

ТЕХНИЧЕСКАЯ ЗАПИСКА 2 ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ РИСКИ

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ПЕРЕДОВОЙ ПРАКТИКИ ПО
БЕЗОПАСНОСТИ ПЛОТИН



THE WORLD BANK
IBRD • IDA | WORLD BANK GROUP



GWSP

GLOBAL WATER
SECURITY & SANITATION
PARTNERSHIP

О Глобальной Практике по Водным Ресурсам

Начавшая свою деятельность в 2014 году, Глобальная Практика по Водным Ресурсам группы Всемирного Банка в рамках единой платформы объединяет механизмы финансирования, управление знаниями и механизмы реализации. Объединяя глобальные знания Банка с инвестициями в страны, эта модель создает больше экономического потенциала для преобразовательных решений, с целью оказания помощи странам в устойчивом росте.

Посетите нашу веб-страницу по адресу www.worldbank.org/water или следите за нашими новостями в социальной сети Twitter по адресу [@WorldBankWater](https://twitter.com/WorldBankWater).

О Глобальном Партнерстве в области Водной Безопасности и Санитарии (GWSP)

Данная публикация стала возможной благодаря поддержке Глобального партнерства в области водной безопасности и санитарии (GWSP). GWSP – это многосторонний донорский трастовый фонд, администрируемый Глобальной практикой Всемирного банка по водным ресурсам и финансируемый Министерством иностранных дел и торговли Австралии, Федеральным министерством финансов Австрии, Фондом Билла и Мелинды Гейтс, Министерством иностранных дел Дании, Министерством иностранных дел Нидерландов, Министерством экономических отношений и цифровой трансформации Испании (MINECO), Шведским агентством международного сотрудничества и развития, Государственным секретариатом Правительства Швейцарии по экономическим вопросам, Швейцарским агентством по развитию и сотрудничеству, и Агентством США по Международному Развитию.

Посетите нашу веб-страницу по адресу www.worldbank.org/gwsp или следите за нашими новостями в социальной сети Twitter по адресу [@TheGwsp](https://twitter.com/TheGwsp).

ТЕХНИЧЕСКАЯ ЗАПИСКА 2 ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ РИСКИ

© 2023 Международный Банк Реконструкции и Развития / Всемирный Банк

1818 H Street NW, Washington, DC 20433

Телефон: 202-473-1000; веб-сайт: www.worldbank.org

Данный документ был первоначально опубликован Всемирным банком на английском языке в 2021 году. В случае расхождений преимущественную силу должен иметь исходный язык.

Данная публикация является результатом работы сотрудников Всемирного банка при участии сторонних организаций. Содержащиеся в настоящем документе выводы, толкования и заключения принадлежат его авторам и не обязательно отражают мнения Всемирного банка, его Совета Исполнительных Директоров или правительств, которые они представляют.

Всемирный банк не гарантирует точность данных, содержащихся в настоящей публикации. Национальные границы, цвета, обозначения и прочая информация, помещенная на картах в настоящей публикации, не являются выражением мнения Всемирного банка относительно юридического статуса какой-либо территории и не означают подтверждение или признание какой-либо территории таких границ.

Права и Разрешения

Материалы, содержащиеся в данной публикации, охраняются авторским правом. Поскольку Всемирный банк приветствует распространение своих публикаций, данная работа может быть воспроизведена полностью или частично в некоммерческих целях при условии указания полной ссылки на эту работу.

Данная Техническая Записка по Геотехническим Рискам является дополнительным документом к Рекомендации по применению передовой практики по Безопасности Плотины. Ссылка на данный документ должна оформляться следующим образом: World Bank. 2021. “Good Practice Note on Dam Safety – Technical Note 2: Geotechnical Risk.” World Bank, Washington, DC.

Любые вопросы относительно прав и лицензий, включая производственные права, следует направлять по адресу: Издательский Отдел Всемирного Банка, The World Bank Group, 1818 H Street NW, Washington, DC 20433, USA; факс: 202-522-2625; электронная почта: pubrights@worldbank.org.

Фотография на обложке: Плотина гидроэнергетического комплекса Лом-Пангар [Lom Pangar] (Камерун) © Имед Хафи, Electricity Development Corporation, Камерун.

Дизайн обложки: Билл Праглуски, Critical Stages, LLC.

Техническая Записка 2: Геотехнические риски

Содержание

Введение	1
Геотехнические угрозы	1
Геологические угрозы	2
Состояние основания	3
Устойчивость и фильтрационная прочность береговой линии водохранилища	4
Выбор типа плотины и ключевые факторы	6
Программа работ по инженерным изысканиям	6
Геотехнические отчеты и базовые данные	12
Реестр геотехнических рисков	14
Справочная литература	18

Введение

Настоящая техническая записка подготовлена с целью предоставления рабочим группам и заказчикам Всемирного банка рекомендаций по геологическим и геотехническим вопросам и рекомендуемым мерам по снижению и управлению рисками. При изысканиях, проектировании и строительстве плотин необходимо выявить и учесть все потенциальные опасности и угрозы для безопасности плотины, осознавая при этом все возможные последствия разрушения плотины.

Геотехнические угрозы

Геотехнические опасности¹ и угрозы для плотины должны рассматриваться для всей системы плотины, включая тело плотины, вспомогательные сооружения, основания, устои и береговую линию водохранилища. К критическим опасностям и угрозам, которые могут привести к разрушению плотины, относятся:

- Суффозия и сосредоточенная фильтрация через тело или основание плотины
- Прорыв тела плотины
- Поверхностная эрозия
- Устойчивость откосов
- Статическое и динамическое разжижение грунтов основания или насыпи плотины
- Чрезмерная инфильтрация

¹ Опасность здесь определяется как угроза или состояние, которое может возникнуть в результате внешних воздействий (например, землетрясения или наводнения) или внутренней уязвимости. Риск определяется путем сочетания оценки вероятности возникновения опасности с оценкой последствий, которые эта опасность может вызвать в случае ее возникновения. Более подробная информация представлена в разделе "Реестр геотехнических рисков".

- Чрезмерное фильтрационное давление
- Деформация плотины
- Сдвиг основания по плоскостям ослабления
- Непригодные строительные материалы

Геологические угрозы

Геотехнические опасности вытекают из более широких геологических опасностей, окружающих территорию плотины и водохранилища. С геологической точки зрения невозможно найти два идентичных участка. Многочисленные геологические процессы и взаимодействия могут создавать сложные участки и различные материалы, доступные для строительства плотины. Геология оказывает значительное влияние на расположение площадки плотины и элементов плотины. Геологические опасности — это те геологические особенности, которые потенциально могут негативно повлиять на успешное строительство плотины на выбранном участке. В ходе успешного проекта эти геологические опасности выявляются и, при необходимости, смягчаются последствия, которые эти опасности могут оказать на строительство и эксплуатацию плотин и водохранилищ.

Геологические угрозы могут включать:

- Дефекты в скальных основаниях, включающие трещины, плоскость напластования, разломы, заполняющие пласты, выщелачивание пород, подземные аллювиальные каналы, выветривание или изменение пластов, могут образовать зоны фильтрации или неустойчивые клинья в основании плотины
- Дефекты в грунтовых основаниях, включая трещины, трещины растяжения, исторические оползни и заполняющие пласты
- Потенциально-разжижаемые грунты основания, которые являются ненадежной опорой при землетрясениях
- Растворимые породы, которые со временем приводят к фильтрации и проблемам эрозии
- Меняющаяся твердость материалов основания, приводящая к неравномерным осадкам плотины
- Потенциально-неустойчивые массивы горных склонов в местах примыкания плотины
- Потенциально-неустойчивые склоны береговой линии водохранилища, которые могут вызвать обвальную волну и перелив воды через гребень плотины
- Материалы основания, подверженные эрозии и размыву в результате рассеивания кинетической энергии потока воды через водосбросные сооружения
- Наличие высоконапорных систем грунтовых вод, препятствующих выемке грунта и строительству фундамента
- Химически активные заполнители, влияющие на строительные материалы (например, заполнители, которые могут стать причиной трещин, образующихся при расширении бетона в результате реакции между заполнителем и щёлочью или заполнители цементационной завесы грунтовой плотины)

- Активные региональные разломы, которые могут вызвать землетрясения
- Активные разломы, пересекающие водохранилище или участок плотины, способные вызвать стоячие волны в водохранилище и вызвать перелив воды через гребень плотины

Геологические угрозы должны оцениваться с использованием данных, полученных в ходе инженерно-геотехнических изысканий, которые дополняются анализом и заключением геологов и инженеров-геотехников. Необходимо рассмотреть меры по смягчению последствий для уменьшения воздействия угрозы или снижения вероятности ее возникновения. Если риск останется неприемлемо высоким даже после принятия мер по смягчению последствий, то от строительства плотины, возможно, придется отказаться.

Состояние основания

Дефекты основания могут повлиять на целостность и устойчивость плотины любого типа, а не устраненные дефекты основания явились причиной разрушения ряда плотин по всему миру. Основание любой плотины должно выполнять следующие пять функций:

- Обеспечение устойчивости
- Обеспечение достаточной прочности для поддержания деформаций в рамках допустимых пределов
- Контроль и ограничение фильтрационных потоков и фильтрационного давления под плотиной
- Обеспечение устойчивости к суффозии
- Не подвергаться разрушению с течением времени

Надлежащее проектирование фундамента должно решать любые проблемы, возникающие в связи с этими функциями.

В некоторых участках строительства плотины геологические условия достаточно просты, и все вышеперечисленные функции легко выполнимы. На других участках геологические условия сложны, и критические дефекты могут не проявиться до тех пор, пока не будет проведена выемка грунта. Задача состоит в том, чтобы удерживать неопределенности в приемлемых пределах. Некоторые геологические условия требуют более тщательного изучения, проектирования и строительства.

В Приложении 1 к Социально-Экологическому Стандарту (СЭС) 4 указано, что к плотине, имеющей «сложное и трудноподготавливаемое основание», должны применяться определенные требования по безопасности плотины независимо от ее размеров. К таким сложностям и проблемам основания могут относиться:

- Крупнозернистый песок, гравий и галька, которые могут способствовать образованию сосредоточенной фильтрации в основании или унос материалов насыпи в основание
- Рыхлые иловые или песчаные отложения, которые потенциально могут разжижаться
- Открытые или заполненные трещины в породах основания, которые могут подвергаться эрозии и создавать потенциал для сосредоточенной фильтрации или уноса материалов насыпи в основание

- Залегающие между пластами отложения грунта (мелкий с крупным), которые могут способствовать образованию сосредоточенной фильтрации в основания
- Ослабленные породы, прослойки и пласты с низкой прочностью, которые могут создавать потенциальные плоскости скольжения в пределах фундамента и вызвать разрушения
- Наличие субгоризонтальных трещин, ограничивающих прочность на сдвиг на подошве основания или в самом основании плотины
- Разломы и другие крупные разрывы, которые могут содержать низкопрочные материалы и, при неблагоприятной ориентации, влиять на устойчивость плотины
- Высоко сжимающиеся или дисперсные грунты, которые могут привести к обрушению, к неравномерным осадкам плотины, трещинам или сосредоточенной фильтрации основания
- Карстовые образования (полости и карстовые воронки) в известняке или растворимых основаниях (например, в гипсе), которые могут привести к значительным сосредоточенным фильтрациям и дополнительным карстовым воронкам после заполнения водохранилища в результате растворения или вымывания заполняющих или перекрывающих материалов
- Активные разломы, которые могут вызывать землетрясения, приводящие к смещениям под плотиной и началу суффозии, увеличению фильтрационного давления и снижению устойчивости плотины (см. Техническую записку по Сейсмическим Рискам)
- Оползни или неустойчивые зоны сопряжения плотины

Устойчивость и фильтрационная прочность береговой линии водохранилища

Помимо основания плотины и устоев, необходимо также оценить геотехнические проблемы берегов водохранилища.

Устойчивость береговых склонов водохранилища

В рамках оценки безопасности плотины следует изучить возможность возникновения оползней на береговых склонах водохранилища. Оползни береговых склонов водохранилища могут вызвать обвальную волну, образующуюся в результате быстрого движения оползня (или обвала породы), способную привести к переливу воды через гребень плотины и затопить населенные пункты в районе водохранилища.

Кроме того, оползень склонов водохранилища или склонов рек верхнего течения может создать завальную плотину, блокирующую речной поток/воду в водохранилище. Прорыв такой завальной плотины также может вызвать обвальную волну, способную привести к переливу воды через гребень плотины

МКБП (2002) предоставляет рекомендации по исследованию и управлению оползнями водохранилищ, содержит информацию о возможных мерах по снижению риска, а также обсуждает требования и методы постоянного мониторинга оползневых процессов в водохранилищах.

Применительно к оползням вокруг береговой линии водохранилища необходимо учитывать следующее:

- Наличие части периметра водохранилища (например, периметр с узким гребнем) вероятность разрушения которой выше вероятности разрушения самой плотины.
- Существует ли вероятность того, что волны, генерируемые оползнями, могут оказать воздействие на населенные пункты, прилегающие к водохранилищу
- Возможность повторной активации существующих оползней или возникновения новых оползней, приводящих к переливу воды через гребень плотины или перекрытия водохранилища или притоков, расположенных выше по течению.
- Может ли эксплуатация водохранилища привести к эрозии подошвы склонов в зонах с высокой вероятностью оползней
- Возможность разрушения склонов вблизи водосброса или донных водовыпусков и блокирования сооружений или ограничение их функционирования
- Режим эксплуатации необходимый для предотвращения влияния наносов или мусора на работу водосброса или донных водовыпускных сооружений
- Эксплуатационные требования необходимые для обеспечения устойчивости существующих неактивных и других потенциальных оползневых участков при снижении уровня воды в водохранилище.
- Режим управления необходимый для мониторинга состояния известных оползневых участков и выполненных восстановительных работ во время ввода плотины в эксплуатацию и эксплуатации

Фильтрационная прочность береговых склонов водохранилища

Фильтрационная прочность береговых склонов водохранилища зависит от проницаемости грунтов и других местных материалов, существующих грунтовых вод вокруг водохранилища, а также от градиентов и длины потенциальных путей фильтрации. В то время как незначительная фильтрация воды из водохранилища не создает проблем с безопасностью и эксплуатацией плотины, сосредоточенная фильтрация может привести к ряду негативных последствий. Чрезмерная утечка может препятствовать заполнению водохранилища и вызвать повышение уровня грунтовых вод, что приведет к развитию заболоченных участков ниже по течению или оползням. Неконтролируемые утечки могут привести к размыву окружающего грунта или конструкции плотины.

Скорость фильтрации будет зависеть от геологической формации и типа материала, окружающего водохранилище. Нерастворимые, растворимые и почвенные материалы будут иметь различные уровни проницаемости для воды. Ключи к пониманию фильтрационной устойчивости нерастворимых и растворимых пород включают понимание условий грунтовых вод вокруг резервуара и истории участка, региональной топографии, геологии и свойств материалов, окружающих водохранилище.

Существуют множество мер по предотвращению и сокращению фильтрации, таких как облицовка, цементация, строительство диафрагм и т. д. Поскольку эти работы могут быть довольно затратными, важно провести

надлежащие инженерно-геотехнические изыскания и оценить стоимость работ по снижению фильтрации до приемлемого уровня. В зависимости от таких оценок может потребоваться пересмотр места расположения плотины.

Выбор типа плотины и ключевые факторы

Плотины в основном строятся из «земляных» (грунт и камень) материалов или бетона. Выбор подходящего типа плотины и строительных материалов зависит от нескольких факторов, включая назначение и геологические особенности. В таблице 1 приведены существенные факторы, которые следует учитывать для конкретных типов плотин, чтобы минимизировать угрозы безопасности плотины, а также возможные меры по проектированию и смягчению последствий потенциальных отказов.

Ниже приведены некоторые хорошие справочники и руководства по проектированию и восстановлению плотин:

- Уивер и Брюс (2007) по цементации основания
- Фелл и др. (2005) по геотехническому проектированию плотин.
- МКБП (2005) по основаниям плотин, включая геологические факторы, методы изысканий, подготовку и мониторинг.
- МКБП (2009) по техническим характеристикам и контролю качества бетонных плотин
- FEMA (2011) по обратным фильтрам (переходная зона) грунтовых плотин
- USBR (1987) по проектированию низконапорных плотин

Программа работ по инженерным изысканиям

Для понимания стратиграфии основания плотины, конструкции и строительных материалов необходимо провести комплексные инженерно-геотехнические изыскания. Все изыскания и сбор данных для проектирования должны проводиться на уровне, соответствующем сложности территории плотины. Изыскания на территории могут быть длительными, поэтому важно начать их как можно раньше. Изыскания должны быть пропорциональны степени угроз сооружения и величине риска. Может возникнуть соблазн отложить изыскания до этапа реализации, но к тому времени контракт на строительство уже будет подписан, и неизвестные грунтовые условия, скорее всего, станут источником споров по контракту. Предпочтительно проводить изыскания поэтапно, чтобы выводы из полученных данных определяли объем работ на последующих этапах изысканий.

Изыскания могут быть затратными. Даже если на ранней стадии разработки проекта будет трудно убедить клиента тратить средства, важно вкладывать время и деньги и поэтапно, во избежание возникновения неожиданностей. Стоимость изысканий будет зависеть от сложности участка и характера имеющихся материалов. Степень риска сооружения также должна быть фактором разумного вложения средств в изыскания для защиты населения, проживающего ниже по течению. Чем больше средств будет вложено в хорошо спланированные исследования, тем больше вероятность того, что геотехнические риски будут выявлены и смягчены, а не станут причиной

ТАБЛИЦА 1. Выбор типа плотины и ключевые факторы

Тип плотины и основные характеристики	Типичные возможные режимы отказов	Ключевые факторы и вопросы	Основные меры по проектированию и смягчению последствий
<p>Плотины из однородной насыпи (из однородного грунта)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Конструкция из одного материала с низкой проницаемостью; может иметь дренажную призму в нижнем бьефе • Строится из эрозионно-стойких водонепроницаемых материалов • Данная конструкция более характерна для небольших плотин • По сравнению с бетонной плотиной лучше подходит для грунтовых/гравийных оснований и оснований, склонных к осадке /деформации • Однородные грунтовые плотины могут включать такие дополнительные противофильтрационные устройства как экран из негрунтовых материалов, цементационная завеса и дренажная призму 	<ul style="list-style-type: none"> • Утечка через трещины или дефекты в ядре, приводящая к суффозии ядра и последующим к разрушению плотины • Внутренняя суффозия и образование сосредоточенной фильтрации через ядро вблизи боковых примыканий 	<ul style="list-style-type: none"> • Наличие достаточного количества подходящего непроницаемого материала для насыпи, естественно устойчивого к сосредоточенной фильтрации и суффозии • Подверженность выбранных материалов к суффозии и сосредоточенной фильтрации • Прочность, сжимаемость и проницаемость насыпного материала для ограничения оседания и контроля фильтрации • Осторожность при использовании дисперсных грунтов • Прочность материала основания и возможные недостатки • Следует избегать в конструкции основания образования ступенек и резких изменений уклона, которые могут привести к образованию трещин в ядре плотины. 	<ul style="list-style-type: none"> • Обеспечение необходимого дренажа в пределах плотины и упорной призмы для предотвращения перенасыщения влагой низкой призмы • Цементационная завеса для контроля фильтрации через основание • Усиление грунта основания путем инъекции раствора или технологии перемешивания грунта (машинное перемешивание грунта с цементным раствором) • Усиление контрфорсом низового откоса если откос неустойчив • Противофильтрационный контрфорс низового откоса, если риск фильтрации через плотину слишком высок
<p>Плотины из неоднородной насыпи</p> <ul style="list-style-type: none"> • Конструкция с зоной низкой проницаемости (ядро, центральная призма, экран) и земляной или каменной насыпью более высокой проницаемости в низовой и верховой призме • Ядро из низкопроницаемых глинистых грунтов, мелких и пылевых песков+, асфальта, бетона или геомембраны • Обычно включают зоны обратного фильтра (переходная зона) для предотвращения внутренней эрозии ядра (предотвращение выноса фильтрационным потоком мелких частиц) • Включает дренажные устройства для контроля и отвода фильтрации • В качестве альтернативной конструкции используется противофильтрационная поверхность из асфальта, бетона или геомембраны, верховой грани плотины 		<ul style="list-style-type: none"> • Необходимость обработки основания в местах примыкания к телу плотины • Соответствующее проектирование фильтрующих и дренажных материалов для предотвращения сосредоточенной фильтрации и контроля фильтрации • Выбор строительных материалов, которые не цементируются естественным образом • Риск загрязнения или нарушение целостности фильтров и дренажей (кольматация) из-за некачественного производства или технологического расположения • Строительные методы, предотвращающие дефекты плотины, такие как почти преимущественно горизонтальные пути фильтрации, способствующие интенсивным фильтрациям с высокой скоростью или высокому внутреннему давлению • Предотвращение обходных путей фильтрации и суффозии через устой 	<ul style="list-style-type: none"> • Устойчивость между зонами и основанием для предотвращения суффозии и сосредоточенной фильтрации • Обеспечение необходимого дренажа в пределах плотины и упорной призмы для предотвращения перенасыщения низкой призмы • Цементационная завеса для контроля фильтрации через основание • Усиление грунта основания путем инъекции раствора или технологии перемешивания грунта (машинное перемешивание грунта с цементным раствором) • Усиление контрфорсом низового откоса если откос неустойчив • Противофильтрационный контрфорс низового откоса, если риск фильтрации через плотину слишком высок

продолжение таблицы на следующей странице

ТАБЛИЦА 1. Продолжение

Тип плотины и основные характеристики	Типичные возможные режимы отказов	Ключевые факторы и вопросы	Основные меры по проектированию и смягчению последствий
<p>Бетонные гравитационные плотины</p> <p>Полагаются на вес бетона для удержания воды в водохранилище. Обычно строятся на умеренно прочных или прочных скальных породах. Методы строительства включают:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Традиционные бетонные гравитационные плотины, построенные из массивного бетона • Плотины из укатанного бетона, построенные с помощью дорожно-строительной техники • Плотины из песчано-гравийной смеси с водонепроницаемой бетонной поверхностью 	<ul style="list-style-type: none"> • Сдвиги, проходящих по контакту бетон - скала и в массиве основания • Опрокидывание, вызванное слабой прочностью основания • Сдвиг, проходящих по трещинам в массивах бетона • Расширение заполнителей бетона, приводящее к деградации тела плотины • Прорыв, связанный с обрушением устоев • Сосредоточенная фильтрация через заполнения трещин пород основания, приводящая к неконтролируемой инфильтрации • Структурное разрушение плиты верхнего бьефа контрфорсной плотины 	<ul style="list-style-type: none"> • Потенциальная деформация основания • Наличие в породе основания эрозионных разрывов, представляющие риск возникновения фильтрации или проблем с устойчивостью • Наличие уязвимых субгоризонтальные плоскостей в породе основания и возможность их укрепления • Эффективные системы внутреннего дренажа для снижения фильтрационного давления • Долговечность бетонного материала в течение срока службы и химическая активность заполнителей (не допускать щелочно-кремнеземистой активности) • Обработка швов и водонепроницаемость верховой грани • Цементы с низкой теплотой гидратации и пуццолановые материалы должны быть в приоритете 	<ul style="list-style-type: none"> • Цементационная завеса для контроля фильтрации через основание • Обеспечение надлежащего дренажа за цементной завесой в зубе верховой грани плотины для предотвращения высокого фильтрационного давления • Обработка путей фильтрации в основании с помощью дренажных колодцев, бетона и цементации • Выемка неустойчивых скальных пород в фундаменте и закладка массивного бетона • Наличие внутреннего дренажа бетона для предотвращения высокого давления в бетоне • Гидроизоляция для предотвращения утечек через стыки бетонных блоков • Выбор массивно-контрфорсной конструкции для устойчивости, если плотина подвержена к сдвигу на границе основания • Дренажные системы для удаления воды из системы галерей плотины • Дренаж и контрфорс неустойчивых примыканий
<p>Бетонные контрфорсные плотины</p> <ul style="list-style-type: none"> • Состоит из верхней бетонного массивного оголовка, поддерживаемой через определенные промежутки рядом бетонных контрфорсов. • Обычно строятся на умеренно прочных или прочных скальных породах 			

продолжение таблицы на следующей странице

ТАБЛИЦА 1. Продолжение

Тип плотины и основные характеристики	Типичные возможные режимы отказов	Ключевые факторы и вопросы	Основные меры по проектированию и смягчению последствий
<p>Арочные плотины</p> <ul style="list-style-type: none"> Устойчивость арочных плотин в основном обеспечивается передачей распора (нормальной силы в арочных поясах) на берега. Как правило, строятся на твердой скальной породе и узких скальных ущельях Проектирование арочных плотин является сложным и требует высокий уровень специализации 	<ul style="list-style-type: none"> Обрушение клина скальной породы в зоне примыкания, лишаящее арку опоры Чрезмерная деформация устоя, приводящая к разрушению бетона арки Разрушение арочной плотины при дефекте в бетоне плотины Расширение заполнителей бетона, приводящее к деградации тела плотины Сосредоточенная фильтрация через заполнения трещин пород основания, приводящая к неконтролируемой инфильтрации 	<ul style="list-style-type: none"> Наличие разрывов в породе, которые могут вызвать клиновидное обрушение или пути фильтрации, и возможность их укрепления Прочность скальной породы примыкания для контроля деформации под нагрузкой плотины и предотвращения разрушения Прочность устоев примыкания и основания против высокого гидравлического градиента в районе основания плотины; необходимо рассмотреть варианты укрепления (например, путем цементации) Наличие в породе основания эрозионных разрывов, представляющих риск фильтрации или устойчивости Долговечность бетонного материала в течение срока службы и химическая активность заполнителей (не допускать щелочно-кремнеземистой активности) Обработка швов и водонепроницаемость верховой грани Цементы с низкой теплотой гидратации и пуццолановые материалы должны быть в приоритете 	<ul style="list-style-type: none"> Цементационная завеса для контроля фильтрации через основание Обеспечение надлежащего дренажа за цементной завесой в зубе верховой грани плотины для предотвращения высокого фильтрационного давления Обработка путей фильтрации в основании с помощью дренажных колодцев, бетона и цементации Выемка неустойчивых скальных пород в фундаменте и закладка массового бетона Гидроизоляция для предотвращения утечек через стыки бетонных блоков Усиление устоев с помощью цементного раствора или шахт для уменьшения деформации устоев под нагрузкой Опорная анкеровка плотины устоев для предотвращения перемещения скальных пород Дренаж и контрфорс неустойчивых устоев

перерасхода средств на более поздних стадиях проекта. Существует много примеров внесения серьезных изменений в проект после обнаружения непредвиденных геологических условий в проектах².

Следует также отметить, что затраты на проведение изысканий часто определяются затратами на доступ к участку и мобилизацию оборудования. Дополнительные затраты на дополнительные изыскания после того, как были сделаны первоначальные инвестиции, могут быть низкими по сравнению с затратами на перемобилизацию.

Большинство программ по инженерным изысканиям выполняются в несколько отдельных этапов со следующими целями:

- Инженерные изыскания до предварительного технико-экономического обоснования проводятся для получения достаточной информации для планирования технико-экономического обоснования. На этом этапе проекта, вероятно, будут определены возможные места расположения плотины, типы плотины или возможные меры по устранению недостатков. Местоположение плотины будет определено в региональном геологическом и геоморфологическом контексте. Будут использоваться первоначальная разведка местности, Google Планета Земля, спутниковые снимки, региональное геологическое картирование и поиск данных, но значительных физических изысканий на участке может не проводиться до тех пор, пока не будет выбран предпочтительный участок и определен предпочтительный тип плотины. На ранней стадии важно, чтобы технические эксперты посетили предлагаемый участок для оценки его пригодности.
- Инженерные изыскания во время технико-экономического обоснования для определения оптимального решения, подтверждения технической осуществимости выбранного решения и оценки стоимости разработки проекта. На этом этапе необходимо определить условия на участке и выявить степень местных опасностей. После определения участка проводится съемка, позволяющая получить исходные топографические данные, с помощью LiDAR. Опытный геолог может определить потенциальные разломы и оползни по этим снимкам. На этом этапе ожидается проведение геологического картирования и первоначальных подземных исследований (скважинные исследования, определение проницаемости, геофизические исследования и лабораторные исследования образцов). Эти работы должны быть направлены на выявление геологических опасностей в основании плотины и прилегающей территории, наличия подходящих строительных материалов в объемах, необходимых для строительства.
- Инженерные изыскания во время проектирования проводятся с целью определения конкретных характеристик участка и материалов для строительства, а также урегулирование неразрешенных вопросов, обнаруженных в ходе предыдущих изысканий. Инженерные изыскания с использованием скважин, геофизических исследований и лабораторных испытаний образцов позволяют тщательно оценить особенности, дефекты и аномалии участка расположения основания плотины и водосброса, геотехнические свойства (прочность, градация, сжимаемость, совместимость и проницаемость) основания и строительных материалов, а также угрозу, исходящую от любых активных разломов и опасных склонов водохранилища.

² Исследование 40 плотин в Австралии, построенных в период с 1888 по 2012 год, показало последующее превышение стоимости проекта на 49 процентов (медиана) и 120 процентов (в среднем) от стоимости плотины (рассчитанной непосредственно перед началом строительства), при этом значительный вклад в превышение стоимости внесли условия основания (Петерам и МакМахон, 2019).

Методы и цели инженерно-геотехнических изысканий на различных этапах проекта приведены в таблице 2. В МКБП (2005) также приводится обзор инженерно-геотехнических изысканий для разрешения геологических вопросов.

ТАБЛИЦА 2. Методы и цели инженерно-геотехнических изысканий на различных этапах проекта

	Метод изысканий	Цель
Инженерные изыскания до предварительного технико-экономического обоснования	<ul style="list-style-type: none"> Первоначальная разведка местности Google Планета Земля Спутниковые снимки, Региональное геологическое картирование Поиск и анализ данных по местности 	<ul style="list-style-type: none"> Почвогрунтовые условия, топография и т. д. Доступ к площадке, землепользование История местности, предыдущие изыскания Геологические отличительные или характерные черты, потенциальные разломы, участки потенциальных оползней Типы пород на площадке плотины Доступные материалы строительства
Инженерные изыскания во время технико-экономического обоснования	<ul style="list-style-type: none"> Разведка местности Топографическая съемка/картирование Геологическое картирование Бурение скважин (шурфов) Анализ скважинных вод Пробная выемка грунта Геофизические изыскания (сейсморазведка методом преломленных волн, электрическое сопротивление грунтов, радарная съемка и т. д.) Лабораторные/натурные испытания (такие как предельная прочность на сжатие, испытание на трехосный сдвиг и испытание на прямой сдвиг) классификация скальных пород 	<ul style="list-style-type: none"> Почвогрунтовые условия Топография, формы рельефа Определение места пересечения сдвигов и разломов Подземная разведка участка плотины Водопроницаемость основания Геологические особенности, например разломы Состояние основания и материалов для строительства Подповерхностные условия (границы пород и профили выветривания) Физические свойства материалов (основание и материалы для строительства) Физические свойства горных пород
Инженерные изыскания во время проектирования	<ul style="list-style-type: none"> Бурение скважин (шурфов) с извлечением керна или скважинным акустическим каротажем Испытания на проницаемость (по методу Люжона) Геофизические изыскания (например, сейсмический профиль) Лабораторное тестирование образцов Аэрофотосъемка, съемки LiDAR и спутниковые снимки 	<ul style="list-style-type: none"> Определение глубины выветривания, изменения характеристик материалов и дефектов основания Проницаемость основания для проектирования цементационной (противофильтрационной) завесы Инженерно-геотехнические свойства (прочность, градационная сжимаемость, совместимость и проницаемость) основания и материалов для строительства Выявление зон потенциальных оползней и активных разломов

Программа работ по инженерным изысканиям должны осуществляться постепенно для обеспечения, надлежащего выявления и рассмотрение всех характеристик и проблем. Процесс надлежащей реализации программы работ по инженерным изысканиям включает в себя следующее:

1. Четкое определение целей изысканий
2. Рассмотрение существующей информации и выявление недостающих данных
3. Планирование программы работ по инженерным изысканиям
4. Реализация программы работ по инженерным изысканиям
5. Анализ результатов изысканий и, при необходимости, проведение дополнительных изысканий в соответствии с полученными результатами
6. Интерпретация и документирование результатов изысканий

Распределение ответственности за геологические риски имеет большое значение при подготовке контракта на строительство. В зависимости от типа контракта распределение ответственности может быть разным. Контракт с условиями Красной Книги Международной федерации инженеров-консультантов (FIDIC) обычно используется, когда проектировщик привлекается заказчиком. Красная Книга распределяет геологические и геотехнические риски иначе, чем контракт FIDIC с условиями Серебряной Книги на проектирование, закупку, строительство (EPC). FIDIC Изумрудная Книга (2019) также предусматривает механизм распределения рисков, связанных с непредвиденными геологическими условиями, особенно для проектов тоннелестроения³.

Инженерные изыскания должны проводиться компетентными геологами и инженерами, владеющими опытом работы с ожидаемыми геологическими условиями участка. Геологи должны будут проводить полевые работы, составлять карты участка и выявлять опасности. Важно привлечь геологов, специализированных в области инженерных изысканий для плотин, а не в других областях, как горнодобывающая промышленность или дорожные работы. Для использования геотехнических свойств при проектировании плотины инженеры должны иметь опыт в проектировании плотин и четко понимать геологическую модель, созданную геологами.

Геотехнические отчеты и базовые данные

Документирование геотехнической информации является важным для хранения информации о геологии, гидрогеологии, природных опасностях и материалах проекта и передачи их другим сторонам, участвующим в проекте. Документирование геотехнической информации снизит риск допущения ошибок и упущений в период реализации проекта. Кроме того, Геотехнические отчеты будут служить базовой информацией при возникновении контрактных споров между строителем и собственником плотины/Заказчиком.

3 FIDIC (2017a) называется Красной книгой, FIDIC (2017b) - Желтой книгой, а FIDIC (2017c) - Серебряной книгой. Изумрудная книга представляет собой стандартную форму контракта, учитывающую специфику тоннелестроения и предусматривающую механизм распределения рисков, связанных с непредвиденными грунтовыми условиями между сторонами контракта, а также предоставление геологической и геотехнической информации с использованием Отчета по исходным инженерно-геотехническим данным. Этот ключевой документ устанавливает распределение риска между подрядчиком и заказчиком в отношении геологических условий при подготовке контрактного определения прогнозируемых условий. В «Изумрудной книге» также предусмотрен более гибкий механизм задержки сроков завершения работ и корректировки стоимости, связанной с грунтовыми условиями, а также многоуровневый механизм разрешения споров.

Для плотин с низким уровнем риска, построенных на относительно несложных основаниях и из надежных материалов, может быть достаточно краткого геологического отчета. В отчете следует описать особенности геологии участка и любые известные геологические опасности, которые могут повлиять на участок (например, разломы или оползни), с учетом геологии региона. Эта информация должна быть получена из региональных карт, спутниковых снимков, осмотра и предварительных изысканий участка.

Далее в документе приведено описание объема документации для плотин высокого риска и плотин со сложными инженерно-геологическими условиями и материалами. Цель и рекомендуемое содержание геотехнических отчетов описаны в ASCE (2007). Эта структура документации зародилась в туннелестроении, для снижения количества дорогостоящих споров по контракту в связи с инженерно-геологическими условиями. Проекты плотин имеют много геотехнических рисков, которые в ходе реализации проекта также могут привести к дорогостоящим спорам по контракту. В связи с этим аналогичный подход к представлению отчета рекомендуется для проектов плотин и хорошо сочетается с контрактами по стандартам FIDIC (FIDIC 2017 a, b и c).

Ниже представлены более специфические геотехнические отчеты, целесообразные для крупных строительных контрактов и/или плотин с высокой степенью риска:

Отчет по инженерно-геотехническим изысканиям, подготовленный геологами, представляет собой фактический отчет, содержащий исходные данные каротажа скважин и результатов лабораторных исследований. Если известны геотехнические опасности, они также должны быть отражены в отчете. Отчет предназначен для предоставления достаточной информации для снижения риска по проектам и передачи информации подрядчику.

Отчет по исходным инженерно-геотехническим данным, подготовленный геологами на основе отчета по инженерно-геотехническим изысканиям, играет важную роль в определении предполагаемых геотехнических условий при определении цены контракта. Когда отчет по исходным (базовым) инженерно-геологическим данным является частью контракта на строительство, отчет определяет диапазон неблагоприятных условий, которые должны быть предусмотрены и включены в цену контракта. Данный отчет должен содержать описание ожидаемых горно-геологических условий и подземных вод участка с целью понимания риска для подготовки предложений и заявок на участие в тендере по проекту. Отчет может сэкономить затраты на строительство и минимизировать споры при непредвиденных горно-геологических условиях.

Отчет по интерпретации геотехнических данных подготавливается группой квалифицированных инженеров и геологов путем применения собранных инженерно-геотехнических данных в геотехническом анализе. При формировании выводов в этих отчетах необходима экспертная оценка.

Работа геолога должна быть сосредоточена на геологической информации (параметры основания) и определении геологических опасностей и ожидаемых условий. Инженер, проектирующий плотину, должен уделять пристальное внимание инженерным свойствам исследуемых материалов. После вскрытия котлована под основания плотины результаты земляных работ должны быть включены в отчет и сопоставлены с Отчетом по исходным инженерно-геологическим данным.

Подготовка этих отчетов является хорошей возможностью для наращивания потенциала местных инженерно-геологических учреждений и их сотрудников.

Необходимость и детализация этих отчетов должны определяться типом контракта на строительство. В контрактных документах должны быть четко прописаны риски, распределяемые между заказчиком и подрядчиком. В контракте с единичными расценками обычный принцип распределения риска заключается в том, что риск, связанный с состоянием грунта, несет заказчик, а изменения графика строительства находится в сфере риска подрядчика. Поэтому любое непредвиденное состояние грунта, требующее дополнительных земляных работ, обработки грунта, опорную конструкцию или замены, не предусмотренную проектом, будет оплачивать заказчик. Для обеспечения финансирования непредвиденных условий следует предусмотреть бюджет для непредвиденных затрат. Если заказчик плотины располагает значительным внутренним потенциалом и компетентным проектировщиком, отчет по исходным инженерно-геотехническим данным является целесообразным в качестве базовых условий для контракта. Отчет по исходным инженерно-геотехническим данным является более целесообразным для сложных грунтовых условий. Наличие значительного внутреннего потенциала и компетентного проектировщика также является более значимым при наличии сложных условий на объекте.

Если заказчик не обладает потенциалом для управления контрактом, заказчику следует привлечь к помощи опытного Инженера Заказчика. Для плотин с высоким риском и сложными геотехническими условиями рекомендуется привлечение группы экспертов, включая геолога/специалиста по геотехнике и, возможно, экспертов по надзору за строительством и управлению контрактом. Заказчик может делегировать риск, связанный с состоянием грунта, используя контракт с фиксированной стоимостью, контракт на проектирование и строительство, контракт на проектирование, закупку, строительство (EPC) или контракт «под ключ», но заказчик должен учесть, что в этих случаях подрядчик либо включит значительную сумму для непредвиденных расходов в фиксированную стоимость, либо будет настаивать на проведении собственных изысканий на участке до предоставления фиксированной стоимости. Для таких контрактов особенно важна передача всей информации по геотехническим изысканиям, полученной заказчиком, до начала переговоров по контракту. Затем подрядчик может самостоятельно оценить геотехнические риски на участке.

Реестр геотехнических рисков

Реестр геотехнических рисков рекомендуется для каждого проекта. Реестр показывает степень риска, присущего различным аспектам проекта и относящегося к состоянию грунта. Целью реестра геотехнических рисков является оценка риска для проекта, возникающего из-за проблем, связанных с грунтом или строительными материалами, и определение подходящих мер по снижению риска, которые позволят снизить риск до приемлемого уровня. Реестр рисков должен разрабатываться и дорабатываться по мере реализации геотехнического проектирования и оценки. Руководство по разработке реестра представлено в нескольких источниках, включая ICE (2001).

Степень риска (R) определяется путем сочетания оценки вероятности (P) возникновения опасности⁴ с оценкой последствий (I), которые данная опасность вызовет при возникновении ($R = P \times I$). В таблице 3 показана шкала, по которой измеряются вероятность и последствия и определяется степень риска.

4 В то время как в других разделах данной Технической записки опасность используется в качестве меры тяжести последствий в случае разрушения плотины в соответствии с практикой проектирования плотин, в данном предложении опасность подразумевает угрозу или состояние, которое может быть результатом внешних факторов (например, землетрясения или наводнения) или внутренней уязвимости.

ТАБЛИЦА 3. Классификация геотехнических рисков

		Последствия				
		Незначительные	Легкие	Средней тяжести	Значительные	Очень тяжелые
Вероятность	Очень вероятно	Низкий	Умеренный	Высокий	Очень высокий	Очень высокий
	Вероятно	Нет/ Минимальный	Низкий	Умеренный	Высокий	Очень высокий
	Возможно	Нет/ Минимальный	Низкий	Низкий	Умеренный	Высокий
	Маловероятно	Нет/ Минимальный	Нет/ Минимальный	Низкий	Minor	Умеренный
	Крайне маловероятно	Нет/ Нет/ Минимальный	Нет/ Минимальный	Нет/ Минимальный	Нет/ Минимальный	Низкий

В таблице 4 приведен пример реестра рисков для бетонной плотины с дополнительной насыпной дамбой ограждения.

Степень вероятности «крайне маловероятно» указывает на состояние, которое, согласно имеющимся данным, не должно существовать. Включение риска в реестр не является подтверждением того, что проблема существует на объекте. Это лишь определяет риск и меры по снижению риска для продолжения проекта.

Изыскания должны вести к разработке мер по снижению значительных геотехнических рисков. Если заказчик обнаруживает, что объективные трудности и ограничения графика не позволяют проводить изыскания удовлетворительно, он может включить в контракт положение об отсрочке выполнения условий. Данный процесс заключается в следующем:

- В период мобилизации подрядчик проводит дополнительные изыскания и передает их результаты заказчику с предлагаемыми изменениями в проекте.
- Заказчик рассматривает представленные материалы и дает указания подрядчику о том, какие изменения следует или не следует внедрять.
- Выводы обобщаются в отчете, и в ведомость объемов работ и расходов по контракту вносятся соответствующие изменения

В ходе строительства могут быть обнаружены ранее не выявленные геотехнические проблемы. Важно, чтобы эти вопросы решались при каждом выявлении. Такие геотехнические проблемы должны решаться путем внесения изменений в проект или применения мер на случай непредвиденных обстоятельств, запланированных до начала строительства. Контракты должны предусматривать возможность внесения изменений в ответ на геотехнические риски, выявленные в ходе строительства. Соответствующие претензии подрядчика должны будут рассматриваться в соответствии с положениями контракта.

ТАБЛИЦА 4. Пример реестра рисков для бетонной плотины с дополнительной насыпной дамбой ограждения

Элементы	Состояние	Опасность	До применения мер по снижению риска			Комментарии и предлагаемые меры по смягчению последствий	Остаточный риск после снижения
			Вероятность	Последствия	Риск		
Основание бетонной плотины	Горизонтальные дефекты	Скольжение	Вероятно	Очень тяжелые	Очень высокий	Большая плоскость напластования. Извлечение опорной анкерки и обратная заливка бетоном для предотвращения скольжения.	Низкий
Тело дополнительной насыпной дамбы	Зоны суффозионно-неустойчивых пород	Суффозия	Вероятно	Очень тяжелые	Очень высокий	Трудно обнаружить Включение обратных фильтров (переходные зоны) в конструкцию	Низкий
Границы элементов дополнительной насыпной дамбы	Продольные трещины с вертикальными ступенями	Неравномерная осадка плотины	Вероятно	Очень тяжелые	Очень высокий	Трещины в теле плотины, способствуют суффозии Заделка трещин водоупорным материалом или перекрытия непроницаемой стенкой Включение обратных фильтров (переходные зоны) в конструкцию	Низкий
Основание бетонной плотины	Зоны с высокой проницаемостью	Высокое фильтрационное давление	Вероятно	Значительные	Высокий	Фильтрационное давление снижает устойчивость Включение фильтрационной и дренажной завесы в конструкцию	Низкий
Примикания бетонной плотины	Низкий модуль упругости	Чрезмерная деформация	Маловероятно	Очень тяжелые	Высокий	Деформация приводит к образованию трещин или неустойчивости. Укрепить устои или изменить тип плотины.	Низкий
Водохранилище	Оползни	Обвальная волна	Маловероятно	Значительные	Низкий	Древний оползневого процесс вряд ли возобновится	Низкий

Если результаты этих действий окажутся неудовлетворительными, то могут потребоваться дополнительные меры по снижению последствий для решения оставшихся проблем безопасности. Эти меры могут включать:

- Усовершенствованная дренажная система для снижения фильтрационного давления и фильтры для контроля градиент напора фильтрации
- Восстановительная цементация для снижения давления или фильтрации
- Понижение уровня водохранилища для снижения нагрузки на плотину или уменьшения потенциальных последствий ниже по течению от плотины
- Строительство контрфорсов для предотвращения дальнейшей деформации

Допустимый остаточный риск после снижения выявленного риска будет зависеть от потенциального экономического воздействия на проект и последствий для нижнего течения с учетом категории риска плотины. Остаточные риски могут быть устранены путем:

- Наблюдений, приборов и мониторинга во время строительства, ввода в эксплуатацию и эксплуатации плотин
- Процедуры эксплуатации и технического обслуживания, разработанные с учетом особенностей плотины и задокументированные в ПЭИТО
- Наличие хорошо проработанного Плана Аварийной Готовности (ПАГ)

Справочная литература

ASCE (American Society of Civil Engineers). 2007. Geotechnical Baseline Reports for Construction: Suggested Guidelines. Reston, Virginia: ASCE Technical Committee on Geotechnical Reports of the Underground Technology Research Council.

Fell, R., P. MacGregor, D. Stapledon, and G. Bell. 2005. Geotechnical Engineering of Dams. London: CRC Press.

FEMA (U.S. Federal Emergency Management Agency). 2011. Filters for Embankment Dams: Best Practices for Design and Construction. Washington, DC: FEMA.

FIDIC (International Federation of Consulting Engineers). 2017a. Conditions of Contract for Construction, for Building and Engineering Works Designed by the Employer. Geneva, Switzerland: FIDIC.

———. 2017b. Conditions of Contract for Plant and Design-Build. Geneva, Switzerland: FIDIC.

———. 2017c. Conditions of Contract for EPC Turnkey Projects. Geneva, Switzerland: FIDIC.

Clayton, C.R.I. Great Britain. Department of the Environment, Transport and the Regions.; Institution of Civil Engineers (Great Britain). 2001. Managing Geotechnical Risk: Improving Productivity in UK Building and Construction. London, UK: Thomas Telford.

ICOLD (International Commission on Large Dams). 2002. Bulletin 124: Reservoir Landslides—Investigation and Management: Guidelines and Case Histories. Paris, France: ICOLD.

———. 2005. Bulletin 129: Dam Foundations—Geologic Considerations, Investigation Methods, Treatment, Monitoring, Paris, France: ICOLD.

———. 2009. Bulletin 136: The Specification and Quality Control of Concrete for Dams. Paris, France: ICOLD.

Petheram, C., and T. A. McMahon. 2019. “Dams, Dam Costs and Damnable Cost Overruns,” *Journal of Hydrology* X 3 (April), 100026.

USBR (U.S. Bureau of Reclamation). 1987. Design of Small Dams. Denver, Colorado: USBR.

Weaver, K., and D. Bruce. 2007. Dam Foundation Grouting. Reston, Virginia: ASCE.

