интервале профиля 52–60 м менее 20 см.

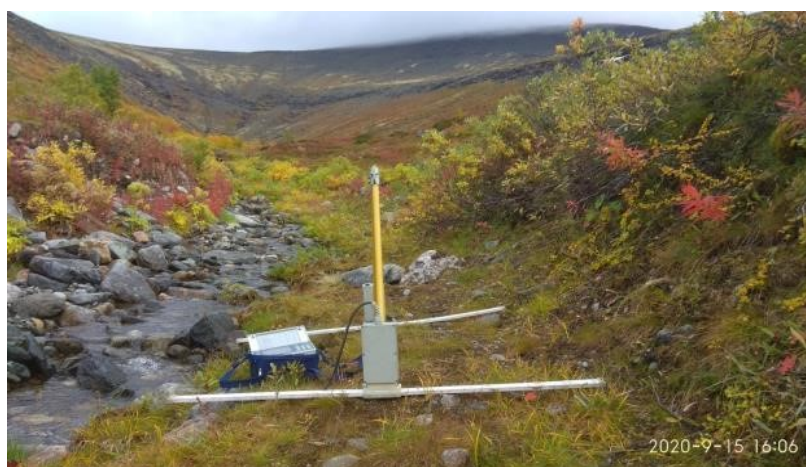


Рис. 4.16. Проведение геофизических исследований на местности георадар «Лоза-1В» (антенна 100 МГц)

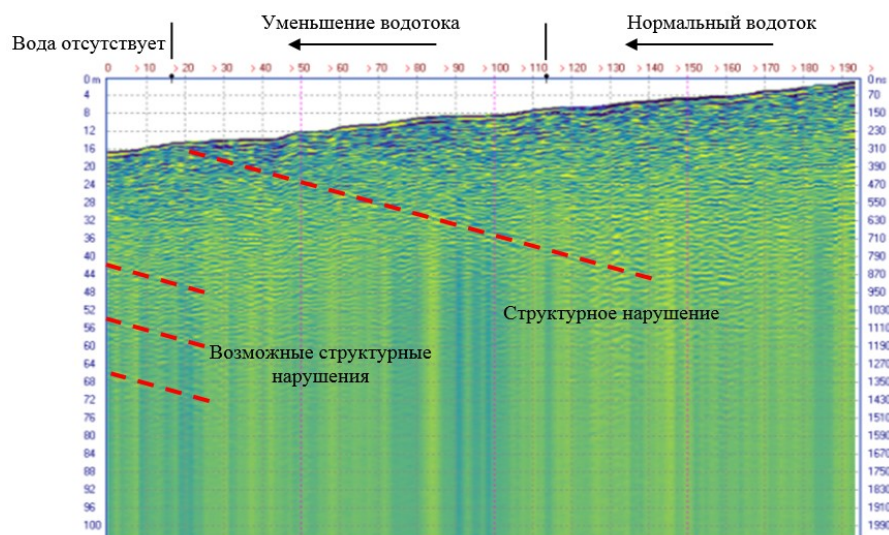


Рис. 4.17. Радарограмма, полученная георадаром «Лоза-1В» с антенной 100 МГц

Посредством сопоставления местоположений на космических снимках результатов георадарных измерений, выполненных Геологической службой Финляндии GTK в 2013 г. (рис. 4.18) [272], установлено, что измерения сделаны параллельно и севернее на 300 м относительно измерений, полученных в 2020 г. По данным измерений 2013 г. (рис. 4.19) прослеживается структурная нарушенность, выходящая на поверхность на 125 м, с углом падения ориентировочно 20° . Комплексный анализ георадарных данных (рис. 4.18) позволил выявить мощную структурную неоднородность с углом падения $20\text{--}22^\circ$ в восточном направлении, уходящую вглубь массива.

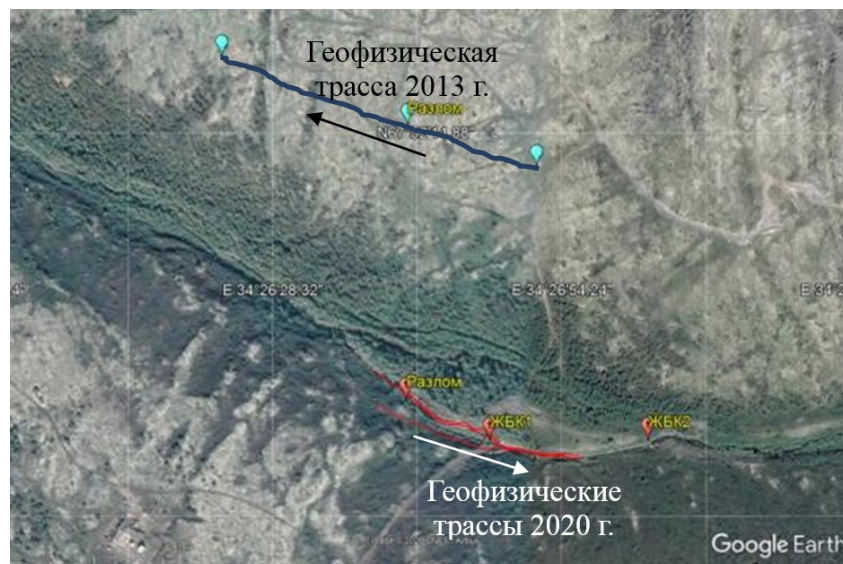


Рис. 4.18. Схема расположения геофизических исследований 2013 и 2020 гг.

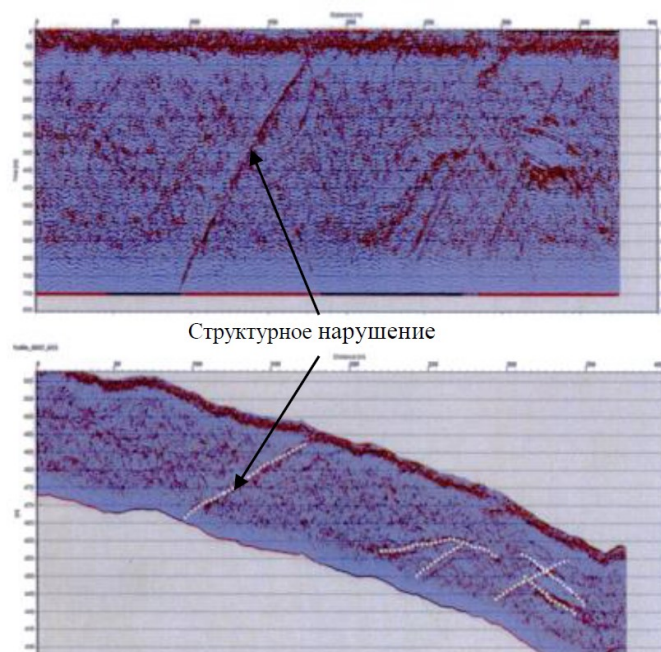


Рис. 4.19. Радарограмма, полученная георадаром Mala ProEx с антенной 100 МГц [272]

Таким образом, в качестве вывода можно сказать следующее: георадарным зондированием выявлена структурная нарушенность, уходящая вглубь массива на восток, по которой ручей Аллуайв продолжает движение, что могло послужить притоку воды в выработки во время работы рудника. Отсутствие каких-либо значимых отражений на Профиле № 1, полученных антеннами 10 МГц, говорит о том, что данное отражение имеет мощность менее 0,6 м, т. к. это предельная величина разрешающей способности комплекта. Анализ данных других исследований в районе позволяет предположить, что фронт этой структурной неоднородности мощностью 20–40 см может распространяться на 300 м далее в северном направлении.

Изменчивость свойств и неоднородность массива скальных пород обуславливает изменение параметров результирующего электромагнитного сигнала георадарного зондирования. С использованием компьютерного моделирования радарограмм появилась возможность избавиться от неоднозначности интерпретации волновой картины, посредством анализа осей синфазности и изменения амплитудных характеристик сигнала электромагнитного зондирования массива скальных пород, ослабленного структурными неоднородностями. Ключевой особенностью здесь является интенсивность искажения волнового поля, которая определяется контрастностью (соотношением) физических свойств пород, пространственной ориентацией и глубиной расположения неоднородности. Таким образом, применение компьютерного моделирования процессов электромагнитного зондирования неоднородностей, позволяет установить принципы идентификации структурных нарушений в скальном массиве по волновым данным радарограмм посредством анализа осей синфазности сигналов.

Комплексное применение компьютерного моделирования как визуального уровня, космических снимков, как спутникового уровня, а также совместное использование современных неразрушающих геофизических исследований позволяют интегрировать применение георадарных технологий в многоуровневые исследования.

5. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ НАРУШЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ВИЗУАЛЬНОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ

Как было сказано выше, важная роль при проектировании и мониторинге насыпных ГТС уделяется фильтрующей в теле сооружения воде. Так, при проектировании ГТС производится определение критических уровней положения депрессионной кривой, которые в рамках мониторинга определяются по данным пьезометров, сравниваются с критическими значениями, и затем принимаются управляющие решения.

Однако в теле насыпных ГТС, кроме проектных фильтрационных потоков, характеризующихся уровнем депрессионной кривой, наблюдаются и аномальные локальные фильтрационные потоки, связанные с локальными нарушениями фильтрационной устойчивости ГТС. По данным расследований причин аварий на насыпных ГТС 31 % аварий, произошедших с 1910 по 1999 гг., были вызваны локальными протечками [273]. Несмотря на то, что подобные аномальные фильтрационные потоки являются одной из основных причин аварий на насыпных ГТС, их влияние, как правило, не учитывается при проектировании и организации мониторинга ГТС. При этом локальные фильтрационные процессы либо имеют непосредственный выход на поверхность, либо приводят к явлениям, которые имеют свое отражение на поверхности сооружения. Например, на рис. 5.1 виден локальный выход воды на поверхность полки насыпного ГТС, а также деформации ГТС, связанные с этим нарушением. При этом по данным пьезометров, установленных на данной полке, уровень депрессионной кривой находится на глубине нескольких метров, что ниже критических значений.



Рис. 5.1. Локальный выход фильтрующихся вод на поверхность полки ГТС

Как видно из рассмотренного примера, стандартные методы наблюдения за фильтрационными процессами зачастую оказываются бесполезными для поиска локальных нарушений фильтрационных потоков. Это происходит из-за того, что локальные нарушения захватывают участки размером до первых десятков метров, а чаще всего ограничены областью в несколько метров. Вместе с тем пьезометрические створы,

по которым контролируются фильтрационные процессы в теле насыпных ГТС, отстоят друг от друга на сотни метров. Однако, учитывая, что локальные фильтрационные процессы имеют прямое или опосредованное проявление на поверхности сооружения, то одним из немногих способов идентификации и наблюдения за ними является визуальное наблюдение. При этом возникает другая сложность — необходимость разработки системы индикаторов локальных нарушений фильтрационных процессов.

Чтобы определиться с индикаторами локальных нарушений фильтрационных процессов в теле сооружения, рассмотрим механизмы развития локальных нарушений и их влияния на ГТС или отдельные его элементы

5.1. Развитие локальных нарушений фильтрационных процессов и их влияние на насыпное ГТС

5.1.1. Развитие локальных фильтрационных нарушений

Фильтрующаяся в теле ГТС вода оказывает сдвигающее воздействие на частицы материала сооружения, однако в большинстве случаев силы, удерживающие данные частицы, находятся в балансе со сдвигающими силами [274]. При балансе сдвигающих и удерживающих сил фильтрационные процессы не приводят к эрозии материала ГТС, поэтому могут считаться безопасными. Однако данные силы находятся в постоянной динамике. Так, фильтрационные потоки могут усиливаться из-за наращивания ГТС, увеличения объема воды в ограждаемом прудке, концентрации фильтрующейся воды на отдельных участках и других причин. Удерживающие силы могут увеличиваться с применением специальных мер повышения устойчивости или уменьшаться из-за неравномерной консолидации грунтов, появления трещин различной природы и участков с пониженным уровнем напряжений, а также по другим причинам. Таким образом, может сложиться ситуация, при которой сдвигающие силы окажутся больше удерживающих на отдельных участках ГТС. В результате нарушения баланса сил вода, фильтрующаяся в сооружении, начнет вымывать частицы грунта. Если процессу вымывания не будут препятствовать специальные меры защиты сооружений или баланс сил не будет оперативно восстановлен, то процесс эрозии материала сооружения может привести к формированию фильтрационных нарушений и вероятному разрушению ГТС.

На рисунке 5.2 представлен пример развития и разрушительного влияния фильтрационного нарушения на однородном насыпном ГТС [275].

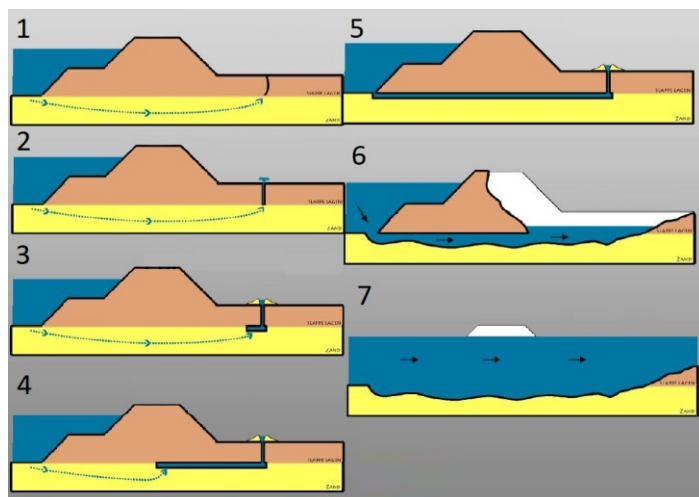


Рис. 5.2. Механизм разрушения ГТС [275]

Как видно из рис. 5.2, основной фильтрационный поток проходил не в теле сооружения, а в подстилающих породах. При этом произошло смещение баланса сдвигающих и удерживающих частицы материала сил (рис. 5.2 (1)), что привело к вымыванию материала сооружения и появлению прорана. Под действием фильтрующихся вод проран, образовавшийся на нижнем уступе сооружения, начал постепенно расширяться, наблюдалось фонтанирование воды (рис. 5.2 (2)). Усилившийся поток фильтрационных вод привел к интенсификации выноса частиц материала сооружения. Вокруг выхода фильтрующихся вод начал формироваться конус, состоящих из вымытых частиц (рис. 5.2 (3)). Дальнейшее вымывание частиц привело к постепенному формированию канала с низкими противофильтрационными свойствами в направлении от наблюдаемого выхода фильтрующихся вод к ограждаемому водному объекту вдоль контакта ГТС с подстилающими породами (рис. 5.2 (3, 5)). В результате, образовавшееся фильтрационное нарушение привело сначала к частичному разрушению в нижнем бьефе, а затем и к полному разрушению ГТС.

Из данного примера видно, как фильтрационный поток постепенно сформировал фильтрационное нарушение в основании ГТС, которое привело к разрушению всего сооружения. Однако локальные фильтрационные нарушения могут формироваться не только у основания. Так, фильтрационные потоки могут проходить и в теле самого сооружения. Например, прудок-отстойник хвостохранилища обычно располагается на значительной высоте на сформировавшихся хвостовых отложениях. В связи с этим, фильтрационные потоки в ограждающих хвостохранилища ГТС могут проходить по границе намывной и насыпной части сооружений, поэтому возникновение локальных нарушений фильтрационных процессов можно ожидать не только у основания, но и на их полках.

Также стоит отметить, что если бы в рассмотренном примере было своевременно идентифицировано локальное нарушение фильтрационных процессов на участке ГТС, то у эксплуатирующей организации была бы возможность предпринять соответствующие меры по предотвращению или контролю развития этих процессов.

5.1.2. Механизмы влияния фильтрационных нарушений на насыпное ГТС

Рассмотрев механизм развития фильтрационного нарушения, перейдем непосредственно к рассмотрению механизмов влияния подобных нарушений на насыпное ГТС.

Вынос частиц материала ГТС

Первый рассматриваемый механизм влияния локального нарушения фильтрационных процессов связан с выносом материала и размывом элементов сооружения фильтрующейся водой в местах локального нарушения фильтрационной устойчивости.

Вынос материала насыпных ГТС фильтрующейся в их теле водой явление распространенное, особенно для сооружений, которые имеют нарушения равномерных фильтрационных процессов, сопровождающиеся формированием локальных фильтрационных нарушений. На рис. 5.3 представлены фотоснимки вымывания материала ограждающей дамбы хвостохранилища горнорудного предприятия Мурманской области.

Вынос материала, показанный на рис. 5.3, носит периодический характер. Также на рис. 5.3 видно, что вынос материала происходил не с поверхности сооружения, а из самого тела сооружения, что представляет серьезную опасность для его устойчивости.



а

б

Рис. 5.3. След вымывания материала дамбы: *а* — вид сверху; *б* — вид сбоку

В качестве примера реализации данного механизма, которая привела к аварии, может служить разрушение насыпной плотины «Титон», находившейся на одноименной реке в США, штат Айдахо. Разрушение плотины произошло 5 июня 1976 г. На рис. 5.4 показано развитие процесса разрушения.



Рис. 5.4. Разрушение плотины «Титон» 5 июня 1976 г. [232]

Разрушение плотины «Титон» произошло из-за действия фильтрующей через тело сооружения воды, что привело к постепенному выносу материала плотины. Формировалась зона локального фильтрационного нарушения, обладающего низкими противофильтрационными свойствами, что привело к концентрации и усилению фильтрационного потока на данном участке. Увеличившийся поток продолжал

выносить материал сооружения. Однако данные процессы происходили скрыто: на поверхности наблюдался лишь небольшой выход фильтрующейся воды. В связи с этим угроза была недооценена, и, в результате, вынос материала плотины привел к аварии, которая, как видно из рис. 5.4, развивалась лавинообразно. Также на рис. 5.4 заметна, вскрывающаяся в результате аварии полость в теле ГТС, которая была образована фильтрующейся водой.

В результате аварии выплеснулось порядка 300 млн м³ воды, разрушено 200 домов, 14 чел. погибли. Ущерб от аварии оценивается в 1 млрд долл. США.

Роль фильтрационного нарушения как структурной неоднородности

Локальные фильтрационные нарушения в теле сооружения, сформировавшиеся вследствие выноса частиц ГТС, являются участками сооружения с низкими не только фильтрационными, но и прочностными свойствами. Таким образом, они могут рассматриваться как структурные неоднородности в теле сооружения — зоны ослабления.

Для демонстрации влияния локальных неоднородностей на устойчивость сооружения рассмотрим влияние угла падения и мощности структурной неоднородности на коэффициент устойчивости уступа (отношение удерживающих и сдвигающих сил). На рис. 5.5 представлена расчетная модель уступа насыпного ГТС, содержащая структурную неоднородность — зону ослабления [276].

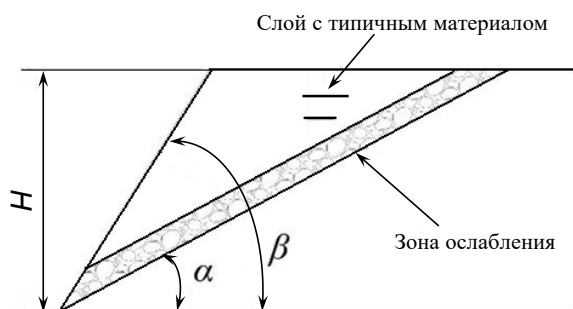


Рис. 5.5. Расчетная схема модели (перевод автора): α — угол зоны ослабления; β — угол откоса уступа [276]

Угол наклона уступа в расчетной модели, представленной на рис. 5.5, оставался постоянным — равным 35°. Угол наклона зоны ослабления и мощность этой зоны варьировались. Расчет проводился с помощью компьютерного моделирования методом конечных элементов. Результаты расчета представлены на рис. 5.6.

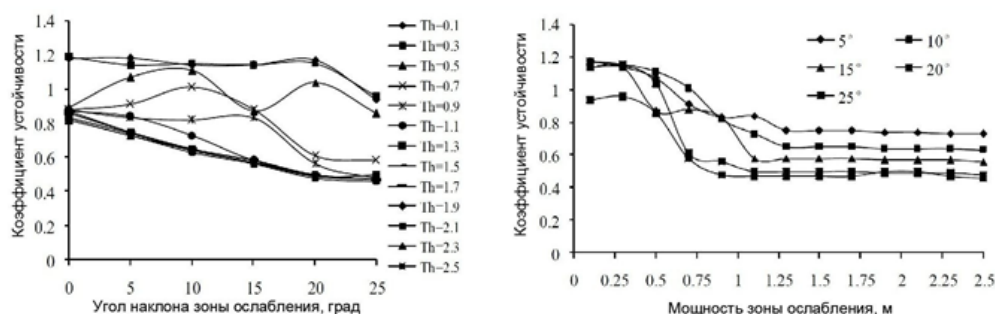


Рис. 5.6. Зависимость коэффициента устойчивости от угла наклона и мощности зоны ослабления [276]

Как видно из рис. 5.6, зона ослабления оказывает значительное влияние на устойчивость откоса, особенно при значительной мощности и угле наклона зоны ослабления. Так, при росте мощности зоны ослабления от 0,1 до 1 м коэффициент устойчивости может меняться до 2 раз в зависимости от расположения этой зоны, при этом коэффициент устойчивости падает ниже значения в 1, что означает расчетную потерю устойчивости уступом. Следовательно, локальное фильтрационное нарушение, рассматриваемое как зона ослабления, существенно влияет на устойчивость сооружения.

Кроме того, для подтверждения влияния на устойчивость ГТС структурных неоднородностей, к которым можно отнести и локальные фильтрационные нарушения, можно использовать богатый опыт оценки их влияния на устойчивость уступов скальных пород в различных условиях. Так, многие исследования показывают негативное влияние неоднородностей среды на устойчивость скальных уступов, особенно при расположении плоскости этих неоднородностей параллельно борту карьера [277–280].

Неравномерная поперечная фильтрация

Вода, фильтрующаяся в теле насыпного ГТС, оказывает существенное влияние на устойчивость сооружения, вследствие изменения соотношения удерживающих и сдвигающих сил, действующих как на отдельных участках, так и в рамках всего сооружения, а также за счет изменения геометрии кривой скольжения в целом. Распределение воды и фильтрационные процессы в теле ГТС характеризуются уровнем депрессионной кривой, которая определяется измерением уровня воды в пьезометрах, расположенных створами на сооружении. При проектных расчетах насыпных ГТС, которые проводятся не реже 1 раза в 5 лет для сооружений I класса, расчет производится для различных положений депрессионной кривой. В дальнейшем при эксплуатации положение депрессионной кривой регулярно, как правило, ежемесячно определяется и сравнивается с расчетными значениями.

Локальные нарушения фильтрационных процессов можно условно разделить на неравномерную фильтрацию в продольном и поперечном направлении относительно оси сооружения. При этом возникают разные для сооружения угрозы. Так, неравномерная фильтрация в поперечном направлении может приводить к искажению положения депрессионной кривой внутри пьезометрического створа. Для примера рассмотрим положение депрессионной кривой в теле насыпного ГТС, представленного на рис. 5.7.

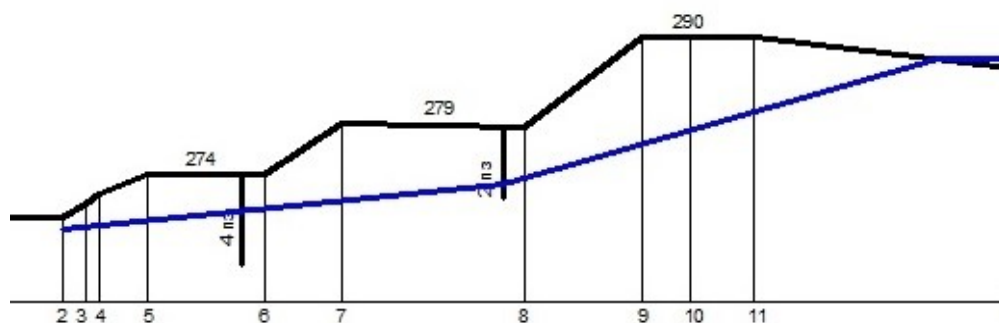


Рис. 5.7. Изменение уровня воды вдоль уступа дамбы

На рис. 5.7 видно, что депрессионная кривая, определенная по данным измерений уровня воды в двух пьезометров и прудке-отстойнике на всем поперечном профиле ГТС находится на глубине до нескольких метров. Однако на рис. 5.8 представлена фотография данного створа ГТС. Как видно из рис. 5.7, наблюдаются многочисленные выходы фильтрующихся вод на поверхность сооружения. В основном данные выходы воды наблюдаются на откосах уступов рассматриваемой дамбы, стекая и скапливаясь затем на поверхности полок. При этом пьезометры в данном створе являются полностью работоспособными и показывают актуальный уровень воды.

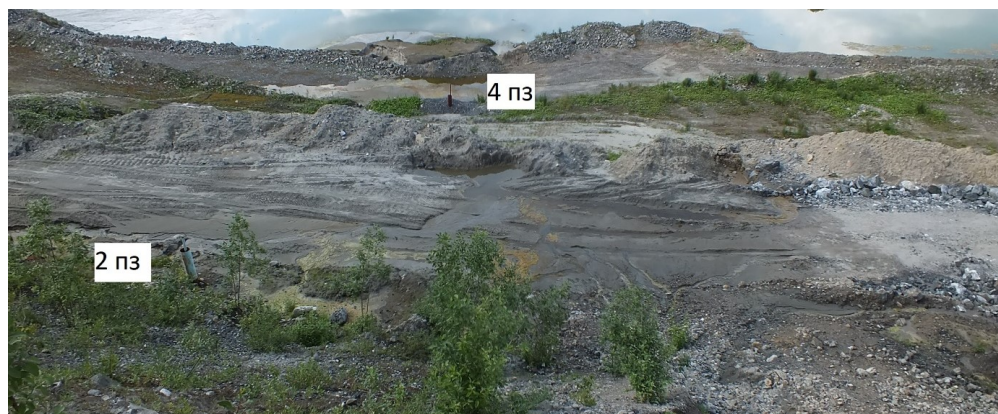


Рис. 5.8. Изменение уровня воды вдоль уступа дамбы

Из рассмотренного примера видно, что локальные нарушения фильтрационных потоков могут приводить к неравномерной фильтрации в поперечном направлении, что приводит к неадекватной оценке положения депрессионной кривой в пьезометрических створах, в которых присутствуют подобные нарушения. При этом на отдельных участках депрессионной кривой возникают перегибы, характеризующиеся критическими значениями углов положения данной кривой.

Неравномерная продольная фильтрация

При проектной фильтрационной устойчивости ГТС положение депрессионной кривой вдоль оси сооружения изменяется не сильно и положение кривой в любой точке может быть получено интерполяцией значений соседних пьезометров. Однако при наличии в теле сооружения локальных нарушений фильтрационных свойств положение этой кривой в продольном направлении может претерпевать существенные изменения. Для примера рассмотрим график изменения уровня воды на одном из горизонтов дамбы хвостохранилища обогатительной фабрики горнорудного предприятия Мурманской области, изображенный на рис. 5.9.

Уровни воды, представленные на рис. 5.9, получены по данным измерений с помощью пьезометрических скважин и георадарного профилирования, проведенных в январе 2016 г. Как видно из графика, уровень воды способен существенно меняться вдоль оси сооружения: на участке длиной 100 м глубина воды изменяется на 50 % от 4 до 6 м. Подобная разница в значениях приводит к существенным колебаниям положения депрессионной кривой, что может угрожать безопасности сооружения особенно, если мониторинг за положением уровня воды осуществляется такими дискретными методами измерения, как измерения с помощью пьезометрических скважин. В результате может сложиться ситуация, при которой в пьезометрических створах уровень депрессионной кривой остается в пределах проектных значений, но на участках, не охватываемых сетью пьезометров, уровень депрессионной кривой превышает критические значения, что угрожает устойчивости всего сооружения.

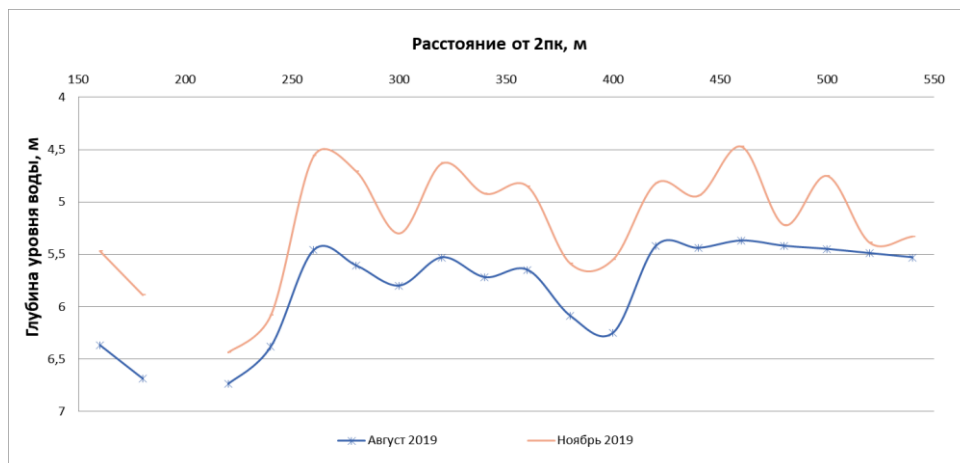


Рис. 5.9. Изменение уровня воды вдоль уступа дамбы

При рассмотрении влияния локальных нарушений фильтрационной устойчивости на положение депрессионной кривой в теле сооружения и его устойчивость, необходимо отметить их дестабилизирующее влияние на скорость протекания фильтрационных процессов на разных участках сооружения. Так, при нормальной работе ГТС, в котором отсутствуют нарушения фильтрационной устойчивости, фильтрационные процессы происходят равномерно. Это позволяет контролировать положение депрессионной кривой на разных участках сооружения, меняя такие технологические параметры, как скорость сброса воды, схемы намыва, план отсыпки и т. п. Тем самым осуществляется управление устойчивостью всего сооружения. Однако при локальных нарушениях фильтрационной устойчивости фильтрационные процессы в сооружении происходят неравномерно, что затрудняет или делает невозможным осуществление контроля за устойчивостью сооружения.

Гидростатическое давление

В процессе эксплуатации ГТС горнорудных предприятий происходят частые изменения уровня воды в ограждаемом прудке. Это происходит вследствие периодического намыва пляжей хвостохранилища, закачки в прудок технических вод, климатических явлений (осадки, таяние снега и льда) и других причин. В результате изменения уровня воды в прудке, а также увеличения притока воды с пляжа хвостохранилища и с поверхности самого сооружения повышается и количество воды, фильтрующейся через ГТС. При нормальном режиме работы ГТС, повышение уровня воды, фильтрующейся через сооружение, происходит плавно и сопровождается изменением положения уровня депрессионной кривой, определяемой по данным пьезометров.

Наличие локальных нарушений фильтрационных свойств ГТС приводит к существенному и опасному дисбалансу вод в теле сооружения. Так, локальные фильтрационные нарушения могут проходить сквозь все тело сооружения, связывая его основание и ограждаемый им прудок (рис. 5.10). Это приводит к тому, что образуется прямая связь по принципу сообщающихся сосудов, которая передает гидростатическое давление из вышележащего прудка в область основания ГТС. Особенно данное явление опасно при применении специальных мер по повышению фильтрационных свойств сооружения у его основания, т. к. в результате возникает сила расширения, пропорциональная гидростатическому давлению внутри области нарушения, что может существенно уменьшить устойчивость сооружения в районе его основания и привести к аварии.

Ярким примером реализации рассматриваемого механизма является разрушение дамбы на искусственном озере Ситу Гинтунг (Тангеранг, Индонезия), произошедшее 27 марта 2009 г. В результате разрушения порядка 1 млн м³ воды было выброшено в заселенный район города. Около 100–200 чел. не смогли спастись. Пострадало большое количество домов. На рис. 5.10 представлен аэрофотоснимок дамбы после разрушения.



Рис. 5.10. Аэрофотоснимок дамбы Ситу Гинтунг после аварии [275]

На первый взгляд казалось, что причиной данной аварии не является размыв: не было зафиксировано никаких признаков эрозии, суффозии или протечек. Однако дальнейшие исследования показали, что авария произошла в результате нарушения фильтрационных свойств дамбы. На рис. 5.11 представлена схема механизма протекания процесса разрушения.



Рис. 5.11. Пошаговый механизм разрушения дамбы Ситу Гинтунг (перевод автора) [274]

Как видно из рис. 5.11, уровень воды в искусственном озере Ситу Гинтунг не превышал допустимых расчетных значений. Однако при безопасном уровне воды происходили процессы локального нарушения фильтрационной устойчивости сооружения. В результате действия солнца на свободные участки поверхности дамбы в верхнем бьефе образовывались небольшие трещины, которые при повышении уровня воды заполнялись ей. Попавшая в трещины вода не позволяла им закрыться, а при еще большем повышении уровня воды происходил гидроразрыв трещин, сопровождаемый их расширением и углублением. Постепенно вода формировала области с пониженными фильтрационными свойствами, по которым она попадала все глубже по направлению к основанию дамбы. Гидростатическое давление, возникающее из-за разницы уровня воды в резервуаре и основании дамбы, передавалось к основанию сооружения, приводя к возникновению силы, направленной на поднятие материала тела дамбы величиной до 100 кПа. Реализоваться силе поднятия мешала скальная наброска, которая давила на поверхность дамбы силой тяжести. Результатом взаимодействия этих двух сил явилось разрушение дамбы у ее основания. Таким образом, нарушение фильтрационных процессов в теле дамбы привело к разрушению сооружения.

Таким образом, видно, что локальное нарушение фильтрационной устойчивости, передает гидростатическое давление веса воды в прудке к основанию сооружения, что несет серьезную опасность для его безопасности. Вместе с тем передача гидростатического давления по ослабленным зонам фильтрационных нарушений делает использование многих методов повышения фильтрационной устойчивости не только нецелесообразным, но и опасным для сооружения.

5.2. Внешние проявления локальных изменений фильтрационных процессов в теле насыпных ГТС

В предыдущем разделе мы рассмотрели следующие механизмы влияния локальных фильтрационных процессов на состояния насыпных ГТС или отдельных его элементов:

- вынос частиц материала ГТС;
- фильтрационное нарушение как структурная неоднородность;
- неравномерная поперечная фильтрация;
- неравномерная продольная фильтрация;
- гидростатическое давление.

На основании перечисленных механизмов, а также на механизме развития подобных нарушений, были сформированы индикаторы наличия локальных нарушений фильтрационных процессов в теле дамбы, которые могут быть использованы при их поиске.

5.2.1. Проявления суффозионного выноса материала сооружения

Так как локальные нарушения фильтрационных процессов приводят к суффозионному выносу частиц материала ГТС, то его следы являются индикатором наличия локального нарушения фильтрационной устойчивости.

Следы суффозионного выноса представляют собой скопление на поверхности сооружения материала, слагающего тело ГТС. Как правило, это мелкие и пылеватые пески, т. к. они наиболее подвержены транспортировке водой, фильтрующейся в теле сооружения. На рис. 5.12 представлены фотоснимки следов суффозионного выноса материала ограждающей дамбы хвостохранилища горнорудного предприятия.



Рис. 5.12. Следы суффозионного выноса материала насыпного ГТС

Кроме индикации наличия в теле ГТС локального нарушения, следы суффозионного выноса могут давать и другую информацию о данных нарушениях. Так, тип материала, вымываемого из сооружения, может свидетельствовать о расположении фильтрационного нарушения. Например, на рис. 5.13 представлены следы суффозионного выноса материала ограждающей дамбы хвостохранилища.



Рис. 5.13. Следы суффозионного выноса хвостовых отложений

Как видно из рис. 5.13, частицы, вымытые на поверхность сооружения, относятся не к насыпной части ГТС, а к хвостовым отложениям, что позволяет с высокой долей вероятности предполагать, что сформировавшееся локальное нарушение проходит по границе между намывной и насыпной частью, это позволяет достаточно точно локализовать данное нарушение по глубине.

Однако обнаружение следов суффозионного выноса материала обследуемого сооружения не всегда возможно в силу того, что поток, приводящий к выносу частиц, как правило, выходит на поверхность у основания сооружения в нижнем бьефе и распределяется по большой площади, формируя обширные прудки. Кроме того, водоприток у основания или на отдельных полках может накапливаться с помощью водоулавливающих сооружений или соединяться с естественными водными объектами (рис. 5.14). В результате, вымытые частицы распространяются на обширных площадях, что не только делает сложным их обнаружение, но и практически невозможным определение местоположения области фильтрационного нарушения, из которой данные частицы были вымыты. Дополнительно осложняет задачу

обнаружения следов суффозионного выноса у основания сооружения наличие скального пригруза или банкета, в которых могут оседать частицы, вымытые из тела ГТС, но при этом отсутствует возможность их обнаружения.



Рис. 5.14. Водоулавливающая канава у основания ГТС

В связи с вышеописанными трудностями, обнаружение следов суффозионного выноса частиц в основании сооружения менее вероятно. Чаще они могут быть обнаружены на поверхностях полок сооружения.

Возможность обнаружения следов суффозионного выноса на поверхностях полок также связана с сезонным характером изменения уровня фильтрующейся в сооружении воды и с проявлением гидростатического давления. На рис. 5.15 представлен график изменения уровня воды в прудке, ограждаемом насыпными ГТС в течение календарного года.

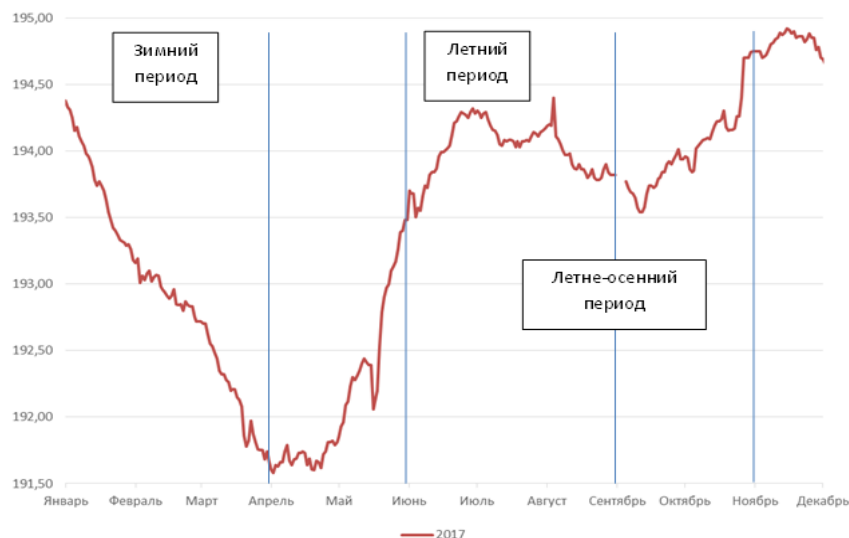


Рис. 5.15. График уровня воды в прудке хвостохранилища

На рисунке четко видна сезонность, зависящая от осадков и температуры воздуха, уровня воды в прудке. Так, до конца апреля температура воздуха в районе рассматриваемого прудка держалась ниже 0°C . В соответствии с этим, до конца мая длился период накопления зимних осадков без их таяния. Соответственно, минимальные значения уровня воды (зимняя межень) были зафиксированы в период с 5 по 25 апреля.

После 26 апреля средние температуры воздуха перешли в положительную область, стали расти. Это привело к началу весеннего снеготаяния и повышению уровня вод до своих максимальных значений (половодье), наблюдавшихся в период с третьей декады июня до второй половины июля. Во время летнего периода наблюдался период понижения уровня воды (летняя межень), длившейся со второй половины июля до конца августа.

После прохождения периода половодья в третьей декаде июля уровень воды начал понижаться, пока не достиг своих минимальных значений в сентябре (летне-осенняя межень).

Повышение уровня воды в прудке в периоды половодья приводит к повышению в нем уровня фильтрующихся вод, что приводит к повышению уровня депрессионной кривой в теле сооружения. При равномерной проектной фильтрационной устойчивости сооружения процессы в его теле происходят равномерно и не приводят к выходу вод на поверхность ГТС.

Если в теле сооружения присутствуют локальные нарушения фильтрационной устойчивости, то они служат концентраторами фильтрующихся вод, а также каналом передачи гидростатического давления от ограждаемого прудка к основанию ГТС. Во время сезонного повышения уровня вод в прудке происходит увеличение гидростатического давления со стороны фильтрационного нарушения. Если оно имеет небольшую пропускную способность или ограничена методами повышения фильтрационной устойчивости или отсыпки, то повышение гидростатического давления приводит к повышению порового давления на смежных участках ГТС, что ведет к выходу фильтрующихся вод на поверхность вышележащих полок. В результате, также происходит суффозионный вынос материала и скопление его вместе с водой, просочившейся на поверхность этих полок. После прохождения периода половодья уровень воды в прудке снижается, что приводит к снижению гидростатического давления, после чего прекращается выход фильтрующейся воды на поверхность полки. В результате, на поверхности полок, расположенных над локальным фильтрационным нарушением, образуются следы суффозионного выноса материала, которые являются индикатором наличия локальных нарушений фильтрационной устойчивости.

5.2.2. Деформации поверхности полок

Локальное проседание

На участке нарушения фильтрационных процессов происходит концентрация водного потока, которая приводит к постепенному суффозионному выносу материала ГТС. Развивающийся суффозионный вынос материала приводит к формированию локального фильтрационного нарушения в теле сооружения. Фильтрационное нарушение, сформировавшееся от подошвы ГТС до ограждающего прудка, позволяет реализоваться гидростатическому давлению воды прудка. Вместе с тем при применении различных методов повышения фильтрационной устойчивости или отсыпке ГТС у его основания происходит передача гидростатического давления от прудка к основанию сооружения и преобразование его в поровое давление концентрировано в районе повышения противофильтрационных свойств. В результате, возникает дополнительный дисбаланс сдвигающих и удерживающих частицы материала ГТС сил, что приводит к еще большему его выносу и к формированию полостей в теле сооружения. Когда полости достигают критических значений, происходит сползание и обрушение в них материала ГТС, что выражается на поверхности сооружения в виде локальных оседаний и обрушений. Пример подобной деформации представлен на рис. 5.16.



Рис. 5.16. Локальная деформация поверхности полки ГТС

Деформации поверхности полок ГТС в основном имеют вид оседания или провалов. При этом деформации полок и провалы, как правило, образуются не постепенно, а скачкообразно, когда несущая способность консолидированного материала сооружения уже не выдерживает веса материала, находящегося над локальным нарушением фильтрационной устойчивости. Данная ситуация особенно опасна, т. к. работа техники или людей в зоне нарушения может спровоцировать деформацию поверхности полки, на которой ранее следов подобных деформаций не наблюдалось. Так, на рис. 5.17 представлена фотография автосамосвала, спровоцировавшего локальную деформацию поверхности полки ГТС, на которой велись работы.



Рис. 5.17. Автосамосвал, пострадавший от локальной деформации

Таким образом, локальные деформации и оседания поверхности полок ГТС могут служить индикатором наличия локальных фильтрационных нарушений в теле сооружения.

Локальное поднятие

Выше изложено, что локальное оседание поверхности полки является индикатором наличия нарушения фильтрационной устойчивости. Однако указывать на наличие локального нарушения фильтрационной устойчивости может не только оседание, но и локальное поднятие или пучение поверхности полки. На рис. 5.18 представлены примеры локального поднятия поверхности полки насыпного ГТС.



Рис. 5.18. Локальные поднятия поверхности насыпного ГТС

В целом для насыпных ГТС свойственно постепенное равномерное оседание поверхности сооружения в первые годы после отсыпки, которое связано с уплотнением и консолидацией материала сооружения, происходящее в масштабах всего сооружения или крупных его элементов. Поднятия поверхности ГТС встречаются редко и из-за небольших масштабов сложно идентифицируемо.

Локальное поднятие поверхности ГТС может возникать вследствие реализации механизма воздействия на сооружение гидростатического давления воды ограждаемого прудка через фильтрационные нарушения. При накоплении гидростатического давления, что может быть вызвано, например, изменением уровня воды в ограждаемом прудке или повышением фильтрационной устойчивости сооружения у основания, повышенное давление преобразовывается в поровое давление фильтрующейся в теле сооружения воды. Повышение порового давления приводит к расширению пор между частицами материала насыпного ГТС, из-за чего происходят поднятия поверхности полки на локальных участках, которые расположены над областью локальных фильтрационных нарушений.

Идентификация локальных поднятий осложняется не только общей тенденцией материала сооружения к консолидации и оседанию, локальным характером поднятия, но и тем, что на таких частях происходит усиленный вынос частиц ГТС, что на следующем этапе приводит к образованию оседания и провалов. Также оседание может быть вызвано падением гидростатического давления на данном участке и, следовательно, порового давления, что приводит к проседанию поверхности полки. На рис. 5.19 приведены примеры участков с совмещением локальных поднятий и оседаний поверхности полки.

На фотографиях, представленных на рис. 5.19, видно маскирующее действие локальных оседаний (рис. 5.19 а) и обрушений (рис. 5.19 б), которые скрывают локальные поднятия поверхности полки. На участках ГТС, представленных на рисунке, первоначально развивался процесс локального поднятия, представленный линией 1, который впоследствии сменился процессом оседания и обрушения — линия 2.



а

б

Рис. 5.19. Деформации поверхности насыпного ГТС: 1 — линия первоначального локального поднятия; 2 — линия последующего локального оседания и обрушения

Между этапом локального поднятия и оседания поверхности насыпных ГТС может проходить относительно небольшой промежуток времени (меньше месяца), что еще больше осложняет обнаружение данного индикатора, а также обуславливает целесообразность регулярных ежемесячных обследований сооружения.

5.2.3. Сконцентрированный выход фильтрующихся вод

В отличие от нормальных фильтрационных процессов в теле ГТС, локальные нарушения фильтрационной устойчивости приводят к неравномерной продольной и поперечной фильтрации и формированию выходов на поверхность фильтрующихся вод. В связи с этим сконцентрированный выход фильтрационных потоков на поверхность может служить индикатором наличия локальных фильтрационных нарушений. На рис. 5.20 представлены фотоснимки выходов фильтрующихся вод на поверхность в основании ГТС и на его полке.



а

б

Рис. 5.20. Выходы фильтрующихся вод на поверхность: *а* — у основания ГТС; *б* — на поверхности полки

Как было сказано выше, локальные нарушения приводят к неравномерному распределению фильтрующейся воды как в поперечном, так и в продольном направлении относительно тела ГТС. Так, при неравномерном распределении воды в поперечном направлении образуются локальные ее выходы на поверхность в одном створе сооружения (рис. 5.20), а при неравномерном распределении в продольном направлении образуются выходы на поверхность, распределенные вдоль оси сооружения.

Стоит отметить, что для идентификации и интерпретации процессов, происходящих в теле ГТС, важны не только наличие выходов фильтрационных вод на поверхность, но и их расположение. Особое внимание необходимо уделять выходам фильтрующихся вод на поверхность полок сооружения.

Так, сконцентрированный выход фильтрующихся вод у основания ГТС свидетельствует о сформировавшемся локальном фильтрационном нарушении, но не позволяет оценить негативное влияние данных процессов на надежность сооружения. С другой стороны, выход фильтрующихся вод на поверхность вышележащих полок не только служит индикатором локальных нарушений фильтрационной устойчивости, но и может указывать на проявление гидростатического давления воды ограждаемого прудка, которое передается по фильтрационному нарушению и преобразуется в поровое давление, которое приводит к повышению уровня фильтрующихся вод на локальном участке и их выходу на поверхность. Они могут приводить к суффозионному выносу материала ГТС и приводить к негативным последствиям.

5.2.4. Фонтанирование воды

На практике не всегда возможно идентифицировать сконцентрированный выход фильтрующихся вод у основания сооружения из-за наличия стоячей или проточной воды в нижнем бьефе ГТС: прудок, водоулавливающая канава, озеро, река и др. В таком случае индикатором наличия локального нарушения фильтрационной устойчивости может служить фонтанирование воды у основания сооружения, как это представлено на рис. 5.21.



Рис. 5.21. Фонтанирование воды у основания сооружения

Фонтанирование воды у основания ГТС происходит из-за реализации относительно высокого уровня гидростатического давления. Оно передается от ограждаемого водного объекта к основанию сооружения и приводит к фонтанированию воды, что служит не только индикатором наличия в теле сооружения локального нарушения фильтрационного процесса, но и свидетельствует о сформировавшемся фильтрационном нарушении.

Из-за потенциальной связи фонтанирования воды с наличием фильтрационного нарушения, по которому передается гидростатическое давление, данный индикатор локального нарушения фильтрационной устойчивости также может указывать на опасность применения существующих методов фильтрационной защиты на данном участке. Такая опасность связана прежде всего с тем, что при восстановлении фильтрационной устойчивости на данном участке, гидростатическое давление будет передаваться по фильтрационному нарушению от ограждаемого прудка до места применения методов повышения фильтрационной устойчивости и далее трансформироваться в поровое давление, что может привести не только к суффозионному выносу материала сооружения, но и к изменению параметров устойчивости данного участка ГТС.

5.2.4. Проявления температурных аномалий

Целый класс методов обнаружения фильтрационных нарушений и протечек основан на температурном воздействии фильтрующейся воды на тело и поверхность сооружения [281]. Данные методы основаны на том, что фильтрующаяся через ГТС вода охлаждает или нагревает смежные участки тела ГТС. В отсутствии нарушений фильтрация воды в теле ГТС происходит равномерно, описываясь положением депрессионной кривой, в связи с чем и температурных аномалий не наблюдается, т. к. температурное воздействие на тело сооружения со стороны фильтрующихся вод также распределено равномерно. В случае развития в сооружении нарушений фильтрация на таких участках происходит более интенсивно. Усиление фильтрационных потоков приводит в том числе и к температурным аномалиям: локальное охлаждение или нагрев участков ГТС.

Существует ряд методов измерения температуры в теле ГТС: с помощью скважин различного назначения (пьезометрические, геологические и др.), с отбором проб, установкой датчиков и др. В качестве примера на рис. 5.22 представлено термограмма участка насыпного ГТС [281]

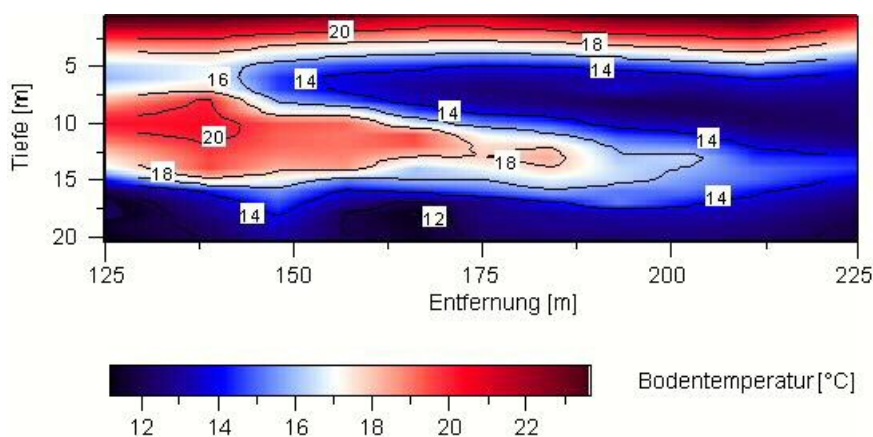


Рис. 5.22. Термограмма участка насыпного ГТС [281]

Кроме того, есть и дистанционные методы обнаружения протечек по визуальным и температурным проявлениям [282]. Прежде всего они основаны на площадной съемке поверхности дамбы в инфракрасном спектре. Однако температурное воздействие фильтрующихся вод на поверхность сооружения делает возможным также и визуальное обнаружение фильтрационных нарушений. На рис. 5.23 представлен фотоснимок участка подножия насыпного ГТС.



Рис. 5.23. Очаги выхода просачивающихся вод [281]

Как видно из рис. 5.23, у подножия сооружения имеются протечки — выходы фильтрующейся воды, сосредоточенные в нескольких очагах. В местах протечек относительно теплая фильтрующаяся вода приводит к локальному таянию снега и льда в зимний период времени. В связи с этим подобные локальные проявления на поверхности или у подножия насыпного ГТС температурных аномалий могут указывать на наличие фильтрационных нарушений. Другими словами, температурные аномалии можно использовать как визуальный индикатор наличия в теле сооружения фильтрационных нарушений.

5.3. Результаты визуального обследования ГТС хвостохранилищ

5.3.1. Апробация геоиндикаторов при проведении визуального обследования

Разработанная система индикаторов локальных фильтрационных нарушений апробировалась при выполнении комплексных инженерных изысканий на ряде насыпных ГТС Мурманской области:

- дамбах хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК»;
- дамбах хвостохранилища АО «СЗФК»;
- дамбах хвостохранилища АО «Кольская ГМК»;
- участке дамбы хвостохранилища АНОФ-2 КФ АО «Апатит».

При этом практически на всех обследованных ГТС были обнаружены те или иные индикаторы развития локальных нарушений фильтрационных процессов. Рассмотрим их в порядке уменьшения частоты, с которой они встречались на обследованных объектах в целом или на их участках в частности.

Следы суффозионного выноса материала сооружения

Одним из наиболее часто наблюдаемых индикаторов на обследованных объектах являются следы суффозионного выноса материала сооружения. На рис. 5.24 представлены примеры.



Рис. 5.24. Выходы фильтрующихся вод на поверхность дамбы

При идентификации следов суффозионного выноса возникала сложность с определением источника вынесенных частиц, т. к. их вымывание могло происходить и с поверхности сооружения, особенно, в период весеннего снеготаяния и осенних дождей. Облегчить определение источника и характер суффозии способно проведение регулярного визуального обследования с более частыми наблюдениями в весенний и осенний период. Также об источнике вымытых частиц может свидетельствовать их геометрия и расположение. Например, на нижних фотографиях рис. 5.24 видно, что вынос частиц происходил из тела ГТС, а не с поверхности вышележащих полок с последующим стеканием их с талой или дождевой водой, очаг выноса располагался на высоте порядка 2 м.

Локальные проседания поверхности полок насыпных ГТС

На половине обследованных объектов были обнаружены следы деформирования, как правило, проседания поверхности полок. На рис. 5.25 приведены примеры таких проседаний.

В случае с проседаниями поверхности полок также вставал вопрос об их связи именно с фильтрационными нарушениями, а не с их деформированием, например, при неравномерной консолидации материала сооружения. Отличить деформации полок, вызванные именно фильтрационными нарушениями, позволял анализ графиков их отсыпки, а также проявление других индикаторов и масштаб наблюдаемых деформаций. Так, наблюдавшиеся деформации, вызванные неравномерной консолидацией материала ГТС, как правило, имели небольшую амплитуду опускания поверхности полки без появления провалов. Кроме того, о связи деформаций поверхности ГТС с фильтрационными нарушениями может свидетельствовать их повторяющийся характер.



Рис. 5.25. Примеры наблюдавшихся локальных проседаний поверхности полков обследованных ГТС

Локальное поднятие поверхности полков

Локальное поднятие поверхности полков можно отнести к редко встречающимся индикаторам локальных фильтрационных нарушений. Это объясняется необходимостью для их формирования совпадения сразу ряда факторов. Таких, как наличие развившегося локального фильтрационного нарушения, по которому передается гидростатическое давление от ограждаемого прудка к основанию сооружения, и наличие препятствия реализации в полной мере данного гидростатического давления через выходы воды. Кроме того, оно наблюдалось только на вновь отсыпанных или восстановленных полках, что может быть объяснено тем, что относительное поднятие таких участков происходило не вследствие их непосредственного поднятия, а, скорее, более слабой консолидацией материала полки, чем на участках, на которых не наблюдаются локальные фильтрационные нарушения.

Локальные поднятия были обнаружены на нескольких участках одного из исследованных насыпных ГТС. На рис. 5.26 приведены примеры поднятия поверхности полков.

При этом стоит отметить, что, несмотря на то, что линейные размеры областей поднятий превышают размеры, например, проседаний и других индикаторов и достигают первых десятков метров, средствами классической и спутниковой геодезии они обнаружены не были. Что еще раз свидетельствует о необходимости проведения визуальных наблюдений за состоянием элементов насыпных ГТС.



Рис. 5.26. Поднятия поверхности полок насыпного ГТС

Сконцентрированный выход фильтрующихся вод на поверхность

По данным обследования насыпных ГТС в рамках апробации разработанной системы визуальных проявлений фильтрационных нарушений наиболее часто встречающимся индикатором стали выходы фильтрующихся вод на поверхность или у основания сооружения. На рис. 5.27 представлены примеры выходов фильтрующихся вод на поверхность обследованных насыпных ГТС Мурманской области.



Рис. 5.27. Выходы фильтрующихся вод на поверхность дамб

При этом на разных сооружениях количество протечек различалось от единичных случаев до наличия их на практически всей протяженности ГТС. Например, на рис. 5.28 представлен план насыпного ГТС, на котором синим цветом нанесены выходы фильтрующихся вод. Как видно из представленной схемы, они располагаются, во-первых, у основания сооружения, во-вторых, были неравномерно распределены вдоль всей его оси.

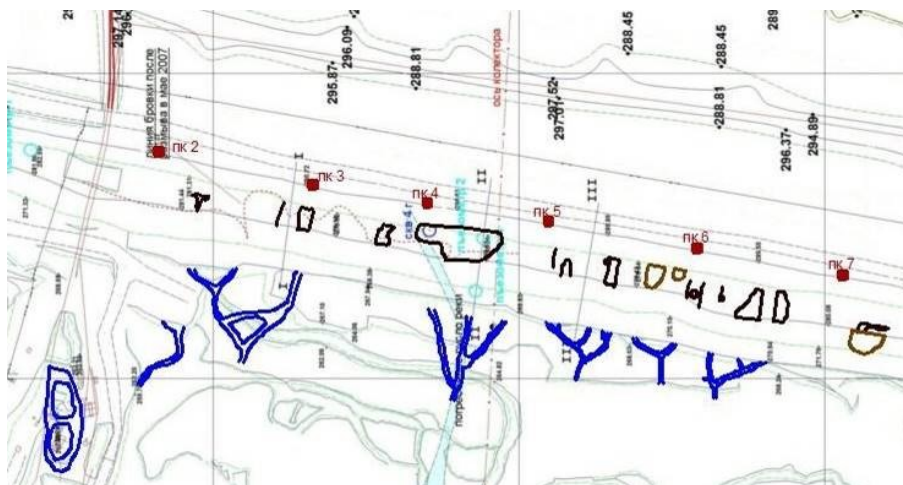


Рис. 5.28. Выходы фильтрующихся вод на поверхность дамбы

Фонтанирование воды у основания сооружения

Еще одним редким индикатором наличия локальных фильтрационных нарушений является фонтанирование воды. Оно было обнаружено лишь на одном участке одного из обследованных ГТС (рис. 5.29).



Рис. 5.29. Фонтанирование воды у основания дамбы

Редкость проявления данного индикатора также может объясняться необходимостью совпадения нескольких факторов: передаче гидростатического давления по локальному фильтрационному нарушению и наличии ограничений в реализации данного давления в районе подошвы ГТС. Такая ограниченность может возникать из-за различных материалов отсыпки основной и нижней части сооружения. Так, в случае, представленном на рис. 5.29, нижняя полка дамбы на данном участке сложена более крупными песками и крупнообломочным материалом, чем остальная часть ГТС. В результате этого суффозионный вынос таких частиц требует приложения больших сдвигающих сил и происходит в меньшем масштабе, что обуславливает относительно более низкую пропускную способность области нарушения на участке у подошвы дамбы.

Подводя итог представленным изысканиям, можно сказать что, визуальное обследование ряда насыпных ГТС Мурманской области позволили апробировать в натурных условиях разработанную систему внешних проявлений (индикаторов) локального фильтрационного нарушения. Также данные работы позволили оценить частоту возникновения различных индикаторов, а также необходимые для их возникновения условия.

Также стоит заметить, что, несмотря на то, что практически на всех обследованных ГТС наблюдались проявления нарушений фильтрационных процессов, масштаб и количество этих проявлений сильно различался для разных ГТС. Это свидетельствует о том, что локальные фильтрационные процессы происходят во многих насыпных ГТС, однако далеко не во всех из них они развиваются и приобретают масштабы, угрожающие безопасности сооружения. Для большинства обследованных дамб стоит говорить, скорее, об уникальных особенностях протекания фильтрационных процессов, нежели о развитии опасных фильтрационных нарушений. Однако даже в таком случае целесообразно включать в программу обследования ГТС визуальные наблюдения с использованием разработанной системы индикаторов для обнаружения формирования локальных фильтрационных нарушений на ранних стадиях.

Температурные аномалии на поверхности сооружения

При проведении визуального обследования насыпных ГТС в зимний период отмечался ряд температурных проявлений. Прежде всего это таяние снега в районе выхода фильтрующихся вод на поверхность сооружения. Примеры представлены на рис. 5.30.

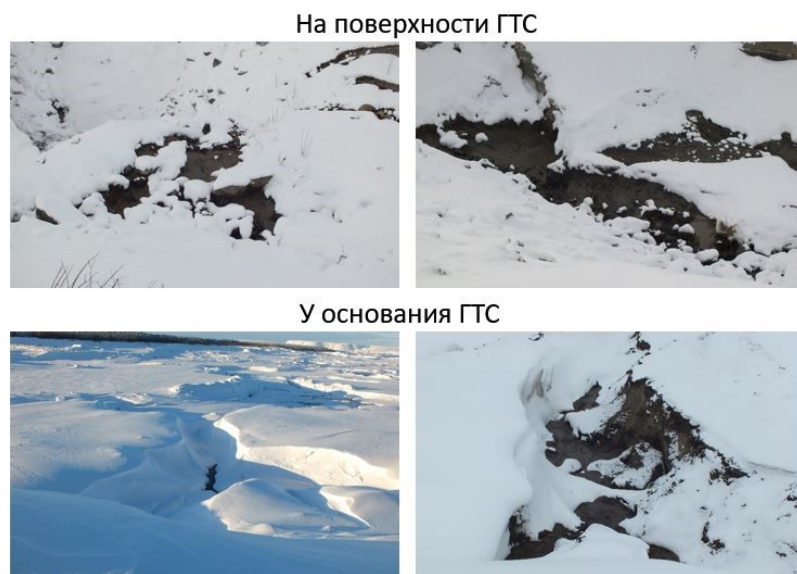


Рис. 5.30. Таяние снега в районе протечек

Как видно из рис. 5.30, такие температурные проявления выхода фильтрующихся вод на поверхность сооружения, как таяние снега облегчает обнаружение протечек, что оказывается наиболее полезным в условиях глубокого снежного покрова.

5.3.2. Развитие локальных фильтрационных процессов по данным визуального обследования

В качестве примера визуального обследования насыпного ГТС рассмотрим динамику фильтрационных и деформационных процессов на участке дамбы хвостохранилища обогатительной фабрики горнорудного предприятия.

Наблюдения по перечисленным выше индикаторам на данном ГТС были начаты в январе 2013 г. Период с января по апрель 2013 г. можно охарактеризовать как стабильный, в ходе которого не было выявлено признаков наличия нарушений фильтрационных и деформационных процессов. Однако уже в мае 2013 г. произошло скачкообразное развитие деформации полки на рассматриваемом участке (рис. 5.31).

Май 2013 г.



Май 2014 г.



Рис. 5.31. Динамика деформирования поверхности полки в период май 2013 г. – май 2014 г.

Как видно из рис. 5.31, в ходе периода кратковременного деформирования произошли многочисленные локальные проседания поверхности полки. С мая 2013 г. начался период постепенного деформирования, который продлился до апреля 2014 г. и сопровождался постепенным проседанием небольших участков рассматриваемой полки. В мае 2014 г. произошло повторное кратковременное деформирование поверхности сооружения на обследуемом участке (рис. 5.31), после которого наступил относительно стабильный период, в течение которого новых деформаций выявлено не было. В периоды постепенного и кратковременного деформирования наблюдалось постепенное и скачкообразное проседание поверхности полки. При этом проявлений фильтрующих вод на поверхности сооружения обнаружено не было. Однако подобный характер деформирования является индикатором наличия в теле сооружения нарушения фильтрационных процессов на данном участке. Это может свидетельствовать о наличии здесь нарушения фильтрационной устойчивости, которое на данном этапе может не проявляться на поверхности.

На протяжении более 2 лет с мая 2014 г. по сентябрь 2018 г. постепенного деформирования поверхности полки сооружения не наблюдалось. Однако в данный период было зафиксировано 2 этапа кратковременного деформирования поверхности полки: в мае 2015 г. и в августе 2016 г. (рис. 5.32).

Как видно из рис. 5.32, деформации снова носили характер проседания. Подобное периодическое возникновение схожих деформаций на протяжении почти 2,5 лет (с января 2013 г. по май 2015 г.) уже позволяет с высокой долей уверенности предполагать наличие на данном участке локального нарушения процессов, происходящих в теле сооружения. При этом подобное деформирование вполне может быть вызвано нарушением фильтрационных процессов. Так, вода, фильтрующаяся в теле сооружения, могла приводить к вымыванию частиц материала ГТС на данном

участке, возможно, с формированием локального фильтрационного нарушения. При достижении полостей или ослабленных зон критических значений, определяемых свойствами грунтов, происходило кратковременное или постепенное обрушение вышележащих слоев материала сооружения. В связи с данным предположением, были предприняты действия по поиску следов выноса материала сооружения и других индикаторов нарушения фильтрационных процессов на нижележащих его полках и в его основании. Попытка не увенчалась успехом, что может объясняться наличием у основания сооружения водного объекта, маскирующего данные индикаторы.

Май 2015 г.

Август 2016 г.

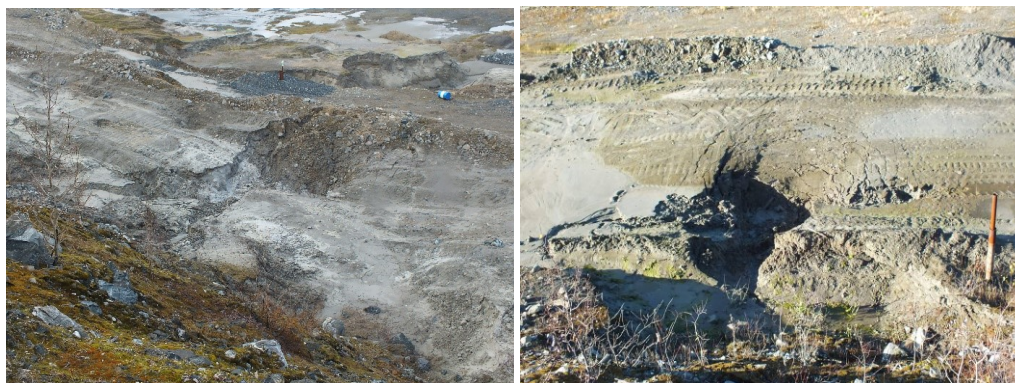


Рис. 5.32. Кратковременное деформирование полки в мае 2015 г. и в августе 2016 г.

Однако в августе 2016 г., наряду с кратковременной деформацией, был впервые обнаружен выход на поверхность полки воды, фильтрующейся через тело дамбы (рис. 5.32). При этом он сопровождался выносом мелких частиц на поверхность рассматриваемой полки. Наблюдения показали, что вынос материала сооружения не мог происходить с поверхности ГТС действием, например, атмосферных осадков. Таким образом, во-первых, в августе 2016 г. к наблюдаемым деформациям поверхности полки добавилось еще два индикатора наличия на данном участке локального нарушения фильтрационной устойчивости ГТС. Во-вторых, динамика проявлений фильтрационных и деформационных процессов на поверхности сооружения позволила сделать предположение о дальнейшем развитии локального нарушения фильтрационных свойств.

С августа 2016 г. по июль 2018 г. водоприток на поверхность полки был не большим и не вызвал опасений у эксплуатирующей организации, а наблюдавшиеся деформации были устранены отсыпкой поверхности полки сооружения.

С июля по октябрь 2018 г. наблюдалось постепенное усиление водопритока на поверхность полки (рис. 5.33). Пик был зафиксирован в октябре 2018 г., после чего начал постепенно снижаться до умеренных значений в зимний период времени, однако уже в апреле 2019 г. произошел новый скачек объемов воды, фильтрующихся на поверхность сооружения.

Подобное усиление выхода на поверхность фильтрующихся вод спровоцировало новый цикл деформационных процессов. Так, в октябре и ноябре 2018 г. были зафиксированы всплески кратковременных деформационных процессов (рис. 5.33), которые впоследствии сменились периодом постепенного деформирования поверхности полки сооружения, продлившегося до мая 2019 г.

Временной ряд, представленный на рис. 5.34, показывает динамику развития фильтрационных и деформационных процессов во времени. Из него видно, как изменялись наблюдаемые фильтрационные процессы: появление воды на полке; усиление водопритока, характеризующееся периодическими всплесками и затуханием. Также видно, что деформационные процессы происходили на всем рассматриваемом периоде времени, а выход фильтрующихся вод на поверхность полки начался только с августа 2016 г. Это может быть связано с тем, что первые 3,5 года наблюдений фильтрационные процессы, приводящие к деформированию полки сооружения, происходили в скрытой форме и не проявлялись на поверхности, но уже приводили к ее деформированию.

Кроме того, из представленного временного ряда наблюдавшихся на поверхности сооружения явлений хорошо заметен периодичный характер деформаций полки и неравномерное развитие фильтрационных процессов, сопровождающееся периодами усиления выхода на поверхность фильтрующихся вод и периодами стабилизации водопритока на умеренном уровне.

Таким образом, подводя итог, можно сказать, что визуальное обследование насыпного ГТС не только позволило выявить потенциально опасный участок сооружения, но и получить картину динамики проявления деформационных и фильтрационных процессов на выделенном участке. Эти сведения крайне полезны для корректировки текущей программы мониторинга сооружения, проведения комплекса дополнительных работ по изучению данного участка, и, в конечном итоге, для разработки и внедрения комплекса специальных мер по обеспечению надежности ГТС.

6. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГТС ХВОСТОХРАНИЛИЩ В ЕВРО-АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

6.1. Создание компьютерных моделей ГТС хвостохранилищ

Согласно работам [11, 13], хвостохранилища обогатительных фабрик горнодобывающих предприятий подразделяются по способу возведения ограждающей дамбы (рис 6.1):

- в сторону верхнего откоса (upstream method) (рис.6.1 *а*);
- центральная отсыпка (central line) (рис.6.1 *б*);
- наращивание в сторону низового откоса (down stream method) (рис.6.1 *в*).

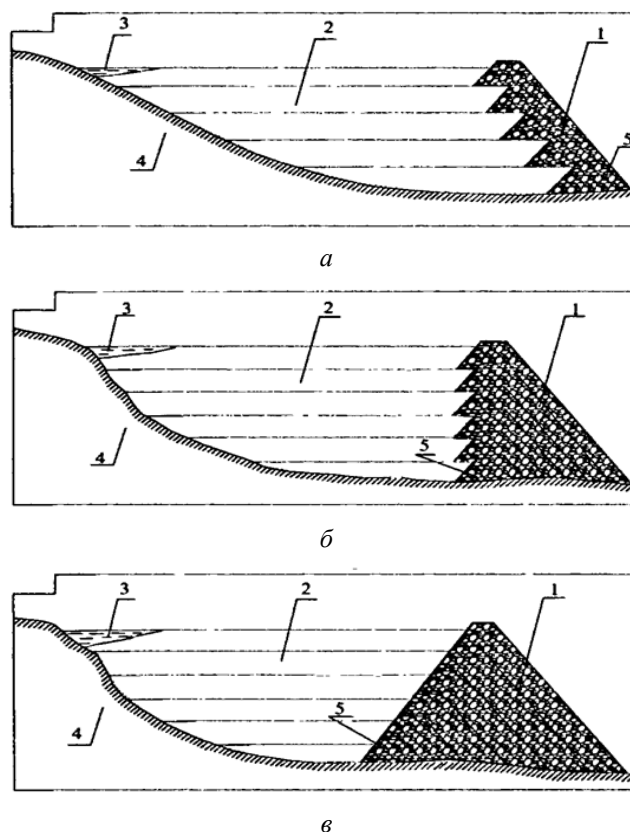
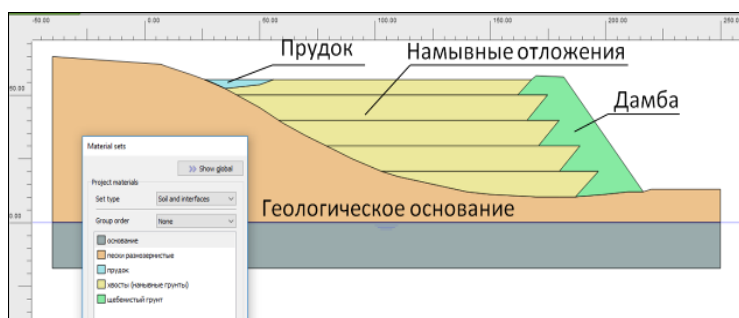
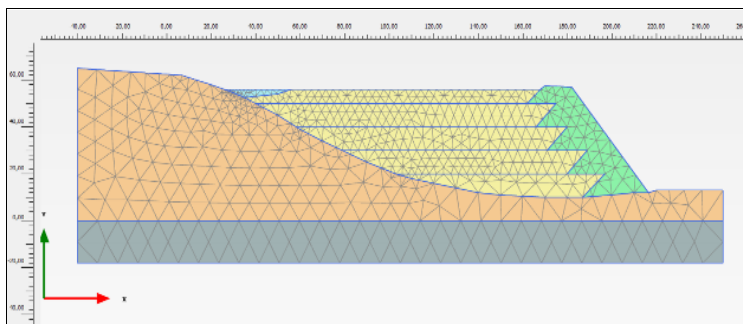


Рис. 6.1. Классификация хвостохранилищ по способу возведения ограждающей дамбы: *а* — наращивание в сторону верхнего откоса; *б* — центральная отсыпка; *в* — наращивание в сторону низового откоса; 1 — дамба; 2 — намывные отложения; 3 — прудок-отстойник; 4 — основание намывного массива; 5 — дамба первоначального обвалования [13]

В соответствии с этим были разработаны следующие компьютерные 2D-модели системы «дамба – хвостохранилище – геологическое основание», отражающие способ возведения ограждающей дамы: наращивание (обвалование на намывные отложения) в сторону верхнего откоса (рис.6.2 *а*); наращивание дамбы с центральной отсыпкой (рис.6.3 *а*); наращивание в сторону низового откоса (рис.6.4 *а*). Модели были реализованы в конечно-элементные схемы в Plaxis 2D и исследованы при различных параметрических сочетаниях влияющих факторов.

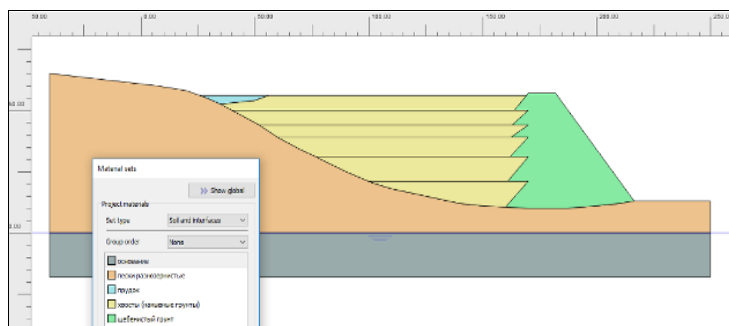


a

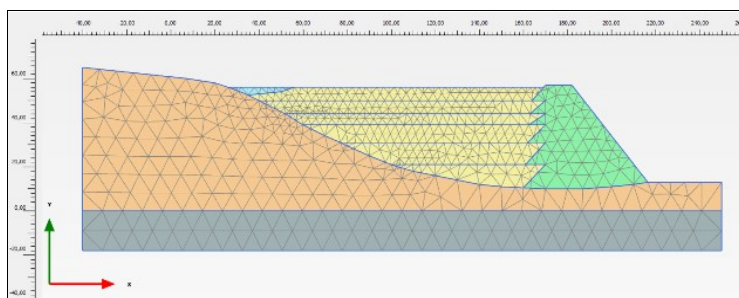


б

Рис. 6.2. Компьютерная 2D-модель системы «дамба – хвостохранилище – геологическое основание» (наращивание в сторону верхнего откоса) (*a*); конечно-элементная схема в Plaxis 2D (*б*)

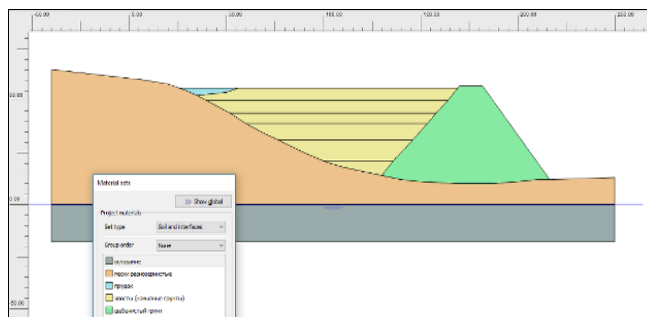


a

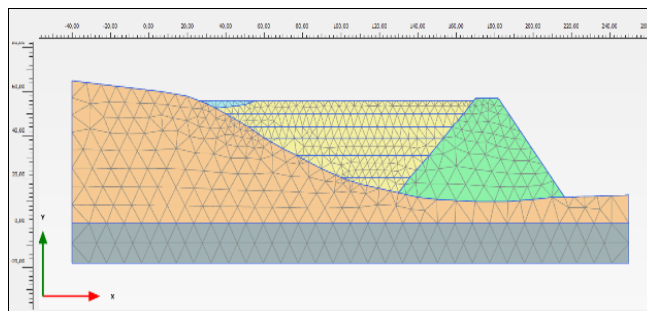


б

Рис. 6.3. Компьютерная 2D-модель системы «дамба – хвостохранилище – геологическое основание» (центральная отсыпка) (*a*); конечно-элементная схема в Plaxis 2D (*б*)



a



б

Рис. 6.4. Компьютерная 2D-модель системы «дамба – хвостохранилище – геологическое основание» (наращивание в сторону низового откоса) (*a*); конечно-элементная схема в Plaxis 2D (*б*)

Исходя из того, что на хвостохранилищах Кольского региона в основном применяется наращивание ограждающих дамб в сторону верхового откоса, в разделе 6.3.3 приведены методические подходы и результаты исследований с использованием компьютерного моделирования системы «дамба – хвостохранилище – геологическое основание» при поэтапном возведении (наращивании) ограждающей дамбы (на примере хвостохранилища АО «Кольская ГМК»).

6.2. 3D-моделирование поэтапного возведения ограждающей дамбы

Компьютерное 3D-моделирование поэтапного возведения ограждающей дамбы выполнено на примере ограждающей дамбы хвостохранилища обогатительной фабрики, расположенной в городе Заполярный Мурманской области, на территории горнодобывающего предприятия АО «Кольская ГМК». При обосновании расчетных характеристик физико-механических свойств техногенных грунтов дамбы и отложений естественного основания учтены результаты лабораторных исследований (табл. 6.1), выполненных в 2016–2021 гг. Горным институтом КНЦ РАН, с привлечением соисполнителей: АО «ПАНА» (Апатиты) и ФГУП «АМИГЭ» (Мурманск).

Оценка ретро, текущего и прогнозного гидрогеомеханического состояния дамбы, устойчивости откосов и фильтрационного режима хвостохранилища выполнена по створу 12 дамбы с учетом ее наращивания от пионерной до проектной отметки гребня +133,5 м. Поставленные задачи по оценке состояния и прогнозу устойчивости дамб при совместном рассмотрении фильтрационного режима хвостохранилища решались с использованием специализированной лицензионной программы Plaxis 3D.

Построение расчетной модели в программе Plaxis 3D выполнялось в следующей последовательности: создание геометрии природно-технической системы «ограждающая дамба – хвостохранилище – геологическое основание», построение расчетной модели инженерно-геологического строения системы, задание свойств компонентов системы (характеристики деформационных, прочностных и фильтрационных свойств) и граничных условий и нагрузок, разбивка геометрической модели на конечные элементы, проведение многовариантных расчетов, обработка полученных результатов с возможностью получения коэффициента запаса, комплексный анализ для оценки состояния системы и устойчивости откосов. В расчетах использовались гидрогеологические условия, а также данные комплексных инженерно-геологических и инженерно-геодезических изысканий, полученные в результате полевых измерений в 2016–2021 гг.

Таблица 6.1

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

Параметры	Ед. измер.	Хвосты (намывной грунт)	Грунты тела дамбы	Пески с включением щебня	Торф	Пески разной крупности	Щебенистый грунт с наполнителем	Скальный грунт диабаз
Тип модели		Mohr–Coulomb	Mohr–Coulomb	Mohr–Coulomb	Mohr–Coulomb	Mohr–Coulomb	Mohr–Coulomb	Mohr–Coulomb
Тип поведения материала		Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained
γ_{unsat} (уд. вес грунта)	[kN/m ³]	16,87	19,82	19,7	3,8	20,1	16,87	23,0
γ_{sat} (уд. вес насыщ. грунта)	[kN/m ³]	20,55	22,10	21,5	9,5	20,9	20,55	23,5
k_x (коэф. фильтрации)	[m/day]	0,1	1,0	10,0	1,0	1,0	0,1	0,01
k_y (коэф. фильтрации)	[m/day]	0,1	1,0	10,0	1,0	1,0	0,1	0,01
k_z (коэф. фильтрации)	[m/day]	0,1	1,0	10,0	1,0	1,0	0,1	0,01
E (модуль деформ.)	[kN/m ²]	8 000	40 000	38 000	3 300	20 000	8 000	500 000
ν (коэф. Пуассона)	[-]	0,32	0,30	0,3	0,3	0,3	0,32	0,25
c_{ref} (сцепление)	[kN/m ²]	0,1	4,0	4	18	7,0	0,1	8
ϕ (угол внутр. трения)	[°]	33,0	34,0	36	10,0	35,0	33,0	60

Компьютерная 3D-модель природно-технической системы «ограждающая дамба – хвостохранилище – геологическое основание» создана на основе данных буровых колонок и инженерно-геологических изысканий (рис. 6.5–6.7).

На следующем этапе создавалась геометрическая схема с выделением основных слоев грунтов прежде всего в основании дамбы, и для них задавались параметры физико-механических свойств (рис. 6.6).

Далее выполнялась разбивка 3D-модели на конечные элементы и узлы, число которых в вариантах расчетов изменялось в зависимости от решаемой задачи (рис. 6.8).

Позэтапное возведение дамбы в компьютерной модели проиллюстрировано на рис. 6.9–6.11.

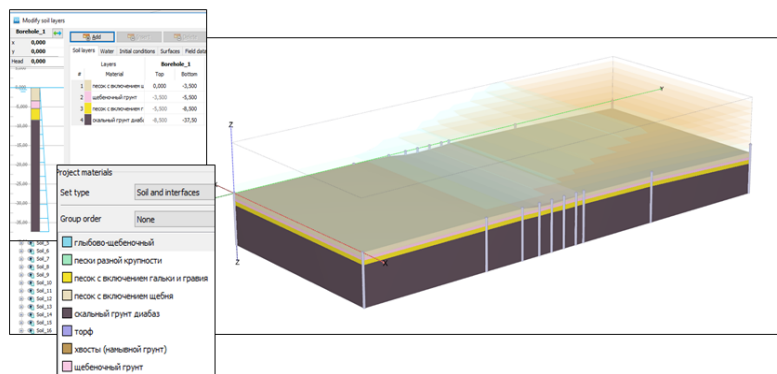


Рис. 6.5. Построение стратиграфического разреза по данным геологических колонок

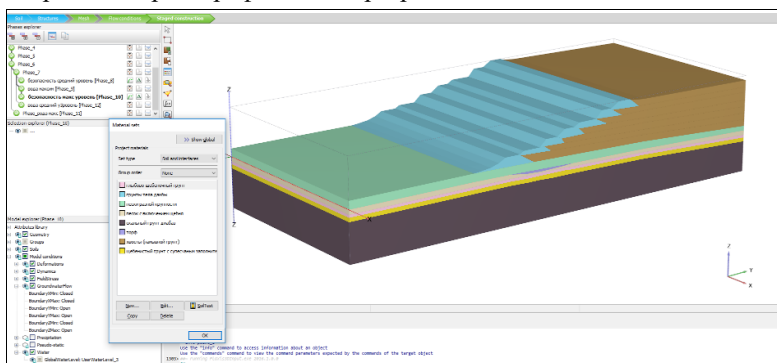


Рис. 6.6. Геометрическая схема и параметры заданных физико-механических свойств грунтов дамбы, отложений хвостов и геологического основания

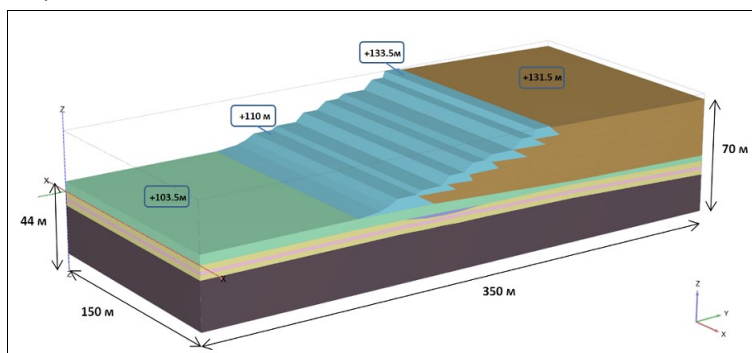


Рис. 6.7. Принятые геометрические размеры для компьютерной 3D-модели

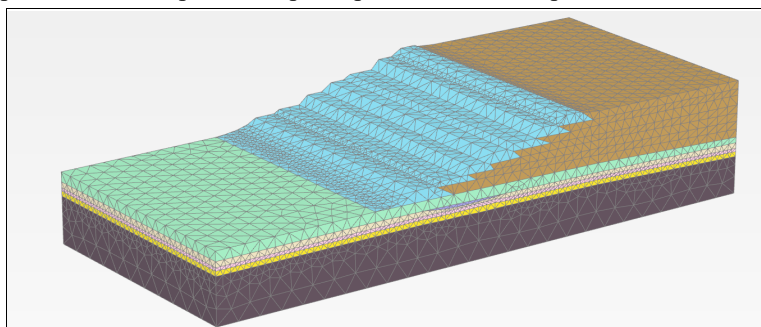


Рис. 6.8. Детализация конечно-элементной расчетной сетки 3D-модели ограждающей дамбы

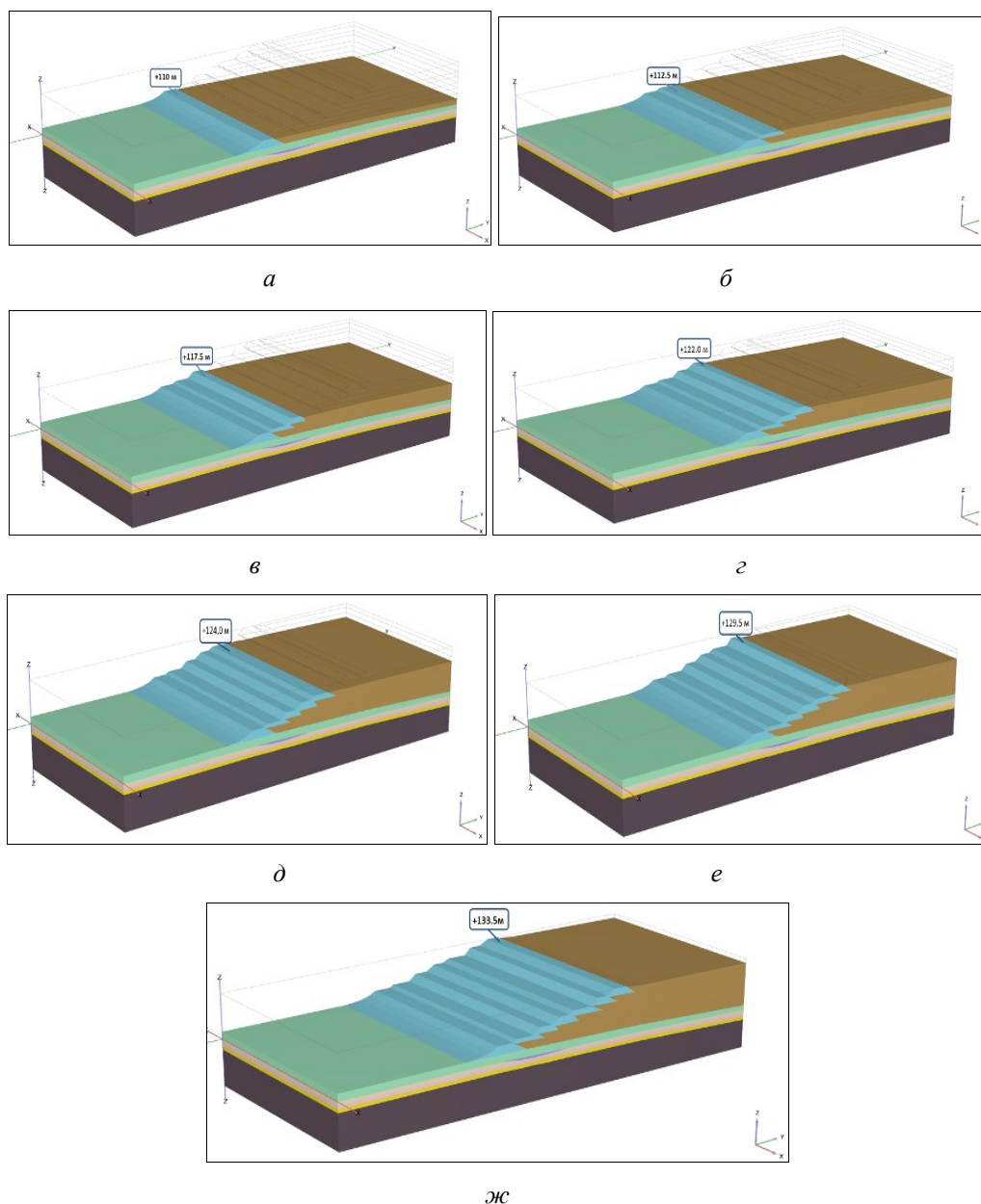


Рис. 6.9. Геометрические схемы компьютерной 3D-модели поэтапного возведения ограждающей дамбы: *а* — пионерная дамба (первоначальное обвалование); *б* — два яруса дамбы (наращивание в сторону верхового откоса); *в* — трехъярусное наращивание; *г* — четырехъярусное наращивание; *д* — пятиъярусное наращивание; *е* — шестиярусное наращивание; *жс* — семиярусное наращивание

В результате многовариантного компьютерного моделирования получены расчетные значения, характеризующие состояние исследуемой системы для рассматриваемых вариантов. Для наглядности наиболее характерные из них (общие и горизонтальные (вкrest простираения) перемещения грунтов, активное поровое давление воды) приведены на рис. 6.12–6.14.

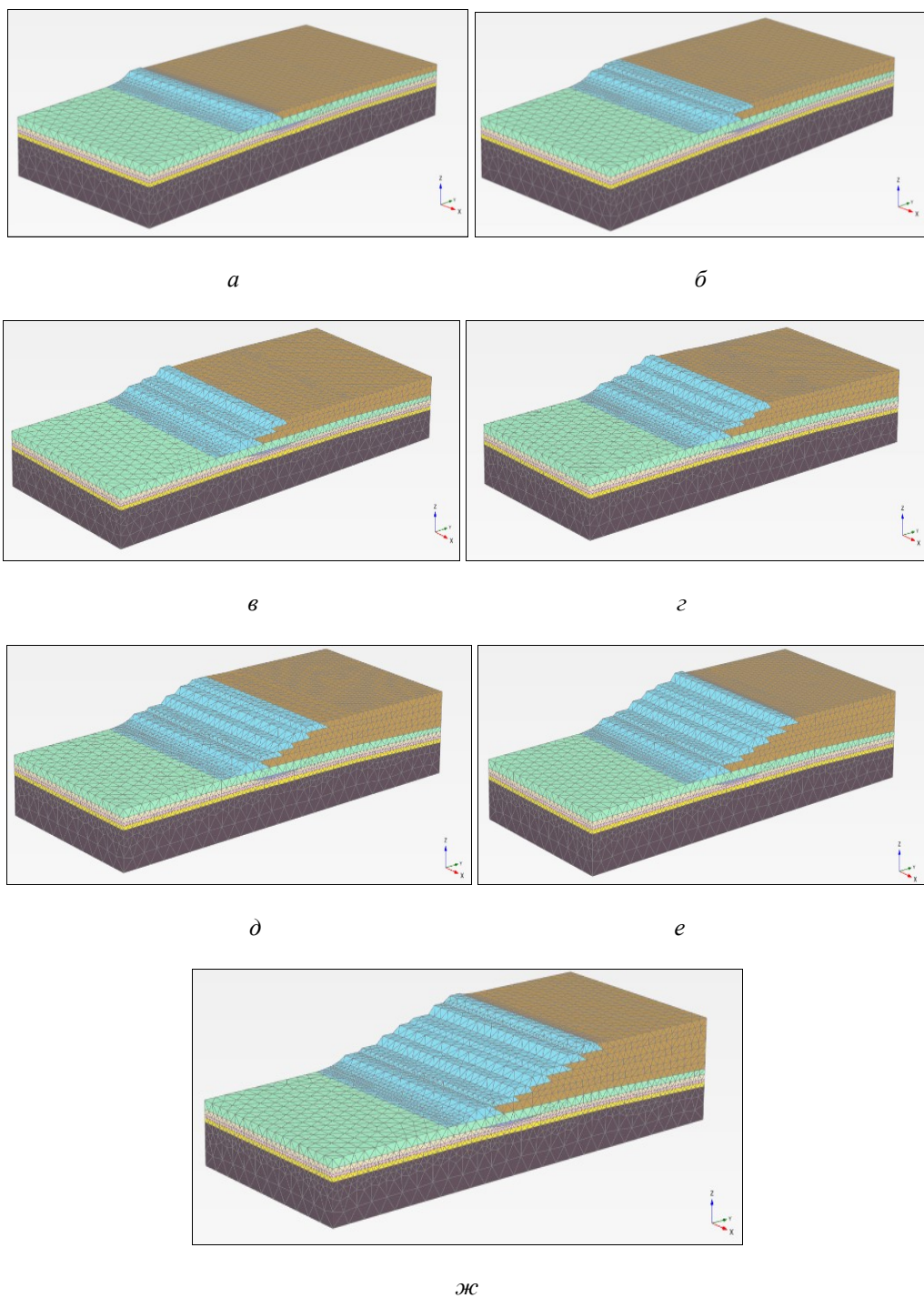
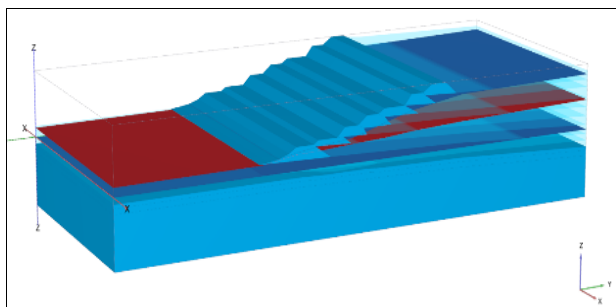
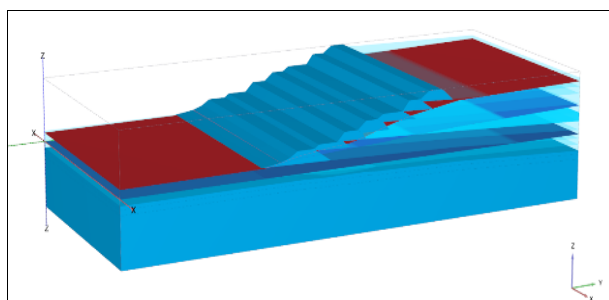


Рис. 6.10. Конечно-элементные сетки для численных расчетов при компьютерном моделировании при поэтапном наращивании ограждающей дамбы: *a* — пионерная дамба (первоначальное обвалование); *б* — два яруса дамбы (наращивание в сторону верхового откоса); *в* — трехъярусное наращивание; *г* — четырехъярусное наращивание; *д* — пятиъярусное наращивание; *е* — шестиярусное наращивание; *ж* — семиярусное наращивание



a



б

Рис. 6.11. Смоделированные депрессионные поверхности воды в хвостохранилище и в теле дамбы (в привязке к данным пьезометров): *a* — средний уровень; *б* — максимальный уровень

Оценка безопасности сооружения основывается на коэффициенте запаса, определяемого как отношение разрушающей нагрузки к действующей нагрузке, что применимо для фундаментов, скальных горных пород, но не для насыпных грунтовых ограждающих сооружений, для них более целесообразно использовать определение коэффициента безопасности (устойчивости, надежности), которое дается в классической механике грунтов и представляет собой отношение имеющейся сдвиговой прочности к минимальной сдвиговой прочности, необходимой для равновесия (см. раздел 1.5).

Во время расчета коэффициента безопасности генерируются дополнительные перемещения. Полные перемещения дают общее представление, а приращения перемещений, полученные на последнем шаге (при наступлении разрушения), позволяют судить о возможном механизме разрушения (рис. 6.15, 6.16).

Значение коэффициента устойчивости (надежности) не должно быть меньше нормативного значения. Для ограждающих дамб хвостохранилища АО «Кольская ГМК» (как для сооружений I класса) нормативные значения коэффициента устойчивости (надежности) составляют $K_{\text{над}} = 1,25$ при основном сочетании нагрузок, $K_{\text{над}} = 1,12$ при особом сочетании нагрузок, $K_{\text{над}} = 1,06$ при особом сочетании нагрузок, включая сейсмическое воздействие [1].

Выполненные расчетные исследования устойчивости ограждающей дамбы Южной хвостохранилища при наращивании ее гребня до отметки +133,5 м, показали, что устойчивость ее грунтов обеспечивается с большим коэффициентом запаса $K_{\text{над}} > 1,5$, намного превышающим нормативные требования.

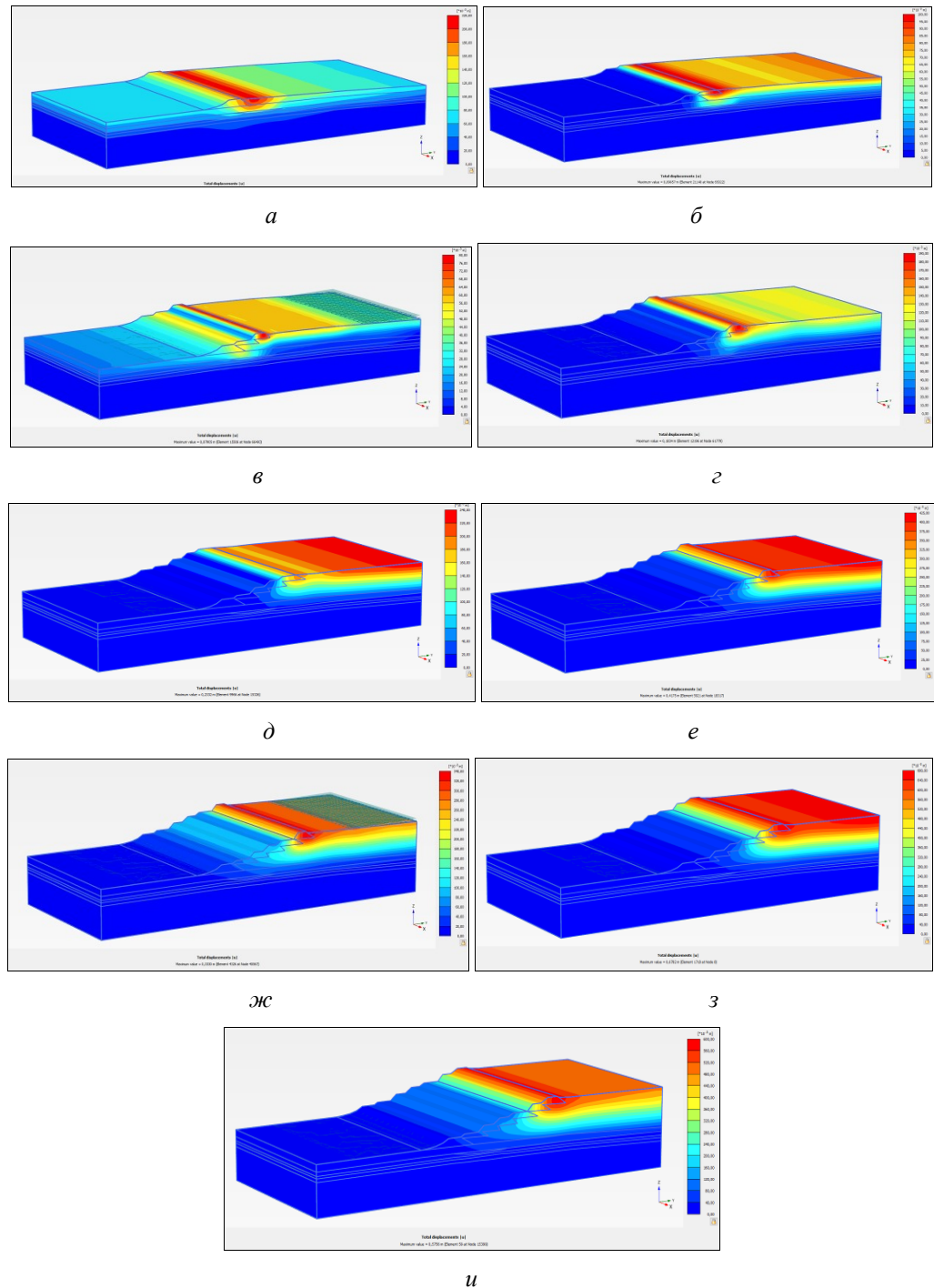


Рис. 6.12. Палитры общих (полных) перемещений (U) при поэтапном возведении ограждающей дамбы: *a* — пионерная дамба (первоначальное обвалование); *б* — два яруса дамбы; *в* — трехъярусное наращивание; *г* — четырехъярусное наращивание; *д* — пятиъярусное наращивание; *е* — шестиярусное наращивание; *ж* — шестиярусное наращивание (при максимальном уровне воды); *з* — семиярусное наращивание; *и* — семиярусное наращивание (при максимальном уровне воды)

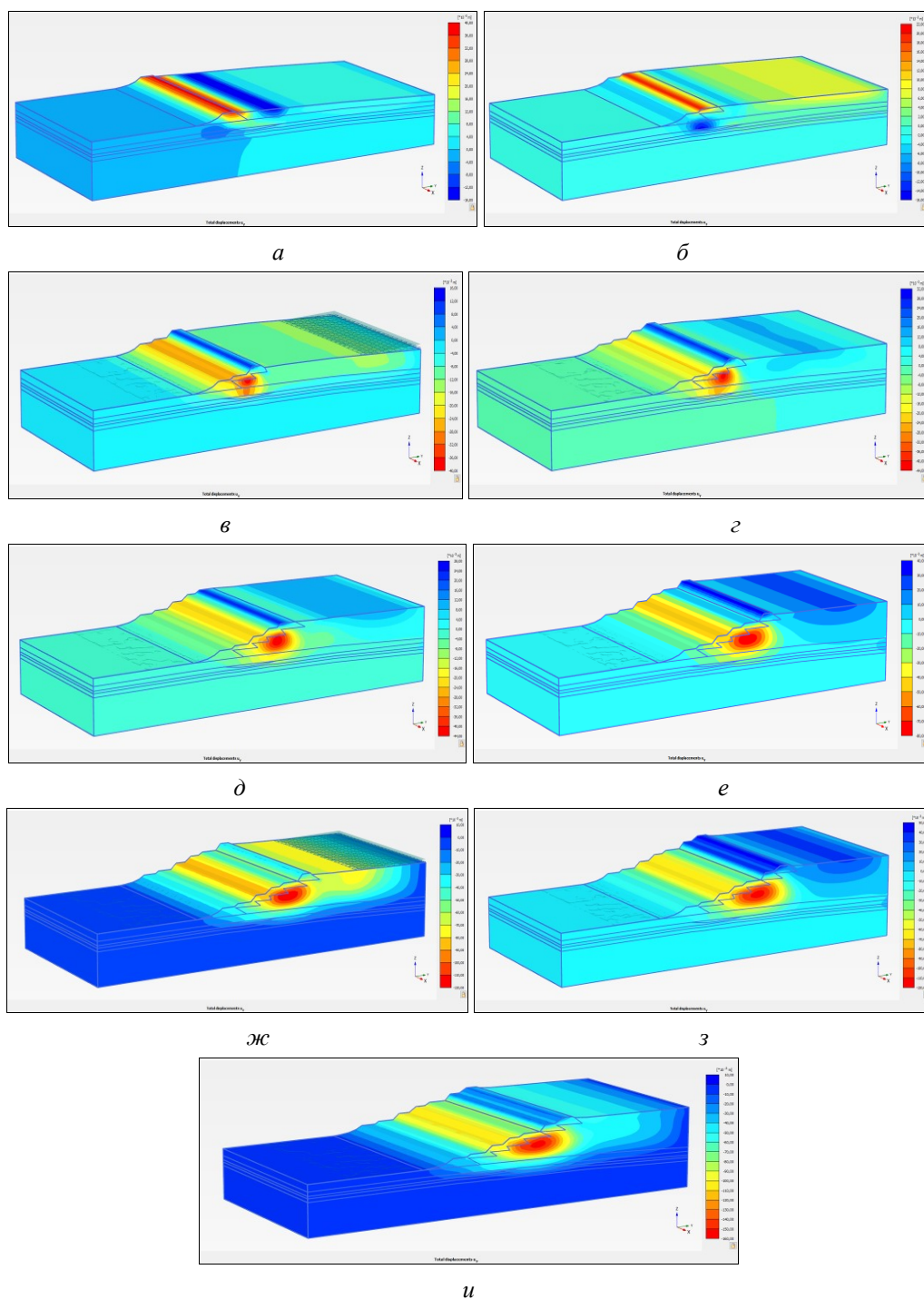


Рис. 6.13. Палитры горизонтальных перемещений (U_y) при поэтапном возведении ограждающей дамбы: *a* — пионерная дамба (первоначальное обвалование); *б* — два яруса дамбы; *в* — трехъярусное наращивание; *г* — четырехъярусное наращивание; *д* — пятиъярусное наращивание; *е* — шестиярусное наращивание; *ж* — шестиярусное наращивание (при максимальном уровне воды); *з* — семиярусное наращивание; *и* — семиярусное наращивание (при максимальном уровне воды)

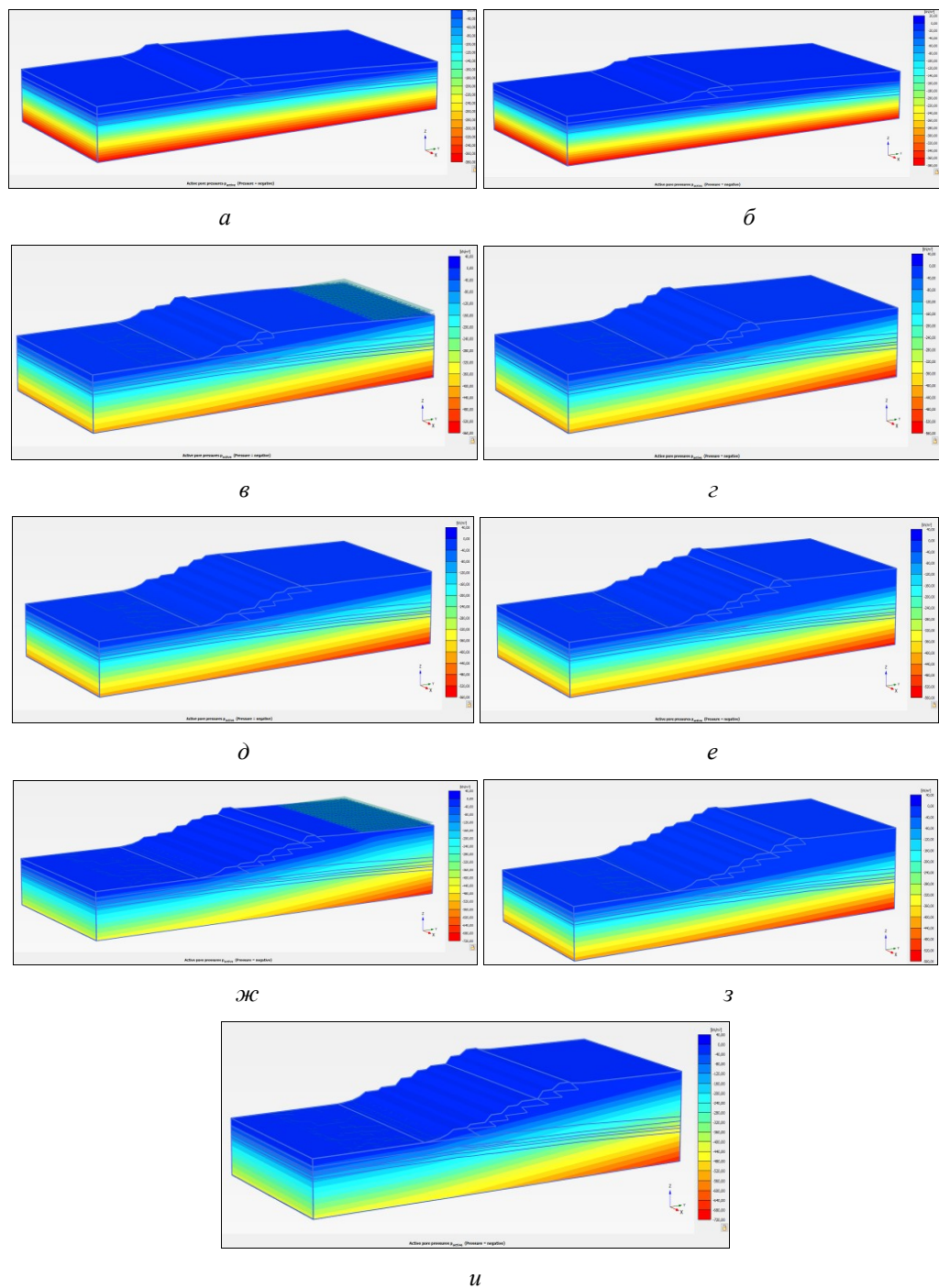


Рис. 6.14. Палитры активного порового давления (*Pactive*) при поэтапном возведении ограждающей дамбы: *а* — пионерная дамба (первоначальное обвалование); *б* — два яруса дамбы; *в* — трехъярусное наращивание; *г* — четырехъярусное наращивание; *д* — пятиъярусное наращивание; *е* — шестиярусное наращивание; *ж* — шестиярусное наращивание (при максимальном уровне воды); *з* — семиярусное наращивание; *и* — семиярусное наращивание (при максимальном уровне воды)



График зависимости перемещений U от высоты дамбы H . На графике представлены четыре ряда данных: $U_{\text{общ}}$ (синие ромбы), U_z (красные квадраты), U_y (зеленые треугольники) и U_x (фиолетовые кресты). Для $U_{\text{общ}}$ и U_z приведены уравнения регрессии и коэффициенты детерминации R^2 .

Высота дамбы, м	$U_{\text{общ}}$	U_z	U_y	U_x
13	0.05	0.04	0.00	0.00
14	0.10	0.09	0.00	0.00
19	0.13	0.12	0.00	0.00
24	0.18	0.16	0.01	0.00
26	0.23	0.20	0.02	0.00
32	0.42	0.40	0.04	0.00
36	0.68	0.60	0.05	0.00

Уравнения регрессии:

- Для $U_{\text{общ}}$: $y = 0,0179e^{0,0992x}$, $R^2 = 0,9692$
- Для U_z : $y = 0,002x - 0,0252$, $R^2 = 0,9745$

Рис. 6.16. Зависимости перемещений ($U_{\text{общ}}$, U_x , U_y , U_z) грунтов дамбы от ее высоты (для рассмотренных условий)

169

6.3. Оценка устойчивости ограждающих дамб хвостохранилища АО «Кольская ГМК»

Целями компьютерного моделирования являлась оценка фактической устойчивости ограждающих Северной и Южной дамб АО «Кольская ГМК», для обеспечения безопасной эксплуатации хвостохранилища при проектных параметрах по текущей технологии складирования хвостов и исключения риска возникновения гидродинамической аварии. При этом были выполнены анализ фильтрационного режима и оценка фильтрационной прочности грунтов тела и основания ограждающих дамб хвостохранилища при различных вариантах ширины надводного пляжа и поэтапному наращиванию дамб. Расчетные исследования выполнялись методом численного моделирования с использованием лицензионных программных комплексов Plaxis 2D и Plaxis 3D. При обосновании расчетных характеристик физико-механических свойств техногенных грунтов дамб и отложений естественного основания учтены результаты лабораторных исследований, выполненных в 2016–2021 гг. в «АМИГЭ» (город Мурманск) по заказу ФГБУ Горный институт Кольского научного центра РАН.

6.3.1. Технологические условия эксплуатации хвостохранилища

Хвостохранилище обогатительной фабрики АО «Кольская ГМК» введено в эксплуатацию в 1965 г. с функциональным назначением — складирование хвостов обогащения сульфидных медно-никелевых руд и осветление технической воды в системе оборотного водоснабжения хвостового хозяйства.

Хвостохранилище расположено поперек устьевой части долины реки Арвалдем-Йоки. До 1999 г. сооружение состояло из двух полей (I поле и II поле). Первое поле практически по всему периметру было околонушено ограждающей дамбой. Второе поле, смежное с первым, примыкало к нему с юго-восточной стороны. Емкость II поля была образована Северной и Южной дамбами и рельефом местности. С 1965 до 1974 гг. в эксплуатации находилось I поле хвостохранилища, с 1974 г. складирование хвостов производилось во II поле хвостохранилища. После достижения отметки +113 м разделительная дамба между I и II полем была затоплена, и разделение емкости накопителя на два поля перестало существовать.

В настоящее время хвостохранилище представляет собой намывное сооружение с двухсторонним обвалованием, емкость которого обеспечивается ограждающими сооружениями, называемыми Северной и Южной дамбами. Ограждающие сооружения представлены пионерными дамбами и дамбами последующего наращивания (обвалования).

По проекту пионерные дамбы возведены из скальных вскрышных пород рудника со следующими параметрами. Северная пионерная дамба: отметка гребня — +95,0 м, средняя высота — 15–20 м; максимальная высота — 22 м, заложение верхового откоса — 1:2, низового — 1:1,5; крепление верхового откоса — слоем моренного грунта; крепление низового откоса — растительным грунтом с торфом и гравийно-галечниковой смесью слоем 1–1,5 м. Южная пионерная дамба: отметка гребня — +105,0 м; максимальная высота — 15 м; заложение верхового откоса — 1:1,4; низового — 1:3.

Уступы наращивания дамбы отсыпаются из смеси скального или моренного песчаного грунта с креплением проезжей части гравийно-щебенистым грунтом. Высота уступов наращивания составляет 4–5 м, заложение откосов — 1:2, ширина дамб по гребню — 10–12 м. Пикетажная разбивка гребней включает 37 ПК на Северной дамбе и 39 ПК — на Южной.

Согласно «СП 58.13330.2019. Гидротехнические сооружения. Основные положения» [1] ограждающие дамбы относятся к основным гидротехническим сооружениям (ГТС) I класса.

Эксплуатация сооружения осуществляется по следующей схеме. Хвосты обогащения подаются в общий хвостовой зумпф, установленный в главном корпусе обогатительной фабрики. Из хвостового зумпфа пульпа по пульповодам поступает в хвостохранилище. Складирование хвостов ведется в летнем и зимнем режимах.

В теплое время года при среднесуточных температурах воздуха выше -5°C складирование хвостов производится в режиме «летнее складирование» посредством рассредоточенного намыва пульпы (хвостов) из пульповодов, проложенных по гребням дамб. Пульповоды хвостовой пульпы проложены двумя нитками стальных труб диаметром 820 мм; длина правой (южной) нитки — 4,0 км, левой (северной) — 3,8 км. Хвостовая пульпа подается в пляжную зону намывных дамб через намывные выпуски, установленные на распределительном пульповоде. Выпуски оборудованы шланговыми затворами. Количество одновременно работающих выпусков на участке намыва — более 40 шт. Контроль над интенсивностью намыва осуществляется путем периодической топосъемки намытых участков пляжа.

В режиме «зимнее складирование» при среднесуточных температурах воздуха ниже -5°C подача пульпы в хвостохранилище производится из распределительного пульповода через сосредоточенные выпуски непосредственно в пруд.

Осветленная вода из отстойного пруда через водоприемный колодец поступает в водосборный коллектор, а затем насосной установкой по водоводу подается в главный корпус обогатительной фабрики.

По результатам полевых исследований, выполненных авторами, в хвостохранилище ежегодно поступают хвосты обогащения в количестве около 7 млн т. Площадь намывного пляжа составляет почти 3 км^2 , площадь зеркала пруда-отстойника — более 3 км^2 . Объем воды в пруду превышает 6 млн м^3 . Средняя длина надводной части пляжа на момент измерений составляла: по Северной дамбе — около 340 м, по Южной — более 450 м.

На хвостохранилище в соответствии с нормативными требованиями к обеспечению безопасности ГТС организована система натурных наблюдений, включающая визуальные наблюдения и инструментальный контроль фильтрационного режима по пьезометрическим скважинам, а также измерения деформаций (вертикальный и горизонтальных смещений) дамб с использованием геодезических методов.

По состоянию на июнь 2017 г. на дамбах функционируют пьезометрические скважины в количестве 101 шт., из которых на Северной — 45 пьезометров в 9 наблюдательных створах и 56 пьезометров — на Южной в 8 створах. Для контроля и наблюдения за гидродинамическим и гидрохимическим влиянием хвостохранилища на подземные и поверхностные воды имеются гидронаблюдательные скважины, расположенные в нижнем бьефе намывных дамб в створах существующих пьезометров в количестве 8 шт. на Южной дамбе и 17 шт. — на Северной.

Для определения возможных деформаций (осадок и смещений) на дамбах установлены грунтовые марки (реперы) в количестве 26 шт. с размещением в створах пьезометров, а также скальные (опорные) реперы в количестве 3 шт. на Северной дамбе и 4 шт. — на Южной.

6.3.2. Инженерно-геологические условия хвостохранилища

Условия устойчивости ограждающих дамб хвостохранилища во многом определяются геоморфологическими особенностями участка расположения объекта. Сооружение построено в долине реки Арвалдем-Йоки, которая здесь представляет собой широкое корытообразное понижение, окруженное возвышенностями, сложенными скальными породами и мореной. Донная часть понижения занята торфяными болотами и озерами.

В основании дамб хвостохранилища выделяют несколько литолого-генетических типов четвертичных грунтов, которые имеют невыдержанное распространение по протяженности дамб, что предопределяет различие в условиях устойчивости ограждающих сооружений по разным сечениям.

Четвертичные грунты представлены озерно-болотными, аллювиальными и озерно-аллювиальными, флювиогляциальными и моренными образованиями. Коренной основой служат скальные породы протерозойского возраста. Мощность четвертичных отложений максимальная в днище долины, где достигает 40–50 м [283, 284].

Изучение инженерно-геологических условий участка расположения хвостохранилища ведется, начиная с проектирования I поля хвостохранилища (1954 г.). В дальнейшем различными организациями проводились дополнительные изыскания в 1968 г. (проектирование II поля); 1970 г. (по 3 поперечникам Северной дамбы I поля); 1976 г. (оборудование наблюдательных створов на Северной дамбе); 1984–1986 гг. (по 4 поперечникам Северной дамбы II поля с одновременной установкой пьезометров). В 2003 г. был детально обследован IV наблюдательный створ Северной дамбы, на котором было пробурено 9 скважин непосредственно на дамбе и 3 точки опробования на пляже.

Ниже приводится инженерно-геологическая характеристика четвертичных и техногенных грунтов, составленная по результатам изысканий разных лет.

Озерно-болотные и аллювиальные отложения представлены торфом, суглинками и песчано-крупнообломочными отложениями.

Торф, плохо разложившийся, залегает с поверхности, подстилается, как правило, моренными отложениями.

В районе Южной дамбы слой торфа по данным изысканий 1968 г. имел максимальную мощность 5 ÷ 7 м (ПК 15-23), на других участках — до 1,0 м. Торф характеризуется высокой сжимаемостью (коэффициент сжимаемости — 3 кгс/см²), поэтому его мощность и физическое состояние изменяются под нагрузкой от веса дамб. При установке пьезометров на Южной дамбе в 1989 г. встретившийся торф был средней и плохой степени разложения, уплотненный. Мощность его составляла от 0,1 до 1,6 м. Максимальная мощность торфа — 1,6 м была отмечена в ПК 17+50.

В районе Северной дамбы максимальная мощность отложений торфов 2,0 м вскрыта в 1976 г. при установке наблюдательных скважин в пьезометрических створах IV и V, в других створах — не более 0,5 м.

Суглинки голубовато-серого цвета, насыщенные водой, текучепластичной консистенции находятся на самых пониженных участках основания Северной и Южной дамб, подстилаются мелкими песками, сверху перекрыты слоем торфа или песками средней крупности. Мощность — от 1,3 до 6,0 м.

При пересечении трассы дамбы озера Арвалдем-ярви были встречены донные отложения — илы в текучем состоянии мощностью от 1,0 до 3,6 м, подстилаемые разномерными песками с включениями гальки и гравия. При отсыпке дамбы такие отложения, вероятно, должны были выдавливаться.

Флювиогляциальные (водно-ледниковые) отложения представлены гравийно-галечниковыми грунтами с песчаным заполнителем пор и песками различной крупности — от мелких до крупных. Иногда четкой границы между литологическими разностями не наблюдается, происходит постепенная замена одних другими. Пески залегают непосредственно под растительным слоем. Мощность слоя песков — от 2,10 до 6,0 м и более. Коэффициент фильтрации по данным полевых определений: для мелких песков — 4,23 м/сут; для крупных — до 43,2 м/сут.

Моренные отложения представлены плотными или очень плотными мелкими, пылеватыми и гравелистыми песками серого цвета с содержанием крупнообломочного материала (гравия, гальки, валунов и глыб) диабазового состава от 20 до 40 %. В кровле, как правило, моренные отложения сцементированы окислами железа. Мощность морены по трассе дамбы — от 0 до десятков метров.

Коренные породы представлены протерозойскими диабазами зеленовато-серого цвета, преимущественно мелкозернистыми, в различной степени трещиноватыми. В единичных случаях в кровле диабазов залегает элювий этих пород в виде линз мощностью 0,4–0,7 м. Скальные породы покрыты отложениями морены мощностью от 0,3 до 5 м и более, и только в самом конце трассы в примыкании к склонам долины наблюдаются обнажения диабазов.

Техногенные грунты представлены насыпными и намывными отложениями хвостохранилища.

Насыпные грунты слагают пионерную дамбу и дамбы обвалования, представлены гравелистыми песками, галечниковыми грунтами с песчаным заполнителем, глыбовым и глыбово-щебенистым грунтом диабазов. В основании пионерной дамбы отсыпаны хорошо фильтрующие глыбовые, реже глыбово-щебенистые грунты диабазов мощностью $2 \div 4$ м.

Намывные отложения представлены песчаными, супесчаными и суглинистыми грунтами. Обладают большой слоистостью и плавным переходом от одной разновидности грунта к другой. В пределах разведанной пляжной зоны по мере удаления от выпусков пульпы к прудку выделены следующие инженерно-геологические элементы техногенных грунтов:

- *намывные пески различной крупности* в основном пылеватые с прослоями мелкого песка, средней крупности и супесей;
- *намывные супесчаные грунты* с прослоями преимущественно пылеватых песков и реже суглинков;
- *намывные суглинисто-супесчаные грунты*, сменяющие супесчаные и распространяющиеся до уреза воды в прудке.

Отложения прудковой зоны не исследовались.

Наиболее полная оценка физико-механических свойств четвертичных отложений и техногенных грунтов содержится в материалах отчета НПК СПбГПУ за 2004 г. [284].

В расчетных схемах были выделены следующие инженерно-геологические элементы: *намывные грунты* (ИГЭ 1 — отложения прудковой зоны (суглинки), ИГЭ 2 — отложения переходной зоны (супеси), ИГЭ 3 — пляжные отложения (пески пылеватые); *пионерная дамба и дамбы обвалования* (ИГЭ 4 — насыпной грунт, состоящий из смеси скального обломочного грунта с моренными и флювиогляциальными песками и супесями, ИГЭ 5 — скальный обломочный грунт (каменная наброска); *грунты основания* (ИГЭ 6 — торф (озерно-болотные отложения), ИГЭ 7 — суглинки (озерно-болотные отложения), ИГЭ 8 — пески разной крупности (флювиогляциальные), ИГЭ 9 — моренные отложения).

Полноценные комплексные изыскания, ориентированные на изучение свойств четвертичных отложений в основании дамб и установление характера их изменения под воздействием технологических нагрузок в процессе эксплуатации хвостохранилища, выполнены в 2016–2021 гг.

Инженерно-геологические исследования на Северной дамбе проведены в 4 наблюдательных створах II, IV, VI и VII, на Южной дамбе — в 3 створах VIIa, X и XI АО «ПАНА» субподрядной организацией Горного института, было пробурено 12 скважин на Северной и 3 скважины на Южной дамбе. В качестве примера на рис. 6.17 приведен паспорт буровой колонки по скважине 6.

Глубина, м	Номер слоя	Мощность слоя, м	Глубина подошвы слоя, м	Литологическая колонка	Выход зерна, %	Описание	ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТА
							■ Плотность грунта, г/см³ ● Влажность грунта, д.е.
1	1	1.0	1.0	Г		0.0-1.0 м. Песок гравелистый (насыпной грунт), светло-коричневый с галькой, щебнем и валунами, обломки преимущественно диабазового состава	1.4 1.6 1.8 2.0 2.2 2.4
2				Г			
3				Г			
4	2	3.0	4.0	Г		1.0-4.0 м. Супесь твердая, щебеннистая (насыпной грунт), коричнево-серая, бурая с частыми включениями дресвы и щебня, слоями песка.	
5	3	1.0	5.0	Г		4.0-5.0 м. Песок гравелистый (насыпной грунт), светло-коричневый с галькой и щебнем.	
6				Г			
7				ПД		5.0-8.0 м. Супесь пластичная, песчаная (хвостовые отложения), темно-серая до черной с окатышами суглинка, включениями дресвы и щебня.	
8	4	5.0	8.0	ПД		8.0-10.0 м. Песок пылеватый (хвостовые отложения) темно-серый до черного с окатышами суглинка.	
9				П		10.0-11.0 м. Супесь пластичная, песчаная (хвостовые отложения), темно-серая до черной с окатышами суглинка, включениями дресвы и щебня.	
10	5	2.0	10.0	ПД		11.0-12.0 м. Песок пылеватый (хвостовые отложения) темно-серый.	
11	6	1.0	11.0	ПД		12.0-15.0 м. Супесь пластичная, песчаная (хвостовые отложения), темно-серая до черной с частыми тонкими прослоями песка пылеватого.	
12	7	1.0	12.0	П		15.0-17.0 м. Песок пылеватый (хвостовые отложения), темно-серый до черного с окатышами суглинка.	
13				ПД		17.0-18.0 м. Суглинок мягкопластичный легкий пылеватый, голубовато-серый.	
14				ПД		18.0-19.0 м. Супесь пластичная, серая.	
15	8	3.0	15.0	П		19.0-20.0 м. Суглинок мягкопластичный легкий пылеватый, голубовато-серый.	
16				ПД		20.0-28.0 м. Супесь текучая песчаная, серая, голубовато-серая реже коричнево-серая, с прослоями песка пылеватого с включением дресвы и щебня.	
17	9	2.0	17.0	ПД			
18	10	1.0	18.0	ПД			
19	11	1.0	19.0	ПД			
20	12	1.0	20.0	ПД			
21				ПД			
22				ПД			
23				ПД			
24				ПД			
25				ПД			
26				ПД			
27				ПД			
28	13	8.0	28.0	ПД		28.0-30.0 м. Грунт щебеннистый, заполнитель - супесь текучая с щебнем. Заполнитель - супесь светло-коричневого цвета с прослоями суглинка текучего, песка от пылеватого до средней крупности, щебень различного состава, преимущественно диабаз.	
29				ПД			
30	14	2.0	30.0	ПД		30.0-33.0 м. Суглинок мягкопластичный темно-серый, однородный, с тонкими (1-2 мм) прослоями песка пылеватого. С глубины 32.0 м - тугопластичный.	
31				ПД			
32				ПД			
33	15	3.0	33.0	ПД		33.0-36.0 м. Грунт щебеннистый, заполнитель - супесь текучая с щебнем. Заполнитель - супесь светло-коричневого цвета с прослоями суглинка текучего, песка от пылеватого до средней крупности, щебень различного состава, преимущественно диабаз.	
34				ПД			
35				ПД			
36	16	3.0	36.0	ПД		36.0-41.0 м. Диабаз с густой пиритовой вкрапленностью, трещиноватый в различных направлениях.	
37				ПД			
38				ПД			
39				ПД			
40				ПД			
41	17	5.0	41.0	ПД			

Дата бурения	2017 г.	Колонка инженерно-геологической скважины № 6 П 03 Площадка: Южная дамба Кольская ГМК г. Заполярный
Глубина скважины	41.0м	
Высотная отметка уст. скв.		
Геолог:		
Оборудование:		
Способ проходки:	Вращательной	
Диаметр бурения:	151 мм	
Диаметр зерна:	114 мм	

Рис. 6.17. Паспорт буровой скважины 6

Образцы керна отобраны из насыпного тела дамб, намывного пляжа и пород естественного основания. Наиболее тщательное изучение четвертичных грунтов выполнено на Северной дамбе, где в каждом створе пройдено по 3 скважины с различных отметок низового откоса дамбы. Такое их расположение позволило изучить грунты основания в самой ответственной с точки зрения устойчивости части — в пределах призмы возможного оползания. Помимо опробования четвертичных отложений, был проведен полный комплекс лабораторных исследований насыпных грунтов тела дамб и намывных хвостовых отложений, сформировавшихся в приоткосной части хвостохранилища (субподрядчик — «АМИГЭ» (город Мурманск).

На основе данных лабораторных определений физико-механических свойств грунтов в инженерно-геологическом разрезе исследованных участков выделено 13 инженерно-геологических элементов: *техногенные грунты* (1 — песок гравелистый (насыпной грунт); дамбы; 1а — супесь твердая (насыпной грунт); дамбы; 2 — песок пылеватый (хвостовые отложения); 2а — супесь пластичная (хвостовые отложения); 2б — супесь твердая (хвостовые отложения)), *четвертичные отложения* (3 — песок пылеватый; 4а — суглинок текучепластичный; 4б — суглинок мягкопластичный; 4с — суглинок текучий; 5 — супесь текучая; 6 — грунт щебенистый; 7 — грунт сильнозатрещинанный).

В ходе исследований проведено уточнение строения и свойств насыпных пород тела дамбы первичного обвалования и намывных грунтов пляжной зоны хвостохранилища, залегающих в непосредственной близости от пионерной дамбы, т. е. в пределах призмы возможного оползания низовых откосов дамб.

Тело дамб хвостохранилища сложено техногенными насыпными грунтами — песком гравелистым (1) и супесью твердой щебенистой (1а). Обе разновидности содержат большое количество гальки, щебня, валунов и обломком преимущественно диабазового состава.

Намывные отложения пляжной зоны представлены слоистой толщей, сложенной песками пылеватыми (2) и супесью песчанистой в основном пластичной консистенции (2а), которая, по сути, является аналогом песка пылеватого (2), но из-за относительно более высокого содержания пылевато-глинистых частиц классифицирована как супесь.

В основании дамб и хвостовых отложений залегают озерно-аллювиальные и флювиогляциальные агрегации, представленные песком пылеватым (3), суглинком текучепластичным (4а), суглинком мягкопластичным (4б), суглинком текучим (4с) и супесью текучей (5). Суглинки под литерами «а» и «б» представляют собой единый тип грунта, разделенный по консистенции и положению в разрезе относительно дамбы хвостохранилища. Суглинки (4а) и (4б) обладают практически одинаковыми физическими и механическими свойствами и могут быть объединены в один инженерно-геологический элемент. Текучий суглинок (4с) занимает промежуточное положение между суглинками и супесью текучей (5).

Анализ геологических колонок по скважинам позволяет отметить, что в разрезе озерно-аллювиальных отложений на участке Северной дамбы суглинки и супеси встречаются в виде часто чередующихся слоев. Учитывая указанное обстоятельство, для расчетов устойчивости эту толщу целесообразно объединить в единый расчетный элемент, характеризуя их средними расчетными параметрами. Слой чистого суглинка (без супесей) мощностью 7,5 м встречен в основании пригрузки пионерной дамбы, что является важным для оценки устойчивости в диагностическом профиле 0б. Здесь суглинок имеет текучепластичную консистенцию и относится к разновидности (4а).

Лабораторные работы выполнялись субподрядной организацией Горного института — в стационарной грунтовой лаборатории ОАО «АМИГЭ» в городе Мурманске. Комплекс работ включал исследования физических, прочностных и деформационных свойств грунтов. Определение показателей физико-механических свойств грунтов осуществлялось в соответствии с требованиями государственных стандартов и нормативных документов.

На основании испытания 267 образцов и статистической обработки результатов определены нормативные и расчетные характеристики грунтов. При этом определение характеристик прочности и деформируемости производилось по ГОСТ 12248-2010 методом трехосного сжатия по консолидировано-дренированной схеме сдвига при нагрузках, соответствующих напряженному состоянию пород в точках отбора с учетом действия сил гидростатического взвешивания.

Особое внимание уделено изучению прочности пылевато-глинистых грунтов (суглинков) и торфа, залегающих в основании Северной дамбы, для которых испытания проведены по двум схемам — консолидировано-дренированного и консолидировано-недренированного сдвига. При статистической обработке результатов испытаний суглинков расчетные параметры сцепления (c) и угла внутреннего трения (φ) определены отдельно для участка основания под пионерной дамбой (по верхним скважинам), для участка основания — у подошвы дамбы.

Расчетные характеристики грунтов приведены в техническом отчете [285]. Характеристики получены с использованием соответствующих коэффициентов безопасности, определяемых количеством отдельных измерений в статистическом ряду (ГОСТ 20522). Характеристики получены при односторонней доверительной вероятности $\alpha = 0,95$ (по несущей способности) и $\alpha = 0,85$ (по деформациям). Для расчетов устойчивости откосных сооружений используются характеристики, соответствующие $\alpha = 0,95$.

На основании анализа результатов инженерных изысканий 2016–2017 гг. обоснованы расчетные характеристики физико-механических свойств грунтов, использованные для оценки устойчивости Северной и Южной дамб в настоящем отчете.

Расчетные характеристики по выделенным элементам представлены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Характеристики грунтов в теле и основании ограждающих дамб хвостохранилища 2017 г.

Характеристики грунтов		Наименование грунтов								
		намывные грунты			грунты тела дамб ИГЭ-4,5	грунты естественного основания				
		прудковые отложения (суглинки) ИГЭ-1	отложения переходной зоны (супеси) ИГЭ-2	пляжные отложения (пески и супеси пылеватые) ИГЭ-3		торф ИГЭ-6	суглинки и супеси ИГЭ-7	суглинки текучие ИГЭ-7а	пески разно-зернистые ИГЭ-8	щебенистый грунт с супесчаным заполнителем ИГЭ-9
γ_{unsat}	[kN/m ³]	18,44	20,60	16,87	19,82	3,8	20,20	19,00	20,11	20,80
γ_{sat}	[kN/m ³]	18,76	21,19	20,55	22,10	9,5	20,50	19,50	20,86	22,81
k_x	[m/day]	0,005	0,04	0,1	1,0	1,0	0,001	0,001	1,0	4,0
k_y	[m/day]	0,005	0,04	0,1	1,0	1,0	0,001	0,001	1,0	4,0
E_{ref}	[kN/m ²]	10 000	7 000	8 000	40 000	3 300	17 000	9 000	20 000	40 000
μ	[-]	0,33	0,33	0,32	0,30	0,30	0,33	0,33	0,30	0,30
c_{ref}	[kN/m ²]	16,0	8,0	0,1	4,0	18,0	7	12	7,0	4
φ	[°]	29,0	30,0	33,0	34,0	10,0	29	19	35,0	36

6.3.3. Методическое обеспечение расчетов устойчивости

Расчеты устойчивости ограждающих дамб хвостохранилища на протяжении всех лет эксплуатации проводились неоднократно. Последние были проведены в 2015 г. АО «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева», в 2017 г. — ООО «Карбон»¹, в 2017–2021 гг. — Горным институтом КНЦ РАН (авторами).

Обоснование устойчивости ограждающих дамб и безопасных условий эксплуатации хвостохранилища АО «Кольская ГМК» включали решение следующие задач:

- расчетная оценка фактической устойчивости откосов Северной и Южной дамб по состоянию на 2017–2021 гг.;
- оценка фильтрационной прочности грунтов тела и основания ограждающих дамб и статической устойчивости откосов по результатам прогноза фильтрационного режима на фактическое и проектное положение дамб и условий эксплуатации хвостохранилища.

Расчетная оценка фактической устойчивости откосов Северной и Южной дамб выполнена по наблюдательным (диагностическим) створам с учетом современных геометрических параметров ограждающих дамб, уточненного инженерно-геологического строения насыпного и намывного массива грунтов и естественного основания, фиксированных ширине намывного пляжа и положения депрессионной поверхности фильтрационного потока в намывных отложениях и насыпной дамбе по состоянию на 2021 г.

Расчеты устойчивости дамб проводились на основе численного моделирования напряженно-деформированного состояния водонасыщенных грунтовых массивов с использованием лицензионных программных комплексов Plaxis 2D и Plaxis 3D, реализующих метод конечных элементов. Рассматривались задачи: оценка фактического состояния устойчивости откосов Северной и Южной дамб; прогноз устойчивости дамб при различных сценариях фильтрационного режима хвостохранилища.

Построение расчетной модели выполнялось в следующей последовательности: создание геометрии откоса сооружения → построение расчетной модели инженерно-геологического строения массива → задание свойств расчетной среды (характеристики деформационных, прочностных и фильтрационных свойств) → задание граничных условий и нагрузок → разбивка геометрической модели на конечные элементы → фильтрационный расчет → решение упругопластической матрицы жесткости → обработка полученных результатов с возможностью получения коэффициента запаса.

Для описания среды, как правило, принималась упругопластическая модель Кулона–Мора, в которой классическое условие прочности сдвигу (закон трения Кулона) задается в виде уравнения [95, 170]:

$$f = \tau - c - \sigma_n \cdot \tan \varphi. \quad (6.1)$$

Коэффициент запаса устойчивости откоса $k_s(f_s)$ при выполнении численного моделирования определялся согласно следующей методике (которая в целом согласуется с принятой ООО «Карбон»).

¹ Полученные этими организациями результаты частично приведены в данной книге и использованы для сопоставительного анализа с результатами расчетов авторов.

На первом этапе численного моделирования формируется начальное напряженное состояние грунтового массива. Откос массива при этом должен находиться в устойчивом состоянии. На втором этапе исходные величины параметров, отвечающих за прочность породы сдвигу, c и φ , уменьшаются на определенную величину до значений c_{trial} и φ_{trial} . При этом отношение c/c_{trial} должно быть равно $\tan\varphi/\tan\varphi_{trial}$. Для каждой пары c_{trial} и φ_{trial} выполнялся численный расчет и оценивалась сходимость решения. Значения c_{trial} и φ_{trial} при которых сходимость решения переставала обеспечиваться, принимались в дальнейшем в качестве параметров для вычисления коэффициента устойчивости.

Коэффициент запаса устойчивости $k_s(f_s)$ вычисляется по формуле [95, 170]:

$$f_s = \frac{c}{c_{trial}} = \frac{\tan\varphi}{\tan\varphi_{trial}}, \quad (6.2)$$

где c_{trial} и φ_{trial} — значения величины сцепления и угла внутреннего трения, при которых сходимость решения не обеспечивалась.

В соответствии со СП 14.13330.2018 [286] и с комплектом карт ОСР-97, сейсмичность территории города Заполярный в привязке к средним грунтовым условиям для объектов массовой застройки (карта А) следует принимать равной $I = 6$ баллов, для объектов повышенной ответственности, расчеты которых следует выполнять на воздействие уровня МРЗ, используется (карта С) — 7 баллов.

Согласно Своду правил [286] в расчетах сооружения по линейно-спектральной теории грунты дамбы и основания считаются линейно-упругими, в поведении системы «сооружение – основание» отсутствует геометрическая, конструктивная или физическая нелинейность. Сейсмическое ускорение основания задается постоянной во времени векторной величиной $\ddot{U}_0$, модуль которой принимается равным значению максимального пикового ускорения a_p :

$$a_p = \max \left| \ddot{U}_0(t) \right|. \quad (6.3)$$

Для ГТС класса I:

$$a_p^{SLE} = 0,80g \cdot A_{500}. \quad (6.4)$$

где A_{500} — значение расчетного ускорения основания в долях g ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$), определенное для землетрясений с периодом повторяемости T_{ret}^{500} .

Значение ускорения A_{500} с учетом исходной сейсмичности площадки строительства I^{beg} , расчетной сейсмичности I^{des} и реальных грунтовых условий на конкретной площадке составляет 0,10. Отсюда максимальное пиковое ускорение от сейсмической нагрузки в 7 баллов:

$$a_p^{SLE} = 0,80 \cdot 0,10 g = 0,08 g. \quad (6.5)$$

Так как при определении сейсмостойкости дамбы посредством программного комплекса Plaxis расчетная область системы «сооружение – основание» разбита на конечные элементы, то в качестве сейсмических нагрузок используют узловые инерционные силы $\vec{P}_{ik}$, действующие на элемент сооружения, отнесенный к узлу k , при i -й форме собственных колебаний.

В общем случае значения компонент узловых сил P_{ikj} по трем ($j = 1, 2, 3$) взаимно ортогональным направлениям определяют по формуле:

$$P_{ikj} = k_f k_2 k_\psi m_k \ddot{U}_0 \beta_i \eta_{ikj}, \quad (6.6)$$

где k_f — коэффициент, зависящий от степени повреждений, допускаемых в сооружении при землетрясении; k_2 — коэффициент, учитывающий влияние высоты сооружения на значение узловых инерционных сил; k_ψ — коэффициент, учитывающий демпфирующие свойства конструкций; m_k — масса элемента сооружения, отнесенного к узлу k (с учетом присоединенной массы воды); $\ddot{U}_0$ — сейсмическое ускорение основания; β (T_i) (или β_i) — коэффициент динамичности, соответствующий периоду собственных колебаний сооружения T_i по i -й форме колебаний; η_{ikj} — коэффициент формы собственных колебаний сооружения по i -й форме колебаний.

Для всех гидротехнических сооружений k_f принимают равным 0,45. Для водоподпорных сооружений всех типов высотой до 60 м коэффициент k_2 принимают равным 0,8. Для водоподпорных сооружений из грунтовых материалов значение коэффициента k_ψ следует принимать 0,7. При этом значения произведения $k_\psi \beta_i$ должны составлять не менее 0,80. Если коэффициент формы собственных колебаний сооружения η_{ikj} принять равным 1, то:

$$P_{ikj} = 0,45 \cdot 0,8 \cdot 0,8 \cdot 0,08 \cdot g \cdot 1 \cdot m_k = 0,023 \cdot g \cdot m_k. \quad (6.7)$$

Таким образом, согласно указаниям [86] для учета горизонтального сейсмического воздействия поперек оси дамбы при проектном землетрясении в расчеты численного моделирования введено значение максимального пикового ускорения основания, равное 0,023 g.

Критерием устойчивости сооружения в соответствии с требованиями СП [287, 288] является условие:

$$\gamma_{lc} F \leq R / \gamma_n, \quad (6.8)$$

где γ_k — коэффициент по нагрузкам, принимаемый для основного сочетания нагрузок и воздействий в период эксплуатации равным 1,0, для особого сочетания нагрузок и воздействий в период эксплуатации 0,9, для особого сочетания при сейсмическом воздействии — 0,85; F — расчетное значение обобщенного силового воздействия, по которому производится оценка предельного состояния, определенное с учетом коэффициента надежности по нагрузке γ_f ; R — обобщенное расчетное значение сил предельного сопротивления сдвигу по рассматриваемой поверхности, определенное с учетом коэффициентов надежности по грунту γ_g ; γ_n — коэффициент надежности по ответственности сооружения.

При поиске опасной поверхности сдвига для коэффициента устойчивости k_s используется зависимость [95, 170]:

$$k_s = \frac{R}{F} \geq k_{s,n}, \quad (6.9)$$

где k_s — расчетный коэффициент устойчивости; $k_{s,n}$ — нормативный коэффициент устойчивости.

Устойчивость сооружения считается обеспеченной, если выполнено условие (6.8) или (6.9). Значение коэффициента устойчивости k_s не должно быть меньше нормативного значения $k_{s, n}$.

Для ограждающих дамб хвостохранилища АО «Кольская ГМК» (как для сооружений I класса) нормативные значения коэффициента устойчивости составляют $k_{s, n} = 1,25$ при основном сочетании нагрузок, $k_{s, n} = 1,12$ при особом сочетании нагрузок, $k_{s, n} = 1,06$ при особом сочетании нагрузок, включая сейсмическое воздействие.

6.3.4. Результаты расчетов устойчивости дамб хвостохранилища

Оценка устойчивости дамб хвостохранилища по состоянию на начало летнего сезона 2021 г. по наблюдательным профилям выполнена с использованием программного комплекса Plaxis. Результаты расчетов представлены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Результаты расчетов устойчивости Северной и Южной дамб на 2021 г.

№ профиля	Коэффициент запаса устойчивости	
	k_s	k_s с учетом сейсмического воздействия
<i>Северная дамба</i>		
00	1,59	1,43
01	1,61	1,46
02	1,37	1,30
03	1,32	1,26
04	1,13	1,08
05	1,36	1,23
06	1,48	1,35
07	1,51	1,42
08	1,24	1,20
<i>Южная дамба</i>		
08a	1,63	1,51
09	1,78	1,55
10	1,53	1,44
11	1,72	1,66
12	1,65	1,57
13	1,67	1,54
14	1,70	1,53
15	1,26	1,17

Для наглядности и сопоставительного анализа результатов расчетов, полученных авторами в 2021 г., с результатами расчетов ООО «Карбон» 2017 г. на рис. 6.18–6.21 приведены данные ООО «Карбон» по профилям 02 и 06 Северной дамбы и по профилям 11 и 12 — Южной.

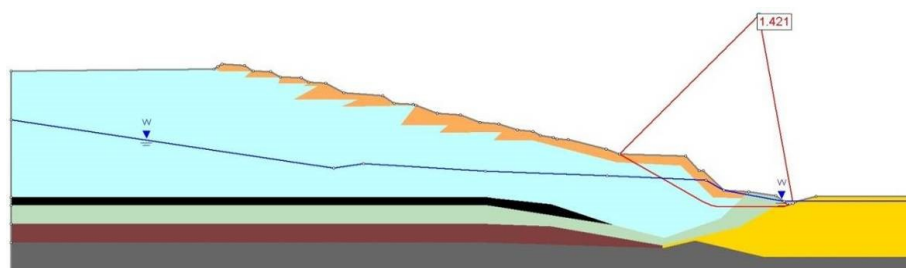


Рис. 6.18. Результаты расчетов устойчивости по профилю 02 на Северной дамбе (данные ООО «Карбон»)

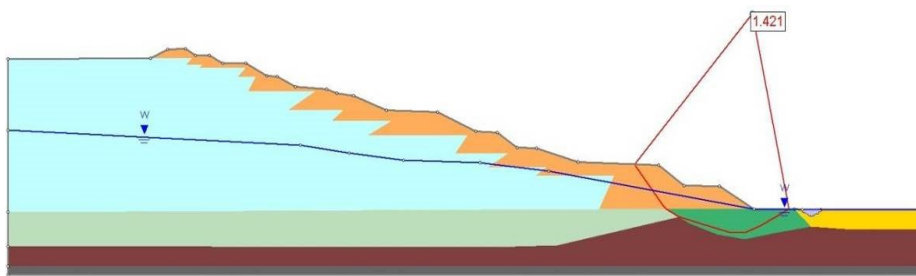


Рис. 6.19. Результаты расчетов устойчивости по профилю 06 на Северной дамбе (данные ООО «Карбон»)

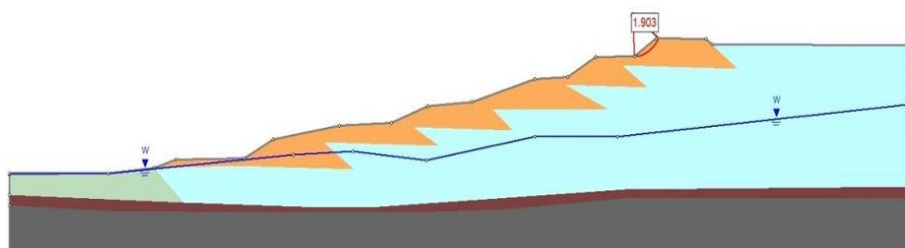


Рис. 6.20. Результаты расчетов устойчивости по профилю 11 на Южной дамбе (данные ООО «Карбон»)

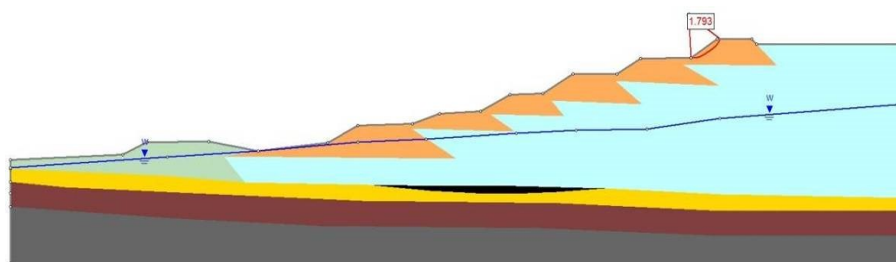


Рис. 6.21. Результаты расчетов устойчивости по профилю 12 на Южной дамбе (данные ООО «Карбон»)

Анализ результатов расчетов показал, что на 2021 г. статическая устойчивость Южной и Северной дамб хвостохранилища по всем профилям (кроме профиля 04 на Северной дамбе) обеспечена с коэффициентом запаса устойчивости не ниже нормативного значения $k_{s, n} = 1,25$ для основного сочетания нагрузок и $k_{s, n} = 1,06$ — для особого (с учетом сейсмического воздействия интенсивностью 7 баллов).

Значения коэффициента устойчивости практически по всем профилям Южной дамбы превышают нормативные требования ($k_s > 1,5$). На Южной дамбе минимальные значения k_s получены для локальных откосов дамб наращивания или пионерной дамбы. Следовательно, нарушение устойчивости Южной дамбы на каком-либо более значительном участке, которое может привести к образованию гидродинамической аварии, на современном этапе эксплуатации хвостохранилища маловероятно.

На участках как Северной, так и Южной дамб, для которых оцениваются минимальные значения коэффициента устойчивости, возможна отсыпка пригруза с параметрами, обоснованными проектом ЗАО «Механобр инжиниринг» (2015 г.) [289].

6.4. Исследование влияния гидрогеомеханических процессов на прочность и фильтрационную устойчивость дамб хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК»

Исследование влияния гидрогеомеханических процессов на прочность и фильтрационную устойчивость дамб хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК» выполнялось, наряду с экспериментальными наблюдениями, на основе компьютерного моделирования с использованием лицензионного программного комплекса Plaxis 3D. В расчетах использовались исходные данные и гидрогеологические условия, принятые ранее для компьютерного моделирования в 2015–2021 гг. (с учетом данных полевых геотехнических и гидрогеологических изысканий, а также полученных от АО «Ковдорский ГОК»).

6.4.1. Ограждающая дамба № 1

В 2017 г. была построена 3D-модель системы «дамба № 1 – хвостохранилище – основание» с учетом отсыпанного уступа горизонта +302 м и в соответствии с данными геотехнических, георадарных и гидрогеологических измерений, выполненных в 2016–2017 гг (рис. 6.22). Размеры модели были приняты: по оси X–X — 360 м; по оси Y–Y — 100 м, по оси Z–Z — не менее 100 м, (максимальная высотная отметка дамбы на текущий момент — +302 м). Компьютерное моделирование дамбы № 1 выполнялось в объемной постановке. Ниже на рисунках показаны подготовка геометрической схемы, компьютерной модели и предварительные результаты.

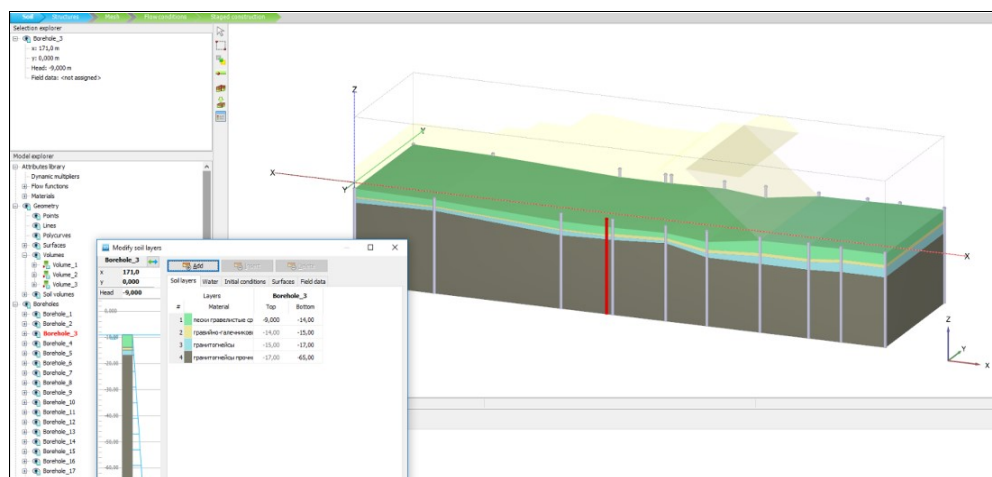


Рис. 6.22. Построение геометрической схемы и 3D-модели дамбы № 1

На следующем этапе создавалась геометрическая схема с выделением основных слоев грунтов прежде всего в основании дамбы, для них задавались параметры физико-механических свойств (табл. 6.4, рис. 6.23, 6.24). Далее выполнялась разбивка модели на конечные элементы, число которых в вариантах расчетов изменялось в зависимости от решаемой задачи (рис. 6.25).

Моделирование выполнялось при различных задаваемых внешних условиях: положение депрессионной плоскости в теле дамбы в привязке к данным пьезометров (рис. 6.26); повышение депрессионной плоскости на 2 м (рис. 6.27); повышение уровня депрессионной плоскости до отметки горизонта +280 м (рис. 6.28). По результатам расчетов были построены картины перемещений грунтов дамбы, активного порового давления и напряжений, наиболее характерные из которых представлены на рис. 6.29–6.36.

Таблица 6.4

Параметры физико-механических свойств грунтов дамбы № 1
и пород подстилающего основания, используемые для расчетов

Параметры	Ед. измер.	Грунты, породы					
		Насыпные грунты (морена)	Отложения хвостов	Пески гравелистые средней плотности	Гравийно-галечниковые грунты	Гранито-гнейсы средней прочности	Гранито-гнейсы, прочные
Тип модели		MohrCoulomb	MohrCoulomb	MohrCoulomb	MohrCoulomb	MohrCoulomb	MohrCoulomb
Тип поведения материала		Drained	Drained	Drained	Drained	Drained	Drained
$\gamma_{исх}$ (уд. вес грунта)	[kN/m ³]	17,8	17,4	19,8	22,5	25,3	25,8
$\gamma_{скл}$ (уд. вес насыщ. грунта)	[kN/m ³]	19,8	20,9	20,0	23,0	25,5	26,7
K_x (коэф. фильтрации)	[m/day]	20	20	50	100	25	0,5
K_y (коэф. фильтрации)	[m/day]	20	20	50	100	25	0,5
K_z (коэф. фильтрации)	[m/day]	20	50	100	100	25	0,5
E (модуль деформ.)	[kN/m ²]	25 000	35000	30 000	30 000	40000	500000
ν (коэф. Пуассона)	[-]	0,3	0,4	0,3	0,3	0,25	0,2
c_{ef} (сцепление)	[kN/m ²]	2	5	2	4,4	6	37
φ (угол внутр. трения)	[°]	30	38,5	30	30	34	42
ψ (угол дилатанции)	[°]	0	3,5	0	0	4	7

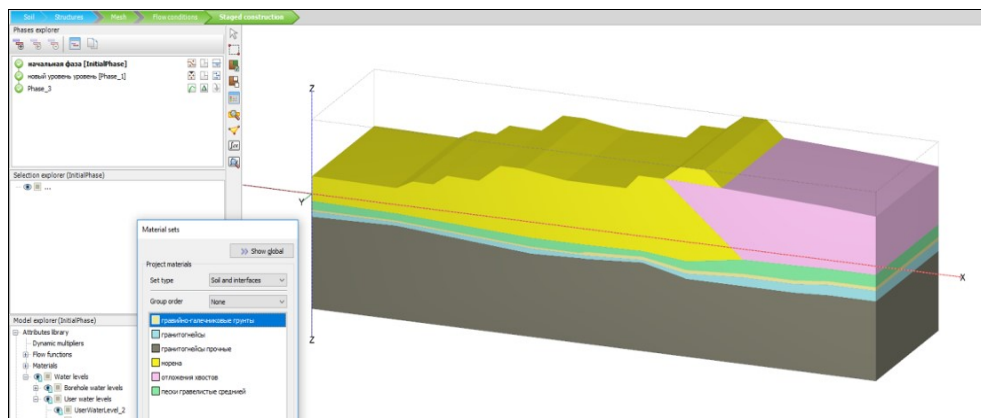


Рис. 6.23. Геометрическая схема и параметры заданных физико-механических свойств грунтов дамбы, пород основания (дифференцировано по геологическим слоям) и отложений хвостов

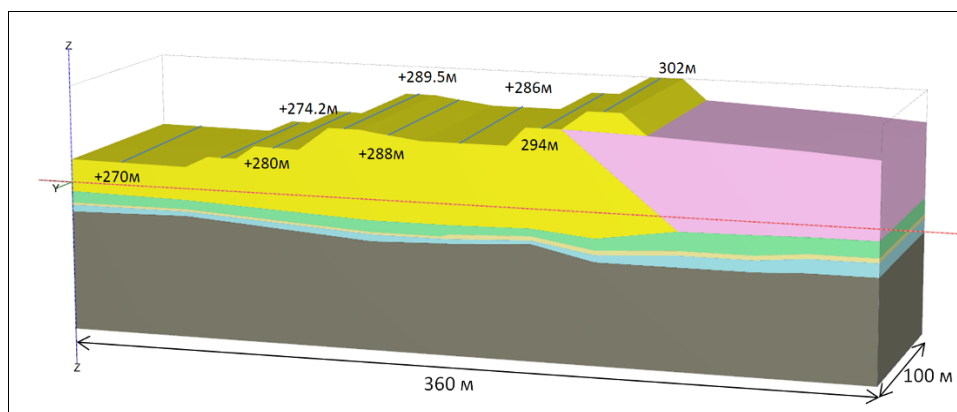


Рис. 6.24. Геометрические параметры 3D-модели дамбы № 1

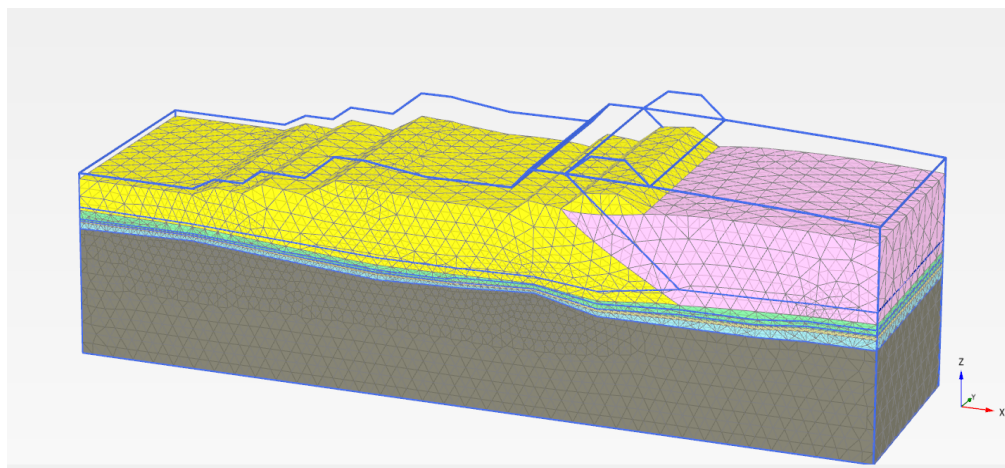
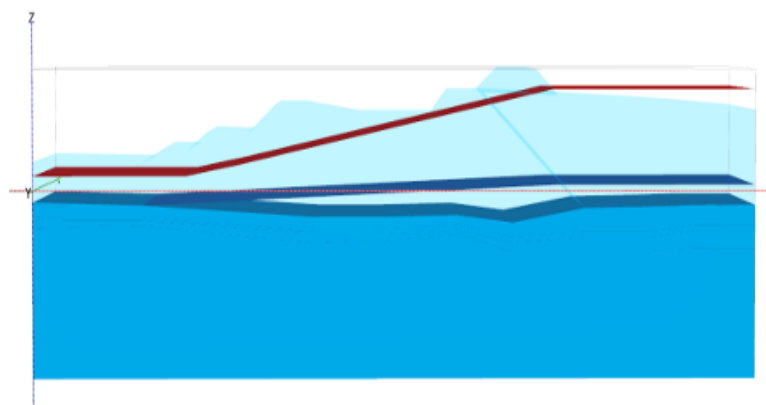
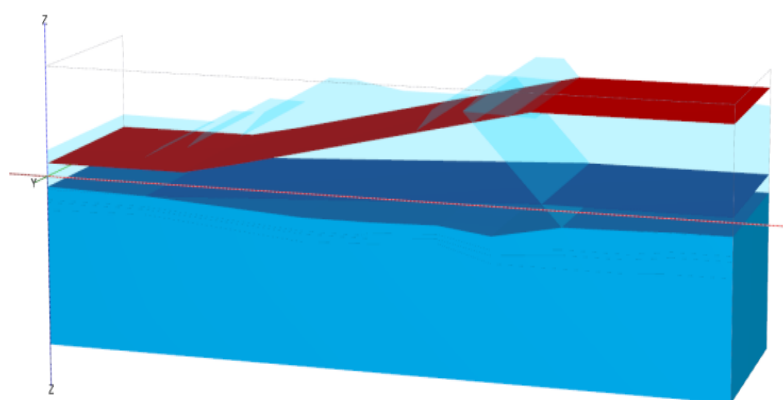


Рис. 6.25. Деформационная сетка модели при нагружении



a



б

Рис. 6.26. Смоделированный текущий уровень воды в хвостохранилище и в теле дамбы (в привязке к данным пьезометров): *a* — вид сбоку; *б* — вид в изометрии

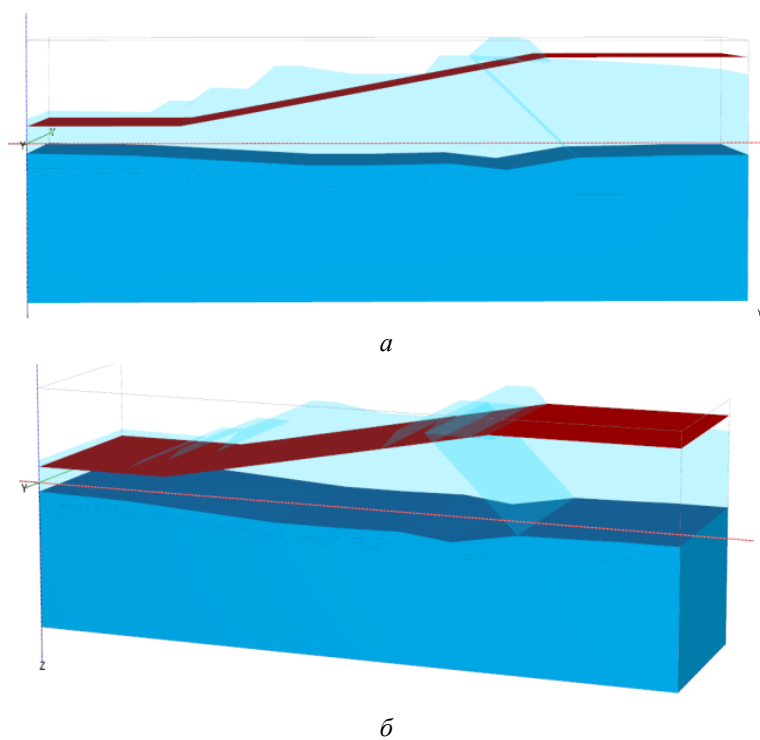


Рис. 6.27. Смоделированный уровень воды в хвостохранилище и в теле дамбы в случае повышения уровня депрессионной плоскости на 2 м: *a* — вид сбоку; *б* — вид в изометрии

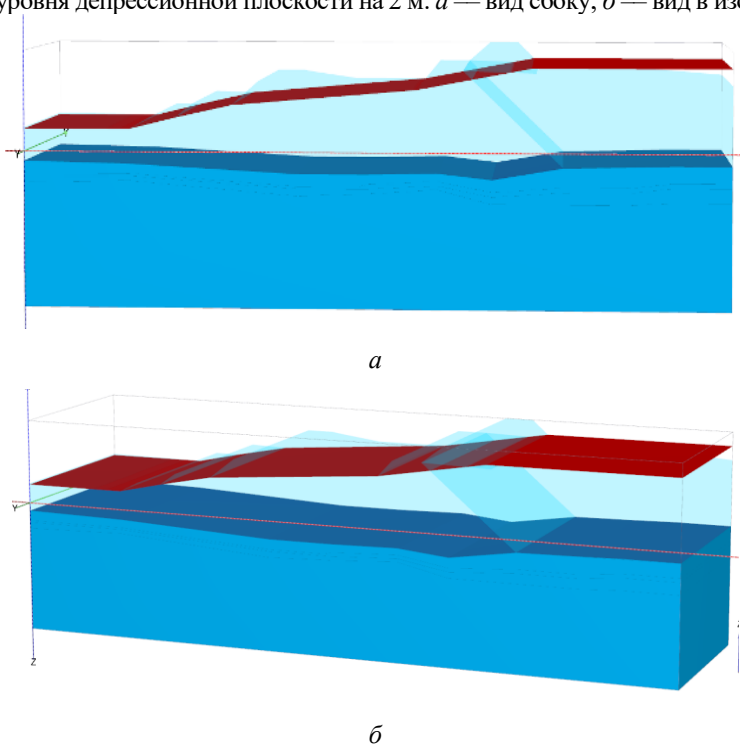


Рис. 6.28. Смоделированный уровень воды в хвостохранилище и в теле дамбы в случае повышения уровня депрессионной плоскости до горизонта +280 м: *a* — вид сбоку; *б* — вид в изометрии

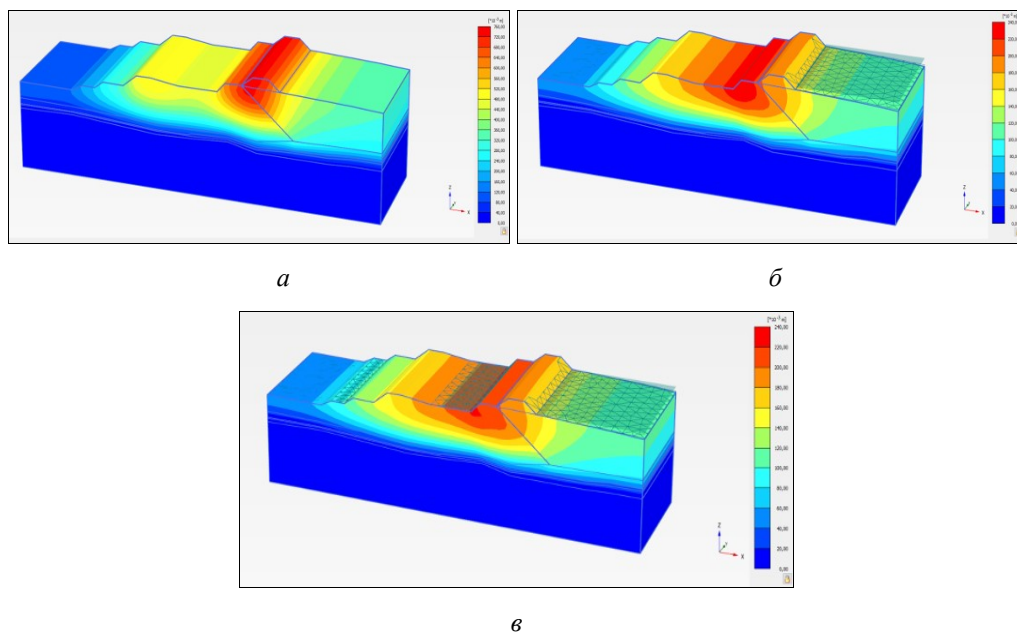


Рис. 6.29. Картины рассчитанных значений общих (полных) перемещений грунтов дамбы при различном уровне воды в хвостохранилище: *а* — исходное состояние; *б* — уровень воды по данным пьезометров; *в* — уровень воды при повышении депрессионной плоскости в дамбе до +280 м

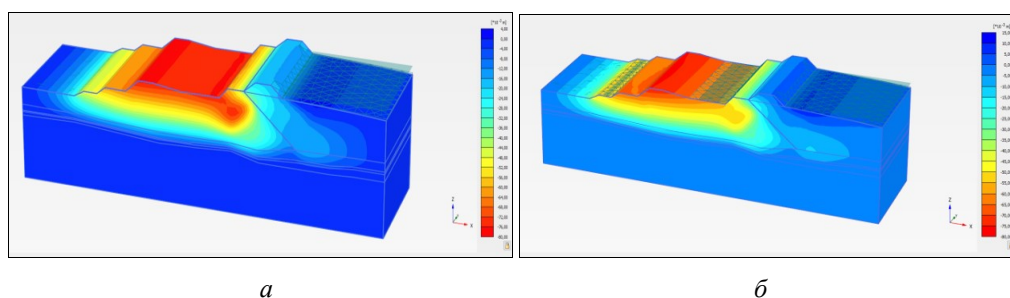


Рис. 6.30. Картина рассчитанных значений горизонтальных (вкрест простирания дамбы) перемещений U_x грунтов дамбы при различном уровне воды в хвостохранилище: *а* — в привязке к пьезометрам; *б* — повышенный уровень в дамбе до +280 м

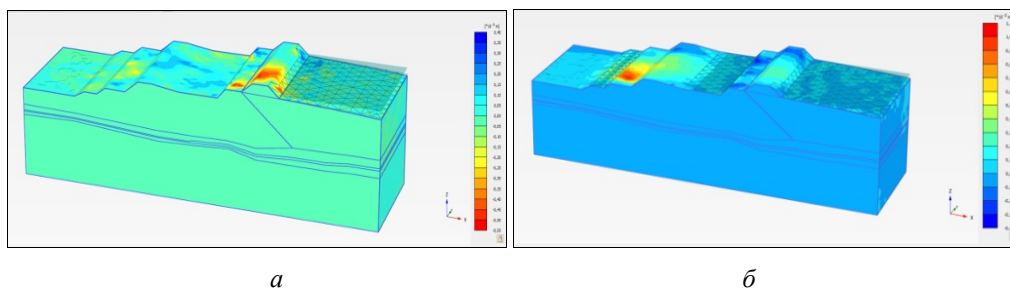


Рис. 6.31. Картина рассчитанных значений горизонтальных перемещений грунтов U_y дамбы при различном уровне воды в хвостохранилище: *а* — в привязке к пьезометрам; *б* — повышенный уровень в дамбе до +280 м

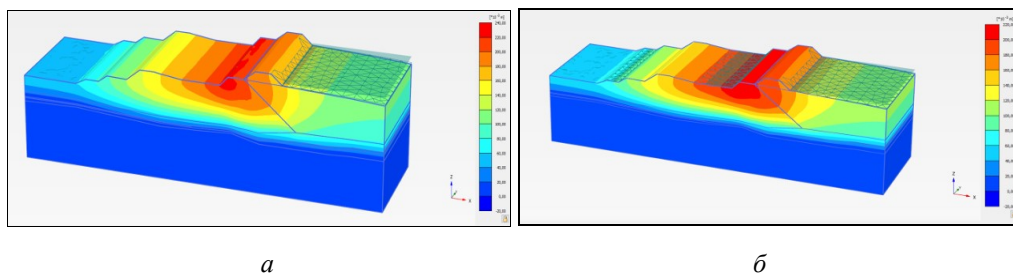


Рис. 6.32. Картина рассчитанных значений вертикальных перемещений грунтов U_z дамбы при различном уровне воды в хвостохранилище: *a* — в привязке к пьезометрам; *б* — повышенный уровень в дамбе до +280 м

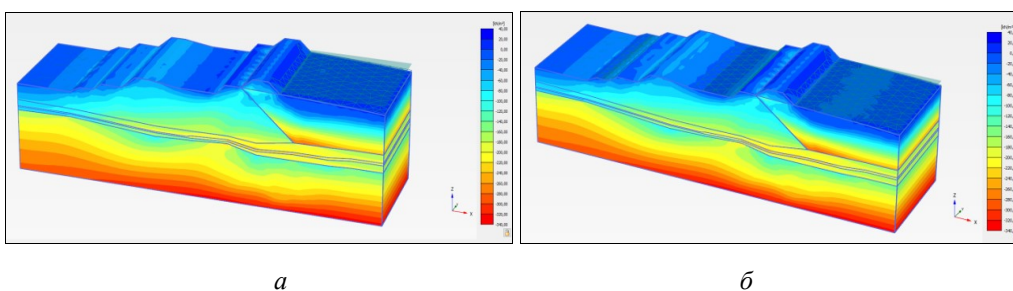


Рис. 6.33. Картина рассчитанных значений эффективных напряжений в системе «дамба № 1 – хвостохранилище – основание» при различном уровне воды в хвостохранилище: *a* — в привязке к пьезометрам; *б* — повышенный уровень в дамбе до +280 м

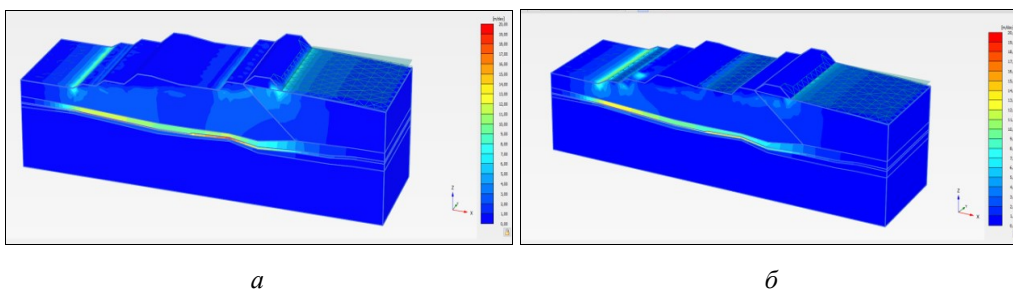


Рис. 6.34. Картина рассчитанных значений фильтрационных потоков в теле дамбы при различном уровне воды в хвостохранилище: *a* — в привязке к пьезометрам; *б* — повышенный уровень в дамбе до +280 м

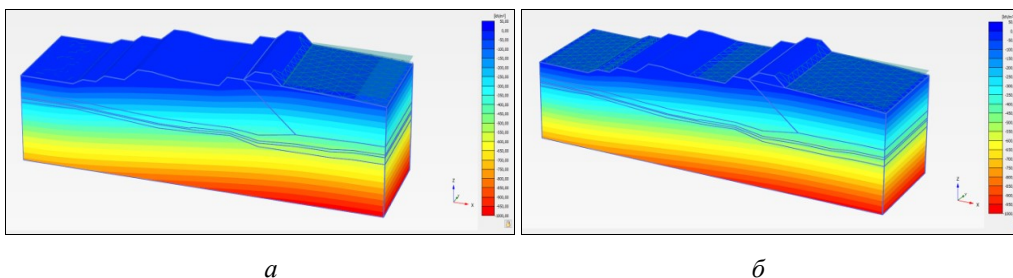


Рис. 6.35. Картина рассчитанных значений активного порового давления воды в системе «дамба № 1 – хвостохранилище – основание» при различном уровне воды: *a* — в привязке к пьезометрам; *б* — повышенный уровень в дамбе до +280 м

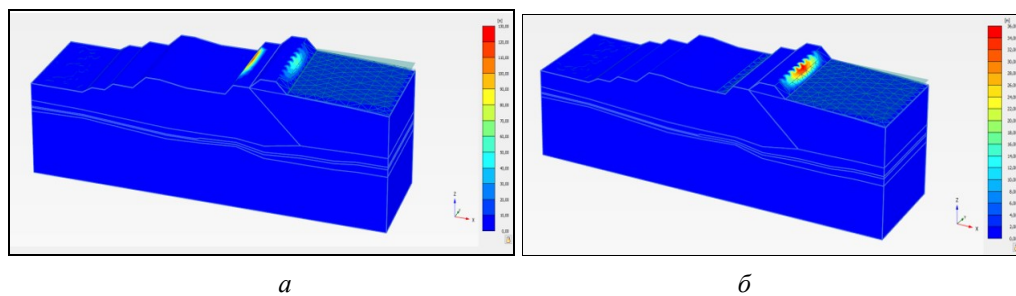


Рис. 6.36. Картина рассчитанных значений коэффициента запаса ($K_{\text{зап}}$) при различном уровне воды в хвостохранилище: *а* — в привязке к пьезометрам $K_{\text{зап}} = 1,18$; *б* — повышенный уровень в дамбе до +280 м $K_{\text{зап}} = 1,13$

Детальный анализ состояния флюидомеханического состояния дамбы проводился на основании графиков, построенных по 6-ти продольным и одному поперечному сечениям (см. рис.6.37–6.44).

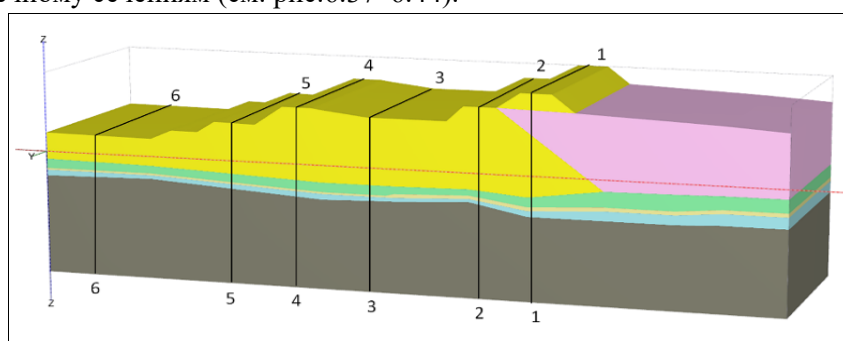


Рис. 3.37. Схема, иллюстрирующая расположение продольных разрезов, принятых для детального анализа состояния дамбы

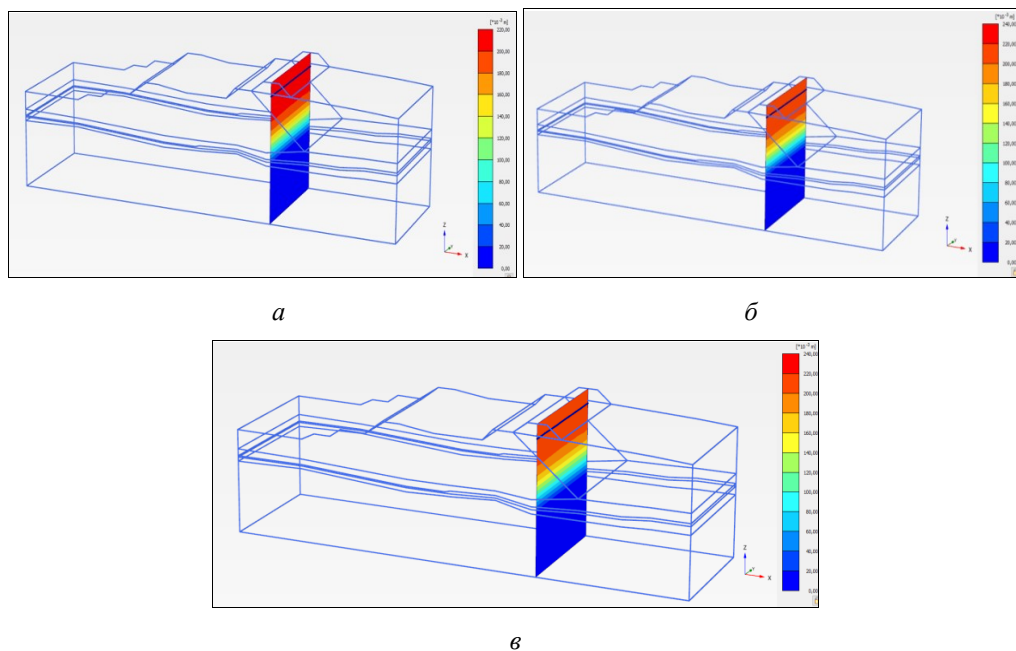


Рис. 6.38. Картины полных перемещений грунтов в сечении 1-1 при различных уровнях воды: *а* — уровень воды по пьезометрам; *б* — подъем воды на 2 м; *в* — подъем воды до отметки +280 м

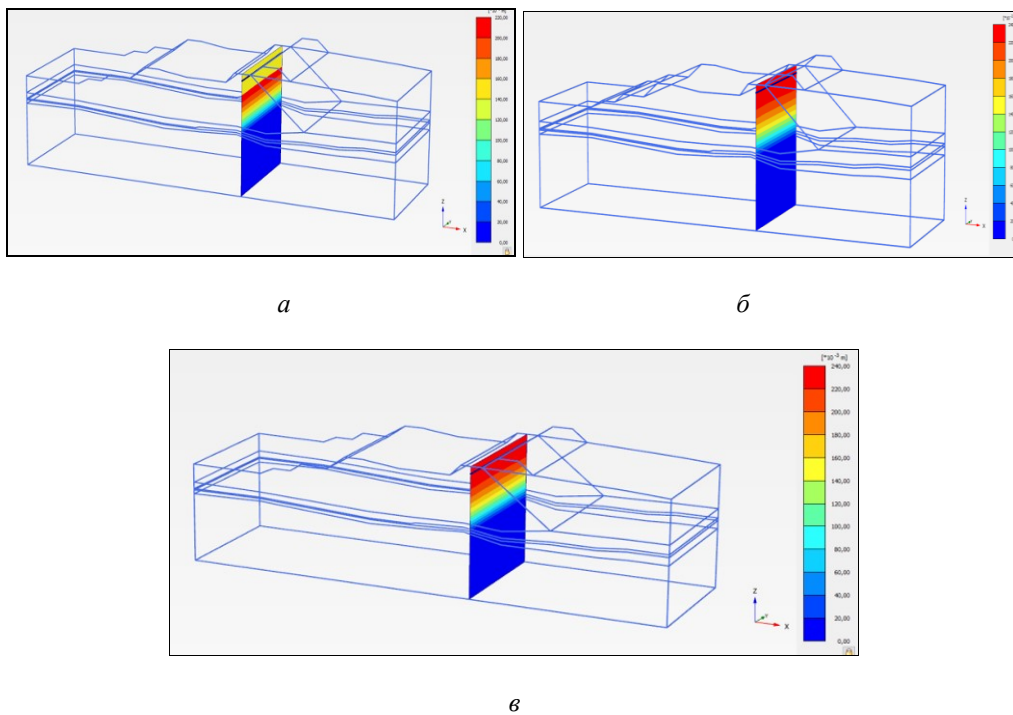


Рис. 6.39. Картины полных перемещений грунтов в сечении 2-2 при различных уровнях воды: *a* — уровень воды по пьезометрам; *б* — подъем воды на 2 м; *в* — подъем воды до отметки +280 м

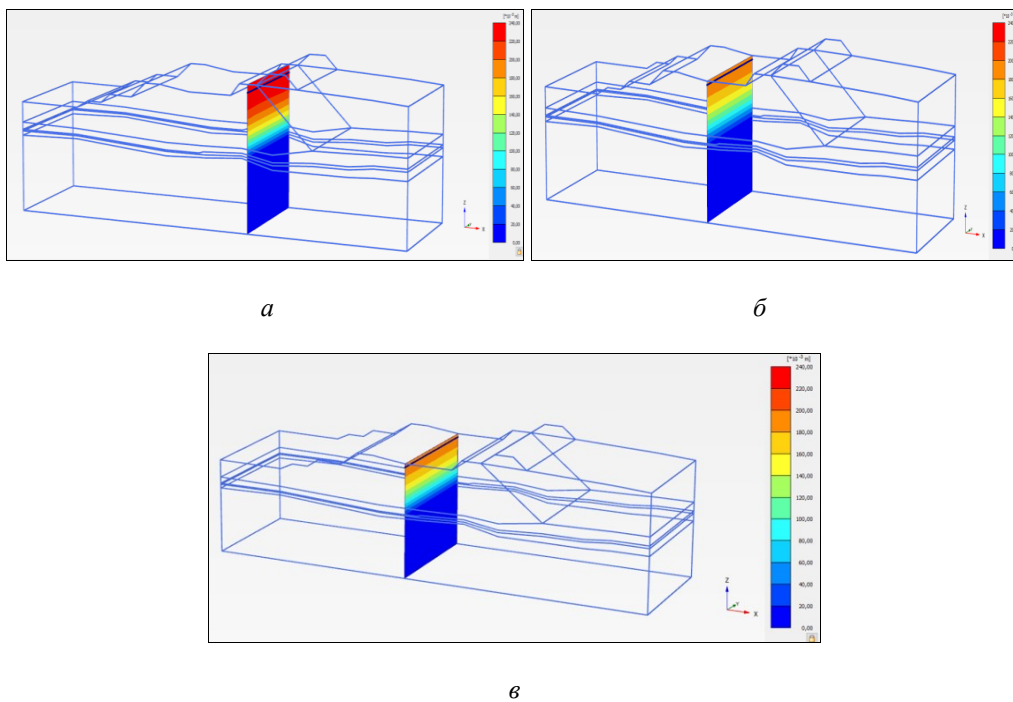


Рис. 6.40. Картины полных перемещений грунтов в сечении 3-3 при различных уровнях воды: *a* — уровень воды по пьезометрам; *б* — подъем воды на 2 м; *в* — подъем воды до отметки +280 м

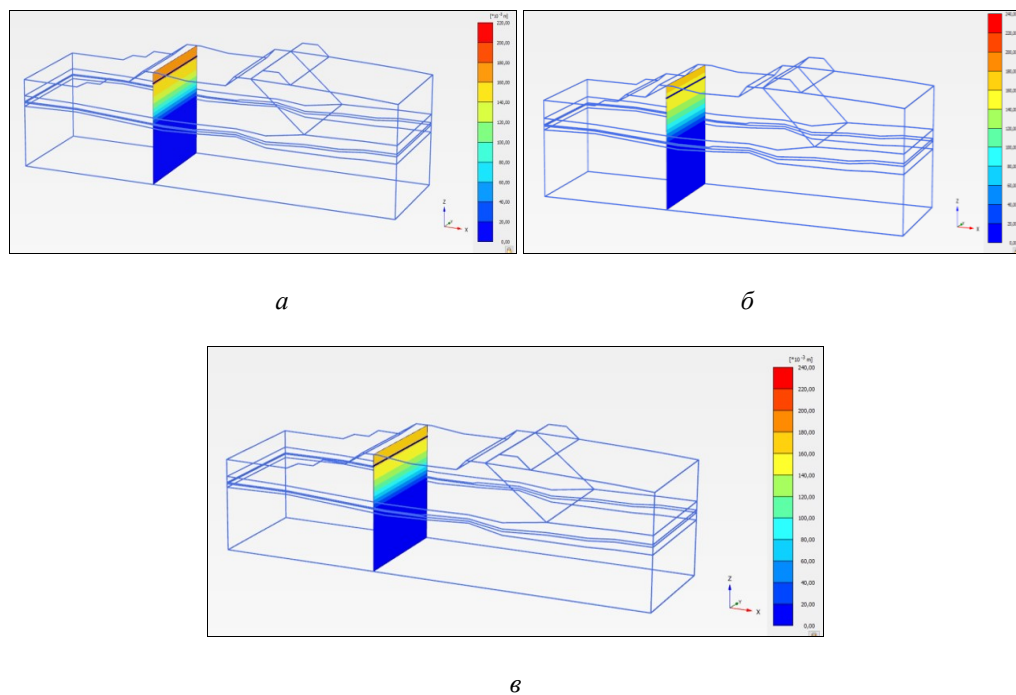


Рис. 6.41. Картины полных перемещений грунтов в сечении 4-4 при различных уровнях воды: *a* — уровень воды по пьезометрам; *б* — подъем воды на 2 м; *в* — подъем воды до отметки +280 м

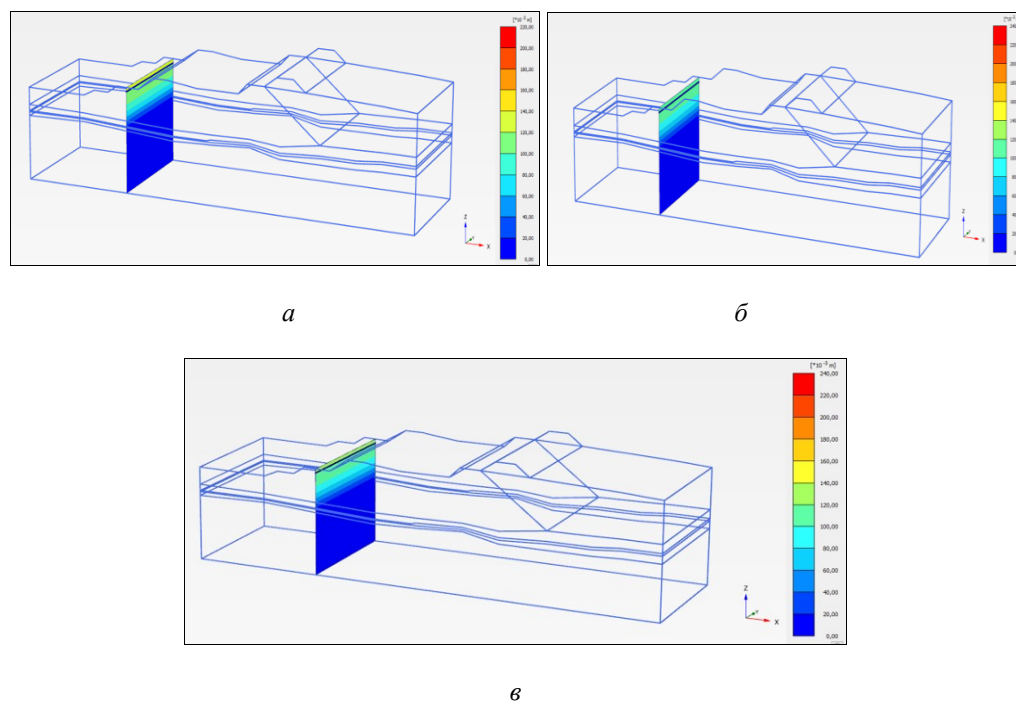


Рис. 6.42. Картины полных перемещений грунтов в сечении 5-5 при различных уровнях воды: *a* — уровень воды по пьезометрам; *б* — подъем воды на 2 м; *в* — подъем воды до отметки +280 м

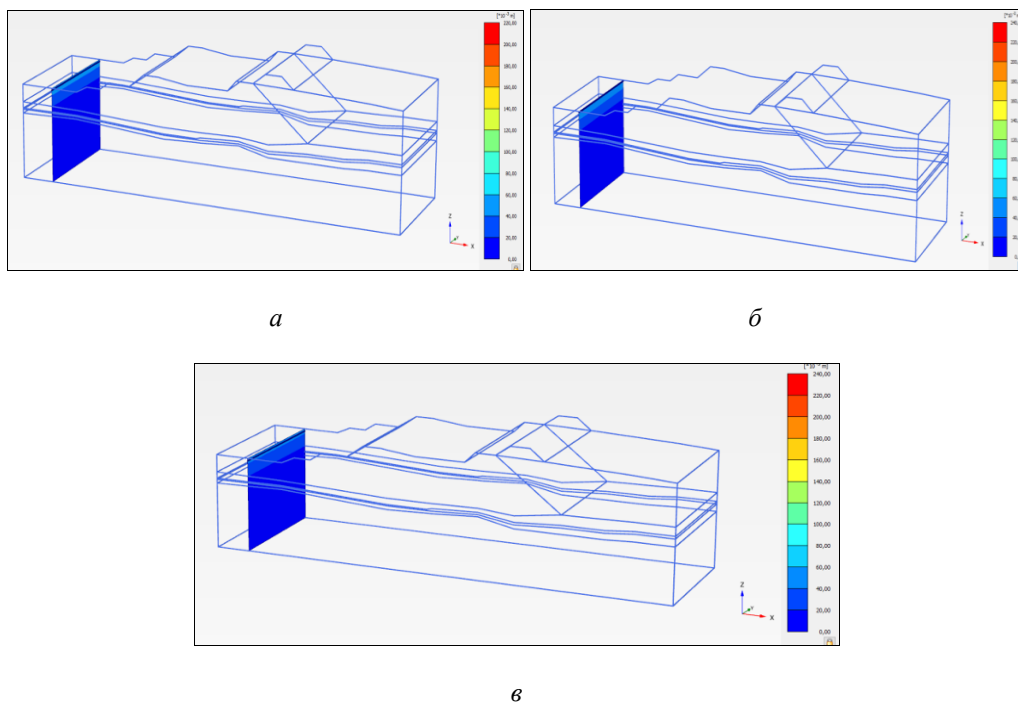


Рис. 6.43. Картины полных перемещений грунтов в сечении 6-6 при различных уровнях воды: *а* — уровень воды по пьезометрам; *б* — подъем воды на 2 м; *в* — подъем воды до отметки +280 м

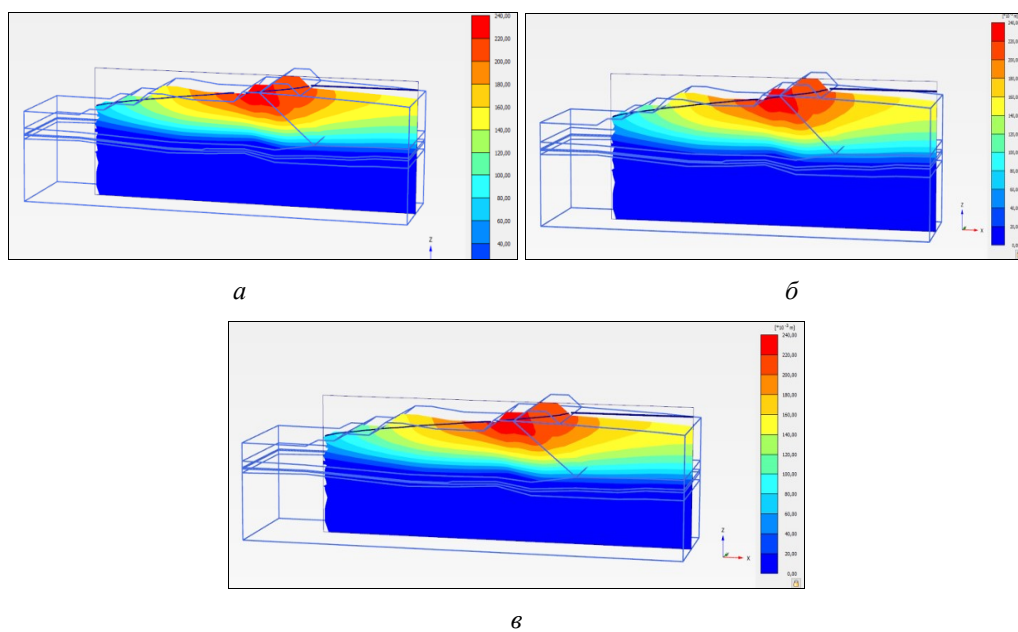
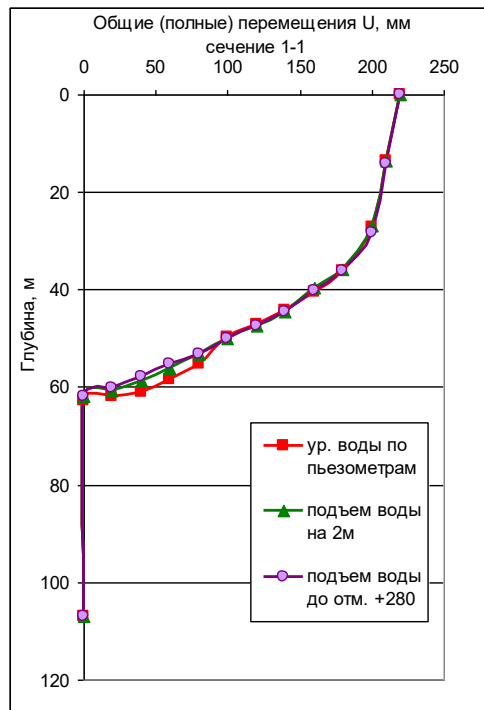
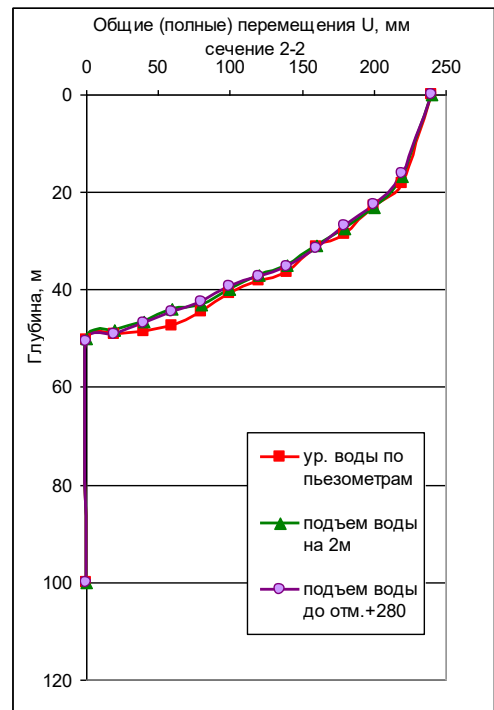


Рис. 6.44. Картины полных перемещений грунтов в поперечном сечении 7-7 при различных уровнях воды: *а* — уровень воды по пьезометрам; *б* — подъем воды на 2 м; *в* — подъем воды до отметки +280 м

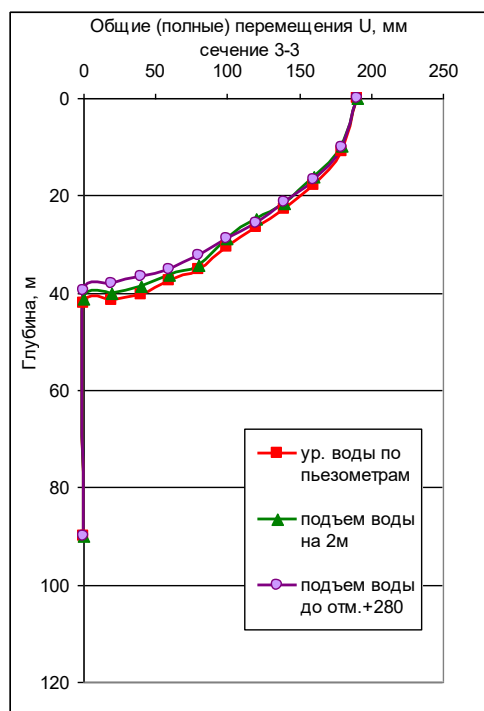
Зависимости перемещений грунтов с глубиной по выбранным сечениям приведены на рис. 6.45–6.47.



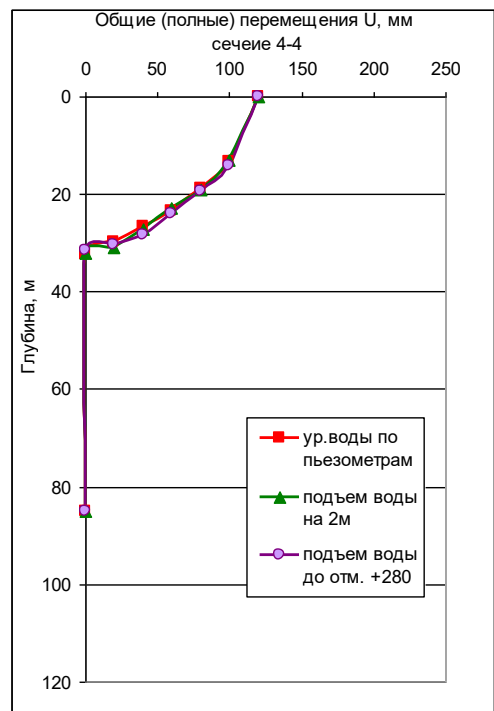
a



б



в



г

Рис. 6.45. Графики общих (полных) перемещений грунтов по сечениям: *a* — 1-1; *б* — 2-2; *в* — 3-3; *г* — 4-4 (начало)

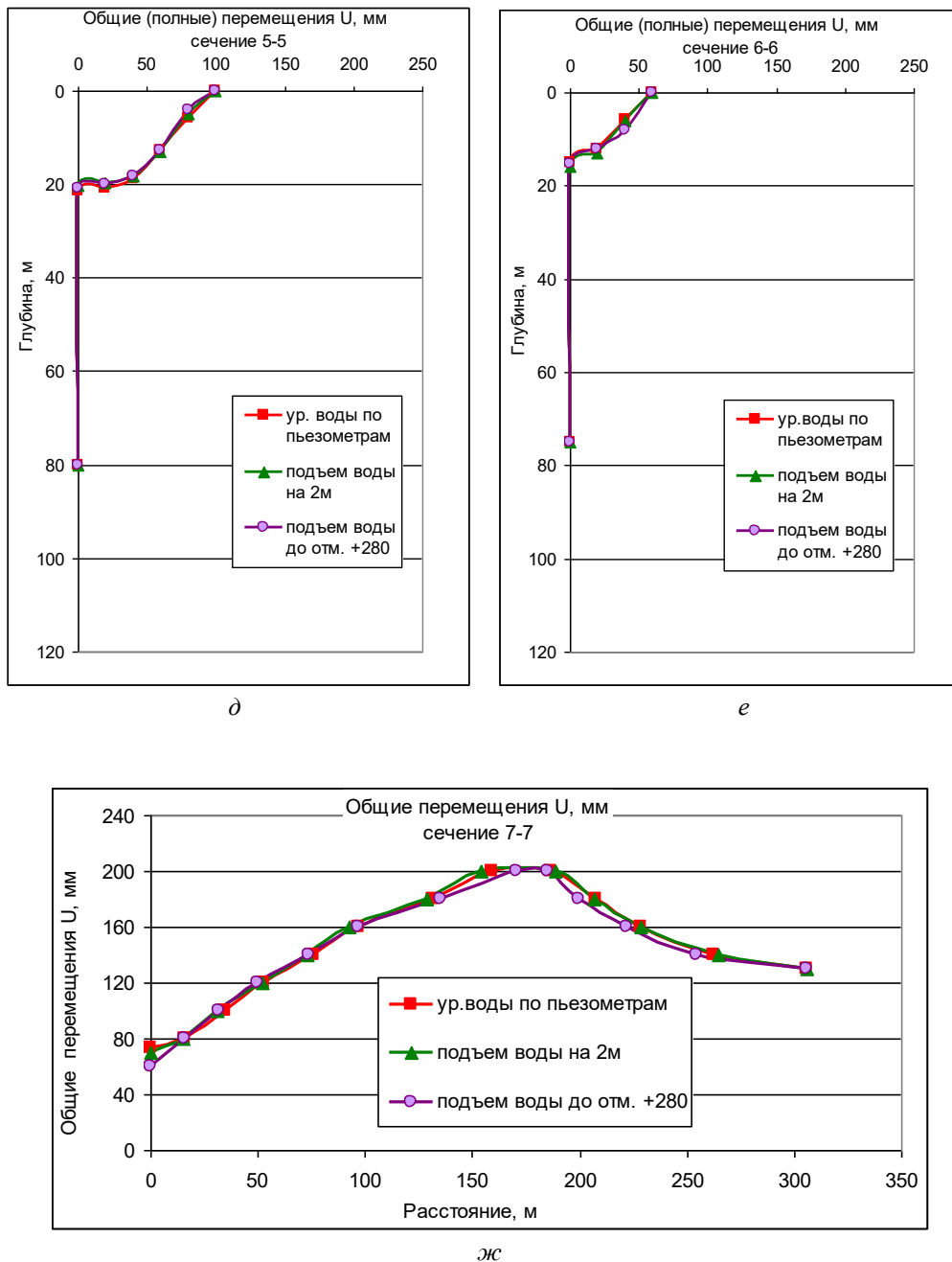
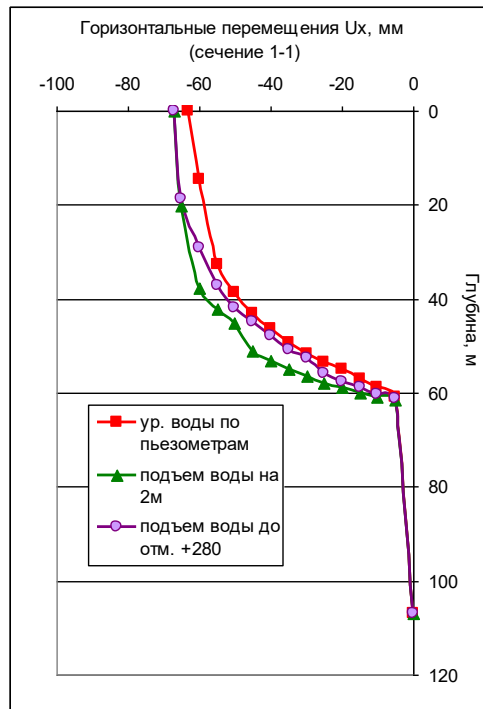
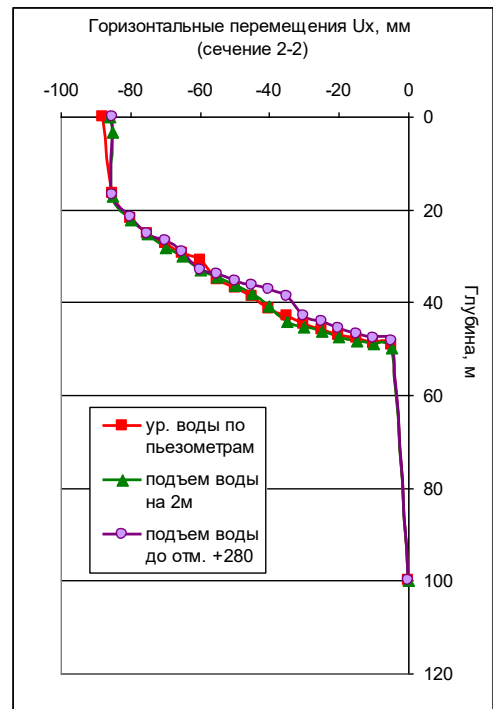


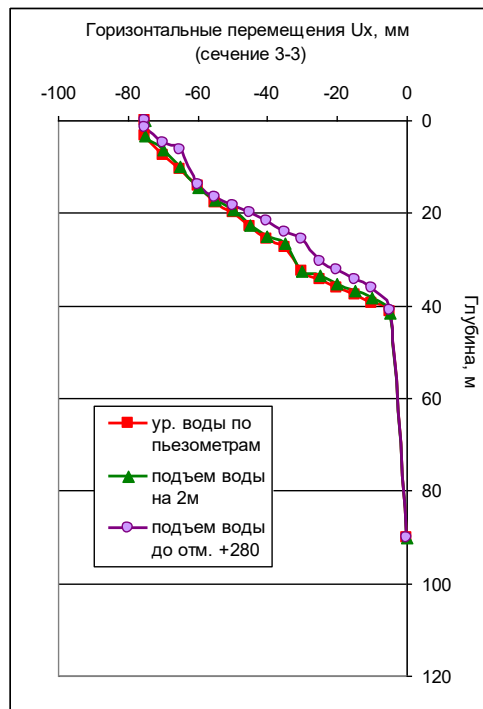
Рис. 6.45. Графики общих (полных) перемещений грунтов по сечениям: *д* — 5-5; *е* — 6-6; *жс* — 7-7 (окончание)



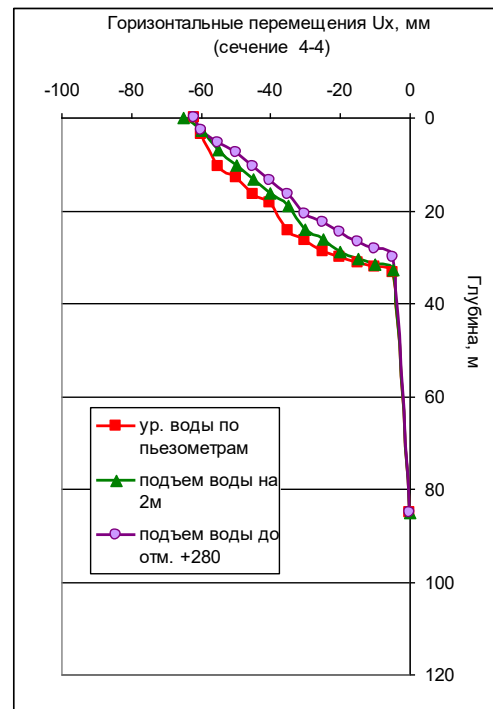
a



б



в



г

Рис. 6.46. Графики горизонтальных U_x перемещений грунтов по сечениям: *a* — 1-1; *б* — 2-2; *в* — 3-3; *г* — 4-4 (начало)

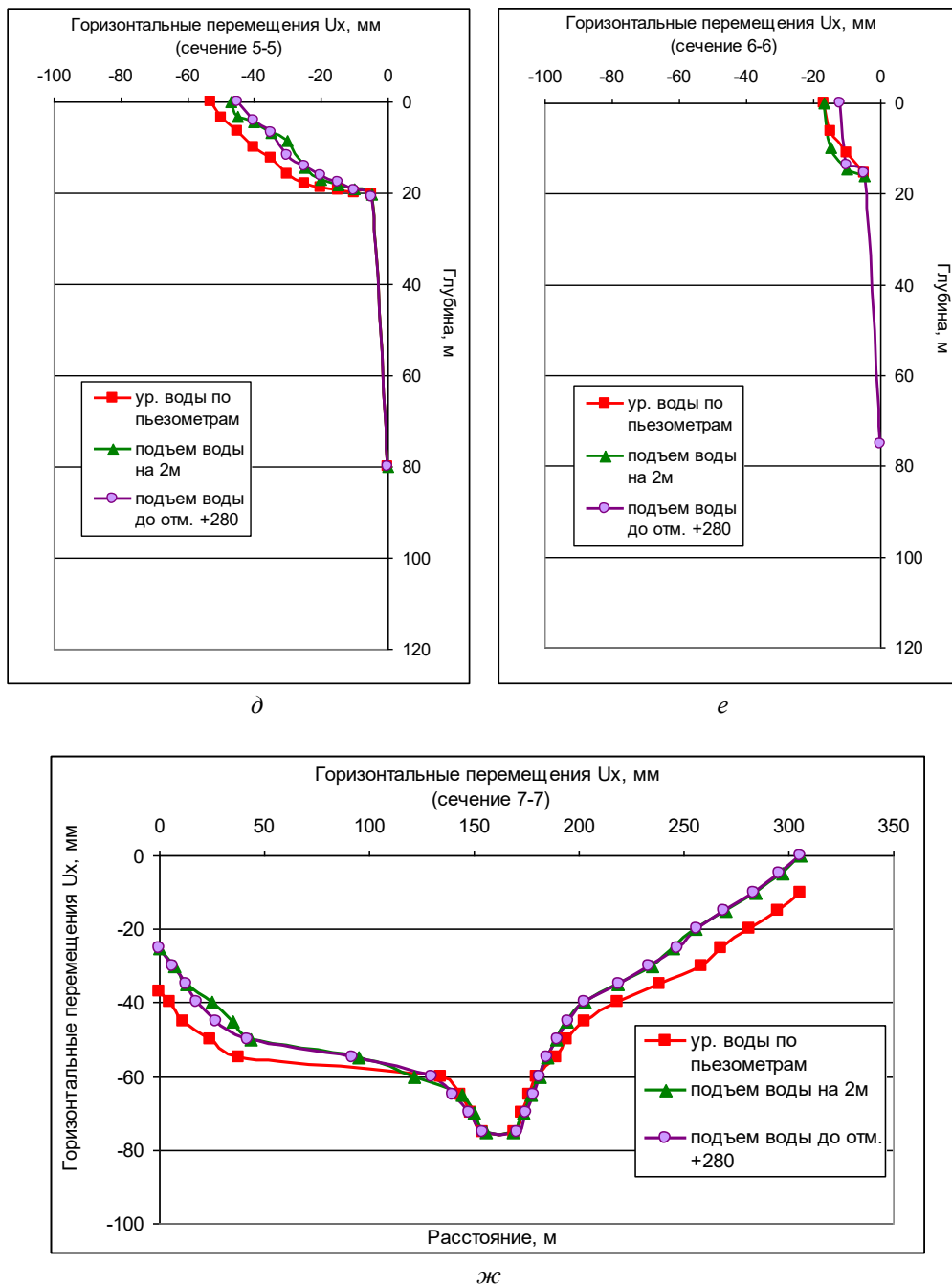
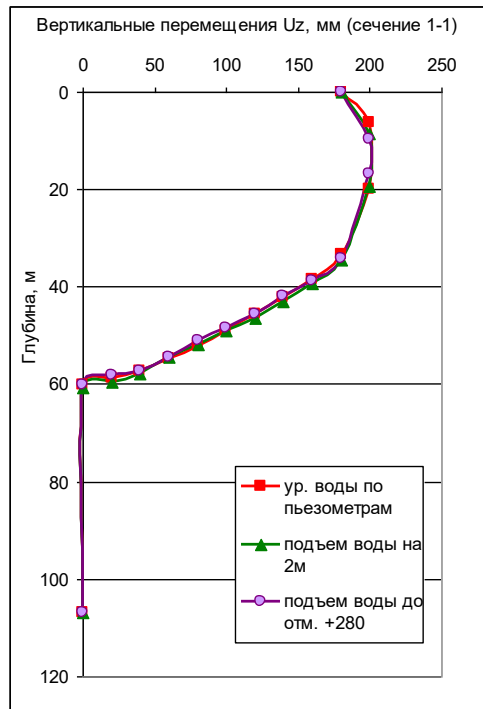
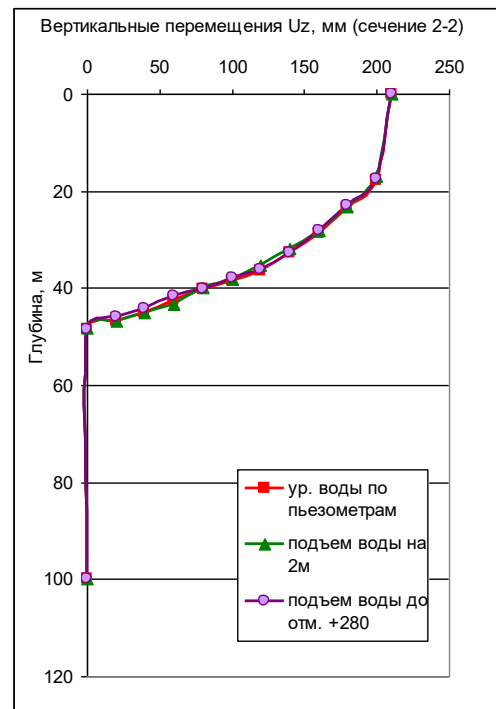


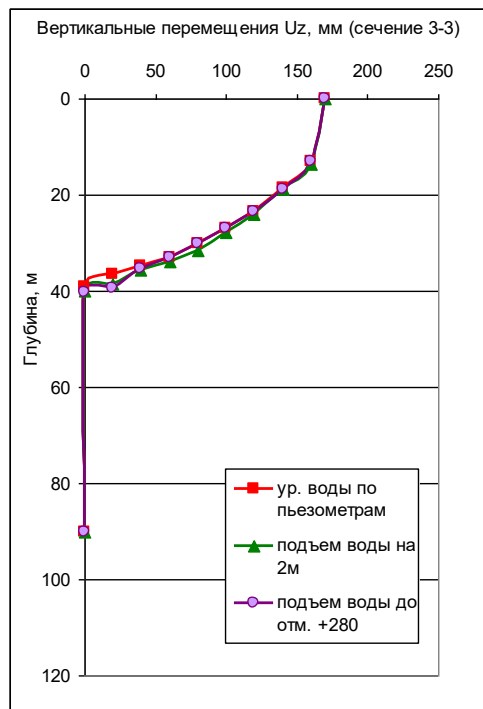
Рис. 6.46. Графики горизонтальных U_x перемещений грунтов по сечениям: ∂ — 5-5; e — 6-6; $ж$ — 7-7 (окончание)



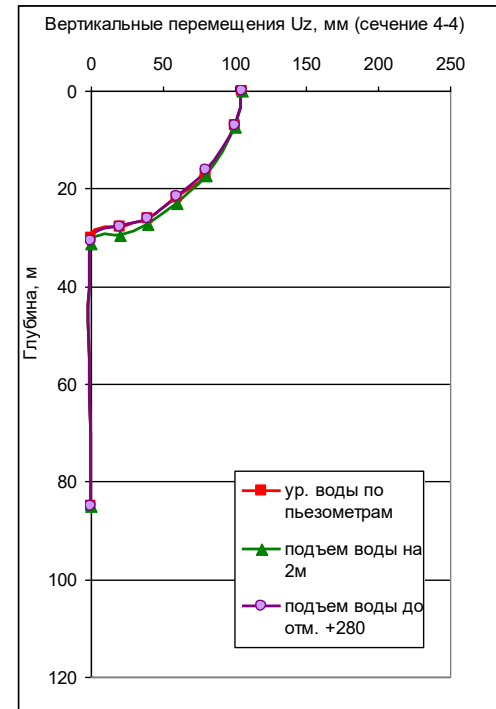
a



б



в



г

Рис. 6.47. Графики вертикальных U_z перемещений грунтов по сечениям: *a* — 1-1; *б* — 2-2; *в* — 3-3; *г* — 4-4 (начало)

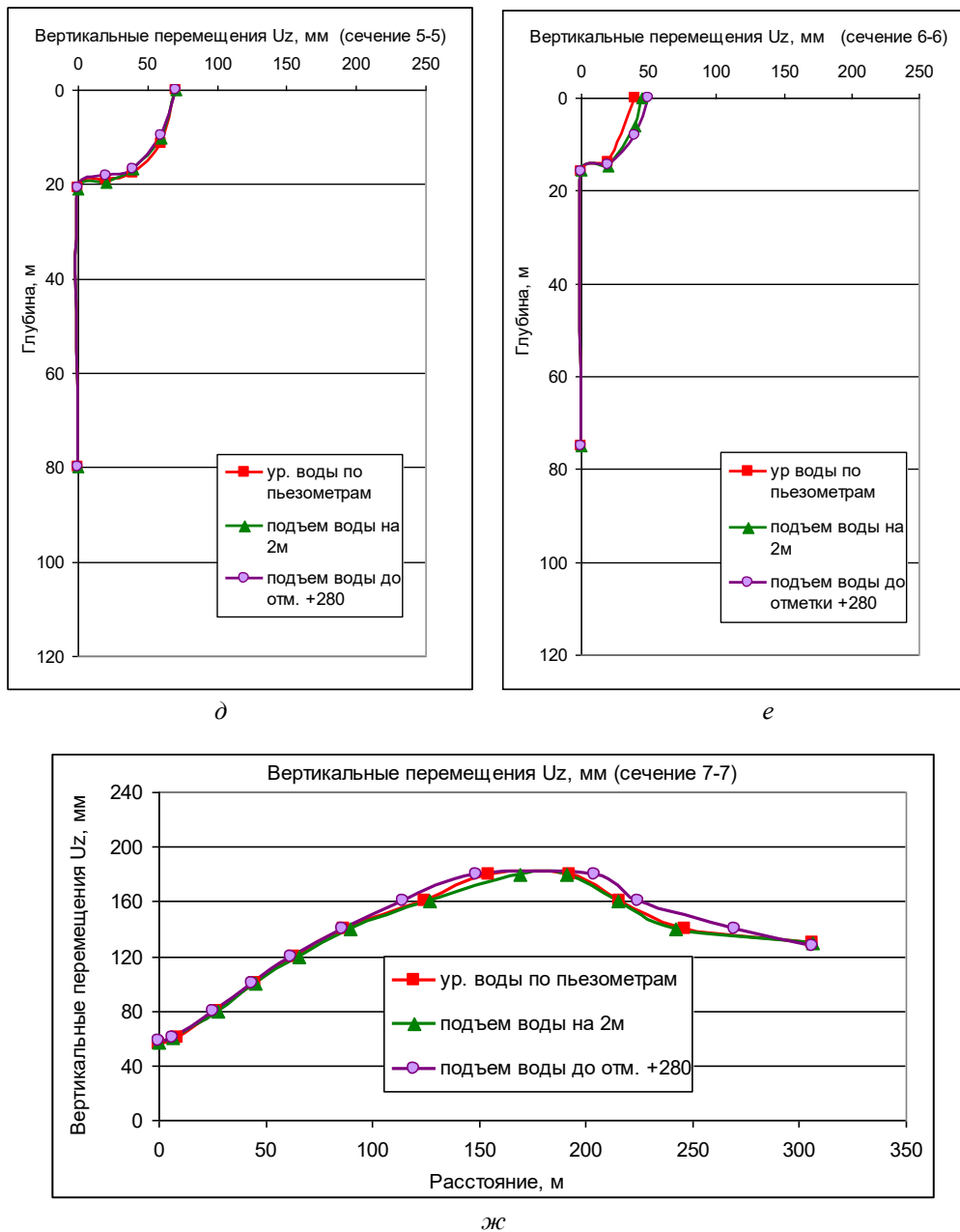


Рис. 6.47. Графики вертикальных U_z перемещений грунтов по сечениям: д — 5-5; е — 6-6; ж — 7-7 (окончание)

Анализ полученных результатов компьютерного моделирования состояния дамбы № 1 в объемной постановке позволяет сделать вывод о том, что в целом ее механическое состояние устойчивое. Расчетные значения перемещений, порового давления и эффективных напряжений не являются опасными и соответствуют эксплуатационным характеристикам хвостохранилища. Коэффициент запаса по рассмотренным вариантам имеет значения в диапазоне 1,18–1,13.

6.4.2. Ограждающая дамба № 4

При компьютерном моделировании деформационных и фильтрационных процессов в теле дамбы № 4 использовались расчетные схемы и гидрогеологические условия, принятые для компьютерного моделирования в 2017 г., с учетом дополнительных исходных данных геотехнических и гидрогеологических изысканий, полученных в результате полевых измерений в 2016–2017 гг. (табл. 6.5). Оно выполнялось в объемной постановке, 3D-модель системы «хвостохранилище – ограждающая дамба – геологическое основание» создана на основе данных буровых колонок и инженерно-геологических изысканий (рис. 6.48–6.50). Уровень воды в хвостохранилище моделировался на отметке +284 м.

Моделировался уровень воды в хвостохранилище на отметке +284 м и в теле дамбы по вариантам ПДЗ-1 и ПДЗ-2 (по данным гидрогеологической службы) (рис. 6.51, 6.52).

Результаты выполненного компьютерного моделирования приведены на рис. 6.53–6.56 и в табл. 6.6.

Прогноз деформационных и фильтрационных процессов в дамбе № 4 и оценка рисков потери ее устойчивости выполнены на основе компьютерного моделирования при уровне воды в хвостохранилище на отметке +284 м и в теле дамбы по вариантам ПДЗ-1 и ПДЗ-2 (по данным гидрогеологической службы).

Картины распределения расчетных значений коэффициента надежности (безопасности) дамбы № 4 при уровнях воды ПДЗ-1 и ПДЗ-2 представлены на рис. 6.57.

Таблица 6.5

Параметры физико-механических характеристик грунтов дамбы № 4, намывных отложений и подстилающих пород геологического основания, используемые для расчетов

Параметры	Ед. измерения	Грунты, породы			
		насыпные грунты	пески намывные	валунно-гравийный галечник	гранито-гнейсы прочные
Тип модели		MohrCoulomb	MohrCoulomb	MohrCoulomb	MohrCoulomb
Тип поведения материала		Drained	Drained	Drained	Drained
γ_{unsat} (уд. вес грунта)	[kN/m ³]	17,8	17,4	18,7	25,8
γ_{sat} (уд. вес насыщ. грунта)	[kN/m ³]	19,8	20,9	19,2	26,7
K_x (коэф. фильтрации)	[m/day]	20	20	50	0,5
K_y (коэф. фильтрации)	[m/day]	20	20	50	0,5
K_z (коэф. фильтрации)	[m/day]	20	20	50	0,5
E (модуль деформ.)	[kN/m ²]	25 000	35 000	25 000	500000
ν (коэф. Пуассона)	[-]	0,3	0,4	0,3	0,2
C_{ref} (сцепление)	[kN/m ²]	2	5	2	37
Φ (угол внутр. трения)	[°]	30	38,5	25	42
Ψ (угол дилатансии)	[°]	0	3,5	0	7

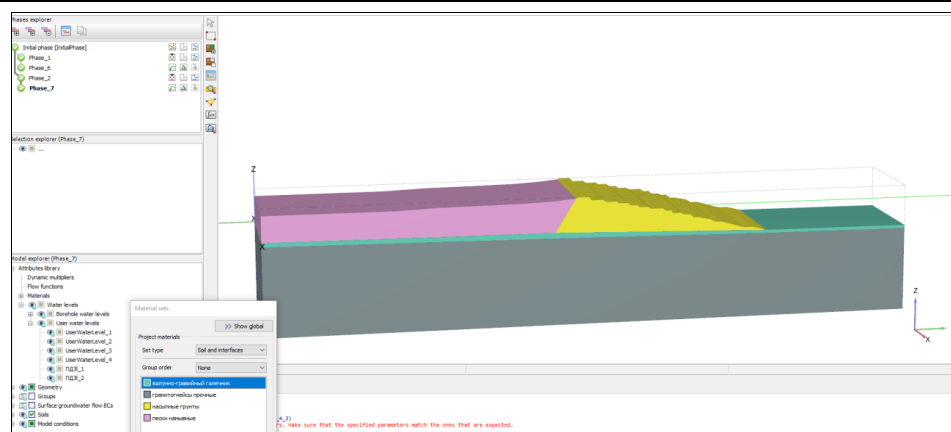


Рис. 6.48. Компьютерная 3D-модель фрагмента хвостохранилища, ограждающей дамбы № 4 и подстилающего геологического основания

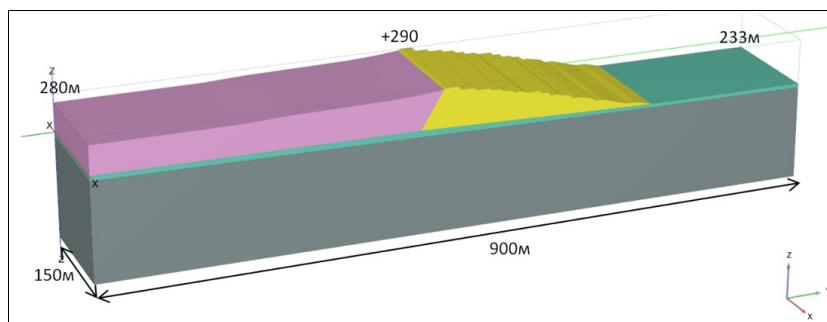


Рис. 6.49. Геометрические параметры 3D-модели дамбы № 4

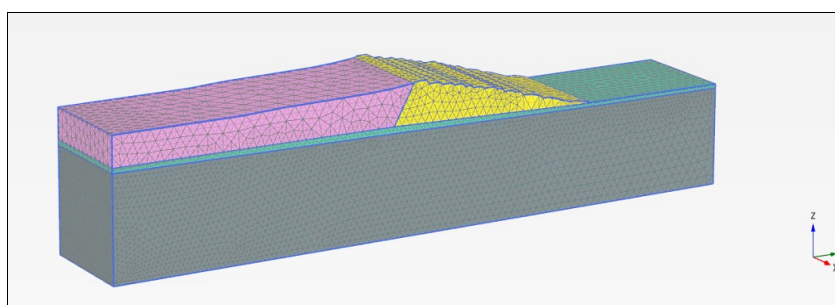


Рис. 6.50. Компьютерная расчетная схема «хвостохранилище – ограждающая дамба № 4 – геологическое основание»

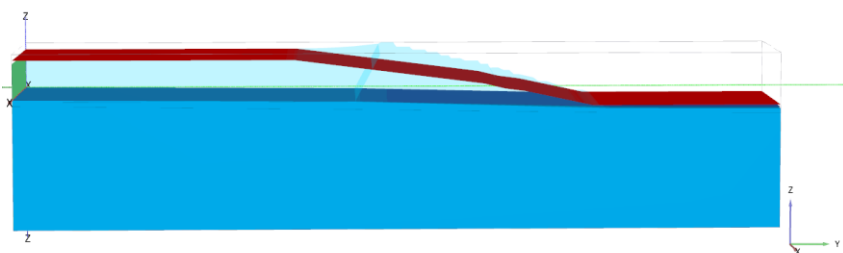


Рис. 6.51. Схема для моделирования уровня воды в хвостохранилище на отметке +284 м и в теле дамбы № 4 на отметках ПДЗ-1 (по данным гидрогеологической службы)

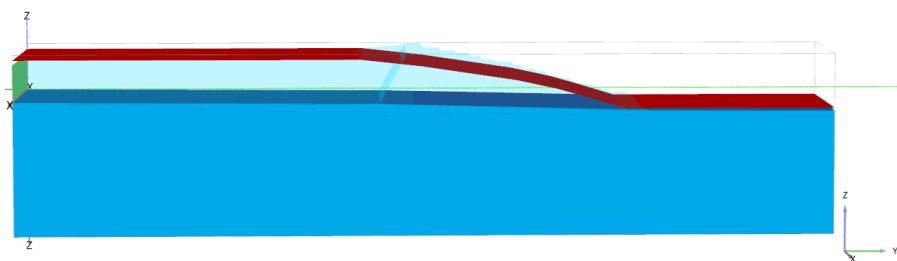


Рис. 6.52. Схема для моделирования уровня воды в хвостохранилище на отметке +284 м и в теле дамбы № 4 на отметках ПДЗ-2 (по данным гидрогеологической службы)

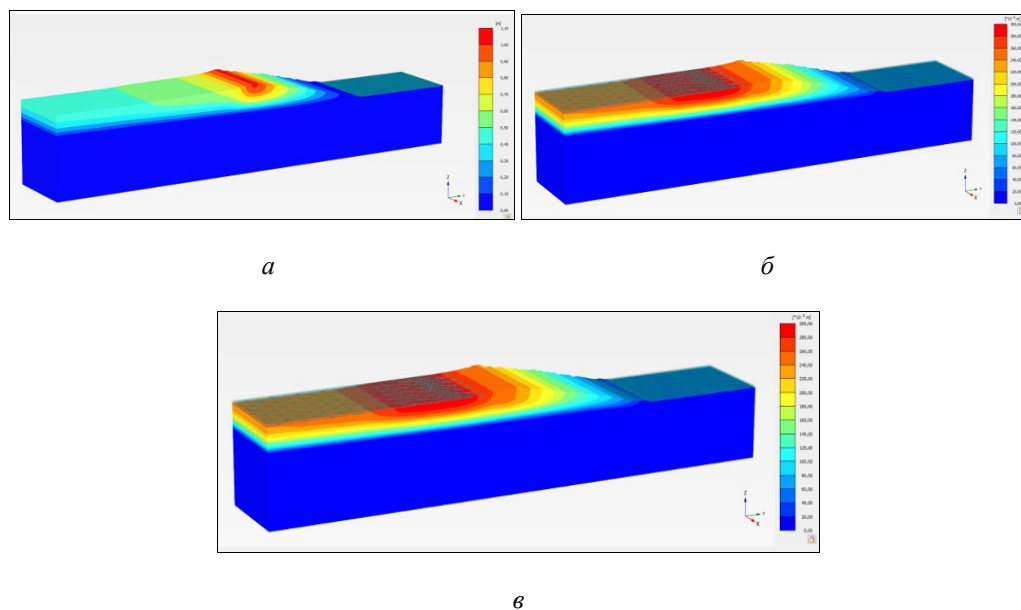


Рис. 6.53. Картины общих (полных) расчетных перемещений (U) грунтов при различных уровнях подземных вод в теле ограждающей дамбы № 4: *a* — при минимальном уровне воды (начальная стадия); *б* — при ПДЗ-1; *в* — при ПДЗ-2

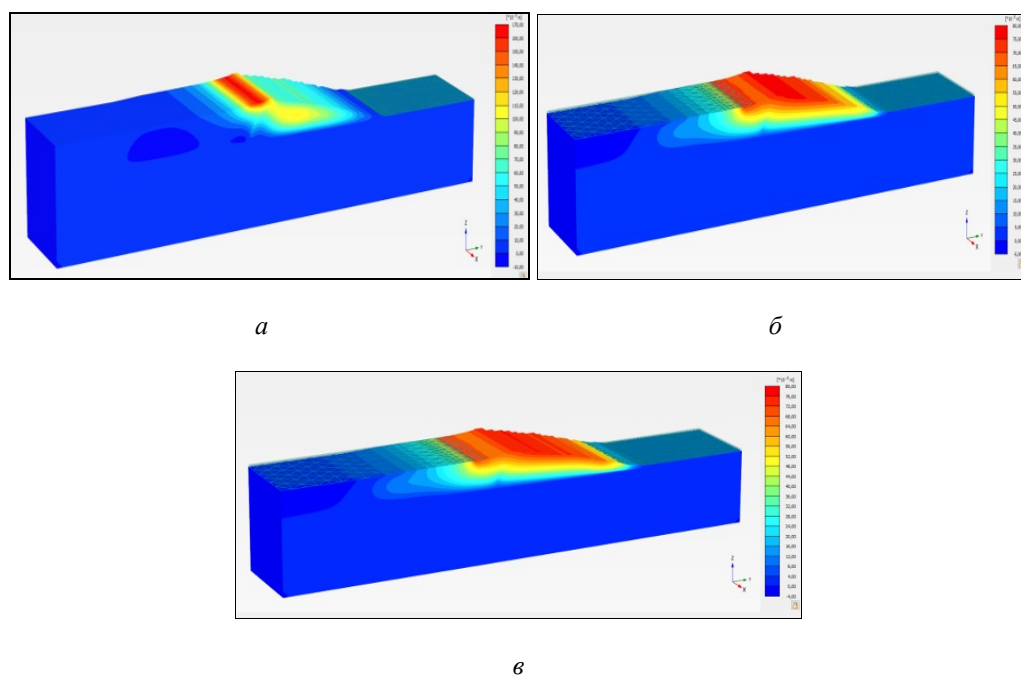


Рис. 6.54. Картины субгоризонтальных поперечных перемещений (U_y) грунтов при различных уровнях подземных вод в теле ограждающей дамбы № 4: *a* — при минимальном уровне воды (начальная стадия); *б* — при ПДЗ-1; *в* — при ПДЗ-2

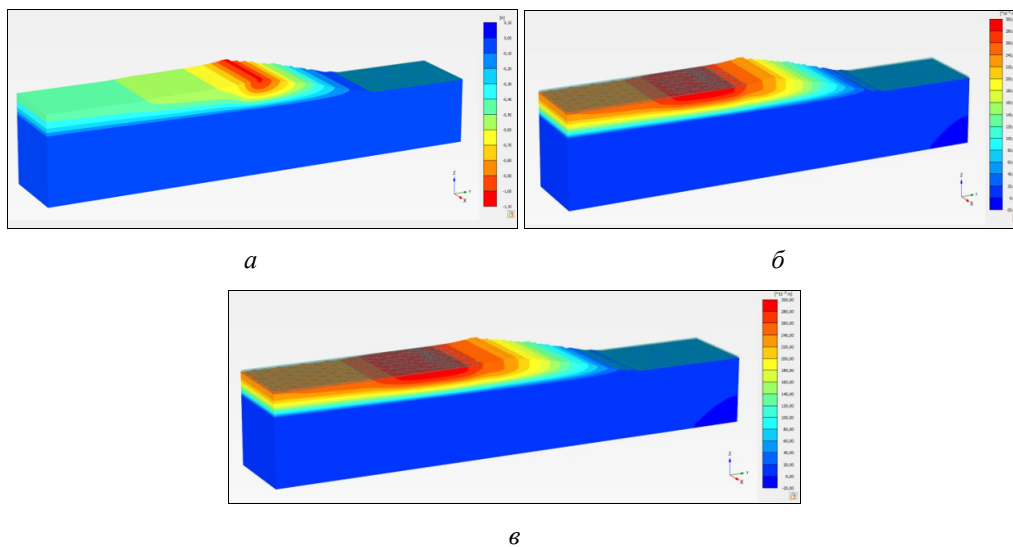


Рис. 6.55. Картины вертикальных перемещений (U_z) грунтов при различных уровнях подземных вод в теле ограждающей дамбы № 4: *а* — при минимальном уровне воды (начальная стадия); *б* — при ПДЗ-1; *в* — при ПДЗ-2

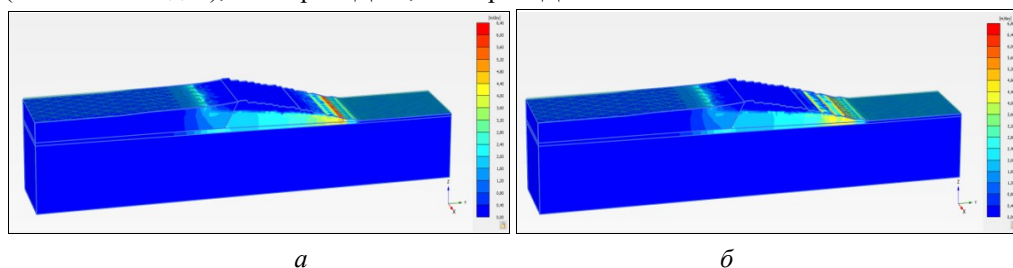


Рис. 6.56. Картины фильтрационного поля грунтовых вод в теле ограждающей дамбы № 4 при различных уровнях воды: *а* — при ПДЗ-1; *б* — при ПДЗ-3

Таблица 6.6

Расчетные значения коэффициента надежности (безопасности) дамбы № 4 при различных уровнях воды в хвостохранилище и в теле дамбы

Варианты расчетов	Уровень воды	Коэффициент безопасности $\sum M_{sf}$
1	Минимальный уровень воды (начальная стадия)	1,44
2	Уровень ПДЗ-1	1,28
3	Уровень ПДЗ-2	1,27

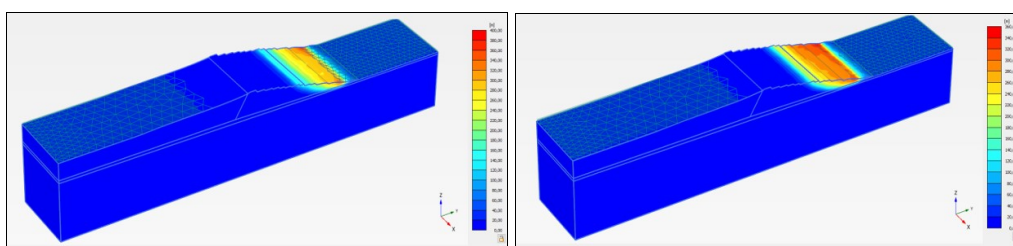


Рис. 6.57. Картины распределения расчетных значений коэффициента надежности (безопасности) дамбы № 4 при уровне воды в хвостохранилище на отметке +284 м и в теле дамбы по вариантам ПДЗ-1 и ПДЗ-2 (по данным гидрогеологической службы)

Детальный анализ состояния флюидомеханического состояния дамбы проводится на основании графиков, построенных по 3 продольным сечениям (рис.6.58–6.63).

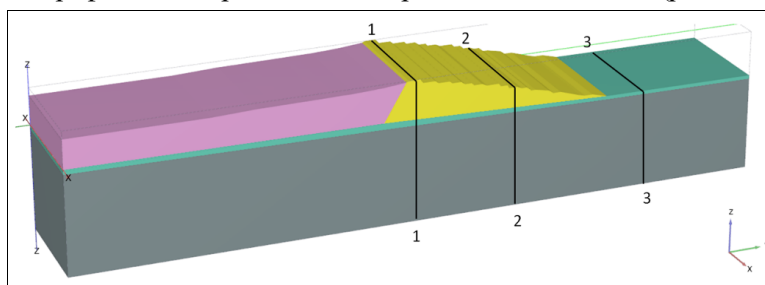


Рис. 6.58. Схема, иллюстрирующая расположение продольных разрезов, принятых для детального анализа состояния дамбы № 4

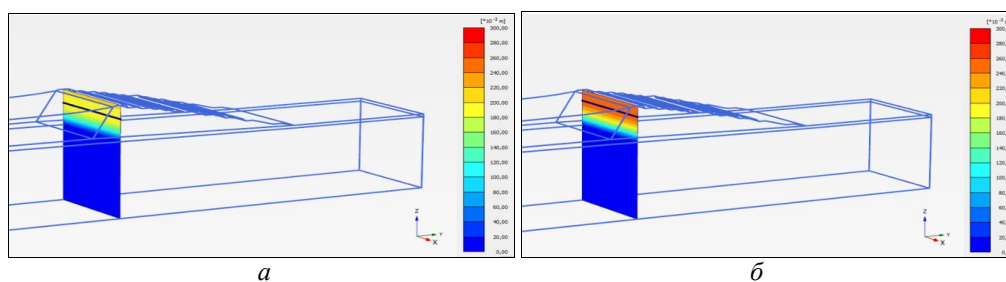


Рис. 6.59. Картины полных перемещений грунтов в сечении 1-1 при различных уровнях воды: *а* — в хвостохранилище на отметке +284 м и в теле дамбы на отметках ПДЗ-1; *б* — в хвостохранилище на отметке +284 м и в теле дамбы на отметках ПДЗ-2

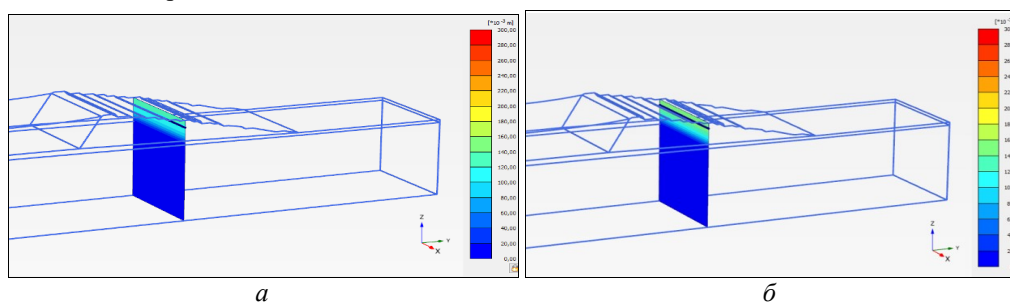


Рис. 6.60. Картины полных перемещений грунтов в сечении 2-2 при различных уровнях воды: *а* — в хвостохранилище на отметке +284 м и в теле дамбы на отметках ПДЗ-1; *б* — в хвостохранилище на отметке +284 м и в теле дамбы на отметках ПДЗ-2

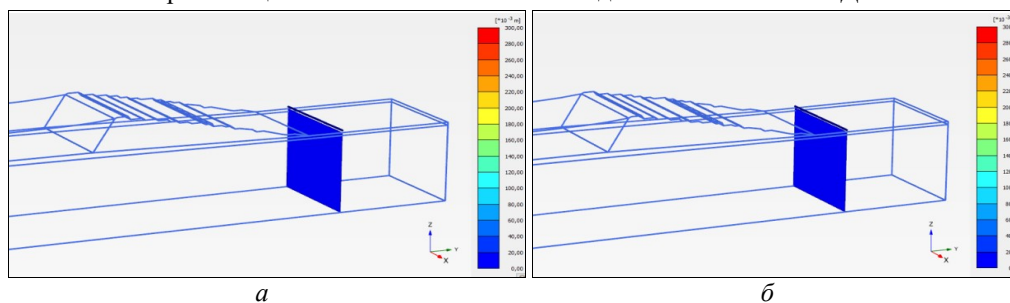


Рис. 6.61. Картины полных перемещений грунтов в сечении 3-3 при различных уровнях воды: *а* — в хвостохранилище на отметке +284 м и в теле дамбы на отметках ПДЗ-1; *б* — в хвостохранилище на отметке +284 м и в теле дамбы на отметках ПДЗ-2

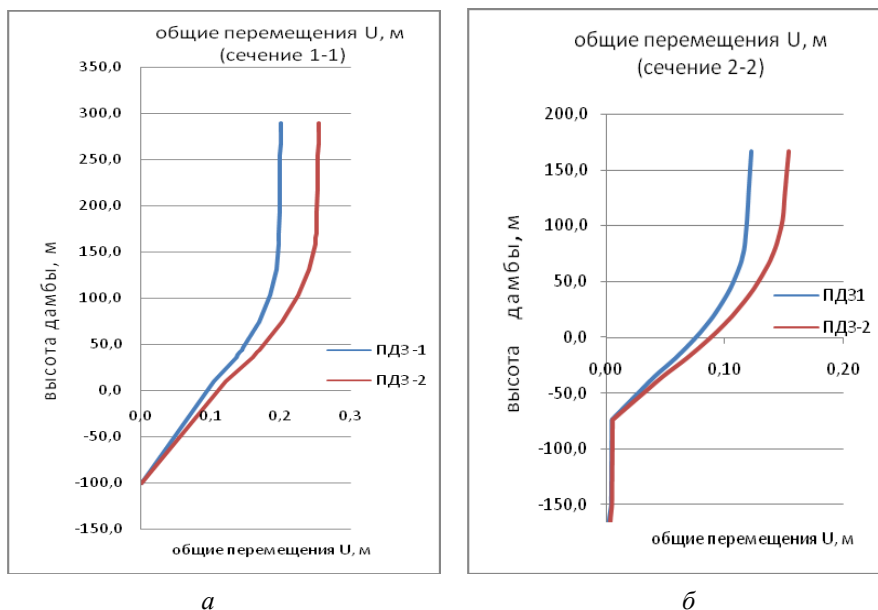


Рис. 6.62. Графики общих (полных) перемещений грунтов по сечениям: *a* — сечение 1-1; *б* — сечение 2-2

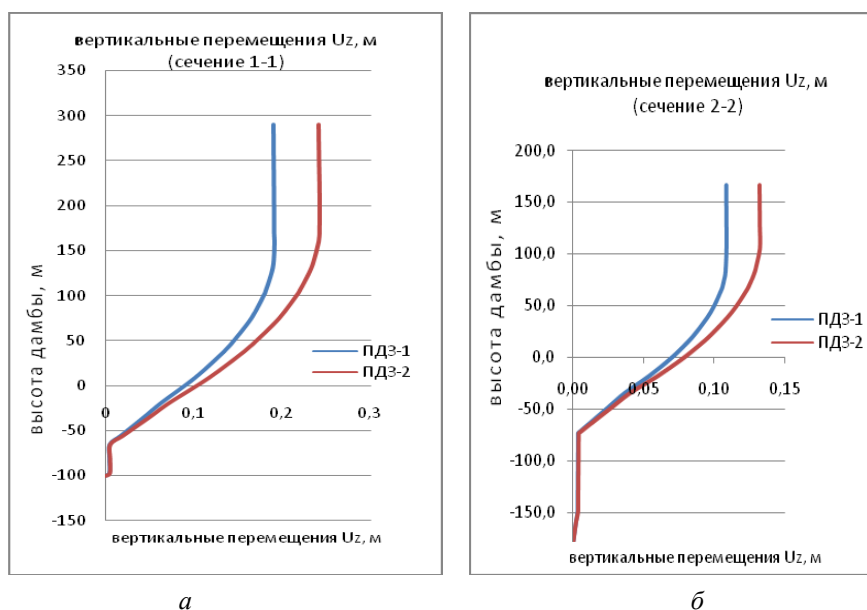


Рис. 6.63. Графики вертикальных перемещений грунтов U_z по сечениям: *a* — сечение 1-1; *б* — сечение 2-2

Анализ полученных результатов компьютерного моделирования состояния дамбы № 4 в объемной постановке позволяет сделать вывод о том, что в целом механическое состояние дамбы устойчивое. Расчетные значения коэффициента безопасности составляют от 1,27 (при уровне воды ПДЗ-2) до 1,44 (при минимальном уровне воды). Необходимо контролировать уровень воды в хвостохранилище, т. к. при его максимальном заполнении коэффициент безопасности (надежности) дамбы № 4 может существенно снизиться.

6.5. Оценка надежности насыпной грунтовой плотины при образовании в ее теле зоны повышенной фильтрации

В главе 1 было показано, что ГЭС Мурманской области представляют собой насыпные грунтовые плотины гидроэлектростанций (ГЭС) почти на всех основных реках (рис. 1.1), а также ограждающие дамбы хвостохранилищ горных предприятий региона [3]. Согласно законодательно-нормативным документам и правилам [1, 2] эксплуатация таких сооружений должна выполняться по требованиям, предъявляемым к ответственным и опасным объектам. Снижение механической и фильтрационной устойчивости плотин и ограждающих насыпных сооружений — дамб приведет к частичной или полной потере их функционального назначения. Дальнейшее развитие неконтролируемых фильтрационно-деформационных процессов может привести к возникновению чрезвычайной ситуации и даже к аварии с вытекающими отсюда социально-экономическими последствиями: ущерб окружающим природно-техническим системам, повреждение зданий и механизмов и т. п.; убытки вследствие остановки основного производства, затраты на локализацию мест разрушения, восстановительные работы, возмещение принесенного вреда и ущерба [9, 10, 26].

В мировой практике эксплуатации насыпных грунтовых плотин известны случаи потери их механической прочности и фильтрационной устойчивости, в результате чего произошли аварии на плотинах ГЭС (Киселевская (Россия), Фонтенель (США), Боулдерхэд (Англия) и др. [9, 10, 27]. При анализе этих аварий другими исследователями, а также авторами [5, 27, 28] выявлено, что основной их причиной является образование в теле плотины локального фильтрационного канала, который в последующем развивается в зону повышенной фильтрации, вызывающую необратимые фильтрационно-деформационные процессы. В конечном результате, происходит интенсивный размыв нижнего откоса, образование прорана или полное разрушение плотины на данном участке. Поэтому исследование надежности насыпной грунтовой плотины ГЭС при образовании в ее теле зоны повышенной фильтрации в целях минимизации рисков аварий и чрезвычайных ситуаций является актуальной задачей, имеющей важное научно-техническое значение.

Авторами ранее были выполнены комплексные георадарные, сейсмотомографические и компьютерные исследования насыпной грунтовой плотины каскада Нивских ГЭС на реке Пиренга в целях оценки общего состояния плотины, уточнения ее внутренней структуры, положения депрессионной поверхности фильтрующихся вод и подстилающего породного основания [29, 290]. В работе [29] дано детальное описание основных технических характеристик, свойств грунтов и геометрических размеров плотины. Георадарные и сейсмотомографические исследования выполнялись синхронно по ее гребню и низовому откосу, при этом подпочвенное зондирование достигало 15–20 м с разрешающей способностью 0,2–0,5 м. По данным зондирования была уточнена структура плотины, контур подстилающего моренного основания, старое русло реки, определена и трассирована депрессионная поверхность грунтовых вод в теле плотины, а также выявлены скрытые локальные зоны неоднородности (рис. 6.64).

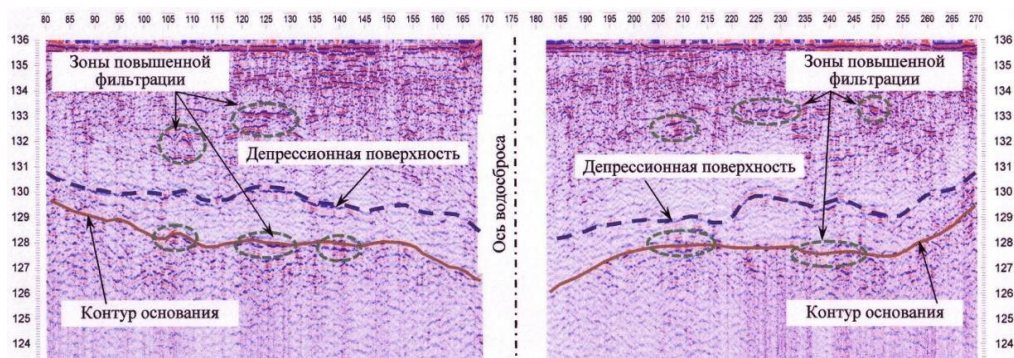


Рис. 6.64. Продольное сечение по гребню плотины с выделением особенностей ее внутренней структуры

В целях выявления особенностей влияния формирующейся зоны повышенной фильтрации на надежность насыпной грунтовой плотины ГЭС была разработана компьютерная гидрогеомеханическая 3D-модель природно-технической системы «река – плотина – геологическое основание», отражающая разные уровни воды в реке, геометрические размеры плотины и свойства слагающих ее грунтов, геологические слои русла реки (рис. 6.65а). Ширина реки была принятой около 100 м, а высота плотины — около 20 м.

Для имитации образования зоны повышенной фильтрации в модели плотины задавался поперечный (на всю ширину плотины) трапециевидальной формы канал высотой 3,5 м, нижний размер которого составлял 10 м, а верхний — 6 м (далее — минимальная фильтрация $10 \times 6 \times 3,5$), с последующим его полуторным (средняя фильтрация $15 \times 8 \times 4$) и практически двукратным увеличением (максимальная фильтрация $20 \times 10 \times 5$) (рис. 6.65 б). Следует отметить, что канал пересекал плотину по нормали, на нижней границе плотины с руслом реки. При этом его вертикальный размер во всех рассмотренных вариантах не превышал $1/4$ высоты плотины.

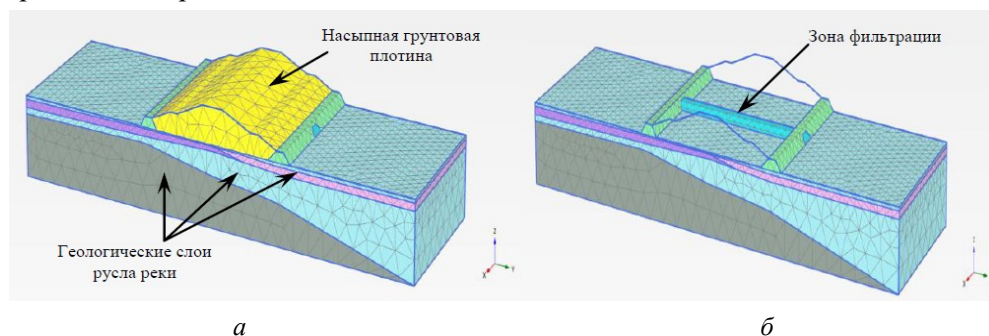


Рис. 6.65. Компьютерная 3D-модель фрагмента грунтовой насыпной плотины: а — геологическое строение и свойства грунтов; б — формирование зоны повышенной фильтрации

Выполнено многовариантное компьютерное моделирование системы «река – плотина – геологическое основание», с учетом уровня воды в реке (минимальный, средний, максимальный) и влияющих внешних и внутренних факторов. Внешними факторами являлись уровни воды в реке: на момент экспериментальных исследований и максимального поднятия. В качестве внутренних влияющих факторов были исследованы изменения значений сцепления и угла внутреннего трения грунтов, а также скорости фильтрации воды в заданном канале.

Компьютерное исследование гидрогеомеханического состояния природно-технической системы «река – плотина – геологическое основание» выполнено с учетом параметрического влияния свойств грунтов и гидродинамических характеристик формирующихся фильтрационно-деформационных процессов на надежность насыпной грунтовой плотины. Для этих целей в программном комплексе Plaxis 3D были проведены следующие типы расчетов для 34 вариантов параметрического сочетания: гравитационное нагружение, пластическое деформирование, совместный фильтрационно-деформационный расчет, оценка надежности.

На основе многовариантных расчетов выявлены особенности фильтрационно-деформационного состояния плотины, заключающиеся в интенсивном развитии смещений слагающих ее грунтов в приповерхностной части ее гребня с локализацией по оси формирующейся зоны повышенной фильтрации (рис.6.66 *а*, красный цвет). Развитие зоны повышенной фильтрации от минимальной к максимальной создает все предпосылки для образования на данном участке плотины механического размыва (прорана) (рис.6.66 *б*).

Во всех вариантах гидрогеомеханического компьютерного моделирования исследовалось параметрическое влияние основных деформационных свойств грунтов плотины: сцепления C и угла внутреннего трения φ . На первом этапе, при прочих равных условиях, задавалось изменение значений сцепления C от 1 до 10. Коэффициент надежности рассчитывался для трех вариантов рассматриваемых размеров зоны и соответствующей фильтрации: минимальной, средней и максимальной (рис. 6.67 *а*).

На втором этапе выполнен анализ зависимости коэффициента надежности плотины от угла внутреннего трения грунтов φ . Для этого, при прочих равных условиях, задавалось изменение φ от 10 до 43. Коэффициент надежности плотины также рассчитывался для трех вариантов размеров зоны фильтрации: минимальной, средней и максимальной (рис. 6.67 *б*).

Анализ рассчитанных значений коэффициента надежности в зависимости от сцепления C грунтов плотины позволяет сделать следующие выводы. При минимальной фильтрации снижение сцепления приводит к незначительному уменьшению коэффициента надежности. Для средней фильтрации снижение сцепления до 5 и ниже обуславливает значения коэффициента надежности менее 1 с последующим пропорциональным снижением. В случае с максимальной фильтрацией только значение сцепления $C = 10$ обеспечивает коэффициент надежности чуть выше 1. Для этого случая снижение сцепления приводит к соответствующему снижению надежности плотины вплоть до значения 0,64.

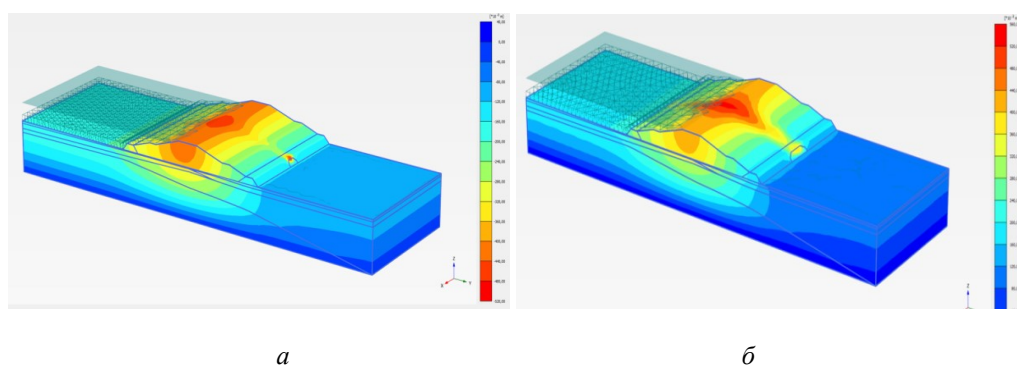
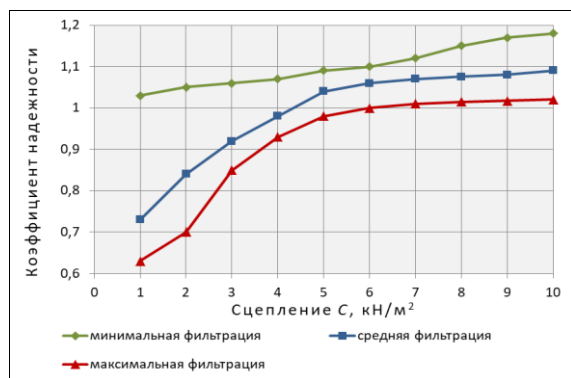
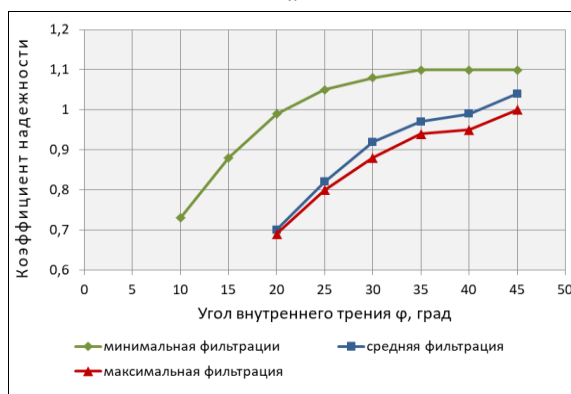


Рис. 6.66. Палитры фильтрационно-деформационного состояния фрагмента насыпной грунтовой плотины при минимальном (*а*) и максимальном (*б*) размерах зоны фильтрации



a



б

Рис. 6.67. Зависимость надежности насыпной грунтовой плотины от сцепления (*a*) и от угла внутреннего трения (*б*) слагающих ее грунтов

Анализ рассчитанных значений коэффициента надежности в зависимости от угла внутреннего трения грунтов φ позволяет сделать следующие выводы. При минимальной фильтрации снижение угла внутреннего трения приводит к уменьшению коэффициента надежности, при $\varphi \leq 20$ коэффициент надежности становится меньше 1. Для средней фильтрации снижение угла внутреннего трения до 30 и ниже обуславливает значения коэффициента надежности менее 1 с последующим пропорциональным снижением. В случае с максимальной фильтрацией даже принятое максимальное значение угла внутреннего трения $\varphi = 43$ не обеспечивает надежность выше 1. Для этого случая снижение угла внутреннего трения приводит к соответствующему снижению надежности вплоть до значения 0,69.

Таким образом, на основе результатов многовариантного параметрического моделирования исследуемой насыпной грунтовой плотины ГЭС установлены особенности влияния геометрических и гидродинамических характеристик формирующейся в ее теле зоны повышенной фильтрации на надежность плотины. Выявлены модельные зависимости надежности плотины от обусловленной протечкой изменчивости основных деформационных свойств (параметров сцепления и угла внутреннего трения) грунтов в контурах зоны при различной степени фильтрационных процессов. Установлены граничные значения сцепления $C \leq 5$ и угла внутреннего трения $\varphi \leq 20$ грунтов в зоне повышенной фильтрации, при которых для рассматриваемых условий надежность плотины не обеспечивается. Полученные данные предоставляют основу для оценки надежности насыпной грунтовой плотины ГЭС при выявлении режимными мониторинговыми наблюдениями зоны повышенной фильтрации на ранних стадиях ее формирования.

6.6. Моделирование механизма формирования зоны повышенной фильтрации в ограждающей дамбе

Компьютерное моделирование механизма формирования зоны повышенной фильтрации в ограждающей дамбе было выполнено с использованием специализированной лицензионной программы Plaxis 3D. В качестве объекта исследований была принята дамба № 4 хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК». В расчетах использовались геометрические схемы и гидрогеологические условия, принятые для компьютерного моделирования в 2018 г., с учетом дополнительных исходных данных геотехнических и гидрогеологических изысканий, полученных в результате полевых измерений в 2016–2018 гг. (табл. 6.7).

Созданная 3D-модель системы «хвостохранилище – ограждающая дамба – геологическое основание» основывалась на данных буровых колонок и инженерно-геологических изысканий (рис. 6.68–6.70). Кроме того, в теле дамбы моделировалась зона фильтрации, размеры которой менялись от 5 до 20 м поэтапно с интервалом 5 м.

Уровень воды в хвостохранилище моделировался на отметке +286 м.

Таблица 6.7

Параметры физико-механических характеристик грунтов дамбы № 4, намывных отложений и подстилающих пород геологического основания, используемые для расчетов

Параметры	Ед. измерения	Грунты, породы				
		насыпные грунты	пески намывные	валунно-гравийный галечник	гранито-гнейсы прочные	зона фильтрации
Тип модели		Mohr–Coulomb	Mohr–Coulomb	Mohr–Coulomb	Mohr–Coulomb	Mohr–Coulomb
Тип поведения материала		Drained	Drained	Drained	Drained	Drained
γ_{unsat} (уд. вес грунта)	[kN/m ³]	17,8	17,4	18,7	25,8	16
γ_{sat} (уд. вес насыщ. грунта)	[kN/m ³]	19,8	20,9	19,2	26,7	17
k_x (коэф. фильтрации)	[m/day]	20	20	50	0,5	20
k_y (коэф. фильтрации)	[m/day]	20	20	50	0,5	100
k_z (коэф. фильтрации)	[m/day]	20	20	50	0,5	20
E (модуль деформ.)	[kN/m ²]	25 000	35 000	25 000	500000	50–1000
ν (коэф. Пуассона)	[–]	0,3	0,4	0,3	0,2	0,45
c_{ref} (сцепление)	[kN/m ²]	2	5	2	37	2
Φ (угл. внутр. трения)	[°]	30	38,5	25	42	15
Ψ (угл. дилатансии)	[°]	0	3,5	0	7	0

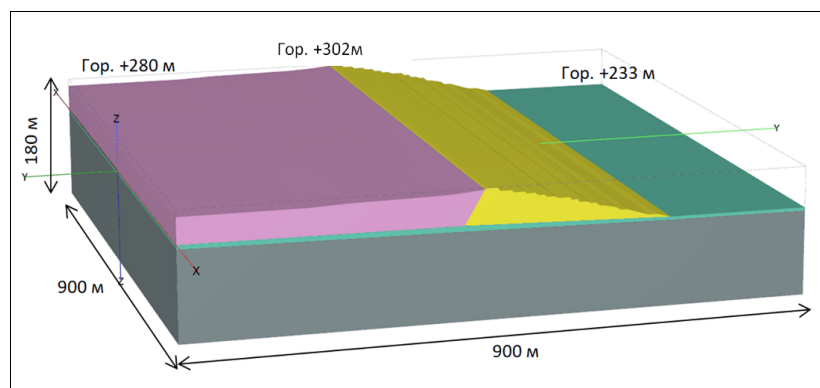


Рис. 6.68. Геометрическая 3D-модель фрагмента хвостохранилища, ограждающей дамбы № 4 с зоной фильтрации и подстилающего геологического основания

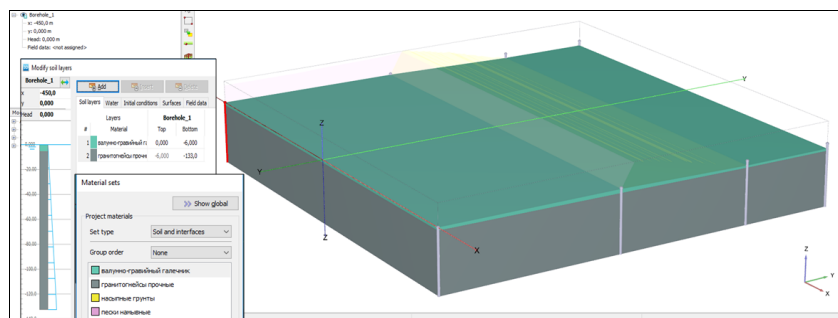


Рис. 6.69. Построение 3D-модели для компьютерного моделирования на основе буровых колонок

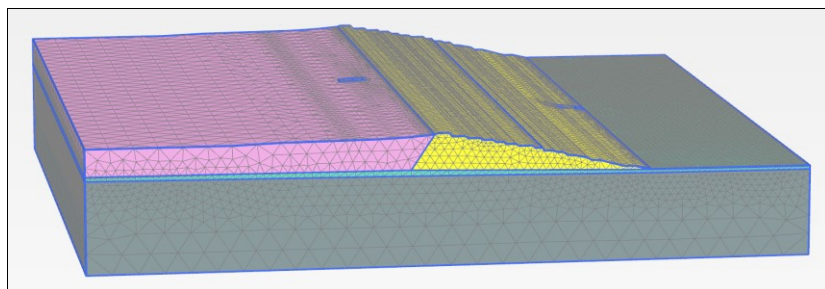


Рис. 6.70. Компьютерная конечно-элементная расчетная схема «хвостохранилище – ограждающая дамба № 4 – геологическое основание»

На следующем этапе создавалась геометрическая схема с выделением основных слоев грунтов (прежде всего в основании дамбы), для них задавались параметры физико-механических свойств (рис. 6.69). Далее выполнялась разбивка модели на конечные элементы, число которых в вариантах расчетов изменялось в зависимости от решаемой задачи (рис. 6.70).

Вычисления производились при различных размерах зоны фильтрации (ширина менялась 5–10–15–20 м соответственно при постоянной высоте 2 м) и физико-механических свойствах зоны фильтрации (табл. 6.8).

Таблица 6.8

Принятые параметры для моделирования механизма формирования зоны повышенной фильтрации в ограждающей дамбе

Варианты	Уровень воды	γ_{unsat}	γ_{sat}	E (модуль деформ.)	ν	c_{ref}	ϕ	k_x	k_y	k_z
Начальная фаза	Буровые колонки	16	17	3500	0,4	2	15	20	100	20
Фаза 1	286 м + ПДЗ	16	17	3500	0,4	2	15	20	100	20
Фаза 2	286 м + ПДЗ	16	17	350	0,4	2	15	20	1000	20
Фаза 3	286 м + ПДЗ	16	17	300	0,4	2	15	20	1000	20
Фаза 4	286 м + ПДЗ	16	17	250	0,4	2	15	20	1000	20
Фаза 5	286 м + ПДЗ	16	17	200	0,4	2	15	20	1000	20
Фаза 6	286 м + ПДЗ	16	17	150	0,4	2	15	20	1000	20
Фаза 7	286 м + ПДЗ	16	17	100	0,4	2	15	20	1000	20
Фаза 8	286 м + ПДЗ	16	17	50	0,4	2	15	20	1000	20

Моделировался уровень воды в хвостохранилище на отметке +286 м и в теле дамбы по вариантам ПДЗ-1 (по данным гидрогеологической службы) (рис. 6.71).

Палитры распределения общих (полных) перемещений при различных гидрогеологических условиях и размерах зоны фильтрации приведены на рис. 6.72–6.75.

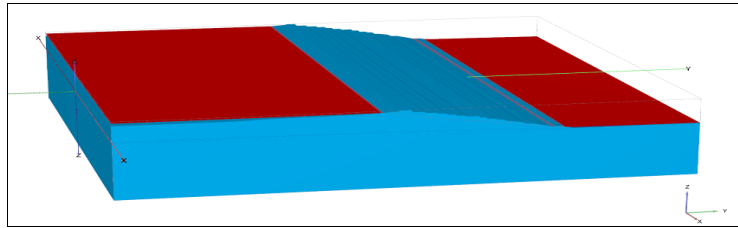


Рис. 6.71. Схема для моделирования уровня воды в хвостохранилище на отметке +286 м и в теле дамбы № 4 на отметках ПДЗ-1 (по данным гидрогеологической службы)

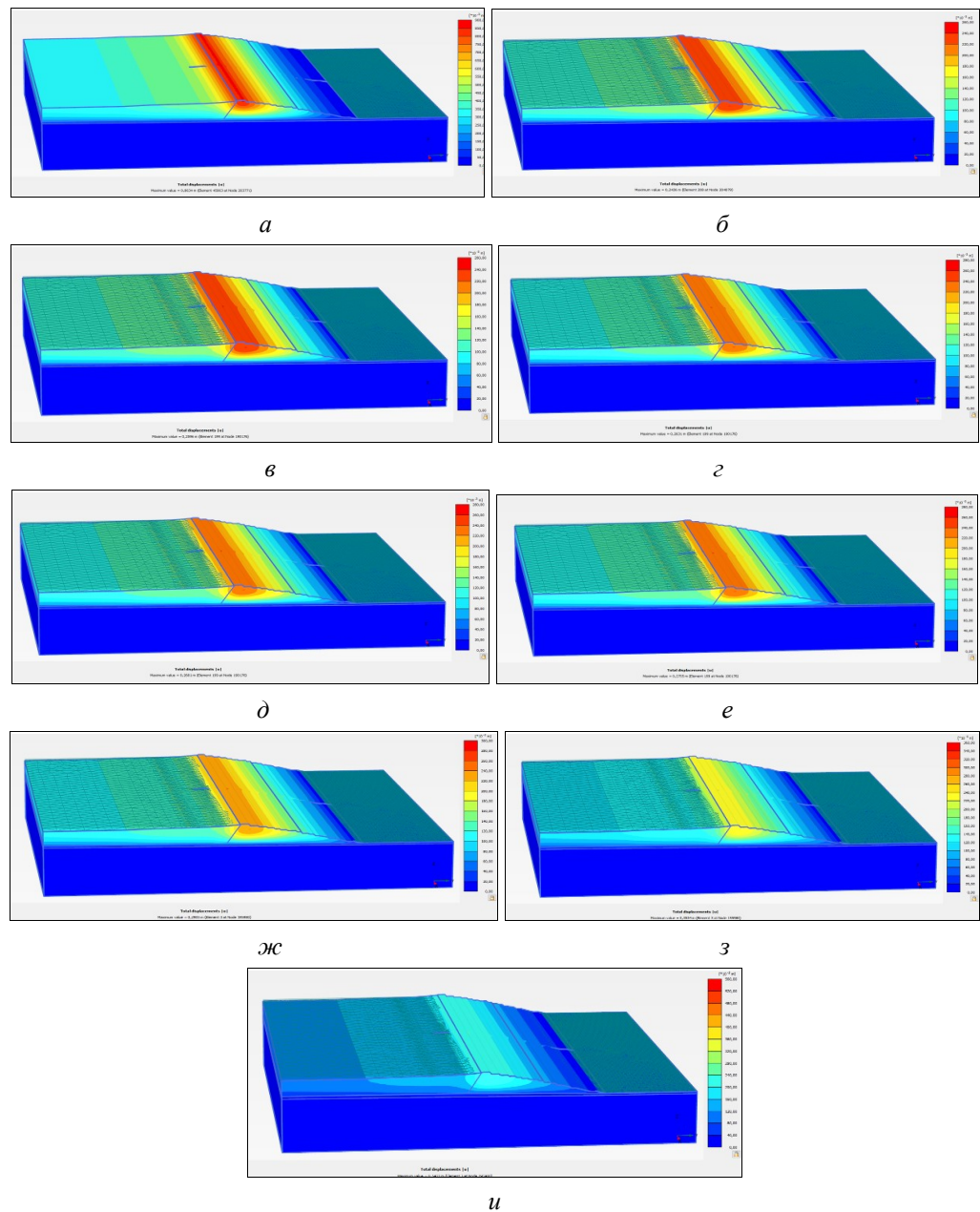


Рис. 6.72. Палитры общих перемещений при зоне фильтрации 5 м: *a* — начальная фаза; *б* — фаза 1; *в* — фаза 2; *г* — фаза 3; *д* — фаза 4; *е* — фаза 5; *ж* — фаза 6; *з* — фаза 7; *и* — фаза 8

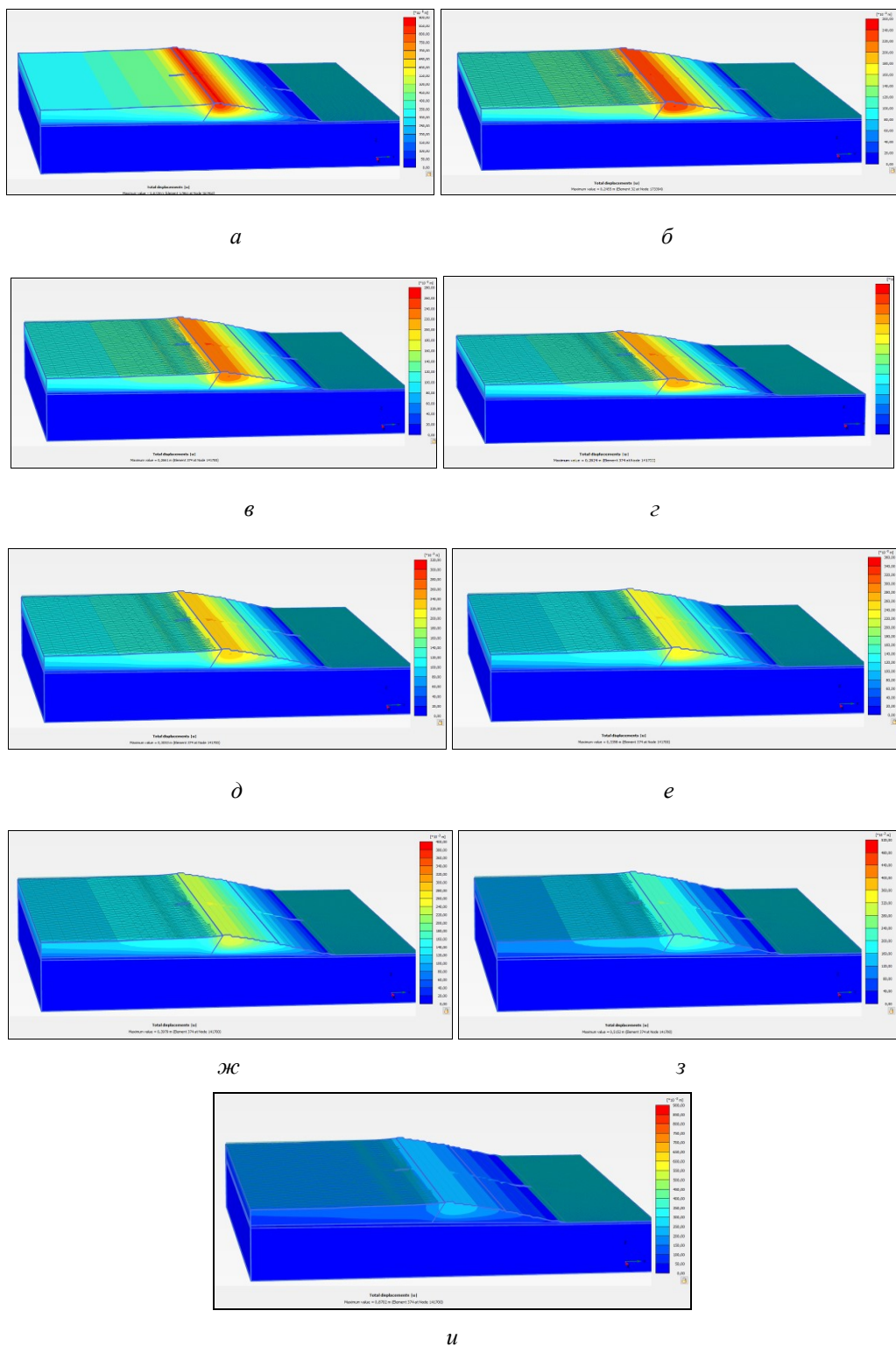


Рис. 6.73. Палитры общих перемещений при зоне фильтрации 10 м: *a* — начальная фаза; *б* — фаза 1; *в* — фаза 2; *г* — фаза 3; *д* — фаза 4; *е* — фаза 5; *ж* — фаза 6; *з* — фаза 7; *и* — фаза 8

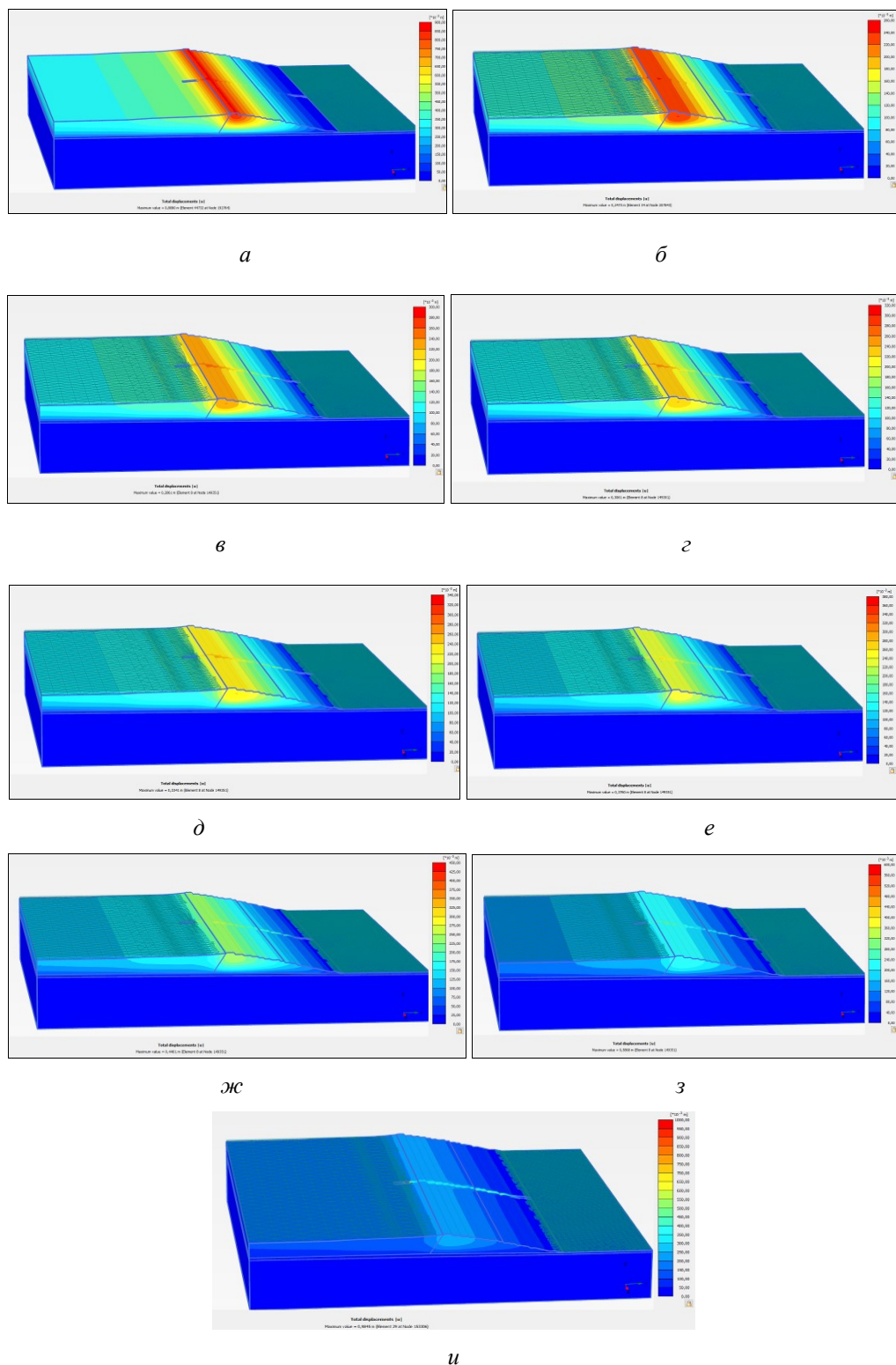


Рис. 6.74. Палитры общих перемещений при зоне фильтрации 15 м: *a* — начальная фаза; *б* — фаза 1; *в* — фаза 2; *г* — фаза 3; *д* — фаза 4; *е* — фаза 5; *ж* — фаза 6; *з* — фаза 7; *и* — фаза 8

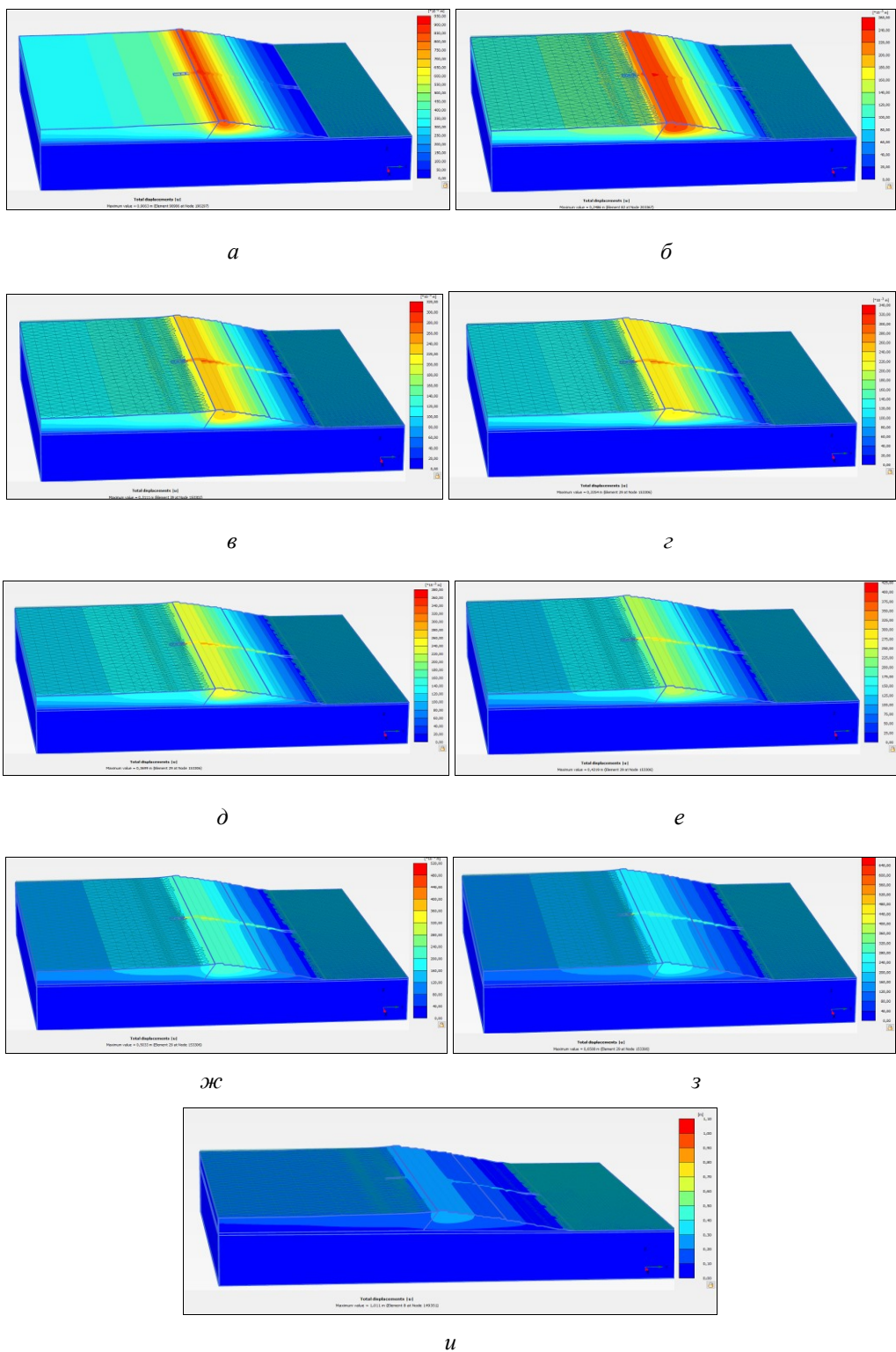


Рис. 6.75. Палитры общих перемещений при зоне фильтрации 20 м: *a* — начальная фаза; *б* — фаза 1; *в* — фаза 2; *г* — фаза 3; *д* — фаза 4; *е* — фаза 5; *ж* — фаза 6; *з* — фаза 7; *и* — фаза 8

По результатам выполненных многовариантных вычислений построены графики зависимости полных, горизонтальных и вертикальных приповерхностных перемещений грунтов дамбы от степени снижения модуля упругости грунтов непосредственно в зоне фильтрации при ее различных размерах (5×2 , 10×2 , 15×2 и 20×2 м соответственно) (рис. 6.76).

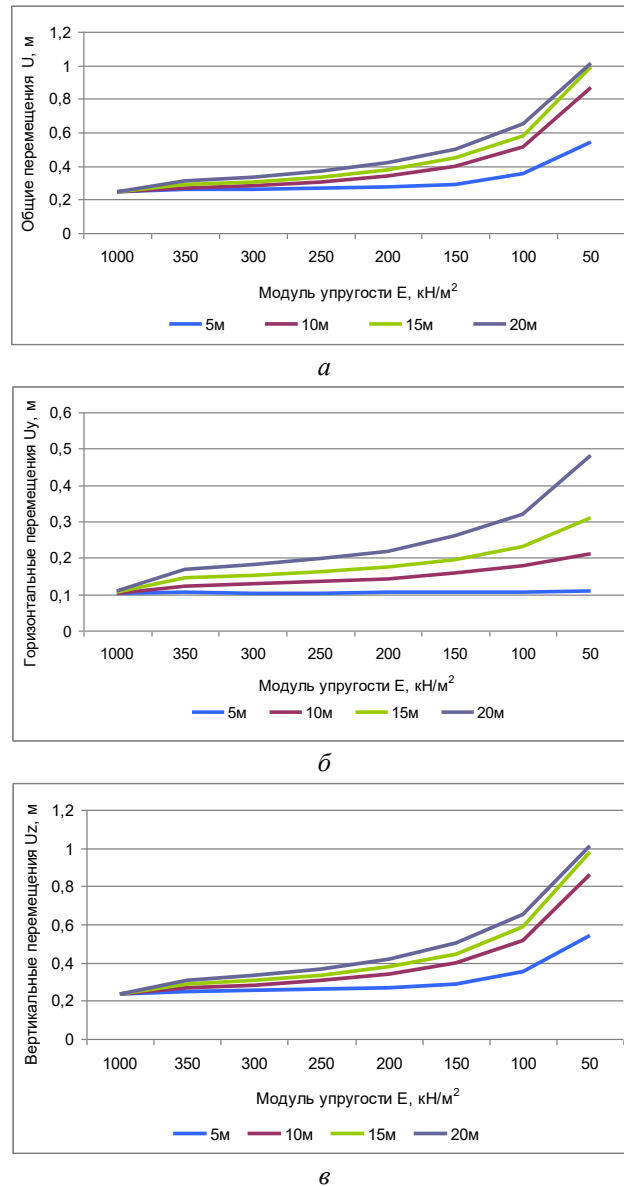
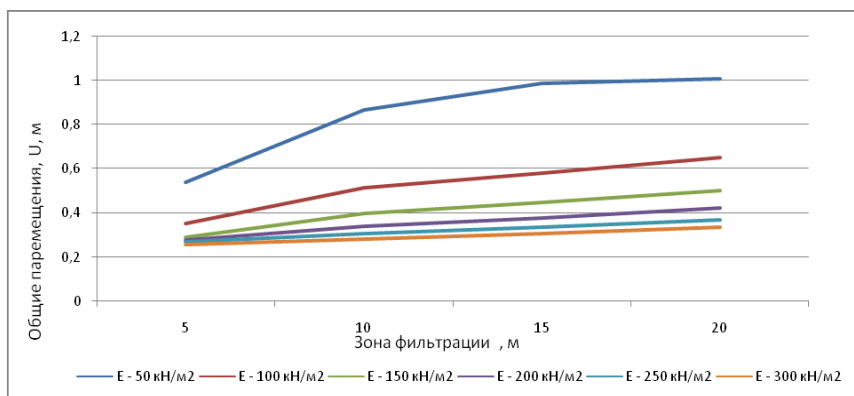
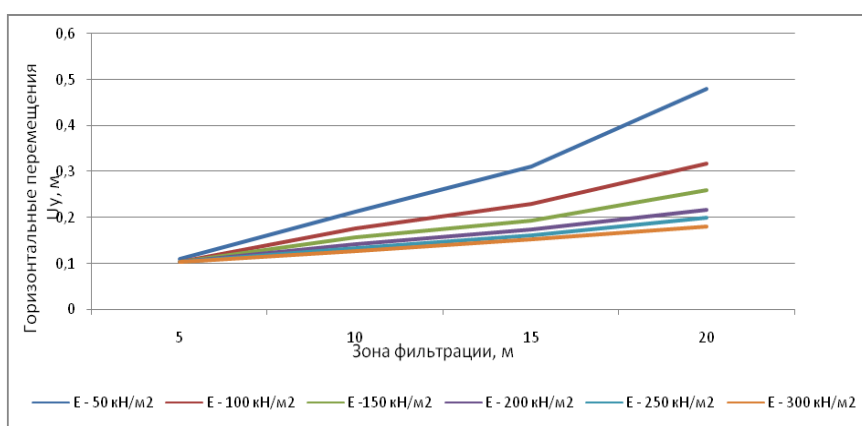


Рис. 6.76. Зависимости перемещений грунтов от степени снижения модуля упругости грунтов в зоне фильтрации: *a* — полные U ; *б* — горизонтальные (вкрест простирания) U_x ; *в* — вертикальные U_z

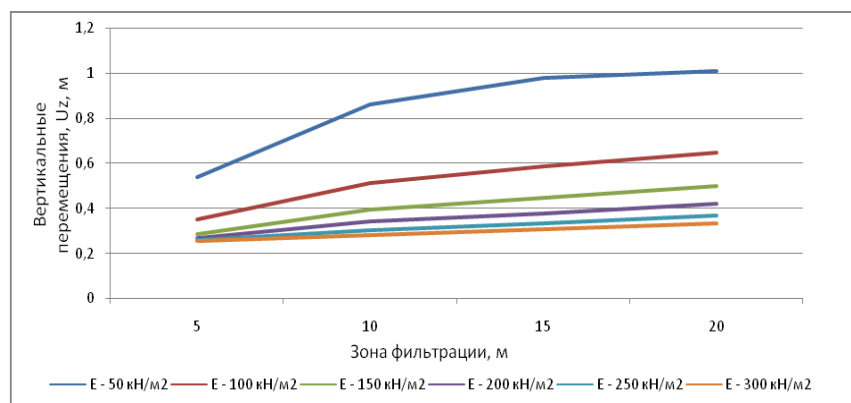
Графики зависимости перемещений грунтов от размеров зоны фильтрации при различных значениях модуля упругости приведены на рис. 6.77.



а



б



в

Рис. 6.77. Зависимости перемещений грунтов от размеров зоны фильтрации при различных значениях модуля упругости: а — $U_{\text{общ}}$; б — U_y ; в — U_z

По результатам компьютерного моделирования были определены расчетные значения коэффициента безопасности (надежности) (рис. 6.78, 6.79 и табл. 6.9).

Step info				
Phase	Phase_19 [Phase_19]			
Step	Initial			
Step type	Safety			
Updated mesh	False			
Solver type	Picos			
Kernel type	64 bit			
Extrapolation factor	1,000			
Relative stiffness	0,06645E-3			
Multipliers				
Soil weight			ΣM_{Weight}	1,000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0,2643E-3	ΣM_{sf}	1,230
Time	Increment	0,000	End time	0,000
Staged construction				
Active proportion total area	M_{Area}	0,000	ΣM_{Area}	1,000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0,000	ΣM_{Stage}	0,000
Forces				

a

Step info				
Phase	Phase_10 [Phase_10]			
Step	Initial			
Step type	Safety			
Updated mesh	False			
Solver type	Picos			
Kernel type	64 bit			
Extrapolation factor	1,000			
Relative stiffness	5,130E-6			
Multipliers				
Soil weight			ΣM_{weight}	1,000
Strength reduction factor	M_{sf}	0,1382E-3	ΣM_{sf}	1,050
Time	Increment	0,000	End time	0,000
Staged construction				
Active proportion total area	M_{Area}	0,000	ΣM_{Area}	1,000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0,000	ΣM_{Stage}	0,000
Forces				

б

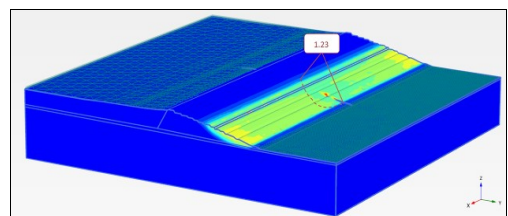
Step info				
Phase	Phase_9 [Phase_9]			
Step	Initial			
Step type	Safety			
Updated mesh	False			
Solver type	Picos			
Kernel type	64 bit			
Extrapolation factor	1,000			
Relative stiffness	0,02306E-3			
Multipliers				
Soil weight			ΣM_{Weight}	1,000
Strength reduction factor	M_{sf}	1,313E-3	ΣM_{sf}	0,9580
Time	Increment	0,000	End time	0,000
Staged construction				
Active proportion total area	M_{Area}	0,000	ΣM_{Area}	1,000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0,000	ΣM_{Stage}	0,000
Forces				

в

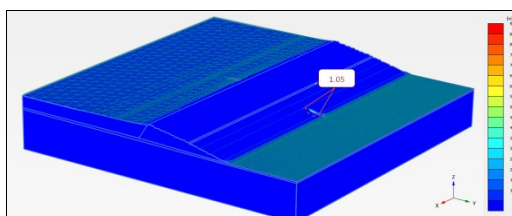
Step info				
Phase	Phase_9 [Phase_9]			
Step	Initial			
Step type	Safety			
Updated mesh	False			
Solver type	Picos			
Kernel type	64 bit			
Extrapolation factor	1,000			
Relative stiffness	0,03720E-3			
Multipliers				
Soil weight			Σ Weight	1,000
Strength reduction factor	M_{sf}	-0,02539E-3	ΣM_{sf}	0,9218
Time	Increment	0,000	End time	0,000
Staged construction				
Active proportion total area	M_{Area}	0,000	ΣM_{Area}	1,000
Active proportion of stage	M_{Stage}	0,000	ΣM_{Stage}	0,000
Forces				

г

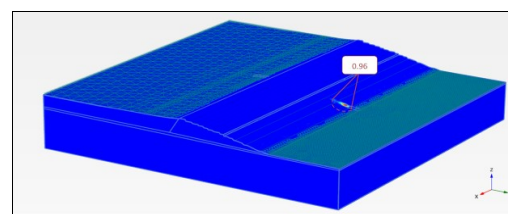
Рис. 6.78. Расчетные значения коэффициента надежности (безопасности) дамбы при различных размерах зоны фильтрации: *a* — 5×2 м; *б* — 10×2 м; *в* — 15×2 м; *г* — 20×2 м



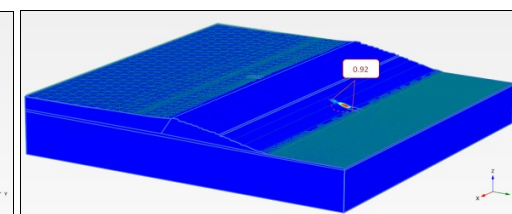
a



б



в



г

Рис. 6.79. Участки низового склона дамбы с пониженным коэффициентом надежности при различных размерах зоны фильтрации: *a* — 5×2 м; *б* — 10×2 м; *в* — 15×2 м; *г* — 20×2 м

Таблица 6.9

Расчетные значения коэффициента надежности (безопасности) дамбы № 4 при различных зонах фильтрации в хвостохранилище и в теле дамбы

Варианты расчетов	Размер зоны фильтрации, м	Коэффициент надежности $\sum M_{sf}$
1	Без зоны фильтрации	1,52
2	5 × 2	1,23
3	10 × 2	1,05
4	15 × 2	0,958
5	20 × 2	0,922

Выполненные расчетные исследования устойчивости ограждающей дамбы № 4 хвостохранилища показали, что ее механическая устойчивость обеспечивается с коэффициентом запаса $K_{над} > 1,5$ (намного превышающим нормативные требования) в случае отсутствия зоны фильтрации в теле дамбы. В случае формирования зоны повышенной фильтрации размерами 5 × 2 м, коэффициент запаса уменьшается до $K_{над} = 1,23$ (т. е. чуть выше нормативного 1,2). При увеличении зоны фильтрации до 10 × 2 м коэффициент запаса снижается до 1,05, что создает достаточно высокую вероятность локальной потери механической прочности и устойчивости дамбы. Дальнейшее увеличение размеров зоны фильтрации до 15 × 2 м и далее до 20 × 2 м приводит к еще большему снижению коэффициента устойчивости, который становится меньше 1. Таким образом, создаются условия для локального размыва дамбы.

Выполненные расчетные исследования и анализ результатов компьютерного моделирования подтверждает выводы, сделанные применительно к оценке состояния ограждающей дамбы. Режимными мониторинговыми наблюдениями за состоянием дамбы необходимо выявлять скрытые зоны повышенной фильтрации на ранних стадиях их формирования и принимать меры к их локализации, не допуская развития опасных фильтрационно-деформационных процессов и превышения размеров возникшей зоны фильтрации 5 × 2 м.

7. ОБОСНОВАНИЕ ИНЖЕНЕРНЫХ РЕШЕНИЙ И МЕРОПРИЯТИЙ ПО МИНИМИЗАЦИИ РИСКОВ ОПАСНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ГИДРОГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГТС

7.1. Прогнозная оценка устойчивости ограждающих дамб хвостохранилища

Прогнозную оценку устойчивости ограждающих дамб хвостохранилища рекомендуется выполнять двумя методами:

1) инженерный расчет механической устойчивости уступов и низового склона (плоское сечение) в соответствии с «Методическими указаниями по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров», 1972 г. [291];

2) интегральная оценка надежности (механическая и противофильтрационная устойчивость, прочность, пластичность, вязкость, активное поровое давление воды) на основе объемного компьютерного моделирования Plaxis 3D.

Далее приведен пример прогнозной оценки ограждающих дамб хвостохранилища ГОК «Олений ручей». Для расчетов использовались параметры физико-механических свойств грунтов по данным натурных геотехнических определений (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Выборка основных параметров физико-механических свойств гравелистых песков

Параметр	Угол внутреннего трения φ , °	Удельное сцепление c , кПа (кгс/см ²)	Модуль деформации E , МПа (кгс/см ²)	Удельный вес γ , кН/м ³
Значение	43,2	3,8 (0,038)	43,4 (434)	20,5

Следует заметить, что значение угла внутреннего трения, равное 43,2° (по данным [2]), явно, завышено по сравнению с аналогичными грунтами, использовавшимися для строительства гидротехнических сооружений на Кольском полуострове. В связи с этим инженерный расчет выполнен для двух вариантов значений угла внутреннего трения грунтов:

- 43,2° — согласно данным инженерно-геологических изысканий;
- 25° — по аналогии с грунтами других гидротехнических объектов горного профиля (табл. 7.2).

Таблица 7.2

Основные показатели расчета кривой обрушения по [291]

Показатель	Формула	Значение	
		при $\varphi = 43,2^\circ$	при $\varphi = 25^\circ$
Угол между направлением действия максимального напряжения и линией скольжения	$\epsilon = 45^\circ - \varphi/2$, φ — угол внутреннего трения породы	23,4°	32,5°
Предельно допустимое напряжение в грунтах	$\sigma_1 = \sigma_0 = 2k \cdot \text{ctg } \epsilon$, k — сцепление грунта	17,56 кПа	11,93 кПа
Глубина, на которой возникают площадки скольжения	$h_{90} = \frac{\sigma_0}{\gamma} = \frac{2k}{\gamma} \cdot \text{ctg } \epsilon$, γ — объемный вес грунта	0,86 м	0,58 м
Ширина призмы обрушения на верхней площадке откоса	$a = \frac{2H \left[1 - \text{ctg } \alpha \cdot \text{tg} \left(\frac{\alpha + \varphi}{2} \right) \right] - 2h_{90}}{\text{ctg } \epsilon + \text{tg} \left(\frac{\alpha + \varphi}{2} \right)}$	Рассчитывалась для каждой дамбы и уступа отдельно	

В наших расчетах была принята круглоцилиндрическая поверхность скольжения с оценкой устойчивости дамбы по этой кривой. Построение кривой скольжения и расчет устойчивости выполнены для низового откоса дамбы, т. к. этот откос является наиболее опасным с точки зрения разрушения/сползания/обрушения.

Рассматриваемая дамба на момент расчетов имела два уступа, поэтому расчет устойчивости производился как для каждого отдельно (рис. 7.1 а), так и для усредненного склона (рис. 7.1 б).

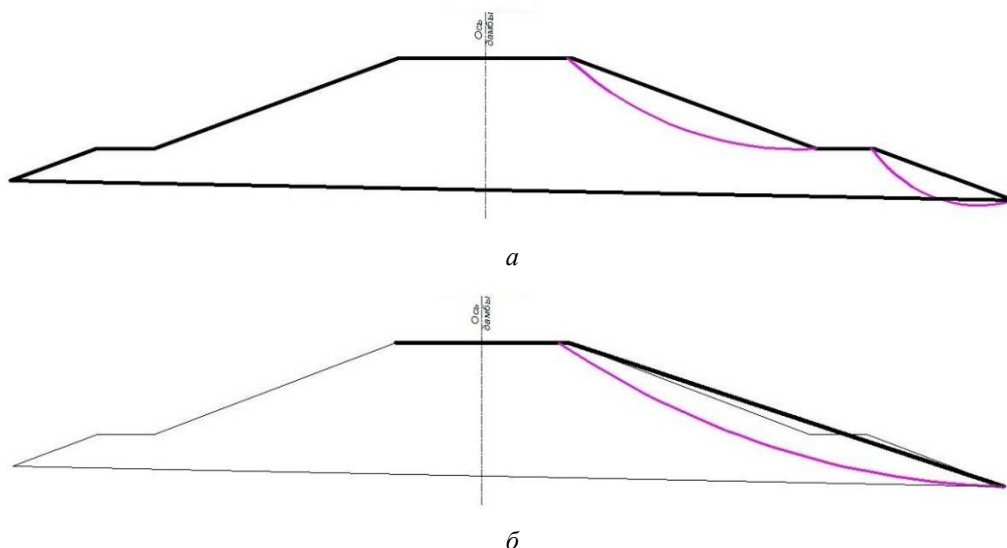


Рис. 7.1. Схема поперечного сечения дамбы с расчетными линиями скольжения: а — уступов низового склона; б — усредненного низового склона

В результате расчета были получены следующие коэффициенты устойчивости:

- | | |
|--|--|
| – при угле внутреннего трения $43,2^\circ$: | – при угле внутреннего трения 25° : |
| нижний уступ — 1,73; | нижний уступ — 1,38; |
| верхний уступ — 1,94; | верхний уступ — 1,48; |
| усредненный склон — 2,32; | усредненный склон — 1,67. |

Для оценки устойчивости часто применяется коэффициент прочности, который определяется как отношение разрушающей нагрузки к действующей нагрузке. Такое ее определение в большей степени применимо для скальных и бетонных оснований и фундаментов, чем для насыпных сооружений. Следует заметить, что данный инженерный метод, вследствие неучета влагонасыщенности и степени консолидации грунтов, дает завышенные значения коэффициента устойчивости в части оценки механической устойчивости дамбы.

Для насыпных конструкций более целесообразно определять коэффициент надежности (устойчивости, безопасности), который дается в классической механике грунтов и представляет собой отношение имеющейся сдвиговой прочности к минимальной сдвиговой прочности, необходимой для равновесия. Поэтому для низовой дамбы и дамбы вторичного отстойника была выполнена интегральная оценка надежности (механическая и противифльтрационная устойчивость с учетом прочностных характеристик, пластичности, вязкости грунтов, а также активного порового давления воды) на основе объемного компьютерного моделирования Plaxis 3D.

Plaxis 3D использует для вычисления этого коэффициента метод phi-reduction (снижение параметров прочности грунта). В используемом методе оценки безопасности прочностные характеристики грунта $\tan\phi$ (угол внутреннего трения) и c (сцепление) последовательно уменьшаются до тех пор, пока не происходит разрушение сооружения.

Как было сказано ранее (см. гл. 2), коэффициент надежности $\sum Msf$ используется для определения параметров прочности грунта на текущем этапе расчета:

$$\sum Msf = \frac{\tan\phi_{input}}{\tan\phi_{reduced}} = \frac{c_{input}}{c_{reduced}} = \frac{S_{u,input}}{S_{u,reduced}},$$

где параметры прочности с индексом “input” относятся к свойствам, заданным в наборах данных по материалам, а параметры с индексом “reduced” — к сниженным значениям параметров, используемым в расчетах.

$$SF = \frac{\text{существующая прочность}}{\text{прочность при разрушении}} = \text{величина } \sum Msf \text{ при разрушении.}$$

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

Во время расчета коэффициента надежности генерируются дополнительные перемещения, которые не имеют физического смысла, однако приращения перемещений, полученные на последнем шаге (при наступлении разрушения), используются в расчетах (рис. 7.2).

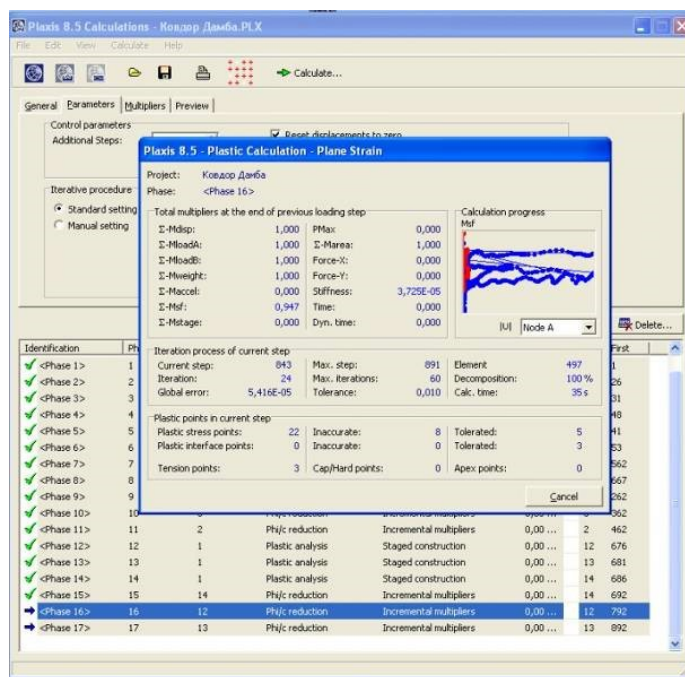


Рис. 7.2. Расчет коэффициента надежности в программе Plaxis 3D

Результаты расчетов коэффициента надежности при различных размерах зоны и скорости фильтрации приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Расчетные значения коэффициента надежности
при различных размерах зоны и скорости фильтрации

№ варианта	Размер зоны фильтрации		
	минимальный	средний	максимальный
	коэф. надежности $\sum Msf$	коэф. надежности $\sum Msf$	коэф. надежности $\sum Msf$
1	1,07	1,18	1,01
2	1,07	1,18	1,02
17	0,71	1,03	0,43
18	0,95	1,03	0,44
21	0,88	1,01	0,46
31	0,71	1,03	0,52
34	0,71	1,02	0,51

Приняв за основу вышеописанные методические подходы, также выполнен расчет коэффициента надежности уступов дамб № 1 и 4 АО «Ковдорский ГОК» при различных уровнях заполнения хвостохранилища (табл. 7.4, 7.5).

Таблица 7.4

Расчетные коэффициенты безопасности уступов дамбы № 1 АО «Ковдорский ГОК»
при различных уровнях воды в хвостохранилище

№	Уровень воды	Коэффициент безопасности $\sum Msf$
1	1	0,981
2	2	0,928
3	3	1,023
4	4	0,95
5	5	1,053
6	6	0,996
7	7	0,979

Таблица 7.5

Расчетные коэффициенты безопасности уступов дамбы № 4 АО «Ковдорский ГОК»
при различных уровнях воды в хвостохранилище

№	Уровень воды	Коэффициент безопасности $\sum Msf$
1	Минимальный	1,833
2	Уровень ПДЗ-1	1,654
3	Уровень ПДЗ-2	1,308
4	Максимальный	1,063

7.2. Способ оценки надежности ограждающей дамбы хвостохранилища на основе георадарных и компьютерных исследований

На основании выполненных исследований разработан способ оценки надежности (устойчивости, безопасности) ограждающей дамбы хвостохранилища, реализующий алгоритм обеспечения условий устойчивости для формирующейся круглоцилиндрической зоны ослабления нижнего откоса с учетом данных о положении депрессионной плоскости, получаемых в результате комплексного анализа георадарных и пьезометрических измерений и компьютерного моделирования функционального состояния системы «хвостохранилище – ограждающая дамба» в упруго-пластической постановке.

Система ограждающих дамб и хвостохранилище представляют собой ответственное гидротехническое сооружение, эксплуатация которого должна выполняться в строгом соответствии с требованиями промышленной безопасности (117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений», СП 58.13330.2019. «Свод правил. Гидротехнические сооружения»). Нарушение устойчивости и функциональности ограждающих дамб может привести к аварийной ситуации и значительному социально-экономическому ущербу, заключающемуся в финансовых потерях (недополученная прибыль вследствие остановки фабрики), дополнительных затратах (ремонтно-восстановительные работы: дамб, пульпопроводов, дорог, линий электропередач, пьезометрических станций, устройств и механизмов и др.; ликвидация последствий аварии; восстановление окружающих природных систем) и штрафов за загрязнение окружающей среды и экологический ущерб. Поэтому важное значение приобретает оценка надежности (безопасности, устойчивости) уступов нижнего склона дамбы.

Комплексный анализ выполненных георадарных исследований состояния дамб, измерений на имеющихся пьезометрических станциях и компьютерного моделирования гидротехнической системы «хвостохранилище – ограждающие дамбы» позволил выявить закономерности формирования в нижнем склоне откосов дамбы круглоцилиндрической поверхности ослабления, обусловленную положением депрессионной поверхности (рис. 7.3).

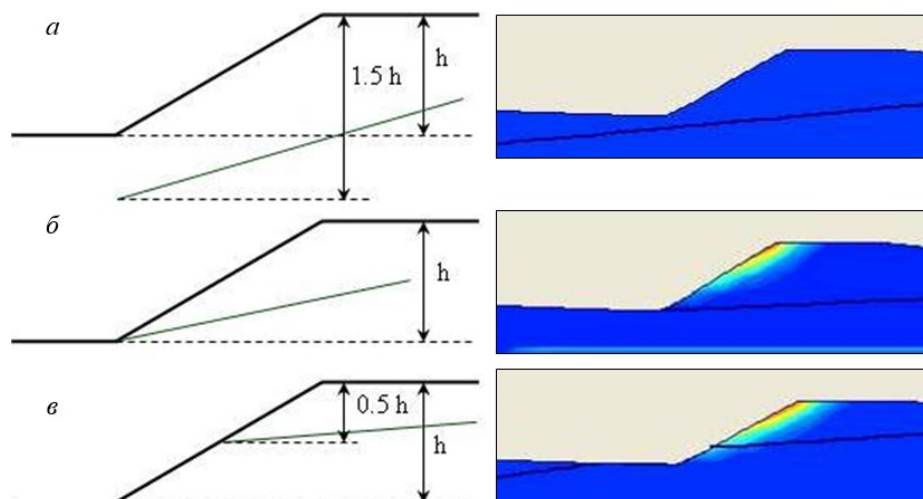


Рис. 7.3. Формирование зоны ослабления уступа дамбы в зависимости от положения депрессионной поверхности грунтовых вод: *а* — $\Delta h/h = 1,5$; *б* — $\Delta h/h = 1$; *в* — $\Delta h/h = 0,5$

Реализовав в упруго-пластической модели условие устойчивости для круглоцилиндрической зоны ослабления: $K_{уст} = \frac{\sum M_{уд.}}{\sum M_{сдв.}}$ (как механическое соотношение удерживающих и сдвигающих сил), с учетом водонасыщенной и сухой масс и их свойств (пропорциональное соотношение угла трения и сцепления) $K_{уст} = \frac{(N_d^H + N_d^C - P) \cdot \text{tg} \varphi + C + P_0 R_0 / R}{G_n R_d^H / R + G_n R_d^C / R}$ определены коэффициенты надежности (безопасности, устойчивости) ограждающей дамбы для различных случаев плоскости депрессионного зеркала (см. п. 7.1).

По результатам комплексных расчетов установлена зависимость коэффициента надежности (безопасности, устойчивости) ограждающей дамбы от положения депрессионной плоскости (рис. 7.4), которая имеет аналитический вид: $K_{\text{над}} = 0,75 e^{0,4 \cdot (\Delta h/h)}$, при достоверности $R^2 = 0,83$.

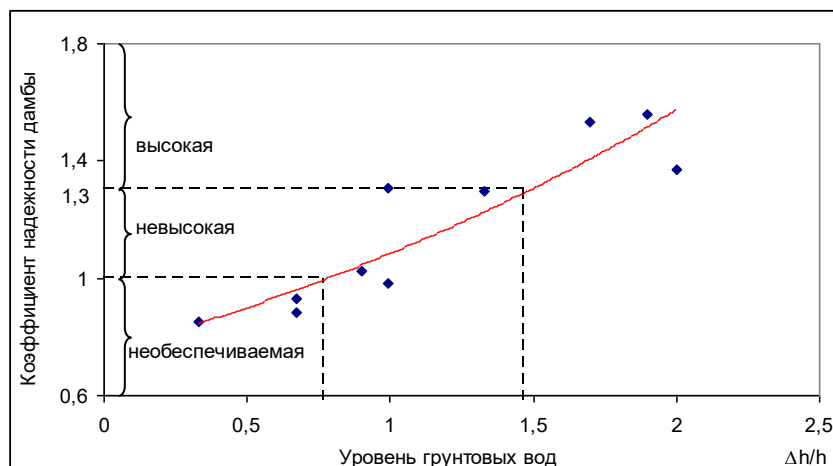


Рис. 7.4. Зависимость коэффициента надежности (устойчивости, безопасности) ограждающей дамбы от положения депрессионной плоскости

Для практических целей оценку надежности (безопасности, устойчивости) ограждающей дамбы рекомендуется выполнять на основе следующих работ и измерений:

- 1) георадарными и пьезометрическими измерениями определяется глубина уровня грунтовых вод от поверхности уступа;
- 2) строится депрессионная плоскость;
- 3) определяется положение депрессионной плоскости в долях от высоты уступа ($\Delta h/h$);
- 4) выполняется районирование уступа по $\Delta h/h$ с детализацией 0,5;
- 5) для выделенных участков с использованием зависимости коэффициента надежности (устойчивости, безопасности) ограждающей дамбы (рис. 9.4) или по формуле определяется $K_{\text{над}}$;
- 6) надежность ограждающей дамбы классифицируется: высокая (при $K_{\text{над}} > 1,3$); невысокая (при $1,3 > K_{\text{над}} > 1,0$) и необеспечиваемая (при $K_{\text{над}} < 1,0$).

7.3. Обоснование применения противофильтрационного экрана

Обоснование применения и параметров противофильтрационного экрана выполнено для низовой дамбы хвостохранилища ГОК «Олений ручей», фильтрационная устойчивость которой, как установлено режимными мониторинговыми наблюдениями, не обеспечивается в должной мере.

Для этих целей в программном комплексе Plaxis выполнено моделирование текущего состояния дамбы и предлагаемого сооружения противофильтрационного экрана по центру ее гребня (другие варианты расположения экрана изначально показали их недостаточную эффективность). При этом к обязательному учету принимались характеристики слоев грунта в нижележащем основании, включая их водонасыщенность/водопроницаемость.

На рисунке 7.5 представлены расчетные схемы дамбы без экрана (рис. 7.5 а) и с экраном на различную глубину: до основания — 17 м; включая приповерхностный водонасыщенный слой — 22 м; до слоя с относительно низкой проницаемостью — 28 м (рис. 7.5 б, в, г). Расчетные схемы учитывают горно-геологические свойства материалов дамбы и подстилающих пород. Для всех схем задавались одинаковые гидравлические условия.

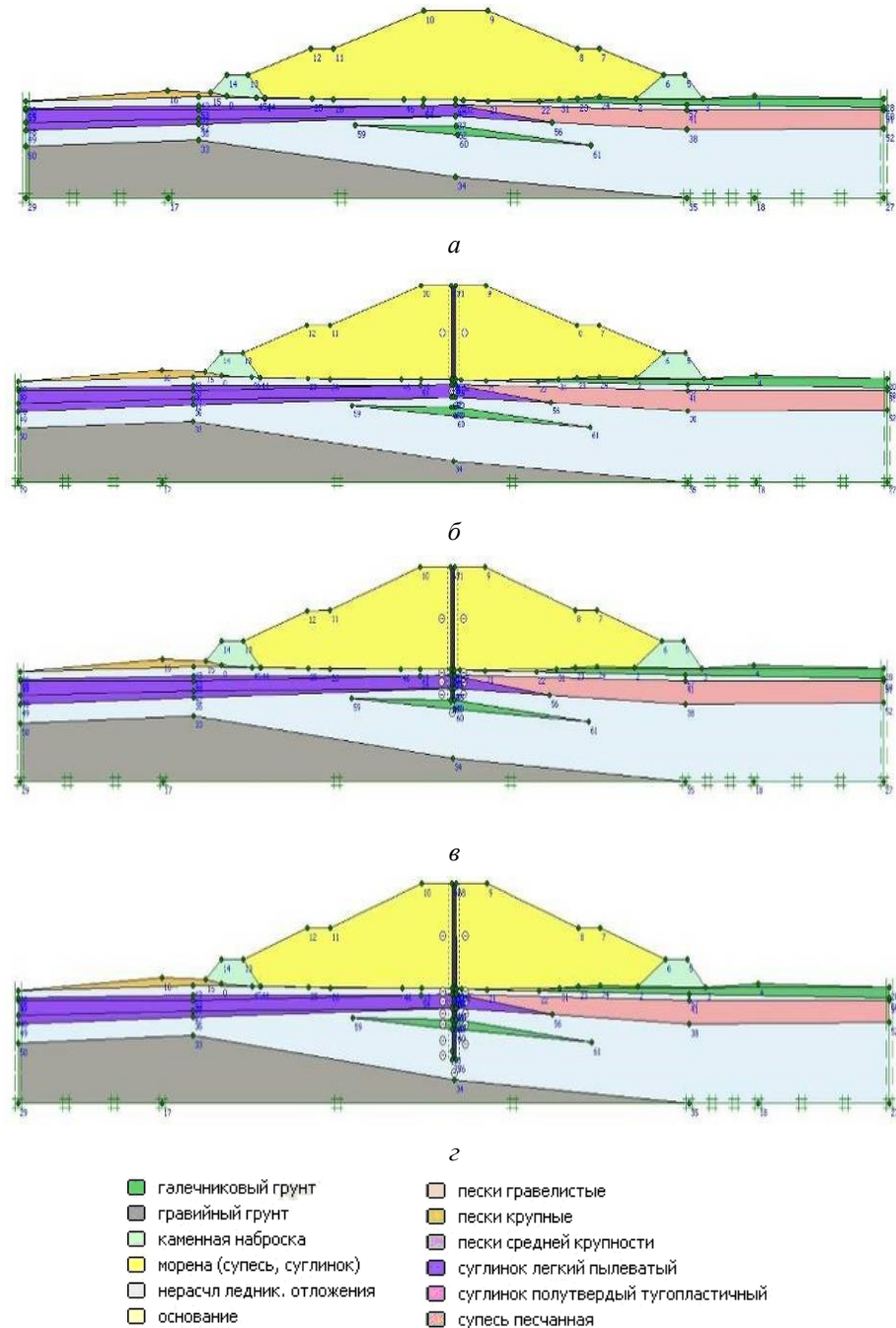


Рис. 7.5. Моделирование противифльтрационного экрана по гребню дамбы: *а* — без экрана; *б* — с экраном 17 м; *в* — с экраном 22 м; *г* — с экраном 28 м

В результате моделирования были получены картины распределения поля фильтрации в теле дамбы без экрана (рис. 7.6 *а*) и с экраном различной глубины (рис. 7.6 *б, в, г*). Поле фильтрации характеризует депрессионную кривую в теле дамбы, а также величину расхода воды в узлах сетки конечных элементов.

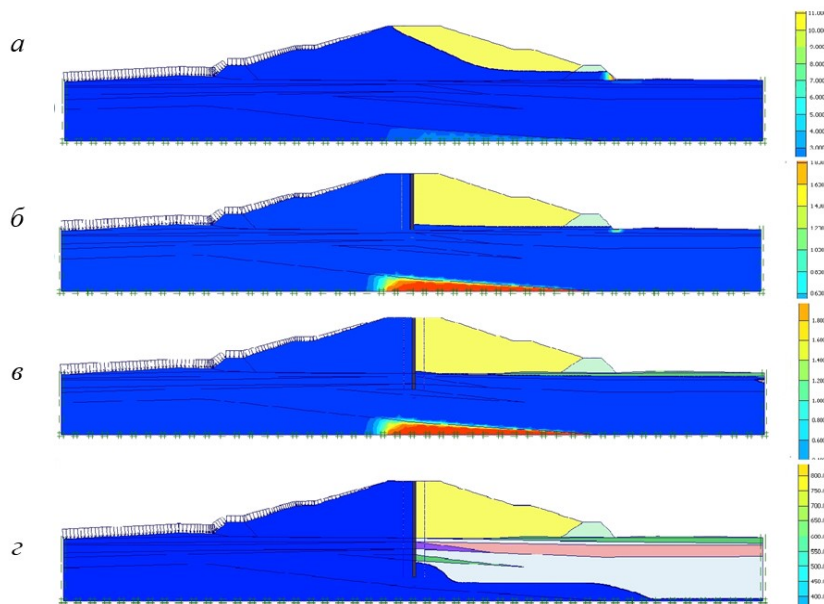


Рис. 7.6. Поле фильтрации: *а* — без экрана; *б* — с экраном 17 м; *в* — с экраном 22 м; *г* — с экраном 28 м

Из рисунка 7.6 следует, что экран существенно влияет на распределение поля фильтрации в теле дамбы. С помощью компьютерного моделирования можно оценить не только влияние экрана на поле фильтрации, но и найти его оптимальные размеры. Так, экран глубиной 17 м уменьшает фильтрацию в теле дамбы, но не исключает ее полностью, поэтому не может быть признан эффективным в данных условиях (рис. 7.6 *б*). В результате затраты на сооружение такого экрана оказались бы напрасными, т. к. фильтрация в теле дамбы осталась, т. е. цель по повышению противофильтрационной устойчивости не была бы достигнута.

При глубине экрана до 22 м происходит уменьшение поля фильтрации ниже уровня основания дамбы (рис. 7.6 *в*). Экран такой глубины может быть признан эффективным в идеальных условиях, однако существует риск повышения уровня фильтрующихся вод при увеличении фильтрационной нагрузки на дамбу в результате изменения технических условий, дождей, таяния снега и т. д. Также необходимо обратить внимание на распределение поля фильтрации по основанию тела дамбы, что может негативно сказаться на ее устойчивости, поэтому экран глубиной 22 м также не может быть признан безопасным.

При увеличении глубины экрана до 28 м прогнозируется значительное падение уровня фильтрующихся вод (рис. 7.6 *г*). Это связано с конкретными гидрогеологическими условиями подстилающего массива пород, а именно наличием двух геологических слоев, сложенных породами с высоким коэффициентом фильтрации. Он перекрывает оба водопроницаемых слоя, тем самым ограничивая фильтрацию вод через эти слои в область, защищаемую дамбой. Поэтому экран глубиной 28 м будет являться достаточным и эффективным, в наиболее полной мере соответствуя поставленной цели повышения противофильтрационной устойчивости дамбы.

Таким образом, компьютерное моделирование в среде Plaxis является методом, с помощью которого можно оценить влияние противофильтрационных устройств в различном исполнении на уровень фильтрующихся вод и на устойчивость гидротехнического сооружения в целом. Немаловажным его преимуществом является возможность учета не только свойств пород, слагающих гидротехническое сооружение, но и свойств, а также фильтрационных характеристик, подстилающих пород, что позволяет более точно изучить происходящие процессы и выработать наилучшее решение для каждой конкретной ситуации.

7.4. Обоснование комплексных инженерных решений и мероприятий по повышению устойчивости ограждающих дамб хвостохранилищ

В силу известных факторов: простота конструкции, широкое использование местных строительных материалов, возможность постройки почти на любых основаниях — насыпные ГТС получили широкое повсеместное распространение. Использование местных материалов делает эти сооружения, являющиеся, по сути, линейными протяженными объектами, исключительно дешевыми, но вместе с тем фильтрационные свойства слагающих их материалов не всегда обеспечивает основное назначение — противофильтрационное ограждение. Для повышения их противофильтрационных свойств применяют различные дренажные устройства, противофильтрационные мероприятия и средства.

В настоящее время в мире создано значительное количество методов повышения противофильтрационной устойчивости ограждающих насыпных линейных протяженных объектов. Вместе с тем это разнообразие ставит перед проектировщиками и инженерами задачу по выбору оптимальных методов для каждого конкретного случая, в зависимости от условий эксплуатации объекта, его назначения и текущего состояния. Также при выборе и обосновании средств противофильтрационной защиты необходимо учитывать природно-климатические и горно-геологические условия, в которых находится или будет находиться объект. Особенно данная проблема актуальна в районах Крайнего Севера, характеризующихся исключительно тяжелыми природно-климатическими условиями. Еще одним важным фактором, обуславливающим особое внимание к районам Крайнего Севера, является уязвимость природных систем и низкие скорости их восстановления.

Среди всех регионов, относящихся к Крайнему Северу, особое место занимает Мурманская область. Во-первых, она обладает всеми слабыми сторонами, характерными для таких районов. Во-вторых, на ее территории находится большое число возможных источников техногенного загрязнения: крупные горнопромышленные комплексы, объекты атомной энергетики и флота, транспортные терминалы (в том числе предназначенные для обработки транспортных потоков нефтепродуктов). В большинстве из этих секторов промышленности Мурманской области используются ограждающие ГТС, поэтому проблема их противофильтрационной защиты исключительно важна.

Согласно СП 39.13330.2012 [287], основа противофильтрационной устойчивости плотин или дамб закладывается при проектировании в виде обоснованного выбора положения створа плотины или дамбы. Существуют различные варианты их типов и видов. В табл. 7.6 и на рис. 7.7 приведены основные типы и виды земляных плотин, применяемые в северной климатической зоне.

Таблица 7.6

Основные типы и виды земляных плотин [287]

Тип плотины	Элементы плотины	Вид плотины
Земляная насыпная талая	Тело	однородная (рис. 7.7 а), с грунтовым экраном (рис. 7.7 б), с ядром (рис. 7.7 в), с центральной призмой (рис. 7.7 г), с диафрагмой (рис. 7.7 д), с экраном из негрунтовых материалов (рис. 7.7 е)
	Противофильтрационное устройство в ее основании	с зубом (рис. 7.7 б, в, е), с инъекционной (цементационной) завесой (рис. 7.7 е), со стенкой, шпунтом (рис. 7.7 д)
Земляная насыпная мерзлая	Тело	однородная с мерзлотной завесой (рис. 7.7 ж), с ядром и с мерзлотной завесой (рис. 7.7 з), с центральной призмой и с мерзлотной завесой (рис. 7.7 и)
	Противофильтрационное устройство в ее основании	с мерзлотной завесой (рис. 7.7 ж, з, и), с зубом и мерзлотной завесой (рис. 7.7 з)

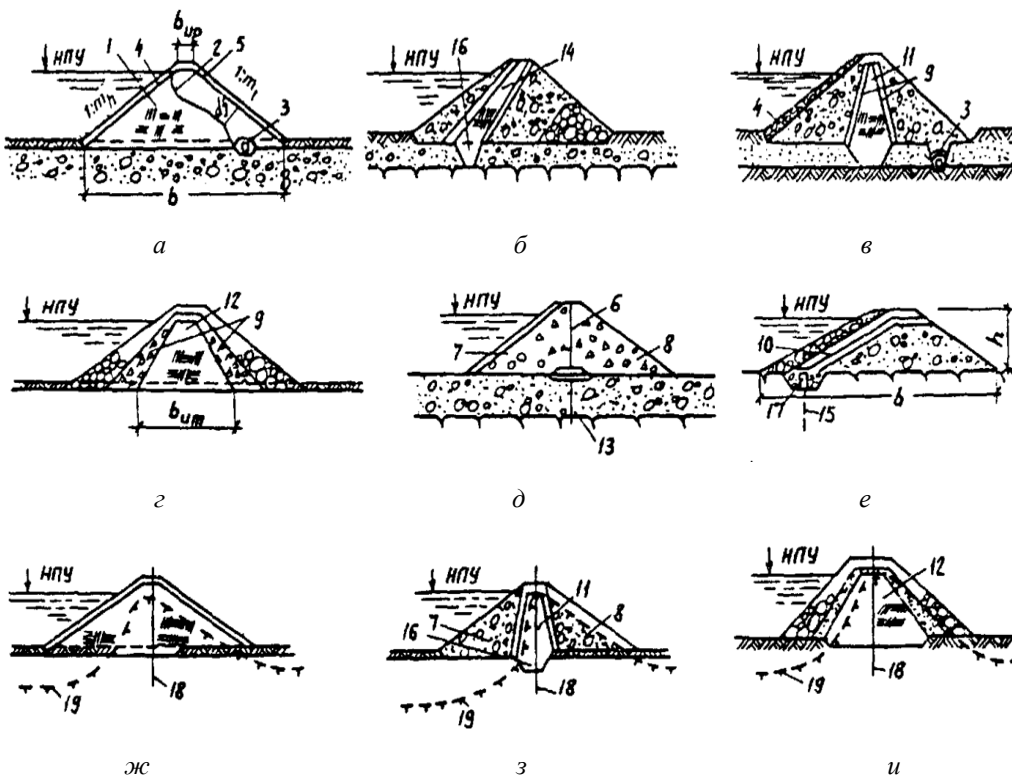


Рис. 7.7. Типы и виды земляных насыпных плотин, возводимых в северной климатической зоне: а-и — см. табл. 6.6; 1 — тело плотины; 2 — поверхность депрессии; 3 — дренаж; 4 — крепление откосов; 5 — теплоизоляционный слой; 6 — диафрагма; 7 — верховая призма; 8 — низовая призма; 9 — переходный слой; 10 — экран из негрунтовых материалов; 11 — грунтовое ядро; 12 — центральная грунтовая противофильтрационная призма; 13 — шпунт или стенка; 14 — грунтовый экран; 15 — инъекционная (цементационная) завеса; 16 — зуб; 17 — цементационная галерея; 18 — замораживающая система; 19 — линия раздела талого и мерзлого грунтов; h — высота плотины; b — ширина плотины понижу; $b_{ум}$ — ширина противофильтрационного устройства понижу; $b_{гр}$ — ширина плотины по гребню; m_n — коэффициент верхового откоса; m_i — коэффициент низового откоса [287]

На этапе проектирования, наряду с обеспечением их функциональности, одни из ключевых ролей играют технико-экономические параметры приведенных видов и типов плотин. Зачастую подобный подход, основанный прежде всего на экономических показателях, не обеспечивает учет всех нюансов свойств материалов, горно-геологической обстановки и природно-климатических факторов. Это приводит к тому, что противofильтрационные свойства объекта не полностью соответствуют заданным величинам, что может нести угрозу для самого объекта, прилегающей территории и окружающей среде.

В связи с этим уже при эксплуатации возникает необходимость повысить противofильтрационные свойства оперативными методами без внесения существенных изменений в его конструкцию. Подобные методы можно разделить на две категории:

- 1) повышение противofильтрационных свойств материала плотин;
- 2) использование изолирующих покрытий.

К группе методов повышения противofильтрационных свойств материала ГТС относятся:

метод уплотнения пород. Он основан на принципе повышения противofильтрационных свойств материалов при их уплотнении, которое может производиться как механическим способом, так и с применением энергии взрыва;

термическая обработка заключается в обработке материала дамб и плотин горячими газами. Часто газы дополнительно обогащают различными химическими соединениями [13];

электрохимическое закрепление пород. Оно основано на воздействии на обводненные породы постоянного тока или электрического поля. Выделяют следующие методы электрохимического укрепления [13]:

- электроосмотическое обезвоживание;
- электрохимическое закрепление;
- электроосмос;

методы физико-химического закрепления пород. Закрепление осуществляется нагнетанием в грунт под давлением через скважины-инъекторы маловязких химических растворов, а также воздействием на грунт электрического тока, нагреванием и охлаждением. Химические растворы с течением времени затвердевают, консолидируя водопроницаемый грунт. По химическому составу и количеству компонентов выделяют следующие физико-механические методы закрепления [13]:

- цементация;
- двухрастворная силикатизация;
- однорастворная силикатизация;
- применение глинисто-силикатных растворов;
- газовая силикатизация;
- смолизация.

Данные методы имеют ряд недостатков, которые могут проявиться в северных природно-климатических условиях. Северная природно-климатическая зона характеризуется низкими температурами на протяжении большей части года, распространением очагов вечной мерзлоты. Это следует учитывать при планировании увеличения противofильтрационной устойчивости перечисленными методами. Так, термическая обработка пород насыпных ГТС может привести к изменению и разрушению температурного режима сооружения, что может привести к неконтролируемому изменению его фofильтрационной устойчивости. Также при соприкосновении раскаленных газов, обогащенных различными химическими веществами, с очагами мерзлоты в теле ГТС или сопряженном массиве пород начнется повышенное осаждение частиц реагента. Вследствие этого образуется неоднородность фofильтрационных свойств в теле дамбы или плотины, что может негативно сказаться на ее устойчивости. Также данная проблема актуальна и для электрохимического закрепления пород.

При физико-механическом закреплении пород следует учитывать низкие температуры, характерные для условий Крайнего Севера, которые замедляют химические реакции. Так, в соответствии с правилом Вант-Гоффа при температурах от 10 до 400° при уменьшении температуры среды на 10° скорость химических реакций снижается в 2–4 раза.

Отдельно среди методов повышения противofильтрационных свойств материала плотин стоит выделить использование геокриогелевых конструкций. Принцип действия данного метода основан на использовании грунтово-криогелевых составов, получаемых на основе водного раствора поливинилового спирта [292]. При замораживании и последующем оттаивании они превращаются в водонепроницаемый гель. При повторении циклов замораживания – оттаивания, в отличие от других природных материалов, прочностные свойства грунтово-криогелевых массивов растут. Этот факт делает данный метод повышения противofильтрационных свойств плотин весьма перспективным при использовании в северной природно-климатической зоне.

Методы, основанные на использовании изолирующих покрытий, заключаются в обработке поверхностей сооружений материалом, обеспечивающим защиту от агентов выветривания и воды. В качестве изолирующих материалов традиционно применяют бетон, полимерные материалы, битумы.

В последнее время среди изолирующих покрытий широкое распространение получили бентонитовые геосинтетические маты (рис. 7.8). Они отличаются простотой в использовании и высокими изоляционными свойствами. Они способны выдерживать значительные растягивающие напряжения, имеют однородное распределение противofильтрационных свойств и значительные сроки службы [293, 294]. Данные методы одинаково эффективно работают в широком спектре температур, что позволяет успешно использовать их в условиях Крайнего Севера.



Рис. 7.8. Примеры использования бентонитовых геосинтетических матов (Использованы фотографии с сайта <https://geomembrana.lc-umi.ru/>)

Особый класс изолирующих покрытий составляет геотекстиль. Принцип действия данного материала основан на свойстве бентонита натрия при полной гидратации разбухать и увеличиваться в объеме до 20–30 раз. Гранулы бентонита, равномерно распределенные в пространстве между двумя слоями иглопрошивного каркаса, имеют ограниченное пространство, благодаря чему под воздействием воды образуется гель, который находится в напряженном состоянии и создает полностью водонепроницаемый слой (рис. 7.9).

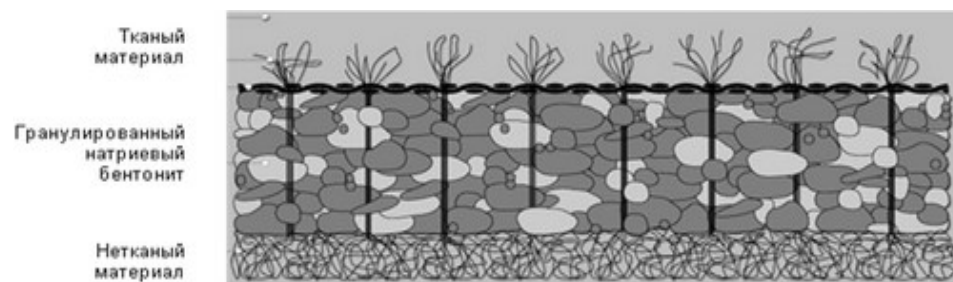


Рис. 7.9. Конструкция геотекстильного полотна [293, 294]

Как видно из приведенной информации, существует огромное количество способов и методов повышения противофильтрационной устойчивости насыпных ГТС. Многие из этих способов кардинально отличаются друг от друга как по характеру работы, степени изоляции, влиянию на гидротехническое сооружение и сопряженный массив пород, так и по методам расчета и контролируемым параметрам. Данные различия делают задачу сравнения различных способов и выбора оптимального варианта для каждого конкретного случая чрезвычайно сложной и трудновыполнимой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение и контроль гидрогеомеханического состояния действующих хвостохранилищ горнодобывающего предприятия по-прежнему остается одной из актуальных проблем в задачах обеспечения их промышленной безопасности и функциональности. Применение многоуровневых комплексных исследований и мониторинга при достаточной методической и технической проработке позволяет получить более полную, детализированную и иерархически структурированную информацию о контролируемом объекте. Вопросам развития методологических основ многоуровневых исследований и мониторинга хвостохранилищ, реализующих оптимальное комплексирование мультидисциплинарных методов и способов наблюдений в комбинациях на различных уровнях от дневной поверхности, и посвящена настоящая монография.

Более чем 10-летний опыт авторов и результаты комплексного изучения и мониторинга на хвостохранилищах обогатительных фабрик всех горнодобывающих предприятий Кольского полуострова однозначно подтверждают эффективность и информативность такого подхода. Для натурных многоуровневых комплексных измерений были созданы наблюдательные полигоны, а для моделирования — компьютерные гидрогеомеханические 3D-модели фрагментов хвостохранилищ.

В книге получили развитие методические подходы к исследованию хвостохранилищ как природно-технических водонасыщенных систем западной части Российского сектора Арктики, при этом важной методической особенностью являлась 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 разработана концепция и предложена системная структура комплексного мониторинга хвостохранилищ горнодобывающих предприятий, позволяющая использовать, наряду с уже ставшими традиционными (геотехнические измерения, геодезические наблюдения, сейсмические, лазерные методы, аэрофотосъемка), новые методы измерений и исследований такие, как: георадарное подповерхностное зондирование, спутниковые оптические и радарные снимки, GPS-технологии, а также компьютерное гидрогеомеханическое моделирование, что создает научно-техническую основу для выявления опасных фильтрационно-деформационных процессов на ранних стадиях их развития и обоснования принятия своевременных решений по инженерно-защитным мероприятиям.

Мониторинговые наблюдения на хвостохранилищах горнодобывающих предприятий в Евро-Арктическом регионе имеет свои особенности, заключающиеся в полярно-климатических условиях, длительных неблагоприятных для наблюдений периодов, больших объемах осадков, длительности и высоты снежного покрова, интенсивности и направлении ветров, высотно-широтных природных электромагнитных полей, длительных периодах атмосферной прозрачности и интенсивной облачности и др. Поэтому авторами определены периоды и условия, благоприятные для проведения необходимых мониторинговых наблюдений, выполнено обоснование применения методов исследований и наблюдений хвостохранилищ на различных этапах многоуровневого мониторинга, соотнесенных с дневной поверхностью.

Подповерхностный уровень (подповерхностные определения) включает в себя георадарное зондирование, микросейсмопрофилирование, измерения в пьезометрических скважинах и в прудке-отстойнике хвостохранилища. Поверхностный уровень (наземные наблюдения и измерения) основан на визуальных наблюдениях, фотофиксации, классической геодезии (полигонометрия и нивелирование, высокоточном позиционировании с использованием GPS-геодезии). Воздушный уровень базируется на аэрофотосъемке с БПЛА. Спутниковый уровень (дистанционный контроль) включает в себя анализ, обработку и интерпретацию оптических, мультиспектральных и радарных спутниковых снимков «Роскосмоса» и Европейского космического агентства. Виртуальный уровень основан на гидрогеомеханическом 3D-моделировании ситуационного и прогнозного состояния хвостохранилища.

Разработаны методические основы эффективного комплексирования мультидисциплинарных методов как на одном, так и на разных уровнях для целей мониторинга хвостохранилища, 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.

На основе комплексирования данных георадарных, гидрогеологических, геофизических и инженерно-геологических исследований и спутниковых снимков раскрыт механизм инфильтрации из отстойника промышленных вод в основной карьер АО «Ковдорский ГОК», реализующийся в формировании в теле ограждающей насыпной дамбы трех линзообразных зон с повышенными фильтрационными характеристиками. Установление механизма и локализация зон повышенной инфильтрации позволили обосновать инженерно-технические противофильтрационные решения, которые были включены в основу проекта по обеспечению безопасности ведения открытых горных работ и модернизации сети промышленного гидрогеологического мониторинга.

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», 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.

На основе 4D-моделирования (с учетом фактора времени) установлены закономерности развития фильтрационно-деформационных процессов в гидротехнической системе хвостохранилища как сложной открытой водонасыщенной природно-технической системы, что формирует теоретическую основу оценки механической устойчивости ограждающих дамб хвостохранилищ. Установлено, что основное упрочнение грунтов

происходит в первые 1–5 дней, в течение которых скорость уплотнения структурных частиц снижается от 3–6 до 1 см/сут с последующим затуханием и соответствующим снижением фильтрационных процессов. Выявлено, что полное затухание фильтрационно-деформационных процессов происходит на 80–85 день, что предопределяет основу для практических рекомендаций по срокам следующего этапа наращивания дамб.

На основе гидрогеомеханического 3D-моделирования паводкового заполнения хвостохранилища ГОКа «Олений ручей» выявлены закономерности перераспределения градиентов гидравлического напора, определяющие формирование депрессионной поверхности дренирующейся сквозь тело ограждающей дамбы воды, что позволило выполнить оценку фильтрационной устойчивости дамбы посредством сопоставления рассчитанных и критериальных значений показателя надежности для сооружения с категорией II класса опасности в евро-арктических условиях.

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 размыв 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 ГТС 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, которая 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. Она 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 направлению 1.5.7.3. Развитие методов мониторинга развития опасных техногенных процессов; обеспечение безопасного ведения горных работ Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2021–2030 гг.

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. СП 58.13330.2019. Свод правил. Гидротехнические сооружения. М.: Стандартинформ, 2020.
2. Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений» от 23 июня № 117-ФЗ. 1997.
3. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2017 году. 2018. 165 с. URL: https://gov-murman.ru/upload/iblock/665/Doklad_zh-2017-god.pdf (дата обращения: 05.10.2018).
4. Загрязнение питьевой воды птицефабрикой «Мурманская». 2005. URL: <http://www.murman.ru/themes/farm-regnum.shtml> (дата обращения: 15.04.2016).
5. Мониторинг состояния ограждающей дамбы в зоне отработки техногенного месторождения Ковдорского ГОКа / А. А. Данилкин, А. И. Калашник, Д. В. Запорожец, Д. А. Максимов // ГИАБ. 2014. № 7. С. 344–351.
6. Гальперин, А. М. Техногенные массивы и охрана окружающей среды / А. М. Гальперин, В. Ферстер, Х.-Ю.Шеф. М.: Изд. Московского гос. горного ун-та, 2001. 534с.
7. Амосов, П. Численное моделирование процессов пыления хвостохранилищ / П. Амосов, А. Бакланов, О. Ригина. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. 109 с.
8. Ранкс, К. Сточные воды «Талвишаары» остановлены // Финские страницы на Фонтанке.ру 2012. URL: <http://fontanka.fi/articles/7736/> (дата обращения: 15.04.2016).
9. Абрамов, В. В. Проблемы защиты окружающей среды. 2010. URL: http://secandsafe.ru/pravovaya_baza/blogi/ekologicheskaya_bezopasnost/-problemy_zaschity_okrujayuschey_prirodnoy_sredy_v_rossii (дата обращения: 05.10.2018).
10. Айрапетян, Р. А. Причины аварий и повреждений плотин и их предупреждение. 1975. URL: <http://engineering-systems.ru/proektirovanie-kamennno-zemljanih-plotin/prichiny-avariy.php> (дата обращения: 05.10.2018).
11. Ritcey, G. M. Tailings management. Elsevier – Amsterdam – Oxford – New-York – Tokyo, 1989. 970 p.
12. Радченко, В. Г. Ремонт плотин из грунтовых материалов в случае нарушения фильтрационной прочности / В. Г. Радченко, С. В. Радченко // Гидротехническое строительство. 2011. № 5. С. 20–26.
13. Гальперин, А. М. Геомеханика открытых горных работ: учебник для вузов. М.: Изд. Московского гос. ун-та, 2003. 473 с.
14. Технологическая схема горнодобывающего предприятия. URL: <http://www.mining-enc.ru/> (дата обращения: 26.03.2021).
15. Mineral commodity summaries. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2018. 200 p.
16. Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation / D. Kossoff, W. E. Dubbin, M. Alfredsson [et al.] // Applied Geochemistry. 2014. Vol. 51. P. 229–245.
17. Tailings Dams — risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences, United Nations Environmental Programme (UNEP), Division of Technology, Industry and Economics (DTIE) and International Commission on Large Dams (ICOLD). Paris, 2001. Bulletin 121. 144 p.
18. Reported tailings dam failures / M. Rico, G. Benito, A.R. Salgueiro [et al.] // Journal of Hazardous Materials. 2008. Vol. 152. No. 2. P. 846–852.
19. Tailings info. Tailings Related Accidents-Failures. Breaches and Mudflows. 2018. URL: <https://www.tailings.info/> (дата обращения: 26.03.2021).
20. Bowker, L. N. The risk, public liability, and economics of tailings storage facility failures / L. N. Bowker, D. M. Chambers // Earthwork Act. 2015. P. 1–56.
21. World Mine Tailings Failures. 2018. URL: <http://Worldminetailingsfailures.org> (дата обращения: 26.09.2021).

22. 11 самых ужасных аварий на дамбах в мире. 2017. URL: <https://www.vestifinance.ru/articles/81282> (дата обращения: 12.02.2021).
23. Лескина, В. Хвостохранилища без аварий — химера? 2015. URL: <https://zen.yandex.ru/media/dpromonline/hvostohranilisca-bez-avarii--himera-5c1324f2eaf0a500aa6a12ac> (дата обращения: 12.02.2021).
24. WISE World Information Service on Energy Uranium Project. Chronology of major tailings dam failures. URL: <https://wise-uranium.org/mdaf.html> (дата обращения: 22.03.2021).
25. Gilyarova, A. A. Feasibility study of geo-engineering investigations of mine tailings conditions / A. A. Gilyarova, A. I. Kalashnik, O. V. Smirnova // Journal of International Scientific Publication: Ecology & Safety. 2016. Vol. 10. P. 377–383.
26. Максимов, Д. А. Экономические тенденции изысканий и мониторинга накопителей жидких горнопромышленных отходов в Арктической зоне для целей декларирования их промышленной безопасности / Д. А. Максимов, А. И. Калашник // Север и рынок. 2018. № 1 (57). С. 74–85.
27. Мельников, Н. Н. Применение современных методов для комплексных исследований состояния гидротехнических сооружений региона Баренцева моря / Н. Н. Мельников, А. И. Калашник, Н. А. Калашник, Д. В. Запорожец // Вестник МГТУ. 2017. Т. 20, № 1. С. 13–20.
28. Калашник, А. И. Идентификация фильтрационно-деформационных процессов в теле ограждающей дамбы хвостохранилища / А. И. Калашник, Д. В. Запорожец, Н. А. Калашник // Вестник КНИЦ. 2013. № 2. С. 13–17.
29. Калашник, А. И. Исследование состояния насыпного гидротехнического сооружения на моренном основании / А. И. Калашник, Н. А. Калашник, Д. В. Запорожец // Ученые записки ПетрГУ. Серия: Естественные и технические науки. 2014. № 6 (143). С. 92–98.
30. A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History / Z. Lyu, J. Chai, Z. Xu [et al.] // Advances in Civil Engineering. Vol. 2019, Article ID 4159306. URL: <https://www.hindawi.com/journals/ace/2019/4159306/> (дата обращения: 22.03.2021).
31. Dobry, R. Seismic failures of Chilean tailings dams / R. Dobry, L. Alvarez // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 1967. Vol. 93. P. 237–260.
32. Davies, M. Mine tailings dams: when things go wrong / M. Davies, T. Martin, P. Lighthall // Tailings Dams. 2000. P. 261–273.
33. Robinson, K. E. Case histories of different seepage problems for nine tailings dams / K. E. Robinson, G. C. Toland // Mine Drainage. 1979. P. 781–800.
34. Design, construction and management of tailings storage facilities for surface disposal in China: case studies of failures / Z. Wei, G. Yin, J.G. Wang [et al.] // Waste Management & Research. 2013. Vol. 31. No. 1. P. 106–112.
35. Rudolph, T. Implications of earthquakes on the stability of tailings dams / T. Rudolph, W. Coldewey. 2012. URL: http://www.pebblescience.org/OLD-SITE/pdfs/Tailings_dam.pdf.
36. McLean, I. Aberfan: Government and Disasters / I. McLean, M. Johnes // Welsh Academic Press, Cardiff, UK. 2000.
37. Wood, H. Disasters and Minewater / H. Wood // IWA Publishing, London, UK. 2012.
38. Toland, G. C. Case history of failure and reconstruction of the mike horse tailings dam near lincoln, Montana / G. C. Toland // Proceedings of the 15th Annual Engineering Geology and Soils Engineering Symposium Idaho Transportation, Department University of Idaho, Moscow Idaho State University, Pocatello Boise State University, Pocatello, ID, USA. April 1977.
39. Grace, M. C. The buffalo creek disaster / M. C. Grace, B. L. Green, J. D. Lindy, A. C. Leonard // International Handbook of Traumatic Stress Syndromes. Springer, Boston, MA, USA. 1993. P. 441–449.
40. Fourie, A. B. Tailings and mine waste / A. B. Fourie, G. Papageorgiou, G. E. Blight // Proceedings of the 7th International Conference. Fort Collins, NY, USA. June 2000. P. 149–158.

41. Mittal, H. K. Geotechnical aspects of a tar sand tailings dyke / H. K. Mittal, R. M. Hardy // *Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials*. ASCE, Reston, VA, USA. 1977. P. 327–347.
42. Morgenstern, N. R. Hydraulic fill structures — a perspective / N. R. Morgenstern, A. A. G. Kupper // *Hydraulic Fill Structures*. ASCE, Reston, VA, USA. 1988. P. 1–31.
43. Morgenstern, N. R. Geotechnical engineering beyond soil mechanics — a case study / N. R. Morgenstern, A. E. Fair, E. C. McRoberts // *Canadian Geotechnical Journal*. 1988. Vol. 25. No. 4. P. 637–661.
44. Okusa, S. Slope failures and tailings dam damage in the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake / S. Okusa, S. Anma // *Engineering Geology*. 1980. Vol. 16. No. 3–4. P. 195–224.
45. Shakesby, R. A. Failure of a mine waste dump in Zimbabwe: causes and consequences / R. A. Shakesby, J. R. Whitlow // *Environmental Geology and Water Sciences*. 1991. Vol. 18. No. 2. P. 143–153.
46. Alexander, D. Northern Italian dam failure and mudflow, July 1985 / D. Alexander // *Disasters*. 1986. Vol. 10. No. 1. P. 3–7.
47. Liu, H. Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China) / H. Liu, A. Probst, B. Liao // *Science of the Total Environment*. 2005. Vol. 339. No. 1–3. P. 153–166.
48. Castro, G. Seismic behavior of three tailings dams during the March 3, 1985 Earthquake / G. Castro, J. H. Troncoso // *Proceedings of the 5th Chilean Conference on Seismology and Earthquake Engineering*. Arica, Chile. October. 1989.
49. Hu, Z. Seismic response analysis and stability evaluation of the Lixi Tailings Dam / Z. Hu, H. Li, C. Chen // *Journal of Northwest A and F University-Natural Science Edition*, in Chinese. 2010. Vol. 38. No. 9. P. 215–221.
50. Davies, M. P. Static liquefaction slump of mine tailings — a case history / M. P. Davies, B. G. Chin, B. G. Dawson // *Proceedings, 51st Canadian Geotechnical Conference*, Edmonton, AB, Canada. 1998.
51. Harder, Jr. L. F. Failure of Tapo Canyon tailings dam / Jr. L. F. Harder, J. P. Stewart // *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 1996. Vol. 10. No. 3. P. 109–114.
52. Fourie, A. B. Defining an appropriate steady state line for Merriespruit gold tailings / A. B. Fourie, G. Papageorgiou // *Canadian Geotechnical Journal*. 2001. Vol. 38. No. 4. P. 695–706.
53. Vick, S. G. Failure of the Omai tailings dam: closure / S. G. Vick // *Geotechnical News*. 1997. Vol. 15. P. 49–55.
54. Macklin, M. G. Review of the Porco mine tailings dam burst and associated mining waste problems, Pilcomayo basin, Bolivia / M. G. Macklin, I. Payne, D. Preston, C. Sedgwick // *Report to the UK Overseas Development Agency*. 1996. 33 p.
55. Blight, G. E. A review of catastrophic flow failures of deposits of mine waste and municipal refuse / G. E. Blight, A. B. Fourie // *Proceedings of the International Workshop on Occurrence and Mechanisms of Flow in Natural Slopes and Earthfills*, Sorrento, Italy, May. 2003.
56. The impact of tailings dam spills and clean-up operations on sediment and water quality in river systems: the Ríos Agrio-Guadamar / K. A. Hudson-Edwards, M. G. Macklin, H. E. Jamieson [et al.] // *Aznalcóllar, Spain, Applied Geochemistry*. 2003. Vol. 18. No. 2. P. 221–239.
57. The long term fate and environmental significance of contaminant metals released by the January and March 2000 mining tailings dam failures in Maramures, County, upper Tisa Basin, Romania / M. G. Macklin, P. A. Brewer, D. Balteanu [et al.] // *Applied Geochemistry*. 2003. Vol. 18. No. 2. P. 241–257.

58. Piplinks. Chronology of Tailings Dam Failures in the Philippines. 2015. URL: <http://www.piplinks.org>.
59. Glotov, V. E. Causes and environmental impact of the gold-tailings dam failure at Karamken, the Russian Far East / V. E. Glotov, J. Chlachula, L. P. Glotova, E. Little // *Engineering Geology*. 2018. Vol. 245. P. 236–247.
60. The red mud accident in Ajka (Hungary): plant toxicity and trace metal bioavailability in red mud contaminated soil / S. Ruyters, J. Mertens, E. Vassilieva [et al.] // *Environmental Science & Technology*. 2011. Vol. 45. No. 4. P. 1616–1622.
61. Breach of a tailings dam in the 2011 earthquake in Japan / K. Ishihara, K. Ueno, S. Yamada [et al.] // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2015. Vol. 68. P. 3–22.
62. AGHAM, Advocates of Science and Technology for the People, Center for Environmental Concerns (CEC) and Kalikasan People's Network for the Environment (Kalikasan-PNE). 2013. URL: http://agham.org/sites/default/files/aghamdownloadables/phil_ex_full_report_2013.pdf.
63. The impact of a catastrophic mine tailings impoundment spill into one of North America's largest fjord lakes: Quesnel Lake, British Columbia, Canada / E. L. Petticrew, S. J. Albers, S. A. Baldwin [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42. No. 9. P. 3347–3355.
64. Fundao tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context / F. F. D. Carmo, L. H. Y. Kamino, R. T. Junior [et al.] // *Perspectives in Ecology and Conservation*. 2017. Vol. 15. No. 3. P. 145–151.
65. USCOLD, TDI, US Committee on Large Dams, USCOLD, Denver, CO, USA 1994.
66. EPA, Damage Cases and Environmental Releases from Mines and Mineral Processing Sites, U. S. Environmental Protection Agency, Office of Solid Waste, Washington, DC, USA. 1997.
67. Mine tailings storage: safety is no accident. ICOLD 2001, Chambers 2017. URL: https://gridarendal-website-live.s3.amazonaws.com/production/documents/s_document/371/original/RRA_MineTailings_lores.pdf?1510660693 (дата обращения: 12.11.2021).
68. Лесных, В. В. Оценка показателей промышленной безопасности производственных объектов газовой отрасли методами риск-анализа / В. В. Лесных, С. В. Овчаров // *Наука и техника в газовой промышленности*. 2010. № 2 (42). С. 62–71.
69. Акимов, В. А. Риски в природе, техносфере, обществе и экономике / В. А. Акимов, В. В. Лесных, Н. Н. Радаев. М.: Деловой экспресс, 2004. 352 с.
70. РД 03-418.01. Методические указания по проведению анализа рисков опасных производственных объектов. Серия 03. Вып. 10. М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2010. 40 с.
71. ФЗ О промышленной безопасности опасных производственных объектов. № 116-ФЗ. 1997.
72. Куликова, Е. Ю. Стратегия управления рисками в городском подземном строительстве / Е. Ю. Куликова, А. В. Корчак, А. Н. Левченко. М.: МГУ, 2005. 207 с.
73. Маршалл, В. К. Основные опасности химических производств: пер. с англ. Г. Б. Барсамяна и др. / под ред. Б. Б. Чайванова, А. Н. Черноплекова. М.: Мир, 1989. 671 с.
74. Лекции по системному анализу в чрезвычайных ситуациях. URL: <http://www.mylect.ru/bgd/chrezvsit/> (дата обращения: 08.09.2021).
75. Буянов, В. П. Рискология (управление рисками): учеб. пособ. для вузов. 2-е изд. испр. и доп. / В. П. Буянов, К. А. Кирсанов, Л. М. Михайлова. М.: Изд. «Экзамен», 2003. 384 с.
76. СТП ВНИИГ 210.02 – 04. Методические указания по проведению анализа риска аварий гидротехнических сооружений. 2-ое изд. / под ред. Е. Н. Беллендира, Н. Я. Никитиной. СПб.: Изд-во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2005. 121 с.
77. Aven, T. Risk management with applications from the offshore petroleum industry // *Springer series in reliability engineering*. 2007. 200 p.

78. Kumamoto, H. Satisfying safety goals by probabilistic risk assessment // Springer series in reliability engineering, 2007. 252 p.
79. РД 153-34.2-002-01. Методика оценки ущерба, возможного вследствие аварии гидротехнического сооружения. Дата введения: 01.05.2001.
80. Геомеханика: учеб. пособ. в 2-х ч. / Э. В. Каспарьян, А. А. Козырев, М. А. Иофис [и др.]. Мурманск. 2016. Ч. 1. 272 с. Ч. 2. 320 с.
81. Управление геомеханическими процессами при разработке месторождений полезных ископаемых: учеб. пособие / Д. М. Казикаев, А. А. Козырев, Э. В. Каспарьян, М. А. Иофис. М.: Горная книга, 2016. 490 с.
82. Цытович, Н. А. Механика грунтов. М.: Высш. Школа, 1983. 288 с.
83. Шестаков, В. М. Гидрогеомеханика: учеб. пособие. М.: Изд-во МГУ, 1998. 72 с.
84. Герсевич, Н. М. Основы динамики грунтовой массы. М.: ОНТИ, 1937. 242 с.
85. Иванов, П. Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. школа, 1991. 447 с.
86. Маслов, Н. Н. Основы инженерной геологии и механики грунтов. М.: Высш. школа, 1982. 511 с.
87. Федровский, В. Г. Методы расчета устойчивости откосов и склонов / В. Г. Федровский, С. В. Курилло // Геоэкология. 1997. № 6. С. 95–106.
88. Тихвинский, И. О. Оценка и прогноз устойчивости оползневых склонов. М.: Наука, 1988. 142 с.
89. Дашко П. Э. Механика горных пород. М.: Недра, 1987. 263 с.
90. Шадунц, К. Ш. Оползни-потоки. М.: Недра, 1983. 120 с.
91. Мироненко, В. А. Основы гидрогеомеханики / В. А. Мироненко, В. М. Шестаков. М.: Недра, 1974. 295 с.
92. Жиленьков, В. Н. Основы оценки водопроницаемости и фильтрационной прочности грунтов. Л., 1988. 38 с.
93. Печеркин, А. И. Карст и суффозия в берегах водохранилищ / А. И. Печеркин, В. Е. Закоптелов. Пермь: ПГУ, 1982. 87 с.
94. Кутепов, В. М. Напряженное состояние массивов горных пород в карстовых районах. М., 1987. 346 с.
95. Plaxis 3D Руководство пользователя. Essential for geotechnical professionals. 2013. 150 с.
96. Создание унифицированной системы ведения архивов спутниковых данных, предназначенной для построения современных систем дистанционного мониторинга / А. А. Прошин, Е. А. Лупян, И. В. Балашов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13, № 3. С. 9–27.
97. Gorelick, N. Google Earth Engine // EGU General Assembly Conference Abstracts. 2013. Vol. 15. P. 11997.
98. Evolution of the earth observing system (EOS) data and information system (EOSDIS) / Н. К. Ramapriyan, J. Behnke, E. Sofinowski [et al.] // Standard-Based Data and Information Systems for Earth Observation. 2010. P. 63–92.
99. ESA. URL: <https://scihub.copernicus.eu/> (дата обращения: 25.10.2020).
100. Построение объединенного каталога распределенных архивов спутниковых данных различных центров / А. В. Антонов, М. А. Бурцев, В. Ю. Ефремов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 2. С. 84–89.
101. Система работы с распределенными архивами результатов обработки спутниковых данных центров приема НИЦ «Планета» / М. А. Бурцев, В. Н. Антонов, В. Ю. Ефремов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 5. С. 55–76.

102. Система работы с объединенными информационными ресурсами, получаемыми на основе спутниковых данных в центрах НИЦ «Планета» / Е. А. Лупян, О. Е. Милехин, В. Н. Антонов [и др.] // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 89–97.
103. Геопортал «Роскосмоса». URL: <http://gptl.ru/> (дата обращения: 20.10.2020).
104. Носенко, Ю. И. Единая территориально-распределенная информационная система ДЗЗ — проблемы, решения, перспективы (ч. 1) / Ю. И. Носенко, П. А. Лошкарев // Геоматика. 2010. № 3. С. 35–43.
105. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды / Е. А. Лупян, А. А. Прошин, М. А. Бурцев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 5. С. 263–284.
106. Технология построения автоматизированных информационных систем сбора, обработки, хранения и распространения спутниковых данных для решения научных и прикладных задач / Е. А. Лупян, А. А. Мазуров, Р. Р. Назиров [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Вып. 1. С. 81–89.
107. Технологии построения информационных систем дистанционного мониторинга / Е. А. Лупян, А. А. Мазуров, Р. Р. Назиров [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 1. С. 26–43.
108. Современные подходы и технологии организации работы с данными дистанционного зондирования Земли для решения научных задач / Е. А. Лупян, В. П. Саворский, Ю. И. Шокин [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 5. С. 21–44.
109. Построение архивов результатов обработки спутниковых данных для систем динамического формирования производных информационных продуктов / И. В. Балашов, М. А. Бурцев, В. Ю. Ефремов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 26–32.
110. Использование спутникового сервиса «ВЕГА» в региональных системах дистанционного мониторинга / Е. А. Лупян, С. А. Барталев, В. А. Толпин [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, № 3. С. 215–232.
111. Космический мониторинг антропогенного воздействия в районе алмазодобывающей деятельности (на примере Мирнинского ГОКа), июнь 2016 г. / С. Г. Мышляков, О. С. Сизов, Е. Н. Горбачева [и др.]. URL: <http://geomatica.ru/courses/220/> (дата обращения: 24.10.2019).
112. Горбунов, В. А. Результаты космического радарного мониторинга деформаций бортов и уступов карьеров ОАО «Гайский ГОК» и смещений земной поверхности и сооружений на промышленной площадке предприятия / В. А. Горбунов, Ю. И. Кантемиров // Геоматика. 2013. № 2. С. 72–78.
113. Зеркаль, О. В. Использование материалов дистанционного зондирования в инженерно-геологическом и эколого-геологическом картографировании при изучении и мониторинге ЭГП // ArcReview. 2005. №3 (34). URL: https://www.esri-cis.ru/news/arcreview/list.php?SECTION_ID=47 (дата обращения: 25.09.2020).
114. Совзонд. URL: <https://sovzond.ru/projects/3260/> (дата обращения: 16.10.2020).
115. Калабин, Г. В. Оценка состояния окружающей среды территории Качканарского ГОКа по данным спутникового мониторинга / Г. В. Калабин, В. И. Горный, С. Г. Крицук // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 2. С. 179–187.

116. Сашурин, А. Д. Организация геодинамического мониторинга на карьерах Качканарского ГОКа / А. Д. Сашурин, А. А. Панжин // Проблемы недропользования. 2015. № 1 (4). С. 45–54.
117. Усанов, С. В. Мониторинг сдвижения поверхности при ликвидации и затоплении горных выработок Лебяжинского месторождения / С. В. Усанов, А. В. Усанова // Горный журнал. 2017. № 1. С. 18–22.
118. Методика и результаты геодинамического мониторинга при разработке Узельгинского и Талганского месторождений Южного Урала / А. А. Панжин, А. Д. Сашурин, Н. А. Панжина, Е. Ю. Ефремов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 6. С. 41–49.
119. Результаты мониторинга деформационных процессов методами высокоточной геодезии, гравиметрии, радарной интерферометрии на Самотлорском геодинамическом полигоне / Ю. В. Васильев, М. Л. Юрьев, С. И. Яковлев [и др.] // Маркшейдерский вестник. 2015. № 4 (107). С. 38–43.
120. Комплексные геофизические исследования состояния горных пород в основании гидротехнического сооружения / И. А. Санфилов, А. Г. Ярославцев, А. А. Жикин [и др.] // Инженерная, угольная и рудная геофизика – 2015: мат-лы конф. (Сочи, 28 сент. – 02 окт. 2015 г.). 2015. С. 197–201.
121. Monitoring the stress-strain state of marginal saliferous rock mass / A. Baryakh, V. Toksarov, V. Asanov [et al.] // Procedia Engineering. 2017. P. 925–934.
122. Барях, А. А. Интеллектуальный мониторинг в геомеханике // Стратегия и процессы освоения георесурсов. Пермь, 2016. С. 77–79.
123. Гладырь, А. В. Алгоритмическое и программное обеспечение многоуровневой системы комплексного геодинамического мониторинга удароопасного массива горных пород / А. В. Гладырь, В. И. Мирошников, Д. О. Желнин // Геомеханические и геотехнологические проблемы эффективного освоения месторождений твердых полезных ископаемых северных и северо-восточных регионов России: сб. тр. конф. Якутск, 2015. С. 195–199.
124. Разработка многоуровневой системы комплексного геодинамического мониторинга удароопасного массива горных пород / И. Ю. Рассказов, А. В. Гладырь, Е. А. Кателла, В. И. Мирошников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический жур.). 2014. № 9. С. 113–120.
125. Бубнова, М. Б. Экологический мониторинг природно-горнотехнических систем на основе данных дистанционного зондирования / М. Б. Бубнова, Ю. А. Озарян // Экологические системы и приборы. 2015. № 11. С. 15–22.
126. Горная информатика и проблема «больших данных» в построении комплексных мониторинговых систем безопасности недропользования / И. В. Бычков, Д. Я. Владимиров, В. Н. Опарин [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 6. С. 163–179.
127. Опарин, В. Н. Современные информационные аспекты геомеханического мониторинга (DSS подход) / В. Н. Опарин, В. А. Ковалев, В. П. Потапов // Распределенные информационно-вычислительные ресурсы. Наука — цифровой экономике (DICR – 2017): сб. тр. конф. Новосибирск: Институт вычислительных технологий СО РАН, 2017. С. 334–338.
128. Методологические основы построения информационно-мониторинговых систем геодинамической безопасности на горнодобывающих предприятиях / А. В. Нероба, В. П. Марысюк, В. Н. Опарин, А. П. Тапсиев // Горный журнал. 2015. № 6. С. 29–35.
129. Леонтьев, А. В. Геомеханический мониторинг — неотъемлемый атрибут рационального недропользования // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический жур.). 2017. № S 23. С. 333–343.

130. Гидрогеомеханический мониторинг и освоение техногенных массивов на горных предприятиях / А. М. Гальперин, Ю. И. Кутепов, В. С. Круподеров, А. В. Киянец // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический жур.). 2012. № 1. С. 44–58.
131. Совершенствование удаленного автоматизированного контроля откосных сооружений на горных предприятиях / В. В. Мосейкин, А. М. Гальперин, В. В. Ческидов, С. А. Пуневский // Горный журнал. 2017. № 12. С. 82–86.
132. О создании геодинамических полигонов для мониторинга деформационных процессов при разработке месторождений углеводородов / Ю. А. Кашников, И. М. Залялов, В. Г. Соснин [и др.] // Нефтяное хозяйство. 2013. № 4. С. 6–9.
133. Козырев, А. А. Концепция единой системы комплексного геомеханического мониторинга при ведении горных работ в скальных массивах горных пород / А. А. Козырев, Э. В. Каспарьян, Ю. В. Федотова // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 4. С. 168–191.
134. Melnikov, N. N. Integrated multi-level geofluid mechanics monitoring system for mine waterworks / N. N. Melnikov, A. I. Kalashnik, N. A. Kalashnik // Eurasian Mining. 2018. No. 2. P. 7–10.
135. Гиниятуллина, О. Л. Обработка данных Sentinel-1A для решения задач мониторинга в горнопромышленных регионах / О. Л. Гиниятуллина, Л. С. Миков // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: мат-лы III Междунар. науч. конф. 2016. С. 230–233.
136. Радарная спутниковая интерферометрия: новые технологии спутникового мониторинга областей разработки полезных ископаемых, смещений природных и техногенных объектов / В. О. Михайлов, Е. А. Киселева, Е. И. Смольянинова [и др.] // Наука и технологические разработки. 2016. Т. 95, № 3. С. 5–11.
137. Мусагалиева, Ж. Е. Мониторинг техногенного геодинамического полигона Карагандинского угольного бассейна с использованием спутниковой радарной интерферометрии // Велес. 2016. № 1–2 (31). С. 79–83.
138. Геоинформационная система геомеханического мониторинга рудных месторождений с использованием методов космической радиолокационной интерферометрии / Ж. Т. Кожаев, М. А. Мухамедгалиева, Б. Б. Имансакипова, М. Г. Мустафин // Горный журнал. 2017. № 2. С. 39–44.
139. Создание интеллектуальных информационных систем оперативного прогнозирования речных наводнений / А. М. Алабян, В. А. Зеленцов, И. Н. Крыленко [и др.] // Вестник РАН. 2016. Т. 86, № 2. С. 127–137.
140. ФГУГП «Гидроспецгеология». URL: (<https://www.specgeo.ru/>) (дата обращения: 21.11.2020).
141. Федеральное агентство по недропользованию. URL: <http://www.rosnedra.gov.ru/> (дата обращения: 21.11.2020).
142. Институт физической химии и электрохимии. URL: <http://www.phyche.ac.ru/> (дата обращения: 21.11.2020).
143. Сибирский химический комбинат. Росатом. URL: <http://atomsib.ru/> (дата обращения: 21.11.2020).
144. Геофизический центр РАН. URL: <http://www.gcras.ru/> (дата обращения: 21.11.2020).
145. НПО «Радон». URL: <http://www.radon.ru/> (дата обращения: 21.11.2020).
146. Институт горного дела ДВО РАН. URL: <http://www.igd.khv.ru/> (дата обращения: 21.11.2020).
147. Институт водных и экологических проблем ДВО РАН. URL: <http://iver.as.khb.ru/> (дата обращения: 21.11.2020).

148. Дальневосточный федеральный университет. URL: <https://www.dvfu.ru/> (дата обращения: 21.11.2020).
149. ФНИЦ Биоразнообразия ДВО РАН. URL: <https://www.biosoil.ru/> (дата обращения: 21.11.2020).
150. Росгидромет. URL: <http://www.meteorf.ru/> (дата обращения: 21.11.2020).
151. Научно-технический прогресс на горнорудных предприятиях Заполярья / Н. Н. Мельников, П. А. Усачев, Ю. В. Демидов [и др]. Л.: Наука, 1988. 239 с.
152. Калашник, А. И. Комплексные исследования и мониторинг хвостохранилищ горнопромышленных предприятий Кольского региона // Горный журнал. 2020. № 9. С. 101–106.
153. Kalashnik, N. A. 4D modeling of concentrating mill tailings dam protecting dike soil consolidation // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 7. С. 56–62.
154. Калашник, А. И. Методологические основы комплексирования междисциплинарных методов для целей мониторинга гидротехнических сооружений // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2019. № 12–2 (39). С. 107–110.
155. Калашник, А. И. Комплексные исследования насыпной грунтовой плотины // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2019. № 12–2 (39). С. 103–106.
156. Калашник, А. И. Многоуровневая система мониторинга гидротехнических сооружений горнопромышленных предприятий и гидроэнергетики Мурманской области / А. И. Калашник, Д. В. Запорожец, Н. А. Калашник // Вестник КНЦ. 2019. № 2 (11). С. 45–53.
157. Integrated Multi-Level Geomonitoring of Natural-and-Technical Objects in the Mining Industry / N. N. Mel'nikov, A. I. Kalashnik, N. A. Kalashnik, D. V. Zaporozhets // Journal of Mining Science. 2018. Vol. 54. Is. 4. P. 535–540.
158. Комплексная многоуровневая система геомониторинга природно-технических объектов горнодобывающих комплексов / Н. Н. Мельников, А. И. Калашник, Н. А. Калашник, Д. В. Запорожец // ФТПРПИ. 2018. № 4. С. 3–10.
159. Мельников, Н. Н. Создание многоуровневой системы геодинамического мониторинга горнотехнических и нефтегазовых объектов западной части Российского сектора Арктики / Н. Н. Мельников, А. И. Калашник // Арктика: экология и экономика. 2015. № 3 (19). С. 66–75.
160. Kalashnik, A. I. Georadiolocation studies at mining enterprises of Kola region / A. I. Kalashnik, D. V. Zaporozhets // Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics 2020. 2020. Vol. 2020. P. 51089.
161. Дьяков, А. Ю. Методические основы георадарных исследований горнотехнических объектов / А. Ю. Дьяков, А. И. Калашник. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2021. 110 с.
162. Diakov, A. Innovative non-destructive control technologies for mining-engineering constructions and facilities / A. Diakov, A. Kalashnik // 20th International Multidisciplinary Geoconference SGEM 2020. 2020. Vol. 1.2. P. 599–606.
163. Опыт применения георадарных подповерхностных исследований в западной части Российского сектора Арктики / Н. Н. Мельников, А. И. Калашник, Д. В. Запорожец [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 1 (107). С. 39–49.
164. Калашник, А. И. Комплексирование георадарного и сейсмического зондирования дамбы хвостохранилища / А. И. Калашник, А. Ю. Дьяков, Н. Н. Абрамов // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 4. С. 104–111.
165. Abramov, N. N. Identification of Water-Saturated Zones in a Protective Hydraulic Earthen Structure by Synchronous Electromagnetic and Seismic Sounding / N. N. Abramov, A. Yu. D'yakov, A. I. Kalashnik // Power Technology and Engineering. 2019. Vol. 53. Is. 2. P. 167–171.

166. Калашник, А. И. Интегрирование спутниковых радарных съемок в систему комплексного мониторинга горных и нефтегазовых разработок // Развитие арктических территорий: опыт, проблемы, перспективы: мат-лы междунар. науч.-практич. конф. (12–15 дек. 2017 г.), МАГУ. 2018. С. 335–338.
167. Kalashnik, N. Modelling of consolidation of a soil tailings dam taking into account time factor // 20th International Multidisciplinary Geoconference SGEM 2020. 2020. Vol. 1.1. P. 661–668.
168. Калашник, Н. А. 3D-моделирование поэтапного возведения ограждающей дамбы накопителя жидких горнопромышленных отходов // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2019. № 12–2 (39). С. 111–114.
169. Калашник, Н. А. 4D-компьютерное моделирование фильтрационно-деформационных процессов в ограждающей дамбе хвостохранилища // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № S37. С. 393–400.
170. Голубев, А. И. Комплексные расчеты гидротехнических сооружений в Plaxis / А. И. Голубев, А. В. Селецкий // Гидротехника XXI Век. 2011. № 3 (6). С. 16–18.
171. Пьянков, С. А. Механика грунтов: учеб. пособие / С. А. Пьянков, З. К. Азизов. Ульяновск: УлГТУ, 2008. 103 с.
172. Пузыревский, Н. П. Фильтрующие насыпи. Л.: ОНТИ, 1932. 106 с.
173. Терцаги, К. Теоретическая механика грунтов. М.: Стройиздат, 1961. 507 с.
174. Флорин, В. А. Основы механики грунтов: монограф. М.: Госстройиздат, 1961. Т. 2. 544 с.
175. Павловский, Н. Н. О фильтрации через земляные плотины на непроницаемых основаниях. Л.: КУБУЧ, 1932. VIII. 195 с.
176. Biot, M. A. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated solid. I. Low frequency range // J. Aconst. Soc. Amer. 1956, v 28, p 16-178. II. Higher frequency range // J. Aconst. Soc. Amer. 1956. V. 28. P. 179–191.
177. Зарецкий, Ю. К. Теория консолидации грунтов. М.: Наука, 1967. 270 с.
178. Тер-Мартirosян, З. Г. Механика грунтов. М.: Изд-во АСВ, 2009. 550 с.
179. Черных, В. А. Математические концепции гидрогеомеханики: учеб. пособие. М.: РУДН, 2013. 447 с.
180. Механика насыщенных пористых фаз / В. Н. Николаевский, К. С. Басниев, А. Т. Горбунов, Г. Ф. Зотов. М.: Недра, 1970. 339 с.
181. Николаевский, В. Н. Геомеханика и флюидодинамика. М.: Недра, 1996. 447 с.
182. Николаевский, В. Н. Механика пористых и трещиноватых сред. М.: Недра, 1984. 232 с.
183. Кузьмин, Ю. О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. М.: Агентство Экономических Новостей, 1999. 220 с.
184. Соколовский, В. В. Теория пластичности. М.: Высш. школа, 1969. 608 с.
185. Ильюшин, А. А. Пластичность. Ч. 1. Упругопластические деформации. М.–Л.: ОГИЗ, 1948. 376 с.
186. Ильюшин, А. А. Пластичность. Основы общей математической теории. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 271 с.
187. Ильюшин, А. А. Механика сплошной среды: учебник. 3-е изд. М.: Изд-во МГУ, 1990. 310 с.
188. Вялов, С. С. Реологические основы механики грунтов: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
189. Вялов, С. С. Реология мерзлых грунтов. М.: Стройиздат, 2000. 464 с.
190. Гольдин, А. Л. Плоская задача физически нелинейной теории грунтовой среды // Изв. НИИГ. 1978. Т. 87.
191. Зарецкий, Ю. К. Вязкопластичность грунтов и расчеты сооружений. М.: Стройиздат, 1988. 352 с.

192. Крыжановский, А. Л. Механическое поведение грунтов в условиях пространственного напряженного состояния // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1983. № 1. С. 23–27.
193. Крыжановский, А. Л. Расчет оснований сооружений в нелинейной постановке с использованием ЭВМ: учеб. пособие. М.: МИСИ, 1982. 73 с.
194. Федоровский, В. Г. Современные методы описания механических свойств грунтов // Строительство и архитектура. Сер. 8: Строительные конструкции. М.: ВНИИС. 1985. Вып. 9. 72 с.
195. Соломин, В. И. Обобщенная математическая модель осадок поверхности грунтового основания // III Уральские академические чтения. Екатеринбург, 1997. С. 65–69.
196. Plaxis 3D: справочное пособие / под ред. R. B. J. Brinkgreve / Дельфтский технологич. ун-т и Plaxis by, Нидерланды. Ч. 3. Свойства материалов и база данных по материалам. 2011. 36 с.
197. Моделирование сложных геотехнических проектов. URL: www.plaxis.ru (дата обращения: 29.11.2018).
198. Бахаева, С. П. Исследование влияния изменчивости физико-механических свойств грунтов на устойчивость дамб / С. П. Бахаева, Д. В. Гурьев, Т. В. Михайлов // Маркшейдерский вестник. 2013. № 5. С. 11–14.
199. Калашник, Н. А. Оценка надежности насыпного грунтового сооружения при образовании в его теле зоны повышенной фильтрации // Вестник КНЦ. 2019. № 2 (11). С. 69–74.
200. Kalashnik, N. Research of influence of the zone of the increased filtration on reliability of the store of liquid industrial wastes / N. Kalashnik, A. Giliarova, A. Kalashnik // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2018. Vol. 18 I. 1.2. P. 609–614.
201. Калашник, А. И. Компьютерное 3D-моделирование фильтрационно-деформационного состояния ограждающей дамбы хвостохранилища Ковдорского ГОКа / А. И. Калашник, Н. А. Калашник, О. В. Смирнова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический жур.). 2017. Спецвыпуск 23. С. 292–298.
202. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2020 г. URL: <https://gov-murman.ru/region/environmentstate/> (дата обращения: 18.11.2021)
203. Максимов, Д. А. Влияние фильтрационных нарушений на уровень фильтрующихся вод и состояние насыпного гидротехнического сооружения // Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-техн. жур.). 2021. № 5–1. С. 280–291.
204. ПБ 03-438-02. Правила безопасности гидротехнических сооружений накопителей жидких промышленных отходов.
205. П 72-2000. Рекомендации по проведению визуальных наблюдений и обследований на грунтовых плотинах. СПб.: ОАО ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2000. 71 с.
206. П 87-2001. Рекомендации по проведению натурных наблюдений за осадками грунтовых плотин. СПб.: ОАО ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2001. 92 с.
207. Инструкция по нивелированию I, II, III, IV классов. М.: ЦНИИГАиК, 2004. 226 с.
208. Министерство природных ресурсов. URL: http://www.mnr.gov.ru/activity/regions/murmanskaya_oblast/?special_version=Y (дата обращения: 25.01.2021).
209. ГИС сегодня: состояние, перспективы, решения. URL: <http://www.ict.nsc.ru/jct/getfile.php?id=1690> (дата обращения: 22.12.2020).
210. Создание и ведение единой системы регионального мониторинга окружающей среды и природных ресурсов Приаралья. URL: <https://kazaral.org/sozдание-i-vedenie-edinojsistemy-regionalnogo-monitoringa-okruzhayushhej-sredy-i-prirodnnyx-resursov-priaralya/> (дата обращения: 22.12.2020).

211. Разработка методики непрерывного мониторинга для выявления экзогенных процессов на инфраструктурных объектах. URL: <https://www.hse.ru/org/projects/370624544> (дата обращения: 22.12.2020).
212. «Роскосмос» создаст центр по наблюдению за Землей. URL: <https://ria.ru/20190515/1553494828.html> (дата обращения: 22.12.2020).
213. Тематические проекты целевых систем мониторинга на основе данных ДЗЗ. URL: <http://www.gisa.ru/64198.html> (дата обращения: 22.12.2020).
214. 15 отраслевых региональных информационных систем работают в Мурманской области. URL: <https://www.hibiny.com/news/archive/234339/> (дата обращения: 25.01.2021).
215. Хайлов, М. Н. Научно-технические проблемы сбора, хранения, обработки, распространения и применения космической геопространственной информации в интересах российских потребителей / М. Н. Хайлов, В. А. Заичко // Дистанционное зондирование Земли из космоса в России. 2020. № 1. С. 6–15.
216. Design and implementation of a landslide early warning system / E. Intrieri, G. Gigli, F. Mugnai [et al.] // Engineering Geology. 2012. Vol. 147–148. P. 124–136.
217. Кириченко, Ю. В. Кассетный трал для промышленной добычи железомарганцевых конкреций океанического дна / Ю. В. Кириченко, А. С. Каширский // Горный журнал. 2015. № 12. С. 56–61.
218. Chapuis, R. P. Monitoring a well in a clay layer: revisiting the time lag problem // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2009. Vol. 68. P. 387–395.
219. Мясков, А. В. Экономические аспекты адаптации параметров производственной деятельности карьеров к изменениям на рынках сырьевых ресурсов / А. В. Мясков, А. С. Ильин, С. М. Попов // Горный журнал. 2017. № 2. С. 51–56.
220. Howlada, M. Monitoring the underground roadway water quantity and quality for irrigation use around the Barapukuria Coal Mining Industry, Dinajpur, Bangladesh / M. Howlada, P. Deb, A. S. H. Muzemder // Engineering Geology. 2017. Vol. 4. P. 23–34.
221. Хиллер, Б. Автоматизированный деформационный мониторинг — инновационные технологии на службу обеспечения безопасности в горнодобывающей, нефтяной и газовой промышленности // Маркшейдерский вестник. 2010. № 4. С. 54–58.
222. Ческидов, В. В. Гидрогеомеханический мониторинг состояния откосных сооружений // Горная Промышленность. 2017. № 4 (134). С. 78–80.
223. Clarkson, L. Critical review of tailings dam monitoring best practice / L. Clarkson, D. Williams // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2020. Vol. 34. Is. 2. P. 119–148.
224. Morin, R. Satellite Remote Sensing for Effective Monitoring of Tailings Storage // Engineering and Mining Journal, 2016, December 2016.
225. Дистанционный контроль устойчивости намывных сооружений на Стойленском ГОКе / С. А. Напольских, А. В. Крючков, А. О. Андриевский, В. В. Ческидов // Горный журнал. 2017. № 10. С. 52–55.
226. Мониторинг состояния дамбы хвостохранилища намывного типа / О. Г. Бесимбаева, Е. Н. Хмырова, А. В. Логинов, Е. А. Олейникова // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. Т. 1, № 1. С. 125–129.
227. 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). Is. 2. P. 605–621.
228. Мусалев, Д. Н. Опыт георадиолокационных исследований при научно-техническом сопровождении горных работ на Старобинском месторождении калийных солей / Д. Н. Мусалев, Н. Н. Прохоров, А. М. Клабук // Горный журнал. 2018. № 8. С. 42–47.

229. Бахаева, С. П. Прогноз параметров дамбы на основе моделирования напряженно-деформированного состояния откоса / С. П. Бахаева, Д. В. Гурьев // Вестник Кузбасского гос. технич. ун-та. 2016. № 1 (113). С. 12–17.
230. Исмагилов, Р. И. Использование (опыт тестирования) георадара на участке строительства крутонаклонного конвейерного комплекса на южном карьере Михайловского ГОКа им. А. В. Варичева / Р. И. Исмагилов, А. Г. Захаров, Б. П. Бадтиев, Н. В. Сенин [и др.] // Горная Промышленность. 2020. № 3. С. 84–90.
231. Исмагилов, Р. И. Внедрение мониторинга безопасности на участке строительства крутонаклонного конвейерного комплекса на южном карьере Михайловского ГОКа / Р. И. Исмагилов, А. В. Козуб, Б. П. Бадтиев, А. А. Павлович // Горная Промышленность. 2020. № 1 С. 120–126.
232. Розанов, И. Ю. Применение радара IBIS FM для контроля состояния борта карьера рудника «Железный» (АО «Ковдорский ГОК») / И. Ю. Розанов, А. А. Завьялов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический жур.). 2018. № 7. С. 40–46.
233. Калашник, А. И. Оценка нарушенности скальных пород уступа карьера электромагнитным зондированием / А. И. Калашник, А. Ю. Дьяков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический жур.). 2015. № S56. С. 230–237.
234. Изучение приповерхностной структуры метаморфических толщ георадарным методом (Северное Приладожье) / П. Н. Александров, Ю. А. Морозов, А. Л. Кулаковский [и др.] // Геофизические исследования 2020. Т. 21, № 1. С. 5–23.
235. Оценка скорости распространения электромагнитных волн в солях Верхнекамского месторождения солей / А. А. Жуков, А. М. Пригара, И. Ю. Пушкарёва, Р. И. Царев // Инженерные изыскания. 2017. Т. 3. С. 28–33.
236. Characterization of the sedimentary fabrics in ornamental rocks by using GPR / J. Rey, J. Martínez, V. Montiel [et al.] // Near Surface Geophysics. 2017. Vol. 15 (5). P. 457–465.
237. Benter, A. GPR signal attenuation through fragmented rock / A. Benter, W. Moore, M. Antolovich // Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section A: Mining Technology. 2016. Vol. 125. Is. 2. P. 114–120.
238. In situ GPR test for three-dimensional mapping of the dielectric constant in a rock mass / M. Elkarmotya, C. Colla, E. Gabrielli [et al.] // Journal of Applied Geophysics. 2017. Vol. 146. P. 1–15.
239. Loewer, M. Norman Wagner Spectral Decomposition of Soil Electrical and Dielectric Losses and Prediction of In Situ GPR Performance / M. Loewer, J. Igel // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. Vol. 9. Is. 1. P. 212–220.
240. Yuan, C. Spatial reasoning mechanism to enable automated adaptive trajectory planning in ground penetrating radar survey / C. Yuan, H. Cai // Automation in Construction. 2020. Vol. 114. 103157.
241. Георадиолокационные исследования геокриологических объектов массива горных пород месторождений криолитозоны / Л. Л. Федорова, Е. Э. Соловьев, К. О. Соколов, Г. А. Куляндин // Горный журнал. 2019. № 2. С. 38–42.
242. Соловьев, Е. Э. Исследование геокриологических условий массива мерзлых горных пород неразрушающими электромагнитными методами / Е. Э. Соловьев, Д. В. Саввин, Л. Л. Федорова // Горный журнал. 2019. № 2. С. 31–37.
243. Deep penetration subsurface radar: Hardware, results, interpretation / A. I. Berkut, D. E. Edemsky, V. V. Kopeikin [et al.] // 9th International Workshop on Advanced Ground Penetration Radar (IWAGPR), 28–30 June 2017. IEEE, Edinburgh. UK. 2017. 17080160.

244. Deep Penetration Radar: Hydrogeology and Paleorelief of Underlying Medium / I. V. Prokopovich, P. A. Morozov, A. V. Popov, V. V. Kopeikin // 17th International Conference on Ground Penetrating Radar — GPR – 2018. Rapperswil. Switzerland. June 18–21. 2018. P. 394–398.
245. 3D GPR Image-based U-Net for Enhancing Underground Cavity Detectability / M-S. Kang, N. Kim, S. B. Im [et al.] // Remote Sensing. 2019. Vol. 11. Is. 21. 2545.
246. Kumlu, D. Clutter reduction in GPR images using nonnegative matrix factorization / D. Kumlu, I. Erer // Journal of electromagnetic. Waves and applications. 2018. Vol. 32. No. 16. P. 2055–2066.
247. Kumlu, D. Low complexity clutter removal in GPR images via lattice filters / D. Kumlu, I. Erer, N.H. Kaplan // Digital Signal Processing. 2020. Vol. 101. 102724.
248. Maruddani, B. The Development of Ground Penetrating Radar (GPR) Data Processing / B. Maruddani, E. Sandi // International Journal of Machine Learning and Computing. 2019. Vol. 9. No. 6. December. P. 768–773
249. Дьяков, А. Ю. Интерпретация геолого-геофизических данных для идентификации неоднородностей скального массива по данным электромагнитного зондирования / А. Ю. Дьяков, А. И. Калашник // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2018. № 15. С. 132–135.
250. Дьяков, А. Ю. Георадар как инструмент для решения горных задач / А. Ю. Дьяков // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2019. № 12–1 (39). С. 64–68.
251. Point coordinates extraction from localized hyperbolic reflections in GPR data / A. Ristić, Ž. Bugarinović, M. Vrtunski, M. Govedarica // Journal of Applied Geophysics. September 2017. Vol. 144. P. 1–17.
252. Automatic object detection using dynamic time warping on ground penetrating radar signals / S. Jazayeri, A. Saghafi, S. Esmaeili, C-P. Tsokos // Expert Systems with Applications. May 2019. Vol. 122. P. 102–107.
253. Wang, Y. Semi-automatic detection of buried rebar in GPR data using a genetic algorithm / Y. Wang, G. Cui, J. Xu // Automation in Construction. 2020. Vol. 114. 103186.
254. Денисов, Р. Р. Обработка георадарных данных в автоматическом режиме / Р. Р. Денисов, В. В. Капустин // Геофизика. 2010. № 4. С. 76–80.
255. Автоматизация скоростного анализа георадарных данных / А. Л. Марченко, М. Л. Владов, М. С. Судакова, А. В. Старовойтов // Инженерные изыскания. 2017. Т. 5. С. 36–42.
256. Капустин, В. В. Применение атрибутного анализа для решения прикладных задач георадарного профилирования / В. В. Капустин, А. В. Сеницын // Геофизика. 2018. № 2. С. 17–23.
257. Калашник, А. И. Георадарное исследование геолого-структурного строения рабочего уступа карьера / А. И. Калашник, А. Ю. Дьяков // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2015. № 6. С. 73–78.
258. Возможности георадарного метода при обследовании подпорных стен и ограждающих конструкций / Н. Е. Фоменко, Д. А. Гапонов, В. В. Капустин [и др.] // Известия Томского политехнич. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 3. С. 37–45.
259. Андрианов, С. В. Мониторинг состояния заобделочного пространства горных выработок методом георадиолокации / С. В. Андрианов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 5. С. 124–132.
260. Старовойтов, А. В. Интерпретация георадиолокационных данных. М.: МГУ, 2008. 192 с.
261. Владов, М. Л. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений / М. Л. Владов, М. С. Судакова. М.: Изд. ГЕОС, 2017. 240 с.

262. Калашник, А. И. Информационные технологии в задачах мониторинга гидротехнических сооружений горнодобывающих предприятий подповерхностным георадиолокационным зондированием / А. И. Калашник, А. Ю. Дьяков // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический жур.). 2017. № S23. С. 283–291.
263. Мельников, Н. Н. Определение подповерхностной структуры и мониторинг состояния природно-технических систем / Н. Н. Мельников, А. И. Калашник // Север промышленный. 2010. № 4 (34). С. 50–51.
264. Topographic migration of 2D and 3D ground-penetrating radar data considering variable velocities / N. Allroggen, J. Tronicke, M. Delock, U. Boniger // Near Surface Geophysics. 2015. Vol. 13. P. 253–259.
265. Antonis, G. Modeling ground penetrating radar using GprMax // Construction and Building Material. 2005. Vol. 19. P. 755–762.
266. Bano, M. Constant dielectric losses of ground-penetrating radar waves // Geophysics. 1996. No. 124. P. 279–288.
267. Bentner, A. Focusing ground penetrating radar images / A. Bentner, W. Moore, M. Antolovich // Progress In Electromagnetics Research. 2011. No 19. P. 183–195.
268. Tzanis, A. MATGPR: A freeware MATLAB package for the analysis of common-offset GPR data // Geophysical Research Abstracts. 2006. Vol. 8. P. 09488.
269. Tzanis, A. A freeware package for the analysis & interpretation of common and single offset GPR data / A. Tzanis // Fast Times. 2010. Vol. 15. No (1). P. 17 – 43.
270. Атлас физических свойств минералов и пород Хибинских месторождений / И. А. Турчанинов, М. П. Воларович, А. Т. Бондаренко [и др.]. Л.: Наука, 1975. 71 с.
271. Владов, М. Л. Введение в георадиолокацию / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов. М: Изд-во МГУ, 2005. 153 с.
272. Экологическая и геодинамическая безопасность при закрытии рудников в Баренц-регионе. Рудник «Умбозеро» / В. П. Конухин, А. А. Козырев, А. О. Орлов [и др.]. Апатиты: КНЦ РАН, 2014. 192 с.
273. Azam, S. Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years / S. Azam, Q. Li // Geotechnical News. 2010. P. 50–53.
274. Internal erosion of exiting dams, levees and dikes, and their foundations. Volume 2: Case histories, investigations, testing, remediation and surveillance // International commission on large dams. Bulletin. 2016. No. 164. 199 p.
275. Fry, J-J. Projet National ERINOH: Développement du renard: étude de l'effondrement / J-J. Fry, J-R. Courivaud, F. Laigle. Report ERINOH 3 Tranche 2010 EDF PAREOT 0038. 2020.
276. Effects of weak layer angle and thickness on the stability of rock slopes / Garmondyu E. Crusoe Jr, Qing-xiang Cai, Ji-sen Shu [et al.] // International journal of mining and geo-engineering. 2016. Vol. 50. No 1. P. 97–110.
277. Козырев, А. А. Характерные особенности напряженно-деформированного состояния в борту глубокого карьера по результатам численного моделирования / А. А. Козырев, И. Э. Семенова, И. М. Аветисян // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 56. С. 264–272.
278. Геомеханическое обеспечение технических решений при ведении горных работ в высоконапряженных массивах / А. А. Козырев, В. И. Панин, И. Э. Семенова [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 2. С. 46–55.
279. Мельников, Н. Н. Изменение геодинамического режима геологической среды при ведении крупномасштабных горных работ на глубоких карьерах / Н. Н. Мельников, А. А. Козырев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 56. С. 7–23.

280. Козырев, А. А. Геомеханическое обоснование рациональных конструкций бортов карьеров в тектонически напряженных массивах / А. А. Козырев, В. В. Рыбин // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2015. № 2. С. 245–250.
281. Evaluation and monitoring of seepage and internal erosion. Interagency Committee on Dam safety. — Federal Emergency Management Agency (FEMA P-1032), 2015. 576 p.
282. Патент РФ № RU 74643 U1, 24.01.2007. А. Д. Елисеев, Д. А. Елисеев. Устройство наблюдения за напорной дамбой или плотиной. 2008.
283. Технический отчет по комплексным инженерным изысканиям, выполненным в 2003 г. Инженерно-геологические работы. Обследование состояния намывных грунтов Северной дамбы / Пояснительная записка и чертежи 02-02-02-104-01-ИГ.1. ОАО «Институт Гипроникель». 2004.
284. Технический отчет по теме: «Расчетные исследования устойчивости ограждающих дамб хвостохранилища обогатительной фабрики № 1 ГМК «Печенганикель» по договору №140108404» — НПК СПбГПУ, г. Санкт-Петербург. 2004.
285. Технический отчет. Пояснительная записка «Лабораторные исследования образцов керна скважин хвостохранилища ОФ АО «Кольская ГМК»» (ГМК17/130-Д-1-ПЗ) — ФГБУ Горный институт КНЦ РАН, г. Апатиты. 2017.
286. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. М.: Стандартинформ, 2018.
287. СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов. Утв. Минрегионом России 29.12.2011.
288. СП 23.13330.2018. Основания гидротехнических сооружений. Утв. Минстроем России 13.08.2018.
289. Проект эксплуатации сооружений хвостового хозяйства обогатительной фабрики АО «Кольская ГМК» на 2016–2020 гг. Этап 2. Проектная документация по эксплуатации хвостового хозяйства обогатительной фабрики АО «Кольская ГМК» на 2016–2020 гг. с учетом корректировки и согласования предварительных технических решений с Заказчиком (3625-ПЭХХ2) / ЗАО «Механобр инжиниринг». СПб., 2015.
290. Калашник, А. И. Исследования ограждающего насыпного гидротехнического сооружения как прототипа дамбы хвостохранилища горно-обогатительного предприятия / А. И. Калашник, Н. А. Калашник // *Вестник КНЦ*. 2013. № 1. С. 27–30.
291. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров / Одобрено и рекомендовано к применению Госгортехнадзором СССР. Л.: ВНИМИ, 1972. 165 с.
292. Васильев, Н. К. Водоупорные элементы грунтовых плотин в северной строительно-климатической зоне с использованием грунтово-криогелевых композитов / Н. К. Васильев, В. Б. Глаговский, А. А. Иванов, И. Н. Шаталина // *Гидротехническое строительство*. 2013. № 11. С. 19–23.
293. Косиченко, Ю. М. Высоконадежные конструкции противофильтрационных покрытий каналов и водоемов, критерии их эффективности и надежности / Ю. М. Косиченко, О. А. Баев // *Гидротехническое строительство*. 2014. № 8. С. 18–25.
294. Противофильтрационные завесы в промышленности / Ю. И. Волков, А. А. Изотов, Ю. В. Пономаренко. М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2014. 304 с.

ISBN 978-5-91137-465-5

