

ТЕХНИЧЕСКАЯ ЗАПИСКА 3 СЕЙСМИЧЕСКИЕ 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 3 СЕЙСМИЧЕСКИЕ 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 Сейсмическим 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 3: Seismic 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 Трунг Сон [Trung Son] (Вьетнам) © Trung Son Hydropower Company Limited.

Дизайн обложки: Билл Праглуски, Critical Stages, LLC.

Техническая Записка 3: Сейсмические риски

Содержание

Введение	1
Плотины в зонах повышенной сейсмичности	3
Оценка сейсмической опасности	3
Уровни интенсивности землетрясений для проектирования плотин	4
Вероятностный и детерминистский анализ сейсмической опасности	5
Методы расчета на сейсмостойкость	7
Косейсмические деформации	11
Методы выявления и описания разломов, влияющих на территорию плотины	12
Риск разжижения грунтов	12
Анализ разжижения и меры по смягчению последствий	13
Сейсмическая модернизация существующих плотин	14
Приложение А: Мировая карта глобальной сейсмической опасности	21
Справочная литература	22

Введение

Важность обеспечения устойчивости плотин и сопутствующих сооружений к землетрясениям признается и практикуется на протяжении многих лет. С 1980-90-х годов технические возможности инженерной отрасли в области сейсмического проектирования плотин значительно возросли.

Плотины, спроектированные и построенные с использованием современных принципов сейсмостойкого проектирования, демонстрируют хорошую стойкость во время землетрясений, получая лишь незначительные повреждения. Старые плотины, пострадавшие от землетрясений, скорее всего, были построены или обслуживались ненадлежащим образом, либо в них отсутствовали современные меры по предотвращению разрушений.

Сейсмическая опасность в разных точках мира может быть разной (см. Приложение А: Мировая карту глобальной сейсмической опасности). В некоторых странах сильные землетрясения происходят часто, в то время как в других странах их практически не бывает. Сейсмическая опасность существенна в Гималаях, северной Индии, Пакистане, Центральной Азии, некоторых районах Китая, Тайване, Японии, Индонезии, Папуа-Новой Гвинее, Филиппинах, южной части Тихого океана, Новой Зеландии, западной части Северной и Южной Америки, Турции и Южной Европе. Эти страны расположены вблизи границ плит земной коры и регулярно испытывают землетрясения Магнитудой (М) более 5 баллов. В качестве расчетной нагрузки землетрясение имеет относительно меньшее значение в северной и западной Европе, Африке (за исключением районов рифтовой долины), Австралии и центральной/восточной части Северной и Южной Америки, которые находятся на некотором расстоянии от зон повышенной сейсмичности. Соответственно, страны в этих регионах имеют меньшее понимание и готовность к землетрясениям, поскольку у них отсутствует непосредственный опыт землетрясений.

Магнитуда землетрясения в данной записке относится к шкале моментных магнитуд (обозначается как единая буква M для магнитуды, но иногда обозначается более специфически как M_w для отличия от других шкал), которая является мерой магнитуды землетрясения или оценкой масштаба землетрясения на основе его сейсмического момента.

Момент — это физическая величина, пропорциональная скольжению по разлому, умноженная на площадь (длина \times ширина) поверхности разлома, по которой происходит скольжение, что указывает на уровень общей энергии, высвобожденной при землетрясении. Магнитуду момента можно оценить на основе данных мониторинга по сейсмограммам, используя стандартную формулу. Увеличение магнитуды на целое число представляет собой увеличение высвободившейся энергии примерно в 32 раза. Увеличение магнитуды на два целых числа означает увеличение высвободившейся энергии в 1 000 раз.¹

Эффект сильной тряски сооружения при землетрясении, вероятно, является основным фактором при сейсмическом проектировании плотин. Тем не менее, необходимо учитывать и сопутствующие эффекты, которые могут возникнуть в результате землетрясения, такие как оползни в верховьях реки, смещение разломов и стоячие волны. При умеренных землетрясениях проектировщик должен доказать, что плотине не будет нанесен ущерб (или он будет незначительным), в то время как при экстремальных землетрясениях проектировщик должен доказать, что плотина не разрушится катастрофически. Опять же, современные плотины проектируются и строятся с целью обеспечения удовлетворительного функционирования во время землетрясений.

Определение сейсмической опасности — это практика, которая становится более последовательной во всем мире, особенно в странах с высоким уровнем сейсмичности и странах, участвующих в программе Глобальной модели землетрясений (www.globalquakemodel.org). Тем не менее, некоторые страны полагаются на устаревшую практику оценки сейсмической опасности, или не располагают достаточными данными. Практика оценки сейсмической опасности и потенциал сейсмостойкого проектирования, как правило, более тесно связаны в странах, расположенных в зонах высокой сейсмичности.

Данная Техническая записка содержит минимальный уровень технической детализации для сейсмического проектирования новых сооружений и сейсмической оценки существующих сооружений, чтобы ее могли использовать неспециалисты. Основная цель - предоставить руководство по рассмотрению сейсмических аспектов проектов плотин на ранних стадиях разработки проекта. Записка предназначена для повышения осведомленности и, при необходимости, информирования о конкретных исследованиях и изысканиях в ходе подготовки проекта. Представленный материал следует использовать для оценки необходимого уровня оценки сейсмической опасности, анализа адекватности сейсмического проектирования плотины и мер по обеспечению устойчивости, а также для рекомендации необходимых компетенций для обеспечения качества проектов, связанных с плотинами в сейсмических районах.

¹ Шкала или магнитуда Рихтера известна большинству людей, но на практике она больше не используется, за исключением небольших землетрясений, регистрируемых на местном уровне. По мере того, как по всему миру устанавливалось все больше сейсмографических станций, стало очевидно, что метод, разработанный Рихтером, действителен только для определенных диапазонов частот и расстояний. В целях использования преимуществ растущего числа глобально распределенных сейсмографических станций было разработано более универсальное расширение шкалы магнитуд в виде моментной магнитуды (M или M_w), как указано выше. (Источники: адаптировано с сайта Геологической службы США)

Плотины в зонах повышенной сейсмичности

Районы с высокой сейсмичностью² обычно расположены вблизи границ тектонических плит, которые содержат активные разломы, способные генерировать значительные подземные толчки и Косейсмические смещения. Исторические данные обычно являются хорошим индикатором сейсмической активности. Как правило, в регионе происходят землетрясения магнитудой M5 и выше, хотя могут быть периоды сейсмического затишья.

Сейсмические исследования палеозойских отложений, по которым можно датировать геологические образования, дают представление о повторяющихся сейсмических событиях на протяжении тысяч лет. Плотины, расположенные в сейсмически активных районах, должны учитывать сейсмическую нагрузку при проектировании, исходя из их классификации риска или потенциальных последствий разрушения.

В сейсмической среде вдали от этих тектонических границ, как правило, значительно меньше активных разломов и, соответственно, ниже сейсмическая активность. Внутриплитные зоны все еще подвержены значительным землетрясениям, но они, скорее всего, являются результатом высвобождения накопленных в земной коре деформаций, могут быть более случайными и не всегда происходят на известных разломах.

Уровень сейсмической защиты должен быть соразмерен классификации риска плотины с учетом вероятности события разрушения, сейсмических зон и последствий в случае разрушения независимо от размера плотины, как отмечается в Рекомендации по Применению Передовой Практики (РППП) по Безопасности Плотины. Необходимый уровень оценки сейсмической опасности и проверки устойчивости плотины должен быть пропорционален потенциальному риску плотин и может выполняться поэтапно, начиная с упрощенных методов и, в случае неопределенности результата, переходя к использованию более детальных методов.

Оценка сейсмической опасности

Оценка сейсмической опасности необходима для определения сейсмических параметров для оценки сейсмического проектирования и эффективности плотины, включая (а) определение потенциальных источников землетрясений; (b) оценку характеристик каждого потенциального источника землетрясений, таких как тектонические, геологические условия, магнитуда и темпы активности; и (с) эмпирические уравнения затухания для полного определения амплитуд или интенсивности движения грунта (МКБП 2010). Приложение 1 к МКБП (2010) включает полезный список основных факторов, которые необходимо учитывать при оценке сейсмической опасности. Более того, в бюллетене рекомендован набор конечных результатов сейсмической оценки - например, предполагаемая магнитуда максимальных землетрясений, пиковое ускорение грунта (ПУГ), продолжительность и т. д. с использованием детерминистической или вероятностной оценки сейсмической опасности (см. раздел «Уровни интенсивности землетрясений для проектирования плотин»).

Во многих странах составлена национальная карта, на которой показаны три-четыре сейсмические зоны с ориентировочной сейсмической интенсивностью (пиковое ускорение грунта, сейсмический коэффициент, период повторяемости и так далее). Это не заменит оценку сейсмической опасности конкретного объекта, относящегося к плотине, но может обеспечить исходные данные для начального уровня оценки сейсмической безопасности.

² Приложение А к Социально-Экологическому и Стандарту 4 устанавливает, что к плотине, «расположенной в зоне повышенной сейсмичности», должны применяться такие же требования по безопасности плотины, как и к крупной плотине, независимо от ее размеров.

При подготовке технико-экономического обоснования и проектировании плотин в сейсмоопасных районах важно обеспечить сбор необходимой информации в координации с национальными сейсмологическими и геологическими институтами и провести достаточную оценку сейсмической опасности с учетом потенциального риска плотин.

Уровни интенсивности землетрясений для проектирования плотин

Проектное Землетрясение (ПЗ) — это уровень землетрясения, при котором происходит незначительный или нулевой ущерб, и поэтому эксплуатация плотины должна продолжаться без перерыва. Возможные повреждения будут незначительными и легко устранимыми. Магнитуда землетрясения, при которой возможно продолжение эксплуатации, обычно представлено подземными толчками со средним периодом повторяемости 145 лет (то есть 50-процентная вероятность того, что уровень землетрясения не будет превышен в течение 100 лет). Если риски, связанные с потерей работоспособности водохранилища, рассматриваются как чрезмерно высокие при таком относительно низком периоде повторяемости, в качестве магнитуды ПЗ, можно применить более сильные подземные толчки с 500-летним периодом повторяемости.

Максимальное расчетное землетрясение (МРЗ) — это землетрясение, вызывающее максимальный уровень движения грунта, на который рассчитано сооружение. При определении величины МРЗ необходимо учитывать такие факторы, как классификация риска или потенциальной опасности плотины (см. Раздел 7.2 РППП), степень важности функционирования плотины (водоснабжение, отдых, борьба с наводнениями и т. д.), а также время восстановления работоспособности сооружения.

Макросейсмические последствия МРЗ предполагает существенные повреждения и/или частичную потерю устойчивости сооружения, но не должны привести к аварии плотины и неконтролируемому выбросу воды из водохранилища. Значительный ущерб плотине или экономические потери могут быть допустимы при условии соблюдения этих критериев (МКБП 2016). Если функции плотины включают критически важное водоснабжение, производство гидроэлектроэнергии или другие услуги, ожидаемый ущерб должен быть ограничен, чтобы позволить восстановить работу плотины в приемлемые сроки.

МРЗ может быть определена на основе максимального достоверного землетрясения (МДЗ), являющегося максимально возможным землетрясением, которое может произойти вдоль известных разломов или границ тектонических плит, где землетрясения чаще всего происходили или ожидаются.

Кроме МРЗ в проектировании плотин необходимо учитывать нагрузки повторных толчков после основного землетрясения. Сильные повторные толчки могут стать причиной образования трещин, увеличения фильтрации и снижения устойчивости, в дополнение к повреждениям, вызванным основным толчком. Наиболее распространенной оценкой магнитуды повторных толчков для целей проектирования является повторные толчки магнитудой на одну меньше МРЗ, произошедшие вблизи сооружения в течение одного дня после (или еще позже) МРЗ. Следовательно, если МРЗ равно М7.0, то повторным толчкам будет присвоена магнитуда М6.0. При проектировании и оценке безопасности плотины с учетом нагрузок повторных толчков необходимо учитывать развитие последствий землетрясения во времени (например, увеличение фильтрационного давления на скальных основаниях или образование просачивания по трещинам в результате землетрясения). Конструкция плотины должна соответствовать требованиям МРЗ к эксплуатационным характеристикам с учетом повторных толчков.

Если возбуждение сейсмичности в районе водохранилища (ВСПВ), считается возможной (см. раздел «Методы выявления и описания разломов, влияющих на территорию плотины»), параметры движение земной коры для МРЗ должны охватывать параметры сценариев ВСПВ. Поскольку магнитуда ВСПВ, намного меньше, чем МРЗ, сейсмическое проектирование основных плотин не должно зависеть от ВСПВ, но нагрузка от ВСПВ может быть актуальна для сопутствующих сооружений, сооружений, не относящихся к плотине, и инфраструктуры в районе плотины в соответствии с более низкими стандартами проектирования.

Сейсмические параметры, используемые при проектировании плотины, включают пиковое ускорение грунта (ПУГ), спектры реакции ускорения³ (с демпфированием) и акселерограмму землетрясения⁴. Сейсмические параметры могут также показывать пространственную вариацию движения грунта для специальных (удлиненных) сооружений. ПУГ и спектры реакции достаточны для упрощенной оценки конструкций. Спектр реакции или акселерограмма необходимы для динамического анализа реакции конечных элементов. Там, где предполагаются нелинейные характеристики, потребуется акселерограмма с использованием горизонтальных и вертикальных компонентов для бетонных плотин и для насыпных плотин с очень крутыми откосами. Для конечно-элементного анализа других видов насыпей (с более плавными откосами) акселерограммы вертикальных компонентов могут не потребоваться. Кроме того, для сооружений, расположенных на возвышенностях, может потребоваться учет усиления колебаний грунта из-за топографических эффектов или в результате динамической реакции сооружения.

Если это не предусмотрено оценкой опасности, то пиковые вертикальные ускорения обычно принимаются равными двум третям пиковых горизонтальных ускорений, если только сейсмический источник не находится в пределах 10 км от плотины. На участках, расположенных вблизи предполагаемого эпицентра, следует учитывать тип предполагаемого движения по разлому (нормальный, обратный или горизонтальное смещение), и пиковое вертикальное ускорение может быть равно или, возможно, даже больше пикового горизонтального ускорения.

Вероятностный и детерминистский анализ сейсмической опасности

Уровень колебания грунта на территории плотины в результате землетрясения зависит от геологических и тектонических условий региона, включая территорию плотины, а также от источника землетрясения, магнитуды и расстояния до плотины. Следовательно, при оценке сейсмической характеристики плотины вероятностный и детерминистский анализ сейсмической опасности выполняются для разработки расчетных колебаний грунта (МКБП 2016). В зависимости от результатов и неопределенностей в оценке сейсмической опасности и последствий разрушения плотины можно выбрать как вероятностное, так и детерминистское значение МРЗ, но детерминистский подход может быть более подходящим в местах с регулярными землетрясениями, которые происходят в районе известных эпицентров землетрясений. При анализе также следует учитывать воздействие близости к эпицентру или разлому.

3 Спектры реакции представляют собой максимальный отклик в виде ускорения, скорости или смещения упругих осцилляторов с одной степенью свободы на зависящее от времени возбуждение при заданном демпфировании как функция частоты. Таким образом, анализ спектра реакции дает оценку максимальной абсолютной реакции конструкции на землетрясение. Предполагается, что конструкция будет вибрировать в режиме собственных колебаний, и рассчитывается максимальная динамическая реакция, возникающая в каждой режиме (МКБП1989, 2010).

4 Акселерограмма землетрясения - запись во времени процесса изменения ускорения колебаний грунта (основания) для определенного направления. Для проведения нелинейного временного анализа плотин повышенной опасности в сейсмических районах можно подготовить несколько акселерограмм для горизонтального и вертикального движения.

Вероятностный анализ сейсмической опасности

Вероятностный анализ сейсмической опасности численно определяет вклад каждого источника в сейсмическое воздействие на территории плотины всех источников и магнитуд, превышающих установленный минимум (обычно М4 или М5), вплоть до МДЗ. Вероятностный подход обеспечивает единую основу для оценки опасности и с большей вероятностью даст последовательные результаты в зонах с низкой и умеренной сейсмичностью и там, где отсутствует четкая характеристика разломов. Разработкой вероятностного анализа сейсмической опасности занимаются сейсмологи.

При определении МРЗ для плотин с высоким риском или высокой опасности/последствий по методу вероятностного анализа сейсмической опасности обычно используются подземные толчки с периодом повторяемости 10000 лет. Для плотин с умеренным риском или умеренными последствиями МРЗ обычно представляется подземными толчками с периодом повторяемости от 2500 до 3000 лет, а для плотин с низким риском или низкими последствиями - с периодом повторяемости от 500 до 1000 лет.

Вспомогательные сооружения, выполняющие функцию обеспечения безопасности плотины, такие как водосбросные сооружения для сброса паводковых вод и водовыпускные сооружения для понижения уровня водохранилища, должны быть спроектированы на такой же МРЗ, что и плотина. Другие сооружения, не имеющие критической функции обеспечения безопасности плотины (например, турбинный водовод и электростанция), могут быть спроектированы по более низкому стандарту, представленному подземными толчками с 500-летним периодом повторяемости.

Многие страны составляют карты сейсмического районирования для нормативов проектирования зданий и сооружений. Для создания карты следует использовать методы вероятностного анализа сейсмической опасности. Некоторые страны используют другие, менее точные, методы для создания своих карт. Обратите внимание, что большинство национальных карт сейсмической опасности составляются для жилых и городских зданий. Соответствующие нагрузки находятся на уровне ПЗ. Следовательно, они обычно не подходят для выбора расчетных нагрузок для плотины с высоким риском или высокой опасностью/последствиями.

ПЗ обычно вероятностно рассчитывается для определения подземных толчков с периодом повторяемости 145 лет. Если риски, связанные с потерей работоспособности водохранилища, рассматриваются как чрезмерно высокие при таком относительно низком периоде повторяемости, в качестве магнитуды ПЗ, можно применить более сильные подземные толчки с 500-летним периодом повторяемости.

Детерминистский анализ сейсмической опасности

Детерминистские колебания грунта основаны на характеристике землетрясений из-за известных разломов в пределах целесообразного расстояния от территории плотины. Метод детерминистского анализа сейсмической опасности может быть более подходящим в местах с относительно частыми землетрясениями, происходящими на разломах с четко определенными характеристиками. Возможность присутствия активных разломов должна быть определена с помощью установленных методов геологии землетрясений (например, зависимости длины разрыва от магнитуды или зависимости перемещения разлома от магнитуды). Для оценки затухания подземных толчков и

других параметров необходимо определить расстояние от тектонического разрыва до плотины. Для оценки таких важных параметров, как пиковое ускорение грунта, разработано множество формул затухания, однако следует использовать наиболее подходящие из них с учетом конкретной тектонической обстановки и средневзвешенных расчетных значений. Исследованиями для детерминистского анализа сейсмической опасности занимаются сейсмологи.

Детерминистский анализ сейсмической опасности обычно проводится для оценки колебания грунта на территории плотины в условиях МДЗ. МДЗ рассматривается как сильнейшее гипотетическое землетрясение, возникновения которого можно обоснованно ожидать на данном разломе или другом сейсмическом источнике. Максимальное землетрясение для каждого идентифицированного разлома определяется для выявления максимального колебания грунта и определения параметров сейсмического проектирования при МДЗ.

При определении МРЗ для плотин высокого риска или высокой опасности/последствий по методу детерминистского анализа сейсмической опасности, колебания грунта представляются на уровне 84-го перцентиля МДЗ. Для плотин умеренного риска или умеренной опасности/последствий МРЗ обычно представляется колебаниями грунта между 50-м и 84-м перцентилями МДЗ, а для плотин низкого риска или низкой опасности/последствий - на уровне 50-го перцентиля МДЗ.

Период повторяемости, сценариев, связанных с МДЗ, может быть определен, если он контролируется сценарием одного землетрясения на хорошо охарактеризованном разломе. Однако обычно невозможно определить период повторяемости, если сценарий МДЗ связан с разрывом нескольких разломов (косейсмических), за исключением случаев, когда имеется комплексная модель сейсмического источника.

Таблица 1 показывает, что существующие плотины должны соответствовать тем же стандартам сейсмической безопасности, что и новые плотины. Однако повышение стандартов безопасности существующих плотин до более строгих современных стандартов может оказаться сложной и трудоемкой задачей для собственников плотин. В таких случаях для оценки необходимого уровня сейсмической безопасности и поэтапного повышения стандартов сейсмической безопасности с учетом потенциального риска существующих плотин может помочь подход, основанный на управлении рисками.

Методы расчета на сейсмостойкость

Общий подход к сейсмическим расчетам грунтовых и бетонных плотин заключается в том, чтобы начать с упрощенных методов и использовать более комплексные методы до тех пор, пока не будет получен приемлемый и обоснованный результат. Уровень анализа, необходимый для принятия нового проекта или проекта по повышению сейсмической безопасности, зависит от последствий разрушения плотины, степени потенциальной нагрузки, характеристик плотины и основания. Упрощенный сейсмический расчет обычно достаточен для плотин с низким риском или малыми последствиями, в то время как для плотин с высоким риском или более значительными последствиями потребуются более детальный анализ. Валидация результатов сейсмического анализа является важной мерой обеспечения качества для максимального приближения результатов к реальности. Продвижение анализа от упрощенных методов к более комплексным позволяет использовать более ранние анализы при проверке более комплексных.

Грунтовые плотины

Методы сейсмических расчетов грунтовых плотин должны учитывать последствия сейсмических деформаций плотины или основания, которые могут привести к оседанию и потере устойчивости откосов, образованию трещин и превышению уровня МПУ, возникновению суффозии или повреждению прилегающих сооружений.

Методика оценки сейсмических деформаций включает следующие этапы:

1. Скрининг на основе примеров из истории плотин, подвергшихся землетрясению, и эмпирических методов оценки повреждений или оседания гребня
2. Методы Предельного Равновесия (МПР) с оценкой деформаций с помощью метода анализа скользящего блока Ньюмарка; нагрузки при землетрясении применяются с использованием псевдостатических методов для определения ускорения текучести критической поверхности разрушения
3. Анализ МПР после землетрясения, используемый для предварительной оценки деформации, включая влияние разжижения
4. Линейный метод конечных элементов (МКЭ) или метод конечных разностей (МКР) с анализом скользящего блока для определения акселерограммы скользящей массы и использования этих данных для оценки постоянных деформаций как функции времени
5. Нелинейный МКЭ или МКР анализ динамических деформаций

ТАБЛИЦА 1. Краткий обзор периодов повторяемости землетрясений

Уровень рассматриваемого землетрясения	Новая или существующая плотина	Требование к устойчивости	Категория риска или опасности/ последствий	Период повторяемости расчетного землетрясения (лет)
Максимальное расчетное землетрясение (МРЗ)	Новые и существующие плотины и сопутствующие им сооружения, имеющие критическое значение для безопасности плотины	Плотина не должна подвергаться катастрофическому разрушению или неконтролируемому сбросу воды из водохранилища создавая угрозу безопасности жизни людей ниже по течению. Значительный ущерб плотине или экономические потери могут быть допустимы	Высокий	10000
			Средний или значительный	2500–3000
			Низкий	500–1000
Проектное Землетрясение (ПЗ)	Новые и существующие плотины	Повреждения незначительны или отсутствуют. Эксплуатация плотины должна продолжаться без перерыва.	Высокий или средний	150–500
			Низкий	150

Источник: авторская таблица составленная для данной публикации

Если отсутствует возможность разжижения грунта, эмпирические методы, такие как Ньюмарк и Макдиси/Сид, подходят для оценки деформации. Например, хорошо уплотненная грунтовая плотина с уклоном верховых и низовых откосов 2.5 (горизонтальный) к 1 (вертикальный), подверженная умеренному землетрясению ($\text{ПУГ} \leq 0.35 \text{ g}$)⁵; статическая устойчивость тела плотины в условиях устойчивой фильтрации имеет коэффициент запаса более 1.5, а также прилегающие объекты не подвержены к повреждениям.

Для определения коэффициента запаса и ускорения, вызывающего деформацию, используются упрощенные МПР. В условиях ПЗ, коэффициент запаса выше 1.3 указывает на то, что незначительные деформации под действием сейсмической нагрузки не произойдут, если все компоненты не чувствительны к небольшим смещениям. При условиях МРЗ, если пиковое горизонтальное ускорение в пределах тела плотины лишь немного меньше ускорения текучести, деформации все же могут возникнуть, но, скорее всего, будут незначительными. При рассмотрении статической устойчивости после землетрясения, если исходя из прочности, ожидаемой после землетрясения, коэффициент запаса находится в диапазоне от 1.25 до 1.5, то из опыта прошлых землетрясений следует, что деформации будут небольшими, и плотина будет соответствовать критериям надежности.

Упрощенные МПР не целесообразны для оценки потенциальной деформации в результате продолжительного землетрясения (например, происходящего в зоне субдукции), а методы анализа скользящего блока Ньюмарка не подходят для оценки деформаций, если материалы тела или фундамента могут разжижаться.

Более комплексный уровень анализа может потребоваться, если упрощенный анализ показывает, что воздействие деформаций велико и угрожает целостности плотины. Результаты более комплексных анализов должны подтверждать или уточнять выводы упрощенного анализа.

Эквивалентный линейный анализ выгоден своей относительной простотой и позволяет получить рациональную оценку динамической реакции конструкции. Метод не учитывает такие эффекты, как образование порового давления, пластическую деформацию или течение поровой воды.

Если плотина строится на массивном аллювиальном основании, вероятно, потребуется анализ деформации по методу Ньюмарка с определением динамических характеристик с помощью МКЭ или МКР анализа.

Передовые методы нелинейного МКЭ или МКР анализа используются для моделирования постоянных деформаций, включая эффекты образования избыточной поровой воды в насыщенных грунтах. Однако результаты нелинейного МКЭ или МКР анализа не должны рассматриваться как окончательная оценка деформации. Тем не менее, результаты могут быть полезны для определения общих тенденций в деформационном развитии для выявления потенциальных зон возникновения трещин от нагрузки растяжения или сдвига, а также для оценки чувствительности к изменениям в исходных предположениях.

При проведении нелинейного МКЭ или МКР следует использовать от трех до семи комплектов записей землетрясений (которые спектрально соответствуют спектру объекта). При использовании трех записей характеристики должны быть основаны на максимальном значении реакции, а при использовании семи записей характеристики могут быть основаны на среднем значении реакции.

⁵ Единица измерения "g" называется ускорением силы гравитации. На Земле его значение составляет 9.8 м/с².

Бетонные плотины

Динамический анализ бетонных плотин оценивается с точки зрения устойчивости к сдвигу, положения результирующей силы и максимального напряжения. Различные уровни динамического анализа применяются в порядке возрастания сложности и включают:

1. Скрининг на основе примеров из истории плотин, подвергшихся землетрясению
2. Анализ общей устойчивости с использованием псевдостатических методов
3. Линейно-упругий спектр реакции и анализ динамики изменений модуля упругости
4. Нелинейный анализ динамики изменений с использованием МКЭ

Потенциальные режимы разрушения (ПРР), связанные с сейсмическим риском для бетонных плотин, включают сдвиг или опрокидывание вдоль дефектов в теле плотины, вдоль зоны примыкания плотины с основанием или геологических дефектов в основании. Высокая разрывная нагрузка может вызвать растрескивание с неблагоприятными последствиями (сдвиг или возникновение высокого фильтрационного давления).

Общая устойчивость обычно выражается с помощью коэффициента запаса. Но данный подход, является неприменимым при расчете устойчивости во время сильного землетрясения. Следовательно, процесс проектирования бетонных плотин включает определение возможности возникновения деформаций во время землетрясения и расчет статической устойчивости после землетрясения с учетом деформаций, стабилизации условий порового давления и применения свойств разрушенных материалов. Существует несколько технических руководств, описывающих этот процесс (например, глава 3 FERC [2018a] для гравитационных плотин и глава 11 FERC [2018b] для арочных плотин).

Устойчивость бетонной гравитационной плотины на скальном основании при землетрясении с нагрузкой ПУГ ≤ 0.2 g должна быть удовлетворительной, если плотина построена из высококачественного бетона с достаточным количеством технологических швов, результирующая сила в статических условиях находится в пределах средней трети основания гравитационной плотины, а коэффициент запаса устойчивости против скольжения является приемлемым для статических условий (FEMA 2005).

В большинстве случаев псевдостатические методы являются достаточными, для оценки небольших плотин (высотой менее 15 метров). Однако для больших плотин данные методы следует использовать только для скрининга общей устойчивости против сдвига и опрокидывания. Сооружения, которые, согласно данным скринингового метода, могут разрушиться, должны быть изучены более детально.

Если конструкционные характеристики плотины расположены исключительно в линейном упругом диапазоне, то достаточно анализа спектра реакции. Если же речь идет о землетрясениях, при которых расчетные напряжения для массивной бетонной конструкции могут приближаться или превышать предел прочности бетона на растяжение, то линейный динамический анализ с динамикой изменений даст ценную информацию для приблизительного определения потенциального ущерба или ожидаемой динамики изменений неупругой реакции.

Оценка результатов динамического анализа с динамикой изменений позволит определить наличие риска нарушения устойчивости. Линейные и нелинейные анализы должны быть выполнены с использованием нескольких динамик изменений для эффективного анализа характеристик плотины.

Нелинейный анализ следует проводить, если реакция плотины существенно зависит от нелинейности характеристик материала или изменения геометрии. Полный и надежный нелинейный динамический анализ включает растрескивание бетона при растяжении, деформацию арматуры, раскрытие швов и смещения фундамента/основания.

Валидация результатов анализа необходима для подтверждения обоснованности результатов моделирования устойчивости плотины при землетрясениях. Процесс валидации включает сравнение результатов последнего анализа с результатами альтернативных анализов, включая псевдостатический и линейно-упругий анализы, а также чувствительность результатов к изменениям в предполагаемых параметрах модели.

Для оценки воздействия напряжений, превышающих предел прочности на растяжение, требуется надлежащее инженерное суждение, которое должно быть основано на ожидаемых эффектах нелинейного поведения и показателях устойчивости плотины при аналогичных землетрясениях в прошлом

Рекомендуется провести анализ устойчивости к сдвигу после землетрясения с использованием консервативных предположений для демонстрации дальнейшей устойчивости. Если оценка сдвига указывает на смещение, то необходимо рассмотреть величину смещения и расположение плоскости скольжения. Нагрузки повторных толчков следует применять к состоянию плотины после основного толчка.

Косейсмические деформации

В проектировании плотин строго рекомендуется не допускать активных разломов в основании плотины или пересекающих водохранилище, однако найти более подходящий альтернативный участок может быть крайне сложным, или разлом может быть обнаружен на существующей плотине.

Необходимо предусмотреть меры по смягчению последствий для минимизации возможного повреждения от смещений, связанных с активным разломом, расположенным под плотиной. Повреждение может быть в виде трещин, смещений или развития потенциальных путей фильтрации. Смещение разлома в водохранилище может привести к масштабному оползню и образованию стоячих волн в водохранилище, вследствие чего может произойти перелив воды через гребень плотины.

Так как активные разломы в основании плотины или водохранилище встречаются редко, справочные материалы по теме ограничены. Одним из таких справочных материалов является NZSOLD (2015) (на основе исследований Меджиа и др. [2001]), где даются рекомендации по проектированию плотин в зоне активных разломов.

Сейсмические исследования палеозойских отложений, в ходе которых сейсмологи изучают доказательства смещения любых идентифицированных разломов в геологической формации мест расположения плотин путем прокладки траншей и т. д., будут необходимы для установления активности разлома. Геологические подходы для установления активности разлома различаются, но МКБП (2010) рекомендует определять критические активные разломы, свидетельствующие о движениях в голоценовом периоде (за последние 11000 лет), крупные разломы,

свидетельствующие о движениях в плейстоценовом периоде (между 11000 и 35000 лет), или крупные разломы, свидетельствующие о повторяющихся движениях в четвертичном периоде (1,8 млн. лет назад).

При выборе типа плотины следует учитывать ориентацию, направление и величину ожидаемого смещения на любых активных разломах. Грунтовые плотины могут быть спроектированы с учетом мер снижения деформации (например, с использованием широких обратных фильтров/ переходных зон), позволяющих сделать сооружение устойчивым к смещению разломов. Такой подход требует от проектировщика плотины опыта в разработке мер по снижению деформации при смещении разлома, таких как значительная высота превышения гребня над МПУ и ширина обратного фильтра / переходной зоны. Строительство бетонных гравитационных и арочных плотин в зонах с активными разломами не рекомендуется из-за их конструктивных особенностей.

Методы выявления и описания разломов, влияющих на территорию плотины

Расположение активных разломов для плотин с низким и умеренным риском или опасностью /последствиями может быть получено из геологических баз данных национальных сейсмологических/геологических институтов, если таковые имеются. Консультант по проектированию должен оценить актуальность и точность информации, используемой для проектирования.

Для плотин высокого риска или высокого уровня опасности/последствий характеристика смещения разломов должна основываться на знании геологии региона и конкретного участка и тщательном изучении любых разломов основания. Для определения потенциала активных разломов и количественной оценки опасности разломов (т. е. направления, размеров и повторяемости) следует провести исследования на самом участке / объекте. Эти исследования должны проводить эксперты-сейсмологи. Для выявления потенциальных разломов при проведении наземных исследований традиционно использовались аэрофотоснимки, однако в последние годы спутниковое дистанционное зондирование и использование топографических профилей на основе технологии лазерного формирования изображения (LiDAR) позволили значительно улучшить характеристики деформации грунта и оценить Косейсмические смещения для использования при проектировании.

Риск разжижения грунтов

Разжижение грунтов плотины и основания может привести к разрушению откосов, переливу через гребень и суффозии. Рыхлые насыщенные пески, илстые пески и гравелистые пески с плохим дренажем в основании плотины или недостаточно уплотненные материалы в грунтовых плотинах подвержены размягчению и снижению сопротивления сдвигу при воздействии циклической нагрузки. Это может привести к большим циклическим сдвиговым деформациям или развитию неустойчивости в больших грунтовых массивах. Снижение прочности при сдвиге происходит из-за быстрого увеличения порового давления и уменьшения эффективного напряжения в результате реакции на сжатие при сдвиговых деформациях.

В случае наличия таких грунтов в основании плотины или предполагаемого использования в строительстве плотины следует оценить их восприимчивость к разжижению при расчетной нагрузке землетрясения (USBR 2015). Потеря прочности может проявляться в виде разжижения песков и гравия (несвязный материалы) или циклического размягчения глин (вязкий материалы).

Процедура первоначального скрининга определяет восприимчивость грунта к сжижению на основе следующих критериев (MBIE и NZGS 2016):

- Геологические критерии - голоценовые отложения (менее 10000 лет) особенно подвержены разжижению, или тело плотины, содержащее плохо уплотненные участки насыпи.
- Составные критерии - пески, непластичные алевриты и гравий, а также их смеси подвержены разжижению.

Для оценки подверженности мелкозернистых грунтов к разжижению используются критерии Брея и Санцио (2006). Критерии учитывают число пластичности (PI) и соотношение содержания воды к верхнему пределу пластичности. Тем не менее, соответствие критериям неподверженности к разжижению не исключает серьезной потери прочности от циклических нагрузок или значительных постоянных сдвиговых деформаций, которые могут возникнуть в чувствительных грунтах.

Глинистые грунты обычно требуют более высокое напряжение для достижения состояния потери прочности («циклическое размягчение»). Когда это происходит, потеря прочности, скорее всего, будет иметь форму циклической подвижности с ограниченными перемещениями, а не непрерывных деформаций, связанных с разжижением. В этом случае для глинистых грунтов используются эмпирические корреляции циклического размягчения.

Если установлено, что материал подвержен разжижению, то для исключения возможности возникновения разжижения необходимо доказать, что грунт ненасыщенный или достаточно плотный, чтобы не потерять прочность при землетрясении.

Анализ разжижения и меры по смягчению последствий

Для определения достаточности прочности (компактное сложение) материала по отношению к приложенной нагрузке при землетрясении используются упрощенные процедуры определения возникновения разжижения. Эти меры включают сравнение устойчивости грунта к разжижению, называемой коэффициентом циклического сопротивления (CRR), с приложенной нагрузкой при землетрясении, называемой коэффициентом циклического напряжения (CSR).

Процедуры определения устойчивости к разжижению широко описаны в нескольких публикациях Сиды и Идрисса (1982). Устойчивость грунтов к разжижению может быть определена с помощью лабораторных испытаний на циклический сдвиг, однако в целом их следует проводить только для проектов с высоким риском, учитывая трудности с отбором образцов грунта с ненарушенной структурой, стоимость испытаний и так далее. Кроме того, по мере развития техники, проектировщики должны проверять актуальность методов, которые будут применяться в проектах.

Статическая устойчивость плотины после землетрясения должна быть проанализирована с учетом пониженной (остаточной) прочности для разжиженных или чувствительных материалов. Чувствительные глины с пониженным сопротивлением сдвигу, вероятно, приведут к нестабильности после землетрясения, подобно разжиженным бесвязным грунтам.

Для устранения риска разжижения вовремя или после землетрясений рекомендуется усиление основания путем выемки рыхлых грунтов основания и засыпкой сильноуплотнённых грунтов или гидровибрационного уплотнения рыхлых

грунтов и других соответствующих методов. Также рекомендуется уменьшить напряжения сдвига путем уменьшения уклона откосов сооружений, добавления берм на нижних бровках и т. д. и увеличить прочность недреннующих грунтов на сдвиг путем добавления дренажных укреплений, таких как сваи, глинобитные стены и т. д.

Сейсмическая модернизации существующих плотин

Результаты периодической оценки сейсмической опасности могут выявить уязвимость существующей плотины к разрушению в результате землетрясения. Реконструкция существующей плотины зачастую значительно сложнее, чем внедрение соответствующих защитных конструкций во время проектирования и строительства. Для понимания уязвимости существующей плотины обычно требуется обследование технического состояния плотины. Анализ ПРР является важным для понимания необходимых мер по снижению риска развития вероятных ПРР.

Поскольку опасность прорыва плотины для населения, проживающего ниже по течению, одинакова независимо от того, идет ли речь о новой или существующей плотине, цель состоит в том, чтобы приблизить существующую плотину к уровню безопасности новой плотины основываясь на принципах экономической обоснованности и практической достижимости. Восстановительные работы не могут гарантировать низкий уровень риска идентичный новой плотине, поэтому управление остаточным риском с помощью неконструкционных мер (таких как планирование готовности к чрезвычайным ситуациям и управление уровнем водохранилища) имеет еще большее значение.

Изучение и проектирование восстановительных работ может занять несколько лет. Управление риском безопасности плотины с момента выявления недостатков до завершения работ по их устранению является крайне важным. В течение этого времени риск разрушения плотины необходимо поддерживать на максимально низком уровне. Оценка риска необходима для того, чтобы определить, может ли водохранилище эксплуатироваться в полном объеме или же эксплуатация должна быть направлена на снижение риска. Это зависит от того, насколько плотина уязвима к разрушению в результате землетрясения, и от категории опасности плотины. Эксплуатация плотины с низким уровнем риска или с низким уровнем опасности/последствий в полном объеме может быть разрешена даже до завершения модернизация. Землетрясение с периодом повторяемости от 150 до 500 лет, приводящее к значительным последствиям в случае разрушения плотины, считается неприемлемым риском, и необходимо немедленно принять меры по опорожнению водохранилища или даже эвакуации населения, находящегося в зоне риска.

Варианты работ по реконструкции и устранения недостатков могут быть более ограниченными, чем при строительстве новой плотины. Тем не менее, существует несколько примеров применения инновационных методов для устранения недостатков плотин. Некоторые меры применяются с наружной стороны плотины (например контрфорсы); другие являются более инвазивными, например восстановление основания. В следующем разделе также перечислены несколько решений, которые внедряются в проект новой плотины. Эксперты, имеющие опыт сейсмической модернизации плотин, должны привлекаться на протяжении всего проекта, особенно в период разработки концепций восстановления, и продолжать участвовать в процессе реализации.

Любые работы по модернизации и реконструкции действующей плотины при сохранении уровня воды требуют тщательного управления рисками. Если риски высоки, потребуются временное опорожнение или понижение уровня водохранилища. В случае сохранения уровня воды в водохранилище потребуются интенсивный мониторинг и наблюдение за безопасностью плотины, а также тщательное планирование готовности к чрезвычайным ситуациям. Кроме того, необходимо привлечение экспертов, имеющих опыт модернизации плотины в период ее эксплуатации.

Применение мер сейсмозащиты при проектировании

Проектирование новых плотин должно включать меры сейсмозащиты и резервирования для обеспечения надлежащей сейсмостойкости (USBR 2011), в то время как существующие плотины должны включать меры по снижению риска возникновения вероятных ПРР. Также необходимо внедрение неконструктивных альтернатив для поддержания безопасности плотины и населения после землетрясения.

Ниже приведены примеры возможных мер по смягчению последствий сейсмических воздействий (МКБП 2001, USBR 2015).

Меры сейсмозащиты для грунтовых плотин

Подготовка основания:

- Выемка или уплотнение рыхлых или слабых грунтов основания
- Выравниванию скальной поверхности и склонов в основании, вызывающих неравномерную осадку и угрозу возникновения поперечных трещин в плотине.
- Перекрытие разломов, пересекающих площадку плотины, противофильтрационным материалом, для удлинения пути фильтрации.
- Если строительство плотины в местах активных разломов неизбежны или активные разломы обнаружены под существующей плотиной, то в зоне разлома или косейсмического сдвига под плотиной могут быть установлены верхний плоский фильтр и нижний обратный фильтр достаточного размера для сохранения устойчивости после потенциального смещения разлома.

Фильтры и дренажные устройства:

- Тщательный отбор и обработка фильтрующих и дренажных материалов
- Внедрение зоны ограничения трещин из песка и гравия вблизи гребня плотины для обеспечения дополнительной прочности и снижения риска образования трещин, вызванных сейсмическими воздействиями
- Фильтры должны содержать менее 5 процентов мелких частиц
- Внедрение широких фильтрующих и высокопропускных дренажных зон для обеспечения устойчивости плотины к деформациям и сохранения ее работоспособности. После сейсмических воздействий более 50 процентов мелкого песка должно оставаться доступным в фильтрационной зоне для обеспечения работоспособности плотин.
- Переходные зоны со стороны верхнего и нижнего бьефа должны быть самоуплотняющимися и иметь подходящий уровень зернистости для заполнения трещин в ядре плотины.

Форма и конструкция грунтовых плотин

- Широкое ядро из пластичных материалов с высокой относительной деформацией при разрушении для минимизации распространения трещины и предотвращения суффозии в случае образования трещины в ядре.

- Широкий гребень для создания более длинных путей фильтрации через любые поперечные трещины, возникающие во время землетрясений.
- Коэффициент статической устойчивости склонов не менее 1.5 при устойчиво высоком уровне фильтрации.
- Обеспечение достаточной высоты превышения гребня над МПУ для компенсации оседаний и предотвращения перелива через гребень плотины при землетрясении. Высота превышения гребня над МПУ должна составлять не менее 5–10 процентов от высоты плотины и никогда не должна быть менее 0.9 метра.
- Для укрепления устойчивости низового откоса плотины или предотвращения суффозии, следует использовать фильтрующий контрфорс или дренажный банкет с бермой. Такой подход может быть необходим, если материал низовой призмы плотины имеет низкие дренажные свойства и фильтрация сопровождается выносом грунта. При насыщении грунта устойчивость низового откоса плотины значительно снижается, отсюда возникает необходимость в контрфорсе.

Укрепление потенциально неустойчивых береговых склонов водохранилища описано в Технической записке о Геотехнических Рисках.

Меры сейсмозащиты для бетонных плотин

- Устранение дефектов фундамента, например с использованием анкерного понура для повышения устойчивости плотины на сдвиг
- Строительство бетонных плотин на участках с активными разломами не рекомендуется.
- Выбор оптимальной геометрии плотины для максимальной устойчивости на сдвиг
- Внедрение достаточного количества дренажных устройств для контроля противодавления после землетрясения. Размеры, расположение и ориентация дренажных устройств должны учитывать смещение фундамента во время МРЗ. Как минимум 50 процентов дренажных сооружений должны оставаться незаблокированными после землетрясения.
- Обеспечение достаточной высоты превышения гребня над ФПУ для предотвращения перелива через гребень плотины из-за стоячих или оползневых волн в водохранилище, вызванных землетрясениями.
- Элементы плотины, имеющие высокую конструкцию, могут подвергаться значительно усиленным нагрузкам во время землетрясения. Этот факт необходимо учитывать при проектировании, особенно если речь идет об элементах систем безопасности плотины (например затворы водосброса).
- По возможности следует избегать резких изменений профиля в конструкции плотин
- Надлежащее проектирование строительных, деформационных и изолирующих швов.
- Проектирование водосбросных конструкций под высокоскоростной поток.
- Разработка и приготовление бетонной смеси с учетом требуемой прочности на сжатие, растяжение и модуля упругости.

Вспомогательные сооружения, необходимые для обеспечения сейсмической безопасности

- Внедрение водосбросных сооружений донного или среднего уровня для обеспечения быстрой сработки водохранилища после землетрясения.
- Размещение водосбросных/водовыпускных механизмов и объектов аварийного энергоснабжения в местах, защищенных от обрушения горных пород
- Учет влияния усиленных колебаний грунта на конструкцию вспомогательных сооружений, расположенных на возвышенных уровнях. Мостовые электрические краны, расположенные на напорных перекрытиях плотины или на устоях, для контроля шлюзов, особенно уязвимы к усиленным подземным колебаниям.
- Оценка надежности водосбросных/водовыпускных сооружений после землетрясения
- Установка надежного оборудования для электроснабжения и связи, включая независимые резервные системы (например, дизель-генератор)
- Регулярное тестирование независимых резервных систем, резервных источников питания и систем управления
- Если надежность водосбросных/водопропускных затворов не может быть обеспечена, рассмотрите возможность интегрирования нерегулируемого переливного водосброса

Прочие меры по повышению безопасности

- Усиление неустойчивых участков склона, которые могут блокировать проезд к плотине.
- Защита оборудования и электростанций от падения камней.
- Внедрения резервных источников энергии и коммуникаций.
- Обеспечение нескольких путей доступа к плотине.

Не конструкционные меры

- Применение временных или постоянных эксплуатационных ограничений
- Установка усовершенствованной системы мониторинга сейсмической и других систем безопасности плотин.
- Внедрение системы раннего предупреждения
- Совершенствование плана аварийной готовности
- Переселение людей, находящихся в зоне риска.

Возбуждение сейсмичности в районе водохранилища

ВСРВ встречается не часто, но все же риск следует оценивать при строительстве новых плотин, особенно для плотин, превышавших 100 метров и с объемом водохранилища более 500 миллионов кубических метров. Следует обратить внимание на следующие аспекты, связанные с ВСРВ:

- Основным механизмом ВСПВ является высвобождение тектонических напряжений в результате изменения напряжений и прочностных свойств в плоскостях тектонического нарушения, вызванных нагрузкой от водохранилища. Для возникновения данного процесса необходимо, чтобы разлом, способный вызвать землетрясение, уже был близок к разрушению, и дополнительная нагрузка или поровое давление, возникшее в результате наполнения водохранилища, могло бы вызвать сейсмическое явление. Провоцирование землетрясения в результате наполнения водохранилища не меняет общие тектонические процессы и сейсмическую опасность на участке плотины. Дополнительная нагрузка воды не может существенно увеличить выброс сейсмической энергии, поскольку увеличение энергетического потенциала в результате заполнения практически незначительно по сравнению с размером фактического выброса сейсмической энергии (МКБП 2011). ВСПВ обычно являются результатом относительно неглубоких землетрясений и связаны с нормальными разломами и разломами со смещением по простиранию. Сейсмические процессы также могут быть вызваны обрушением подземных шахт/пустот в районах добычи полезных ископаемых, закачкой или извлечением жидкости, геотермальной энергией или гидроразрывом пласта.
- Взаимосвязь между водохранилищами и сейсмичностью продолжает изучаться научным сообществом, однако случаев ВСПВ гораздо меньше по сравнению с общим количеством больших плотин в мире (более 58000). Тридцать девять случаев ВСПВ представлены в МКБП 2009, из них четыре масштабные ВСПВ с магнитудой более 6.0. Самая высокая наблюдаемая магнитуда землетрясения составила 6.3.⁶
- Высота плотин и размер, форма, глубина и объем водохранилищ могут повлиять на возможность возникновения ВСПВ. Все четыре случая ВСПВ с магнитудой более 6,0 были связаны с водохранилищами, глубина и объем которых превышали 100 метров и 500 миллионов кубических метров соответственно. МКБП (2016) рекомендует рассматривать возможность ВСПВ для больших плотин, особенно для тех, которые превышают эти пороговые значения. МКБП (2011) содержит информацию о текущем уровне знаний о водохранилищах и сейсмичности.
- Согласно рекомендациям МКБП, плотины высокого риска (или высокой опасности) должны выдерживать колебания грунта, возникающие при МРЗ или МДЗ. Поэтому сейсмичность ВСПВ не должна быть потенциальной проблемой безопасности для тщательно спроектированной плотины, так как максимальное землетрясение, вызванное водохранилищем, не может быть мощнее МРЗ или МДЗ. Однако ВСПВ все же может стать проблемой для других сооружений, зданий и вспомогательных объектов вблизи плотины, поскольку они могут иметь гораздо меньшую сейсмостойкость, чем плотина. Кроме того, могут быть затронуты подъездные дороги и сооружения, не относящиеся к плотине, расположенные поблизости. Если ВСПВ вызывает опасения, значения параметров движения грунта при ПЗ могут быть увеличены для охвата ВСПВ.
- Соответствующий мониторинг ВСПВ до, во время и после заполнения водохранилища дает наиболее весомые доказательства возможности возникновения землетрясений в результате заполнения водохранилища.

⁶ Максимальная магнитуда землетрясения была зафиксирована в 1967 году на плотине Койна в Индии, высота которой составляла 103 метра, а объем водохранилища - 2.8 миллиона кубических метров.

Для различения фоновой сейсмичности и ВСПВ мониторинг следует начинать заблаговременно (например, за два года) до заполнения водохранилища.

Сейсмическая аппаратура и мониторинг

Сеть сейсмического мониторинга для обнаружения и оповещения о месте и силе землетрясений улучшает реагирование на чрезвычайные ситуации, способствует оценке безопасности после землетрясения и предоставляет ценные данные для развития сейсмостойкого строительства.

В районах с умеренной и высокой сейсмичностью, где имеется достаточный охват сейсмическими датчиками сильных колебаний вблизи плотины, автоматизированная информация может быть доступна через внутреннюю сеть агентств или государственных учреждений. Более 70 стран имеют сети сейсмического мониторинга, и большинство из них обмениваются информацией в режиме реального времени с международными агентствами, такими как Европейско-средиземноморский сейсмологический центр (EMSC).

Установка сейсмических датчиков сильных колебаний на территории плотины может потребоваться в случаях, когда зона охвата сети не обеспечивает достаточного покрытия территории плотины и когда требуется измерение колебаний грунта на территории плотины. Количество датчиков и места их установки должны отражать условия участка и потребности в последующем использовании. Предпочтительными местами установки в порядке убывания полезности являются:

1. Основание плотины для регистрации пикового ускорения грунта
2. В местах примыкания плотины к береговым участкам с для регистрации топографического усиления пикового ускорения грунта
3. В середине гребня плотины для регистрации усиления пикового ускорения грунта в пределах плотины
4. Другие точки, включая промежуточные высоты вдоль сооружения и вблизи площадки плотины, для регистрации свободных колебаний

Основные требования к акселерометрам для измерения сильного колебания грунта включают надежность и соответствующая чувствительность для измерения трех компонентов движения грунта.

Мониторинг возбуждения сейсмичности в районе водохранилища

Для регистрации и определения эпицентра относительно небольших толчков в районе строительства плотины необходим сеть сейсмических станций. Эти станции должны включать в себя микросейсмические регистраторы и регистраторы сильных колебаний. В целом, для определения эпицентра и глубины гипоцентра рекомендуется не менее пяти сейсмических станций. Мониторинг следует начать за несколько лет до наполнения водохранилища, чтобы охарактеризовать характер фоновой сейсмичности.

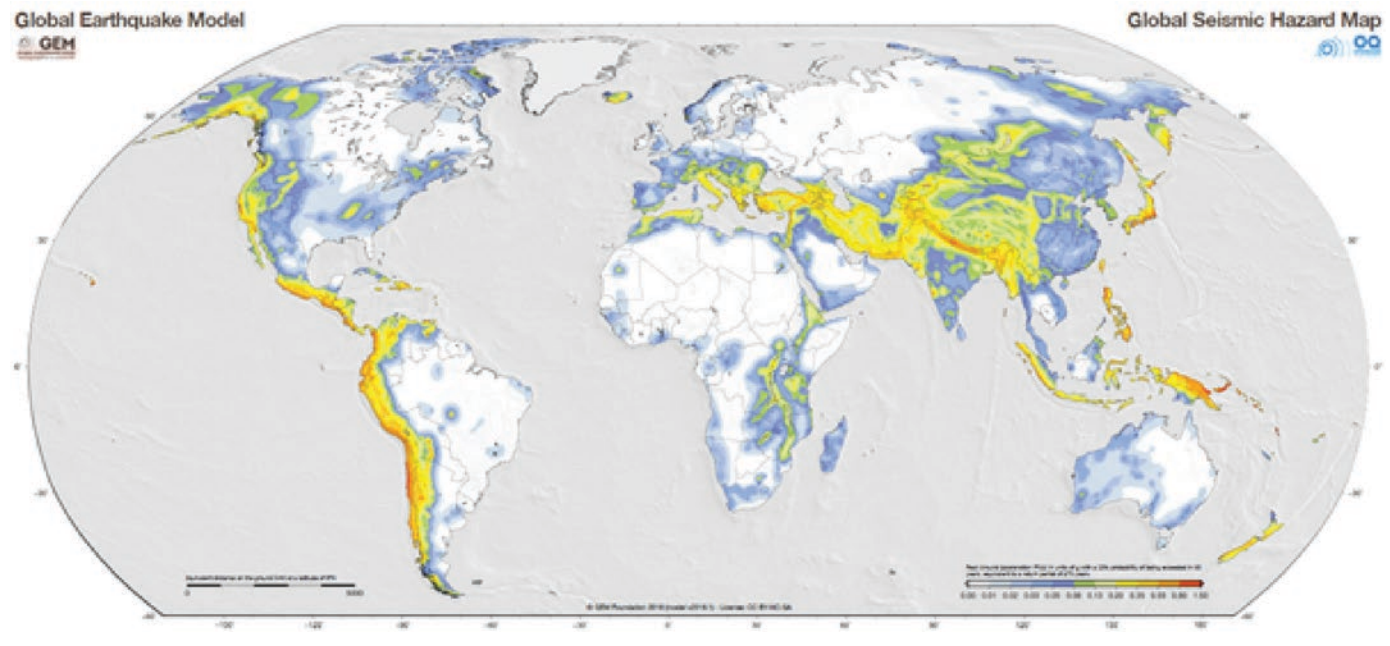
Специальные оборудования для мониторинга

Ниже приведены специальные оборудования для мониторинга сейсмических опасностей:

- Видеокамеры для визуальных наблюдений в режиме реального времени
- Системы измерения температуры (высокого разрешения) воды в пределах фундамента и тела плотины для обнаружения любых изменений в условиях фильтрации и появления суффозии после землетрясения.
- Экстензометры и инклинометры для определения деформации грунта, особенно в отношении разломов и сдвигов
- Простые отметки смещения швов или инструменты по монолиту бетонных плотин, на гребне или внутри галерей

Приложение А: Мировая карта глобальной сейсмической опасности

РИСУНОК А.1. Мировая карта глобальной сейсмической опасности



Источник: <https://www.globalquakemodel.org/gem>

Справочная литература

- Bray, J. D., and R. B. Sancio. 2006. "Assessment of the Liquefaction Susceptibility of Fine-Grained Soils," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132(9): 1165–77.
- Fell, R., P. MacGregor, D. Stapledon, G. Bell. 2005. *Geotechnical Engineering of Dams*. London: CRC Press
- FEMA (U.S. Federal Emergency Management Agency). 1998. "Hazard Potential Class System for Dams," FEMA 333 (October).
- . 2005. "Federal Guidelines for Dam Safety: Earthquake Analyses and Design of Dams," FEMA 65 (May).
- FERC (U.S. Federal Energy Regulatory Commission). 2018a. "Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects, Revised Chapter 3: Gravity Dams," FERC (May).
- . 2018b. "Engineering Guidelines for the Evaluation of Hydropower Projects, Revised Chapter 11: Arch Dams," FERC (March).
- Global Earthquake Model Foundation website. <https://www.globalquakemodel.org/>. Pavia, Italy: GEM Foundation
- ICOLD (International Commission on Large Dams). 1989. *Bulletin 72: Selecting Seismic Parameters for Large Dams*. Paris: ICOLD.
- . 2001. *Bulletin 120: Design Features of Dams to Resist Seismic Ground Motion—Guidelines and Case Studies*. Paris: ICOLD.
- . 2010. *Bulletin 72: Selecting Seismic Parameters for Large Dams, Revised Edition*. Paris: ICOLD.
- . 2011. *Bulletin 137: Reservoirs and Seismicity—State of Knowledge*. Paris: ICOLD.
- . 2016. *Bulletin 148: Selecting Seismic Parameters for Large Dams—Guidelines (Revision of Bulletin 72)*. Paris: ICOLD.
- MBIE (Ministry of Business, Innovation and Employment New Zealand) and NZGS (New Zealand Geotechnical Society Inc.). 2016. *Earthquake Geotechnical Engineering Practice, Module 3: Identification, Assessment and Mitigation of Liquefaction Hazards*. Wellington: MBIE and NZGS, Rev 0 (May).
- Mejia, L., M. Gillon, J. Walker, and T. Newson. 2001. "Criteria for Developing Seismic Loads for the Safety Evaluation of Dams of New Zealand Owners," : The Australian National Committee on Large Dams 2001 Conference on Dams, Hobart, Australia.
- New Zealand Society on Large Dams (NZSOLD) and IPENZ-Engineers New Zealand. 2015. *New Zealand Dam Safety Guidelines*. Wellington.: NZSOLD/IPENZ.
- Seed, H. B., and I. M. Idriss. 1982. *Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes*. Berkeley, CA: Earthquake Engineering Research Institute (134).
- USBR (U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation). 2011. *Design Standards No. 13: Embankment Dams*. Washington, DC: USBR (November).
- . 2015. *Design Standards No. 13 Embankment Dams Chapter 13: Seismic Analysis and Design Phase 4: Final*. Washington, DC: USBR (May).
- United States Geological Survey (USGS) website. <https://www.usgs.gov/science-explorer-results?es=earthquakes>. Reston, Virginia: USGS
- World Bank. 2020. *Good Practice Note on Dam Safety*. Washington, DC: World Bank. World Bank. 2020. *Technical Note on Geotechnical Risk*. Washington, DC: World Bank.

