

# ТЕХНИЧЕСКАЯ ЗАПИСКА 1 ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ 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](http://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](http://www.worldbank.org/gwsp) или следите за нашими новостями в социальной сети Twitter по адресу [@TheGwsp](https://twitter.com/TheGwsp).

ТЕХНИЧЕСКАЯ ЗАПИСКА 1  
**ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ 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](http://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 Гидрологическим 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 1: Hydrological 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](mailto:pubrights@worldbank.org).

Фотография на обложке: Многоцелевая плотина Вусикоу [Wuxikou] (Китай) © Jiangxi Wuxikou Integrated Flood Management Project РМО.

Дизайн обложки: Билл Праглуски, Critical Stages, LLC.

# Техническая Записка 1: Гидрологические риски

## Содержание

Техническая Записка 1: Гидрологические риски	1
Цель и сфера применения данной записки	1
Предыстория	2
Управление данными	2
Модели водоразделов и речных систем	5
Вероятностное определение характеристик наводнений	9
Другие методы определения характеристик наводнений	11
Заиления	12
Экологический сток	13
Критерии расчетного паводка	14
Воздействие изменения климата	15
Управление гидрологическим риском и повышение устойчивости к внешним воздействиям	17
Справочная литература	24
Дополнительные источники	25
Приложение 1: Площадь водосбора и Максимальное Возможное Наводнение некоторых больших плотин	27
Приложение 2: Обзор актуальных исследований Всемирного банка	28

## Цель и сфера применения данной записки

Уровень технической детализации данной Технической записки позволяет неспециалистам использовать ее для руководства при рассмотрении гидрологических аспектов проектов плотин на ранних стадиях разработки проекта. Она предназначена для повышения осведомленности и информирования о конкретных исследованиях и изысканиях, которые необходимо провести, в ходе разработки и реализации проекта. Представленный материал следует использовать для подготовки технического задания на проведение таких исследований и для оценки адекватности методологии, предлагаемой консультантами в тендерах на оказание консультационных услуг. Рекомендуется, чтобы, ознакомившись с запиской, клиент и проектные группы Всемирного банка оценили необходимый уровень гидрологической осведомленности в командах.

Гидрологические вопросы, рассматриваемые в данной записке, типичны для работ, осуществляемых при поддержке Всемирного банка. Существует ряд других вопросов, относящихся к гидрологии, которые в записке не рассматриваются. Расширение сферы охвата до этих вопросов противоречило бы поставленной цели и превратило бы записку в справочник по обширной области знаний гидрологии. Такие же тщательные усилия были предприняты при выборе справочных материалов, к которым читатель может обратиться, чтобы сосредоточиться на конкретных вопросах. По этой причине список был ограничен основными источниками, которые предоставляют общее руководство по необходимым гидрологическим исследованиям, в то время как дополнительные источники дополняют общее руководство ссылками, касающимися конкретных аспектов гидрологии проекта.

Гидрология и управление безопасностью плотин - динамично развивающиеся темы, характеризующиеся постоянным прогрессом. Читателям настоящей записки предлагается представить Всемирному банку отзывы и предложения, которые организация может рассмотреть в будущем обновлении.

## Предыстория

Термин «гидрологический риск» может иметь различные толкования в зависимости от типа рассматриваемого проекта и причин оценки риска. Например, в гидроэнергетическом проекте гидрологический риск часто понимается как риск того, что приток будет недостаточным для поддержания желаемого объема выработки электроэнергии на этапе эксплуатации жизненного цикла станции.

На **этапе проектирования** жизненного цикла плотины гидрологический риск обуславливает требования, связанные с определением пропускной способности плотины, обеспечивающей надежную эксплуатацию плотины в течение нескольких десятилетий.

На **этапе строительства** основным рассматриваемым гидрологическим риском является величина и вероятность притока, который не может быть безопасно пропущен через или вокруг строительной площадки с помощью сооружения для отвода паводковых вод и может вызвать прорыв перемычки и затопление территории ниже по течению, а также задержку работ и/или увеличение их стоимости.

Аналогичный аспект гидрологического риска вызывает беспокойство на последующем этапе жизненного цикла - эксплуатации плотины. Неспособность оборудования для регулирования потока пропускать приток либо из-за недостаточной установленной пропускной мощности, либо из-за отказа оборудования, может способствовать переливу воды через гребень плотины и вызывать структурное разрушение плотины и неконтролируемый катастрофический сброс воды. В данной Технической записке рассматриваются аспекты гидрологического риска, которые могут повлиять на безопасность плотины.

В целом, аспекты безопасности плотины в отношении гидрологических рисков относятся к (а) определению ключевых характеристик экстремальных гидрологических явлений, (b) определению конструкции сбросных сооружений и объема водохранилища, и (с) определению стратегии и планов эксплуатации.

Гидрология и смежная с ней дисциплина управления водными ресурсами, участвующие в определении характеристик безопасности плотин, имеют давнюю традицию разработки методов, моделей и других вспомогательных инструментов, характеризующих гидрологическую опасность. Из-за обширности и углубленности имеющихся методов и компьютерных моделей, поддерживающих эти факторы, данная Техническая записка не может подробно объяснить современное гидрологическое моделирование. Ссылки предоставляют общую информацию как о базовых, так и о передовых методах и технологиях.

## Управление данными

Климатологические и гидрологические данные необходимы для планирования любого потенциального проекта строительства плотины или гидроэлектростанции, а также для эксплуатации существующих проектов. Сбор, обработка и хранение данных, организованных в виде гидрологической информационной системы, обеспечивает надежную основу и необходимые исходные данные для различных гидрологических исследований, поддерживающих оценку безопасности и риска плотин. На рис. 1 представлена схема, предложенная Всемирной метеорологической организацией (ВМО, 2008) для гидрологических систем и модифицированная для целей оценки безопасности плотин. Схема иллюстрирует деятельность и взаимосвязи, присутствующие при разработке информационной системы, способной поддерживать гидрологические исследования, проводимые для целей эксплуатации и проектирования.

**РИС 1. Гидрологическая информационная система - исторические записи и данные в реальном времени**



Источник: ВМО, 2008

В зависимости от национальных экономических и социальных условий не все компоненты этой модели могут являться актуальными или могут быть легко разработаны и внедрены. Даже если основные компоненты внедрены, частота регистрации показаний (ежечасно, ежедневно и т. д.), время хранения имеющихся записей и место сбора информации, определенное существующими наборами исторических данных, могут быть недостаточными. Качество и надежность таких записей и данных также могут быть сомнительными из-за ограниченного контроля качества или его отсутствия. Поэтому без сбора дополнительной информации объем и всесторонность существующих записей могут ограничить выбор методов моделирования и подходов в гидрологических исследованиях, необходимых при разработке и эксплуатации проекта.

Записи данных должны включать следующие наблюдения.

Гидрометрические наблюдения:

- Уровень реки/ручья
- Уровень озера/водохранилища
- Приток наносов
- Заиление
- Ледники

Климатологические наблюдения:

- Атмосферные осадки
- Исследование снежного покрова<sup>1</sup>
- Солнечная радиация
- Испарение
- Минимальная и максимальная температура
- Влажность
- Скорость и направление ветра

Если имеющихся данных (тип, продолжительность записи и так далее) недостаточно или если проект находится на стадии планирования и требуется собрать больше данных до перехода проекта в стадию эксплуатации, следует рассмотреть возможность расширения существующей системы наблюдений для осуществления продолжительной эксплуатации и внесения соответствующих корректировок в будущем. Если данные по соответствующему водосбору доступны только за короткий период<sup>2</sup>, для улучшения оценок следует использовать региональные данные. Региональные данные могут обеспечить характеристики шторма, такие как глубина, форма, направление, пространственная переменчивость и т. д. в регионе, но их сопоставимость и применимость к конкретному участку/площади водосбора должна быть проверена. В Таблице 1 приведены рекомендации<sup>3</sup> по этому вопросу.

Когда гидрологические данные, и, в частности, данные о стоке, ограничены и ненадежны, имеют большие интервалами, база данных ERA5 может стать полезной отправной точкой. Эти гидрологические данные предоставлены ECMWF (Европейский центр прогнозов погоды на средние сроки) с 1979 года по настоящее время с разрешением<sup>4</sup> 30x30 км. Данные также включают осадки и потенциальную эвапотранспирацию. Данные находятся в свободном доступе в интернете. На основе этих данных можно составить баланс объемов и адаптировать их, используя немногочисленные имеющиеся данные. Данные дистанционного зондирования также могут быть использованы в качестве источника альтернативной или дополнительной информации<sup>5</sup>.

---

1 Исследование снежного покрова важно для оценки сезонных осадков и прогнозирования речного стока весной в горных районах, где таяние накопленного снега обеспечивает большую часть воды речного стока и даже вызывает наводнения.

2 С увеличением продолжительности записи возрастает надежность оценки вероятности возникновения гидрологического явления. Приблизительные значения надежности (процентный шанс) могут быть рассчитаны для различных вероятностей превышения (интервалов повторяемости). Пример показан для небольших периодов возврата от 2 до 100 лет, в котором приблизительные значения надежности (% вероятности) оцениваются как функция доверительного предела, периода возврата и продолжительности записи. Таким же образом показан риск возникновения наводнения с периодом возврата более 2–100 лет в течение срока службы проекта (30–50 лет) (МКБП 2012).

3 Ограниченный объем имеющихся исторических данных требует использования дополнительных методов для расширения базы данных, таких как региональный анализ. Независимо от этого, необходимо принять предполагаемое отношение вероятностей для экстраполяции базы данных на расчетную частоту, в диапазоне от 1000 до 10 000-летнего интервала повторяемости. Существует множество отношений вероятности, которые можно выбрать для этой задачи. Специалисты по проектированию плотин должны выбрать наиболее подходящую для имеющихся данных. Следует признать, что независимо от целесообразности используемой вероятностной зависимости, экстраполяция данных на интервал от 1000 до 10 000 лет даже по данным за 100 лет является «растянутым» (сложным и рискованным) процессом (МКБП 2012).

4 [www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5](http://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5)

5 См. Гарсия (2016) о доступных климатологических и гидрологических данных дистанционного зондирования, которые могут быть использованы для заполнения пробелов при недостатке наземных данных.



**ТАБЛИЦА 1. Рекомендации по применению региональных данных**

Качество имеющихся региональных данных	Продолжительность периода, по которому имеются данные по водосбору		
	Менее 20 лет	от 20 до 50 лет	Более 50 лет
Хорошее	Делайте выводы на основании региональных данных	Используйте данные по водосбору и сверьте их с региональными данными	В первую очередь используйте данные по водосбору
Удовлетворительное	Используйте региональные данные и сравните их с эмпирическими формулами <sup>а</sup>	Используйте данные по водосбору и сравните их с региональными данными	
Низкое	Используйте эмпирические методы		

*Источник:* авторская таблица составленная для данной публикации

а. Эмпирическая формула паводка обычно выражается в виде огибающей кривой паводочного расхода для приблизительной оценки верхнего предела расхода для региона/района. Обычная формула представляет пиковый расход (м<sup>3</sup>/с), как степенную функцию площади водосбора (км<sup>2</sup>).

Руководство по гидрологической практике, Том 1, «Гидрология: от измерений до гидрологической информации» (ВМО, 2008) содержит всю необходимую техническую и организационную информацию для проведения таких мероприятий.

Кроме того, если водосборный бассейн выше по течению от места реализации проекта подвержен значительной эрозии, необходимо проведение расчета твердого стока в водохранилище до начала этапа детального проектирования. Топография, геология, геоморфология и схема землепользования водосбора должны быть изучены в рамках расчета твердого стока. Более детальная оценка, включая оценку поступления взвешенных и донных наносов, может потребоваться в ходе детального проектирования.

Основная задача обработки данных должна включать корректировку собранных данных с учетом известных ошибок, агрегирование и интерполяцию данных, а также расчет производных переменных; например, величины сброса, рассчитанные по данным наблюдений за уровнем воды с помощью кривых расходов. Целесообразно проверять состояние измерительной системы, на которое могут влиять неисправности, изменения в состоянии русла реки, частота измерений в периоды паводков и т. д.; калибровать рейтинговую кривую; проверять точность и надежность данных и анализов. Этап вторичной обработки данных должен включать оценку и вставку недостающих данных, а также общую проверку и контроль качества всех записей. Это важно, поскольку недостаточная квалификация и опыт часто приводят к пренебрежению столь важным процессом. При выполнении этих задач следует руководствоваться указаниями ВМО (2008), насколько это позволяют местные условия.

При достаточном наличии данных управление обработанными данными должно осуществляться путем разработки компьютеризированной базы данных, которая должна архивировать данные в безопасном и доступном виде и предусматривать возможность интеграции с другими наборами данных (например, информацией на основе ГИС). При низкой доступности данных или ограниченном объеме собранных данных могут быть уместны более простые инструменты управления данными, не теряющие своей значимости.

## **Модели водоразделов и речных систем**

Ключом к анализу и характеристике гидрологической опасности и риска является разработка гидрологических моделей водораздела и речной системы.

Гидрологические модели водораздела, разработанные с помощью гидрологического моделирования (Сингх и Фреверт 2002 а и b), позволяют оценить, как климат и погода влияют на поток. Гидрологические модели водораздела могут варьироваться от простых эмпирических формул до концептуальных или сложных физически обоснованных компьютерных моделей. Как концептуальные, так и физически обоснованные модели могут быть с сосредоточенными или распределенными параметрами. Тодини (2007) содержит информативное обсуждение особенностей, преимуществ и ограничений различных гидрологических моделей. Выбор метода моделирования зависит от сложности проекта, имеющихся технических возможностей и доступности данных для моделирования. При принятии решения о выборе подходящего метода моделирования важно соблюдать правильный баланс между имеющимися данными и рассматриваемым аналитическим методом. Важно отметить, что повышение сложности аналитических методов без достаточного количества данных не повышает точность результатов. Сложность модели также должна быть адаптирована в соответствии с целью и объемом требуемого анализа.

Наличие программного обеспечения, которое специалисты-практики широко использовали и проверили, является доминирующим способом анализа. Консультанты из разных стран используют различные модели и программное обеспечение, и качество отчетов по гидрологической оценке, сильно варьируется от проекта к проекту. Важно оценить применимость и достаточность предлагаемого математического инструмента для каждого конкретного случая. Критическая оценка результатов также важна, поскольку всегда есть вероятность переоценки красиво представленных графических результатов, полученных с помощью сложных моделей. Общая характеристика современных подходов к моделированию водосбора, включающих метрические, концептуальные и физические методы, изложена в работе Хартфорда и др. (2016).

Большинство современных гидрологических моделей включают возможность моделирования водораздела как совокупности субводосборов с использованием методов гидрологической трассировки для моделирования движения воды между субводосборами. Если такой возможности нет, расчеты трансформации стока могут быть выполнены с помощью известных методов гидрологической трассировки. Расчет трансформации стока или паводка — это процесс, используемый для описания временных и пространственных изменений гидрографа (паводка) по мере его движения по руслу реки. Это трассирование динамического движения воды вниз по течению через участок реки имеет хорошо разработанную теоретическую основу в вычислительной механике жидкости и обширную литературу (ASCE 1996; Чоу 1959; Мейдмент 1993; Сингх 2004; Вайнман и Лоренсон 1979). Широко используемые методы включают кинематическую волну, диффузионную волну, квазистационарную и полную динамическую волну. В качестве альтернативы могут использоваться автономные методы гидрологической трассировки, включающие модель линейного водохранилища, модель модифицированного импульса, модели Маскингума и Маскингума-Кунге (Хартфорд и др., 2016).

В таблице 2 приведен список широко используемых моделей водораздела различной сложности. Более подробный список доступных гидрологических моделей можно найти в работах Эдсела и др. (2011), Сингха (1995) и Ситтерсона и др. (2017). Существующие модели охватывают весь спектр возможных подходов к моделированию, поэтому большое разнообразие доступных моделей водораздела делает идею разработки новой модели специально для проекта экономически неэффективной и нецелесообразной.

При выборе модели для проекта необходимо установить следующее:

- Общие знания и опыт гидрологического моделирования инженера или группы, которая проводит отбор и впоследствии отвечает за внедрение выбранной модели
- Опыт в применении выбранной модели
- Определение площади водораздела, подлежащего моделированию. Часто для целей проектирования необходимо учитывать только территорию выше по течению от места расположения плотины. Однако, когда рассматривается эксплуатация плотины, необходимо также включить часть водораздела ниже по течению<sup>6</sup>.
- Возможность выбранной модели включать все соответствующие гидрологические процессы, происходящие в водосборном бассейне
- Контроль качества данных
- Возможность использования существующих данных для реализации выбранной гидрологической модели (и, при необходимости, отдельной модели трансформации для конкретного водораздела)
- Требования к процессу проверки и оптимизирования моделей

Относительно информации, содержащейся в таблице 2, следует учитывать следующее:

- Некоторые эксперты могут предложить использовать программные модели, не включенные в таблицу 2; это не означает, что эти методы не подходят, и при оценке следует обратиться за консультацией к специалистам.
- Упоминание конкретных программных продуктов, некоторые из которых являются коммерческими, не должно рассматриваться как предпочтение или одобрение этих продуктов.

Модели речных систем представляют собой полезные инструменты в управлении безопасностью плотин, поскольку их можно использовать для оценки того, как гидрологические опасности, особенно наводнения, влияют на риск, создаваемый инженерными сооружениями (плотинами и водохранилищами). Хорошо разработанная расчетная модель также является важным инструментом для корректировки политики, планов, вариантов развития и стратегий эксплуатации проектов, предлагаемых или реализуемых в бассейне. Целью разработки модели речной системы является описание основных гидрологических и гидравлических характеристик бассейна, и путем моделирования ряда сценариев развития или корректировки политики оценить потенциальное воздействие, которое может произойти на водные ресурсы.

Цели базового моделирования включают анализ вариантов местоположения плотин, потенциального объема водохранилищ, надежного водоснабжения/выработки гидроэлектроэнергии и интегрированного управления наводнениями. Простые модели на основе электронных таблиц приемлемы на уровне предварительного

---

<sup>6</sup> Результаты моделирования низовья водораздела необходимы для целей моделирования речной системы и системного моделирования. Кроме того, эта информация необходима для надлежащей оценки последствий разрушения плотины.

**ТАБЛИЦА 2. Системы гидрологического моделирования**

Модель	Тип	Описание	Доступ	Разработчик
GR4J	Водосборный бассейн	Эмпирическая общая, эффективная и надежная модель, использующая значительно меньше данных, чем концептуальные или физические модели	Открытый	eWater, Австралия
HBV	Водосборный бассейн	Эмпирическая общая, эффективная и надежная модель, использующая значительно меньше данных, чем концептуальные или физические модели	Открытый	SMHI-Швеция
INACRES	Водосборный бассейн/ течение	Эмпирическая общая модель водосбора с использованием гидрографов для моделирования трансформации потока	Нет информации	ICAM, Австралия
HEC-HMS	Водосборный бассейн/ течение	Система гидрологического моделирования, симулирующая полный набор гидрологических процессов и трансформации потока; вводные данные в совместимом с другими программными решениями USACE формате HEC.	Открытый	USACE
Mike 11	Водосборный бассейн/ течение	Эмпирическая модель водосбора, симулирующая объем и трансформацию стока; может быть привязана к другим системам моделирования DHI	Платный	DHI, Дания
TOPKAPI-X	Распределенная физическая модель водосбора и упрощенная модель трансформации потока	Усовершенствованная модель водосбора, симулирующая все процессы с помощью кинематических уравнений потока	Открытый	Idrologia & Ambiente
MIKE-SHE	Распределенная физическая модель водосбора и упрощенная модель трансформации потока	Усовершенствованная модель водосбора, симулирующая все процессы с помощью соответствующих гидравлических уравнений	Платный	DHI

*Примечание:* DHI = Датский Гидравлический Институт; HEC = Инженерно-Гидрологический Центр; SMHI = Шведский Метеорологический и Гидрологический Институт; ICAM - Центр Комплексной Оценки и Управления Водосборами, USACE- Инженерный Корпус Армии США

технико-экономического обоснования и могут быть достаточными для простых или мелкомасштабных проектов развития водных ресурсов.

Дальнейшие этапы развития более сложных и масштабных проектов требуют более точных моделей речных систем. Разработка гидрологических моделей водоразделов и моделей речных систем - сложная, трудоемкая и часто дорогостоящая задача, требующая передовых технических знаний и опыта компьютерного моделирования.

В таблице 3 приведен список интерактивных программ, которые помогают сформулировать альтернативные варианты использования водных ресурсов, проанализировать их последствия, интерпретировать и выбрать подходящие варианты для реализации.

Относительно информации, содержащейся в таблице 3, следует учитывать следующее:

- Некоторые эксперты могут предложить использовать программные модели, не включенные в таблицу 3; это не означает, что эти методы не подходят, и при оценке следует обратиться за консультацией к специалистам.

**ТАБЛИЦА 3. Системы моделирования речной системы**

Модель	Описание	Доступ	Разработчик
RiverWare	Модель эксплуатации и планирования водохранилищ и речных систем	Платный	<a href="http://www.riverware.org/">http://www.riverware.org/</a>
	Старые версии модели эксплуатации и планирования водохранилищ и речных систем	Открытый	CADSW Университет Колорадо, Боулдер
ModSim	Обобщенная система поддержки принятия решений по речным бассейнам и моделям речной сети, разработанная в Университете штата Колорадо, с возможностью включения физических, гидрологических и институциональных /административных аспектов управления речными бассейнами	Открытый	Университет штата Колорадо
HEC-ResSim	Программное обеспечение, моделирующее работу одного или нескольких водохранилищ для различных эксплуатационных целей и условий; программа моделирует работу водохранилищ для управления паводками, увеличения расхода водотока и водоснабжения для исследований по планированию, детальным исследованиям плана регулирования водохранилищ и поддержки принятия решений в реальном времени.	Открытый	USACE
HEC-WAT	Программное обеспечение, поддерживающее процесс планирования, позволяя пользователю интуитивно и совместно выполнять анализ альтернатив	Открытый	USACE
GOLDSIM	Программный пакет для моделирования, который использует объектно-ориентированную среду программирования и строит модель из потоков, модификаторов и соединителей.	Платный	<a href="https://www.goldsim.com">https://www.goldsim.com</a>
WEAP	Программное обеспечение для моделирования принятия решений на основе оптимизации и приоритетов пользователя для распределения воды и моделирования влияния сценариев, разработанных пользователем	Открытый	Стокгольмский Институт Окружающей Среды
MIKE-BASIN	Моделирование наличия воды, потребности в воде, работы многоцелевых водохранилищ, схем отвода воды и возможных экологических ограничений в речном бассейне.	Платный	DHI

*Примечание:* DHI = Датский Гидравлический Институт; USACE- Инженерный Корпус Армии США.

- Упоминание конкретных программных продуктов, некоторые из которых являются коммерческими, не должно рассматриваться как предпочтение или одобрение этих продуктов.

## Вероятностное определение характеристик наводнений

Простая вероятностная характеристика гидрологических опасностей может быть выполнена с помощью анализа повторяемости наводнений. анализ повторяемости наводнений проводится путем подгонки распределения вероятности к данным с использованием либо статистических параметров по местоположению, либо региональных параметров. В Таблице 4 приведен список программного обеспечения, которое часто используется для анализа повторяемости наводнений. Анализ повторяемости наводнений для одного участка является более простым и может быть достаточным для оценки крупных наводнений на участке с длительным периодом наблюдений за стоком. Если имеются записи только за короткий период времени (см. раздел «Управление данными»), региональный анализ является эффективным инструментом для определения характеристики паводка. Анализ повторяемости для регионального уровня особенно подходит для оценки редких и экстремальных наводнений. Хоскинг (1997), МКБП (2014 и 2016b) и ВМО (2009) содержат обширное и современное руководство по анализу региональной и одностанционной периодичности наводнений. Региональный анализ, как правило, сложен и требует много времени,

поскольку в нем используются данные с других участков в гидрологически схожем регионе. Особенно важно, чтобы команда, проводящая анализ, обладала знаниями и опытом применения статистических процедур для объединения данных (передовые методы тестирования на равномерность, случайность и независимость). Таким образом, применение анализа для региона требует участия специалиста, и рекомендуется независимая проверка.

Относительно информации, содержащейся в таблице 4, следует учитывать следующее:

- Некоторые эксперты могут предложить использовать программные модели, не включенные в таблицу 4; это не означает, что эти методы не подходят, и при оценке следует обратиться за консультацией к специалистам.
- Упоминание конкретных программных продуктов, некоторые из которых являются коммерческими, не должно рассматриваться как предпочтение или одобрение этих продуктов.
- Невозможно переоценить важность контроля качества данных, доступности данных и периода сбора, точности подгонки и так далее для любого анализа.

В центре внимания развивающихся в последнее время методов анализа периодичности наводнений находятся изменение климата и возникающая в результате этого нестационарность гидроклиматических динамических рядов. Корректировки традиционных методов анализа повторяемости наводнений рассмотрены в работах Мондала и Дензила (2018) и Вольпи (2018).

С развитием вероятностной характеристики экстремальных метеорологических событий (Куцойяннис 1999; Папалекси и Куцойяннис 2006; Сингх, Сингх и Берд 2018), альтернативный косвенный подход применяет модель реагирования водораздела на вероятный максимальный паводок, характеризуемого вероятностно. В сочетании с характеристикой неопределенности других вводимых данных и параметров моделирование реакции водораздела может обеспечить вероятностную характеристику экстремальных паводковых событий.

## Вероятный Максимальный Паводок и Максимально Возможное Наводнение

В дополнение к анализу повторяемости наводнений, основные характеристики (пиковый расход, объем наводнения и продолжительность наводнения) чрезвычайно крупных наводнений могут быть получены в результате

**ТАБЛИЦА 4. Программное обеспечение для анализа повторяемости наводнений**

Модель	Описание	Доступ	Разработчик
HYFRAN-Plus	Программное обеспечение, используемое для подгонки статистических распределений. Она включает в себя несколько эффективных, универсальных и удобных математических инструментов, которые могут быть использованы для статистического анализа экстремальных событий. Кроме того, в более широком плане она может выполнять базовый анализ любых динамических рядов независимо и одинаково распределённых данных.	Платный	Water Resources Publications, LLC
HEC-SSP	Специализированный анализ гидрологических данных (анализ периодичности потока, анализ общей периодичности, анализ периодичности объема)	Открытый	USACE
peakfqSA	Применение алгоритма EMA (Expected Moments Algorithm) для анализа повторяемости наводнений	Открытый	<a href="http://www.timcohn.com/TAC_Software/PeakfqSA">http://www.timcohn.com/TAC_Software/PeakfqSA</a>
CumFreq	Программа для расчета частоты и подгонки вероятностного распределения рядов данных	Открытый	<a href="https://www.waterlog.info/cumfreq.htm">https://www.waterlog.info/cumfreq.htm</a>

применения моделирования водораздела, которое рассчитывает Максимальное Возможное Наводнение (МВН) как реакцию водораздела на экстремальное метеорологическое событие, называемое Вероятным Максимальным Паводком (ВМП). Также важно учитывать характеристики водохранилища, как например расчёт трансформации стока в водохранилище, сбросные сооружения, предшествующие условия перед ВМП и так далее. ВМО (2009а) определяет ВМП как «теоретический максимум осадков за определенную продолжительность при нынешних метеорологических условиях. Максимальное количество осадков может выпасть на расчетном водосборном бассейне или на территории штормовой зоны определенного размера в определенное время года». МО (2009а) содержит подробное руководство по расчету ВМП. Метод Хершфилда является одним из наиболее практических методов расчета ВМП согласно рекомендациям ВМО (2009а).

### Наводнение в результате прорыва ледникового озера

Для водоразделов в высокогорных районах, имеющих ледники и ледниковые озера, прорыва ледникового озера<sup>7</sup> являются одним из явлений, вызывающих экстремальные наводнения. Внезапный выброс воды в результате прорыва ледниковых озер, образованных моренными отложениями, ледниковым льдом или коренной породой, может вызывать катастрофические разрушения. По мере отступления ледников в связи с потеплением климата количество и объем потенциально опасных озер, образованных моренными отложениями, увеличивается. В таких районах квалифицированные эксперты должны подготовить перечень ледниковых озер и оценить их текущую и будущую опасность. Для плотин с высоким риском или последствиями рекомендуется многоэтапная оценка, возможно, включающая более детальное изучение спутниковых снимков с высоким разрешением, облет с вертолета и так далее<sup>8</sup>.

### Другие методы определения характеристик наводнений

Когда имеющиеся данные, которые должны использоваться для моделирования водораздела или официального анализа повторяемости наводнений, ограничены или отсутствуют полностью, приблизительная характеристика наводнений может быть выполнена с помощью простых, детерминистических методов. Основные характеристики наводнений (пиковый приток, пиковый объем и так далее) в реке могут быть определены следующими методами.

### Эмпирические формулы и кривые

Эмпирические модели (часто называемые моделями на основе данных или моделями «черного ящика») используют статистические зависимости между входными (осадки) и выходными (сток в определенном месте) данными.

Модели ориентированы на наблюдения, и при их разработке не используется информация или знания о физических процессах, контролирующих сток. Простота реализации, незначительное время вычислений и низкая стоимость являются преимуществами для выбора эмпирических моделей для моделирования по сравнению с более сложными моделями. Однако важно проверить контекст и ограничение применимости с учетом региона, площади водосбора и т. д.

---

<sup>7</sup> Наводнения в результате прорыва ледникового озера представляют собой огромный риск, который необходимо учитывать при строительстве плотин, расположенных в высокогорных районах. Глобальное потепление оказывает дополнительное влияние на данный риск. Более подробная информация о необходимой оценке и сборе данных приведена в разделе «Вероятностное определение характеристик наводнений».

<sup>8</sup> На сайте [www.reynolds-international.co.uk/dfid](http://www.reynolds-international.co.uk/dfid) представлена обширная информация о ледниковых опасностях и полезные публикации.

Модели на основе номера кривой стока были первоначально разработаны как инструменты проектирования для оценки стока от дождевых осадков на сельскохозяйственных полях, но теперь они также используются для расчета пиковых скоростей и объемов стока для городской гидрологии. Модели на основе номера кривой — это, по сути, коэффициенты, которые уменьшают общее количество осадков до потенциала стока после потерь (испарение, инфильтрации, транспирация и объём задерживаемых на поверхности вод). Номера кривых (доступные в учебниках по гидрологии) определяются с учетом землепользования, типов почв, степени увлажненности водосбора и состояния поверхностного покрова. Номер кривой обычно определяется как индекс потенциала стока водосбора, и его значение варьируется от 0 при отсутствии стока до 100, когда все осадки преобразуются в сток.

### **Рациональный метод**

Рациональный метод — это простой подход, основанный на формуле, которая связывает потенциал водораздела по формированию стока со средней интенсивностью осадков за определенный период времени (время концентрации) и площадью дренажа водораздела. Метод позволяет получить не полный гидрограф, а пиковый приток.

### **Огибающая кривая**

Метод (МКБП 1992, 2016с), устанавливающий связь между пиковым притоком паводка и площадью водораздела, был первоначально представлен Родье и Роше (1984), а затем обновлен Натаном, Вайнманом и Гато (1994) и Херши (2003).

### **Единичный гидрограф**

Различные формы моделей единичного гидрографа объединяет то, что они преобразуют входные данные об осадках в данные о стоке, используя детерминистическую модель реакции водораздела. Эти детерминистические модели могут различаться в деталях, но все они имеют три общих элемента: (а) единичный гидрограф, (b) модель потерь и (с) базовый поток. Параметры модели обычно оцениваются по зарегистрированным наблюдениям дождевого стока, но при отсутствии гидрометрических наблюдений, строится синтетический гидрограф по физическим характеристикам бассейна. Традиционные методы определения параметров моделей единичного и синтетического единичного гидрографа (например Snyder, TS и SCS), разработанные в середине двадцатого века, в настоящее время заменяются методами синтетического единичного гидрографа на основе функции распределения вероятностей. По возможности следует использовать различные методы, которые не зависят друг от друга. Следует учитывать пределы применимости каждого метода. Ссылки, описывающие развитие этих методов, а также рекомендации по выбору параметров модели для различных климатических режимов (тропического, полусухого и засушливого), различных типов и характеристик водосборов и т.д., доступны в работах Амири и Мохаммади (2019); Бхунья, Панда и Гоэл (2011); Биондич, Барбалич и Петраш (2007); Чавес и др. (2017); Эвеа и др. (2018); Хейс и Янг (2005); МГП (2001); Кансал и Такур (2000); Ковач (1988); Натан, Вайнманн и Гато (1994); Рахеча и Сингх (2017); Саха (2002); Салами и др. (2009); Солиман (2010); и Уивер (2003).

### **Заиления**

Хотя процесс заиления не является компонентом общей характеристики гидрологического риска, гидроэнергетические сооружения и плотины подвергаются риску из-за процесса заиления. Процесс заиления водохранилищ снижает объем водохранилища, вызывает повреждение гидромеханического оборудования и имеет



значительные неблагоприятные последствия для низовой плотины. Заиление водохранилищ происходит во всем мире со скоростью, близкой к 1% в год, но в разных регионах скорость заиления сильно варьируется относительно этого среднего показателя (МКБП 2009).

Заиление водохранилища может повлиять на безопасность сооружения следующими способами:

- Снижение полезного объема водохранилища, приводящее к увеличению вероятности переполнения водохранилища в результате наводнений
- Снижение пропускной способности водосброса из-за потери глубины подводящего русла
- Блокирование донных водовыпусков

Проектирование плотины должно не только включать эффективные меры по управлению наносами, такие как шлюзование / промывка через донные водовыпуски, периодическая выемка наносов / дноуглубительные работы, удержание наносов в контрольных плотинах выше по течению и т. д., но и учитывать, если это возможно, способы снижения количества поступающих наносов с верховьев плотины путем борьбы с эрозией на водоразделе / водосборных площадях.

МКБП (2007) содержит руководство по моделированию и количественной оценке заиления вместе с презентацией тематических исследований. ANEEL (2000) является практическим руководством по оценке заиления водохранилищ (методы измерения, сбор и анализ данных, оценка вторичных эффектов).

Аннандейл, Моррис и Карки (2016); Эфтимии и др. (2017); Моррис, Г. (1998) и Палмиери, Шах, Аннандейл и Динар. (2003 а и b) содержат рекомендации по решению проблем, связанных с седиментацией, которые включают комплексный обзор вопросов седиментации, переноса и отложения наносов, мониторинга заиления и методов управления седиментацией.

## **Экологический сток**

Экологический или природоохранный сток — это количество воды, протекающее по реке, необходимое для поддержания реки в желаемом экологическом равновесии. В целом, определение экологического стока является частью более широкой системы оценки в рамках интегрированного управления водными ресурсами.

Важными справочными литературами, объясняющими концепцию экологических потоков и обсуждающими широкий спектр подходов к определению объема экологических потоков, начиная от предписывающих методов и заканчивая интерактивными подходами, являются Европейский союз (2015), Хорн и др. (2017), Всемирный банк (2003) и МФК (2018).

В отношении влияния эксплуатации плотины, как объем водозабора/отвода, так и экологический поток в русле должны быть определены на начальном этапе планирования. При проектировании плотины следует учитывать, что экологические попуски должны быть обеспечены на всех этапах проекта, а не только во время эксплуатации водохранилища. В период строительства и заполнения водохранилища должны быть предусмотрены соответствующие временные или постоянные сооружения для выпуска воды. Во время эксплуатации плотин следует проводить мониторинг экологического стока.

## Критерии расчетного паводка

В большинстве случаев расчетный паводок<sup>9</sup> выбирается на основе системы классификации плотины с учетом ее размеров, последствий для нижнего бьефа и т. д. Эта классификация помогает обеспечить постоянный уровень безопасности от наводнений и потенциального риска переполнения. Величина выбранного расчетного паводка может существенно различаться: от 100 или 200-летнего паводка для плотин низкого класса до 1000-летнего паводка, 10000-летнего паводка или ВМП для плотин высокого класса.

В разных странах принят широкий спектр критериев гидрологической безопасности, расположенных вдоль континуума<sup>10</sup>. Эти критерии отражают особенности страны, основанные на социально-экономических реалиях и общественных ожиданиях в отношении безопасности; технические аспекты, такие как достаточность и надежность гидрометеорологических данных; и другие проектные характеристики, такие как требования к превышению над МПУ (расстояние по вертикали между гребнем плотины и МПУ). Для стран-клиентов важно обсудить и согласовать подходящий уровень гидрологической безопасности с учетом потенциального риска или последствий, а также экономических, социальных и других условий.

Одной из наиболее важных рекомендаций в Бюллетене МКБП 82 (1992) является проверка гидрологической безопасности плотин на случай, следующих двух наводнений:

- Поверочный паводок (часто МВН) для проверки безопасности - конструкция находится на грани разрушения, но демонстрирует минимально безопасные эксплуатационные характеристики во время данного паводка.
- Расчетный паводок - представляет собой требуемый сброс паводка при нормальных условиях с запасом прочности, обеспечиваемый превышением высоты гребня над уровнем МПУ

Также рекомендуется проверить гидрологическую безопасность, учитывая, что некоторые затворы будут недоступны во время расчетного паводка. Доступ к участку, обслуживание некоторых затворов или любые другие проблемы могут повлиять на пропускную способность водосброса. Количество затворов, доступных во время расчетного паводка, будет зависеть от общего количества затворов и сценариев. Хотя все затворы могут рассматриваться как доступные во время расчетного паводка, рекомендуется убедиться, что плотина сможет справиться с более низким паводком, если некоторые затворы окажутся недоступными (МКБП 2016с).

Гидрологическая безопасность также должна быть рассмотрена на этапе строительства, включающем временные сооружения для отвода паводков. Расчетные паводки при строительстве, как правило, являются гораздо более малыми событиями, чем расчетный паводок. Максимальное Возможное Наводнение, рассчитанное на период строительства, как правило, отражает баланс между стоимостью принятия паводков и риском более крупных паводков, происходящих в этот период. Типичные значения варьируются от паводков с годовой вероятностью превышения (АЕР) от 4х10<sup>-2</sup> (25-летний паводок) до 10<sup>-2</sup> (100-летний паводок), причем последнее значение

<sup>9</sup> В Северной Америке вместо термина «design flood» используется термин «inflow design flood».

<sup>10</sup> Уишарт и др. (2020) содержит подробную информацию о различных системах классификации плотин и критериях проектирования гидрологической безопасности. МКБП 1992, 2012 и 2016 гг. содержат информацию о проектировании гидрологической безопасности и полезные примеры. В частности, информация о выборе расчетного паводка в 28 странах (МКБП 2016с) иллюстрирует существенные различия между странами с диапазоном расчетных паводков от паводков с ежегодной вероятностью превышения в диапазоне 10<sup>-3</sup> до ВМП.

используется нечасто и обычно при небольших дополнительных затратах. Особые случаи, включающие управление паводками с помощью водохранилищ выше по течению и использование бетонных перемычек, которые могут противостоять переливу, могут допускать периоды возврата короче 25 лет.

## **Воздействие изменения климата**

Об изменении климата написано много работ, в основном направленных на повышение осведомленности об этой проблеме. Большинство публикаций о влиянии изменения климата на водные ресурсы указывают на общие потенциальные последствия, но редко описывают методологию, которая может быть надежно применена для вероятностного прогнозирования будущих гидроклиматических процессов или водных потоков. Прогнозы изменения климата характеризуются высокой неопределенностью при оценке будущих средних параметров поведения, таких как средняя температура или количество осадков. Неопределенность становится высокой для прогнозов экстремальных событий, что влечет за собой ожидаемую низкую надежность результатов.

Однако отсутствие количественной, вероятностной характеристики гидрологического риска не обязательно означает, что гидрологическим риском нельзя успешно управлять. Актуальную и наиболее последнюю информацию можно найти в МГА (2019) и Рэй и Браун (2015), которые, по существу, предлагают те же рекомендации, что и приведены далее в тексте документа. В Приложении 1 к настоящей Технической записке изложены причины такого существенного сходства.

Ссылки, приведенные в конце данной Технической записки, и опыт работы Всемирного банка свидетельствуют о следующих наблюдениях:

- Результаты климатических моделей не являются предположениями или предсказаниями. Из-за наличия существенных неопределенностей на всех масштабах моделирования климата (глобальном, региональном и водораздельном), они называются «прогноznыми показателями».
- Неопределенность прогнозов обусловлена, прежде всего, (а) значительной неопределенностью значений ключевых физических параметров, (b) тем, что на местный и глобальный климат и последствия изменения климата сильно влияют непредсказуемые действия человека в течение ближайшего столетия, и (c) присущей погоде хаотической изменчивостью не только суточных, но и годовых и декадных масштабов.
- Хотя прогнозы температуры относительно надежны, прогнозы осадков, которые наиболее важны для гидрологического моделирования, гораздо менее надежны во всех временных и географических масштабах. Даже не всегда можно определить, увеличивается или уменьшается среднее количество осадков, возможны оба варианта.
- Изменения в прогнозах осадков (МГЭИК 2014) не будут равномерными. Согласно сценарию с очень высокими выбросами парниковых газов, в высоких широтах, во многих влажных регионах средних широт и в экваториальной части Тихого океана, вероятно, произойдет увеличение среднегодового количества осадков. Во многих сухих регионах средних широт и субтропиков среднее количество осадков, скорее всего, уменьшится. Интенсивные осадки над большей частью среднеширотных массивов суши и над влажными тропическими регионами, вероятно, станут более интенсивными и частыми.

- Все климатические модели показывают продолжающееся потепление температуры приземного воздуха в будущем. Однако в отношении осадков, которые демонстрируют гораздо большие колебания в пространстве и во времени, между климатическими моделями существует меньше согласия. Хотя интенсификация осадков наблюдается во многих регионах мира (Фишер 2016; Прейн и др. 2016), во многих случаях модели не согласны с тем, станет ли то или иное место более сухим или более влажным (Сиппель и др. 2017). Уменьшенные климатические модели пока имеют ограниченное практическое применение для планирования, за исключением, возможно, случаев очень масштабных проектов в области водных ресурсов и гидроэнергетики.
- Для временных горизонтов 30 лет и менее внутренняя изменчивость климата является основным источником неопределенности в отношении осадков, а относительная неопределенность выше для небольших географических районов и для сезонных и годовых значений.

МКБП (2016с) подтверждает эти наблюдения, заявляя, что «прогнозируемое воздействие изменения климата на водные ресурсы, наводнения и засухи является неопределенным, и не может предоставить точную информацию о скорости будущих изменений для лиц, принимающих решения, но оно может предложить очень полезную общую информацию, и может служить в качестве предварительной и первоначальной оценки». Хотя достоверная оценка неопределенности в отношении количественной характеристики воздействия на речной сток будущих экстремальных климатических явлений в настоящее время недоступна, информация, полученная в результате уменьшения масштаба результатов глобальных климатических моделей, может стать основой для анализа чувствительности. МакСвини и Джонс (2016) приводят общие рекомендации по проведению такого анализа чувствительности. Результаты анализа впоследствии могут быть использованы в качестве ценного вклада в адаптивное управление речными системами и водохранилищами.

Во всем мире уже было предпринято множество попыток оценить влияние меняющегося климата на водные ресурсы. Предпочтительная методология основана на ансамблевом подходе, что поддерживается в работе Кундзевича и др. (2018). В публикации делается следующий вывод: «поскольку основанные на моделях прогнозы влияния климата на водные ресурсы могут в значительной степени различаться, необходимо разработать процедуры адаптации, которые не нуждаются в четких, количественных, прогнозах изменений гидрологических переменных, таких как речной сток, уровень озера, влажность почвы и т. д., а скорее на прогнозируемых диапазонах значений». Адаптивное планирование должно основываться на ансамблевых и многомодельных вероятностных подходах, а не на конкретном сценарии и прогнозе будущего по одному значению. В данном подходе используются прогнозы будущего климата, указывающие на ряд потенциальных изменений температуры и осадков, основанные на результатах серии прогонов глобальных климатических моделей из набора данных мультимодельного проекта Всемирной Программы Исследования Климата «Coupled Model Intercomparison Project Phase 5» (CMIP5), которые легли в основу Пятого Оценочного Доклада (ОД5) МГЭИК, наряду с методами регионального масштабирования. Репрезентативные сценарии, построенные на основе выбранного числа прогнозов, могут быть отобраны для представления различных комбинаций потенциальных изменений температуры и осадков при будущих климатических прогнозах.

Следует отметить, что данный метод:

- Требуется значительных вычислительных усилий и может быть непрактичным для небольших проектов. Альтернативные, менее затратные, но достаточно надежные подходы отсутствуют.

- Определяет только показатели чувствительности (диапазон возможных будущих значений) и не способен определить их вероятность.

Учитывая высокую неопределенность комбинированных климатических и гидрологических моделей (Хаттерманн и др. 2018), пока модели не будут усовершенствованы сверх существующих ограничений, наиболее перспективным путем вперед является включение адаптивного управления речной системой, особенно при планировании новых проектов. Показатели чувствительности, разработанные с помощью ансамблевого моделирования, могут стать достаточным руководством для адаптивного и устойчивого проектирования и адаптивного управления системой плотин для смягчения потенциальных последствий изменения климата. Адаптивное управление предполагает регулярный мониторинг, оценки и обзоры с возможным пересмотром программы управления по мере необходимости. Самое главное, адаптивное управление должно основываться на надежном наборе показателей.

Несмотря на то, что это не является темой данной Технической записки, растущее понимание возможного присутствия гидрологической нестационарности (при почти полной уверенности в том, что нестационарность возникнет в течение срока службы речных систем с плотинами) приводит к разработке новых подходов к принятию решений в условиях неопределенности (Браун и др. 2011) и управлению гидрологическим риском.

## **Управление гидрологическим риском и повышение устойчивости к внешним воздействиям**

Когда речь идет о гидрологическом риске, непосредственной связью является оценка пропускной способности водосброса и водовыпускных сооружений плотины. Другим постоянно обсуждаемым вопросом является выбор соответствующего уровня паводка. Такой выбор, который де-факто является выбором необходимого уровня безопасности, имеет политические, экономические и социальные последствия и зависит от многих факторов и местных условий.

Поэтому нельзя ожидать, что общее правило для обеспечения соответствующей безопасности будет достигнуто только путем принятия очень высоких уровней паводка (например, МВН). Из-за стохастической природы наводнений применение норм проектирования является необходимым, но недостаточным условием для управления гидрологическими рисками. Рекомендуется расширить оценку, включив в нее такие темы, как:

- Гидрологические данные и информация, полученные в процессе эксплуатации, для дополнения информации, которые использовались на стадии проектирования
- Изменение социальных и гидравлических условий выше и ниже по течению от плотины с течением времени
- Информированность и подготовка компетентных органов и сообществ к реагированию на чрезвычайные ситуации
- Развитие национальных нормативных актов и руководств
- Устойчивость плотины и сопутствующих сооружений к экстремальным гидрологическим явлениям.

В таблице 5 анализируются отдельные темы, которые имеют актуальное и повторяющееся применение в работе Всемирного банка. Все они относятся к теме гидрологического риска и устойчивости инфраструктуры.

В следующих параграфах представлена более подробная информация об управлении гидрологическими рисками с точки зрения: (а) адаптивного и устойчивого проектирования плотин, (b) адаптивного управления системой плотин, (с) адаптивной эксплуатации плотин и (d) повышения устойчивости сообщества. Гидрологический риск может быть снижен и управляем путем внедрения принципов адаптивного и устойчивого проектирования и принципов адаптивного управления (Сайерс и др. 2012).

### Адаптивное и устойчивое проектирование плотин

Стандартное планирование и проектирование для обеспечения гидрологической безопасности должно учитывать и включать:

- Когда неопределенность в гидрологии наводнений высока, при выборе типа плотины предпочтение следует отдавать типам устойчивым к переливу
- Проектирование плотины и водосброса достаточной величины для предотвращения перелива плотина во время паводка («расчетный паводок» и «поверочный паводок») или расчетный паводок, определенный по результатам комплексной оценки риска
- Проектирование плотины и вспомогательных сооружений, обеспечивающее возможность переполнения сооружения без разрушения и серьезных повреждений
- Проектирование плотины и вспомогательных сооружений, обеспечивающее (а) постепенное разрушение сооружения в результате перелива воды позволяя полностью реализовать систему управления в чрезвычайных ситуациях, и (b) разрушение плотины в результате перелива воды в местах, где его можно своевременно и наиболее экономично устранить
- Определение нормального и максимального превышения уровня воды над МПУ
- Соответственный выбор типов рабочих водосбросов/выпускных затворов, введение резервирования, когда неопределенность в гидрологии наводнений слишком высока<sup>11</sup>
- Рассмотрение внедрения вспомогательных и аварийных водосбросов
- При необходимости рассмотрение опрокидывающихся пробок и затворов/шандорных затворов в качестве средств дополнительного водосброса
- Рассмотрение необходимости водопропускного отводящего канала для безопасного пропуск паводка вокруг плотины
- Рассмотрение целесообразности внедрения средств для предотвращения засорения водосбросов
- Рассмотрение целесообразности и эффективности затрат на увеличение высоты плотины
- Рассмотрение целесообразности, и экономической эффективности добавления рабочих отсеков для водосброса
- Внедрение соответствующих средств прогнозирования наводнений (оборудование и компьютерные модели)
- Системы оповещения для территории нижнего бьефа

---

<sup>11</sup> Информация о последних достижениях в области проектирования водосбросов содержится в МКБП (2016d).

**ТАБЛИЦА 5. Гидрологический риск и меры по повышению устойчивости к внешним воздействиям**

Тема	Примечания	Действия
Обновление гидрологической базы данных	<p>Гидрологические данные, собираются во время эксплуатации плотины/водохранилища, включая количество осадков и снежного покрова, притока в водохранилище, заиление водохранилища и качество воды.</p> <p>В рамках адаптивного управления, база данных, используемая на этапе проектирования, должна периодически обновляться с учетом информации, полученной в процессе эксплуатации. Эксплуатационные процедуры следует пересматривать по мере необходимости не реже одного раза в 10 лет.</p>	Включить положения об обновлении гидрологических данных и адаптивном управлении в ПЭИТО
Адаптивное управление плотинными системами	Необходимо внедрять передовые системы мониторинга гидрометеорологических параметров и прогнозирования наводнений для заблаговременного снижения уровня водохранилищ с целью увеличения противонаводковых объемов и обеспечения безопасности плотины во время наступления пикового паводка. Часто в преддверии крупных наводнений могут возникнуть случаи, когда придется сбрасывать большие объемы воды. Необходимо обеспечить надлежащее оповещение и обучение для работы плотин и сброса воды в исключительных ситуациях, особенно для густонаселенных районов.	Включение процедур по эксплуатации, управлению плотин, по прогнозированию наводнений, режимов пуска воды и системы оповещения для территории нижнего бьефа в ПЭИТО и в ПАГ.
Устойчивое проектирование инфраструктуры	<p>Многие регионы мира испытывают значительную нагрузку на водные ресурсы, и глобальное потепление может усилить эту нагрузку. Несмотря на то, что многие элементы, учитываемые при проектировании и эксплуатации, характерны для каждого проекта плотин, три ключевых элемента встречаются чаще остальных: (1) доступность воды, (2) экстремальные гидрологические явления (наводнения и засухи) и (3) сезонная и межгодовая изменчивость стока. Помимо использования адаптивного управления в условиях неопределенности, правильное проектирование требует принятия мер, повышающих устойчивость инфраструктуры. Устойчивость системы определяет быстроту восстановления системы от кризисной ситуации. В Рекомендации по Применению Передовой Практики (РППП) перечислены некоторые меры по повышению устойчивости инфраструктуры. Следует рассмотреть как структурные, так и неструктурные меры, а также желаемое время их реализации в течение жизненного цикла проекта, включая:</p> <p>(а) выбор правильного типа водосбросов / водовыпусков, эксплуатационной системы, установка опрокидывающихся пробок и затворов, выбор устойчивых к разрушению при переполнении типов плотин и т. д. (структурные меры) и (b) оптимальная эксплуатация водохранилища, раннее оповещение, планы аварийной готовности и т. д. (неструктурные меры). Не следует делать выбор в пользу только структурных или только неструктурных решений. В действительности оптимальные решения непременно включают в себя рациональное сочетание структурных и неструктурных решений.</p>	Рассмотрение вариантов повышения устойчивости инфраструктуры на протяжении всего жизненного цикла плотины, как представлено в РППП.

**ТАБЛИЦА 5. Гидрологический риск и меры по повышению устойчивости к внешним воздействиям**

Тема	Примечания	Действия
Устойчивое управление процессами заиления	<p>Заиление может иметь следующие негативные последствия для безопасности плотин:</p> <p>Заиление водохранилища и уменьшение полезного объема</p> <p>Уменьшение пропускной способности водосбросных/водовыпускных сооружений и снижение потенциала регулирования паводков</p> <p>Серьезные повреждения поверхностных водосбросов, если процесс будет развиваться без контроля и не будут реализованы долгосрочные меры по регулированию отложений</p> <p>Во время разработки проекта необходимо провести надлежащее исследование потенциального заиления, включающую сбор и анализ данных, на основе которых должен быть подготовлен и включен в проект комплексный план управления наносами. При необходимости в плане должны быть учтены дноуглубительные работы, промывка через донные водовыпуски, наносорегулирующие дамбы, мероприятия по консервации водосборных бассейнов и т. д. Для долгосрочной устойчивости важно принять концепцию, охватывающую весь жизненный цикл водохранилища, не заикливаясь на традиционном анализе эффективности затрат или ограничиваясь только увеличением мертвого объема водохранилища.</p>	<p>Проведение надлежащего исследования потенциального заиления, подготовка и внедрение в проект комплексного плана управления наносами. Применение подхода, основанного на жизненном цикле, для повышения устойчивости эксплуатации водохранилища</p>

*Источник:* авторская таблица составленная для данной публикации

*Примечание:* ПАГ - План Аварийной Готовности; ПЭиТО - План Эксплуатации и Технического Обслуживания

*Всемирный банк разработал концепцию RESCON (Reservoir Conservation), изменившую экономический анализ водохранилищ с использованием концепции, охватывающую весь жизненный цикл взамен практики «мертвого объема» (Пальмиери и др. 2003 а). В последующих отчетах Всемирного банка (Аннандейл и др. 2016) и (Эфтимии и др. 2017) была усовершенствована математическая модель, лежащая в основе концепции жизненного цикла, и добавлен 20-летний опыт применения метода RESCON во всем мире. МКБП (2007) и ANEEL (2000) также предоставляют полезное руководство по оценке и управлению седиментацией.*



Помимо этих аспектов, новые принципы адаптивного проектирования включают:

- Устойчивое к широкому спектру угроз (включая угрозы, непредусмотренные в процессе проектирования) проектирование
- Проектирование, обеспечивающее рассмотрение и реализацию в процессе планирования и проектирования решений, предусматривающих, при необходимости, будущие изменения в течение жизненного цикла проекта. Эти положения должны обеспечивать наиболее экономически эффективную реализацию модификаций в течение всего жизненного цикла плотины.
- Функционирование устойчивой конструкции, не разрушающейся катастрофически при воздействии условий, превышающих проектные уровни.
- Проектирование критически важных компонентов (запорной арматуры, затворов и т. д.) для обеспечения максимальной эксплуатационной надежности

МКБП (2012) более подробно рассматривает этот вопрос и дает рекомендации по внедрению этих принципов.

### **Адаптивное управление системой водохранилищ**

Конкретные принципы адаптивного управления речной системой включают:

- Разработку эффективной и точной системы прогнозирования притока (как инструмента, поддерживающего принятие эффективных решений по эксплуатации и управлению паводками) включающую (а) четкое определение цели системы прогнозирования; (b) спецификацию моделируемых компонентов; (c) рассмотрение необходимых и доступных данных (сбор гидрометеорологических данных в режиме реального времени, спутниковые снимки, данные с плотин и манометров речного стока выше по течению и т. д.) и разработку протокола обмена данными; (d) выбор характеристик и структуры модели; (e) выбор критериев эффективности; (f) тестирование и валидацию модели; и (g) количественную оценку неопределенности
- Эксплуатация системы прогнозирования: координация с гидрометеорологическими и другими компетентными агентствами; и периодический пересмотр механизма и протокола обмена данными
- Оптимизация стратегии работы речной системы с учетом скоординированных, общесистемных предварительных сработок (т. е. сработка уровня водохранилища в предпаводковый период), которые могут способствовать улучшению управления экстремальными паводками. Предварительная сработка в данном контексте — это стратегический сброс аккумулированной воды для проактивного снижения уровня воды в водохранилищах до выпадения осадков и увеличения притока на основе информации гидрометцентра и прогноза наводнений. Сроки и объем предварительной сработки могут быть определены путем проведения симуляций наряду с информацией о гидрометеорологическом мониторинге и прогнозировании.

Предварительная сработка и форсировка должна осуществляться в соответствии с принятой стратегией, разработанной в координации со всеми политически (в случае трансграничных речных систем) и институционально заинтересованными сторонами. Процесс внедрения предварительной сработки и форсировки в процесс принятия оперативных решений должен быть определен и обоснован в руководстве по эксплуатации и техническому обслуживанию или отдельном руководстве по эксплуатации в паводковый период.

## Адаптивная эксплуатация водохранилищ

Конкретные принципы адаптивной эксплуатации водохранилищ включают:

- Изменение правил эксплуатации для форсировки водохранилища в течение ограниченного времени
- Временное или постоянное понижение НПУ водохранилища для увеличения доступного объема для сдерживания паводков

Уранос (2015) подробно описывает преимущества и недостатки действий, реализующих принципы, изложенные ранее.

## Повышение устойчивости сообщества нижнего бьефа водохранилища

Несмотря на все усилия по снижению и контролю гидрологического риска, могут сохраняться остаточные риски различной величины. Эффективным способом управления этими рисками является создание эффективной программы управления чрезвычайными ситуациями, основанной на трех столпах: готовность, реагирование и восстановление. Некоторые руководства, такие как Технический бюллетень: Управление чрезвычайными ситуациями для обеспечения безопасности плотин [Emergency Management for Dam Safety] (CDA 2018) и Федеральное руководство по безопасности плотин: Планирование действий в чрезвычайных ситуациях для плотин [Federal Guidelines for Dam Safety: Emergency Action Planning for Dams] (FEMA 2013), могут служить ценными справочными документами, содержащими подробную информацию, необходимую для разработки Планов Аварийной Готовности (ПАГ).

Обеспечение общественной безопасности также стало важной темой, поскольку было зафиксировано несколько случаев наводнений и жертв в территориях, расположенных ниже плотин, в результате отказа или неправильного обращения с затворами водосбросов и водовыпускными сооружениями без надлежащей процедуры сброса воды и предупреждения. Некоторые документы, такие как «Руководство по обеспечению общественной безопасности в районе плотин» [Guidelines for Public Safety Around Dams] (CDA 2011), являются полезной справочной литературой<sup>12</sup>.

## Внедрение подхода по управлению рисками

Правильно проведенная оценка риска является важнейшим инструментом в оценке безопасности плотины. Она дает владельцам плотины, инженерам-конструкторам и операторам лучшее понимание риска наводнений на конкретном объекте. Информация о риске позволяет лучше выявить потенциальные недостатки и определить приоритетность мер по снижению риска.

В последние десятилетия развитие официального анализа риска гидрологических угроз, влияющих на безопасность плотин, привело к разработке методов и технологий, позволяющих комплексно рассматривать гидрологический риск. Эти разработки признают, что отказы плотин при переливе воды не всегда вызываются экстремальными

---

<sup>12</sup> Уишарт и др. (2020) приводят краткое описание глобальных тенденций в области нормативных актов и руководящих принципов ПАГ/ПДАС в главе 7: Готовность к чрезвычайным ситуациям и общественная безопасность [Emergency Preparedness and Public Safety].

паводками, превышающими проектную пропускную способность, но часто являются следствием отказов оборудования, а человеческие ошибки при планировании и осуществлении эксплуатации также могут привести к переливу воды вовремя более частых и незначительных событий<sup>13</sup>. Подобный метод комплексной оценки рисков более подробно рассматривается в основном РППП по Безопасности Плотиин.

---

13 Компания Ontario Power Generation провела детальную количественную оценку рисков для двух регулирующих плотин и пяти электрогенерирующих станций. Динамическое моделирование системы речного потока было выполнено с использованием стохастических моделей паводков и детального моделирования работы затворов и турбин. Несмотря на то, что согласно стандарту проектирования для расчетных паводков притока необходимо использовать МВН, исследование показало, что режим разрушения при переливе не является доминирующим режимом разрушения плотины, а скорее является вполне приемлемым риском. Более значительные риски связаны с возможностью суффозии или неустойчивости берегов конструкций и бетонных элементов в результате сдвига (Источник: Системный подход и моделирование в оценке риска плотин [System approach and simulation in risk assessment of dams] (Зелинский и др. (2017))).

# Справочная литература

- ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica or Brazilian Electricity Regulatory Agency). 2000. Reservoir Sedimentation Assessment Guideline. Brasilia. Brazil.
- Annandale, G. W., G. L. Morris, and P. Karki. 2016. Extending the Life of Reservoirs: Sustainable Sediment Management for Dams and Run-of-River Hydropower. Directions in Development. Washington, DC: World Bank. doi: 10.1596/978-1-4648-0838-. License: Creative Commons Attribution CC BY 3.0 IGO.
- ASCE (American Society of Civil Engineering). 1996. Handbook of Hydrology. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice (28). New York: American Society of Civil Engineers.
- Brown, C., W. Werick, W. Leger, and D. Fay. 2011. "Decision-Analytic Approach to Managing Climate Risks: Application to the Upper Great Lakes," Journal of the American Water Resources Association 47 (3).
- CDA (Canadian Dam Association). 2018. Technical Bulletin: Emergency Management for Dam Safety. Toronto. Ontario: CDA.
- . 2011. Guideline for Public Safety Around Dams. Toronto. Ontario: CDA.
- Chow, V. T. 1959. Open-Channel Hydraulics. New York: McGraw-Hill.
- EU (European Union) 2015. Ecological Flows in the Implementation of the Water Framework Directive. Technical Report 2015 (086). European Commission Guidance Document No. 31. Luxembourg: EU.
- FEMA (US Federal Emergency Management Agency). 2013. Federal Guidelines for Dam Safety - Emergency Action Planning for Dams. Washington, DC: FEMA.
- Garcia, L. 2016. Earth Observation for Water Resource Managements: Current Use and Future Opportunities for the Water Resources Management. Washington, DC: World Bank. <https://elibrary.worldbank.org/doi/pdf/10.1596/978-1-4648-0475-5>.
- Hartford, D. N. D., G. B. Baecher, P. A. Zielinski, R. C. Patev, R. Ascila, and K. Rytters. 2016. Operational Safety of Dams and Reservoirs. London: ICE Publishing.
- Hayes, Donald C. and Young, Richard L. Young. 2005. "Comparison of Peak Discharge and Runoff Characteristic Estimates from the Rational Method to Field Observations for Small Basins in Central Virginia". U.S. Geological Survey, Reston, VA.
- ICOLD (International Commission on Large Dams). 1992. Bulletin 82: Selection of Design Flood. Paris: ICOLD/CIGB.
- . 2007. Bulletin 140: Mathematical Modelling of Sediment Transport and Deposition in Reservoirs: Guidelines and Case Studies. Paris: ICOLD/CIGB.
- . 2009. Bulletin 147: Sedimentation and Sustainable Use of Reservoirs and River Systems. Paris: ICOLD/CIGB.
- . 2012. Bulletin 142: Safe Passage of Extreme Floods. Paris: ICOLD/CIGB. ———. 2014. Bulletin 156: Integrated Flood Risk Management. Paris: ICOLD/CIGB.
- . 2016a. Bulletin 157 Small Dams: Design, Surveillance and Rehabilitation. Paris: ICOLD/CIGB.
- . 2016b. Draft Bulletin 169: Global Climate Change, Dams, Reservoirs and Related Water Resources. Paris: ICOLD/CIGB.
- . 2016c. Bulletin 170 Preprint: Flood Evaluation and Dam Safety. Paris: ICOLD/CIGB.
- . 2016d. Bulletin 172 Preprint: Technical Advancements in Spillway Design: Progress and Innovations from 1985 to 2015. Paris: ICOLD/CIGB.
- . 2018. Bulletin 176 Preprint: Blockage of Spillways and Outlet Works. Paris: ICOLD/CIGB.
- IFC (International Finance Corporation). 2018. Good Practice Handbook: Environmental Flows for Hydropower Projects. Guidance for the Private Sector in Emerging Markets. Washington, DC: World Bank Group. IHA (International Hydropower Association). 2019. Hydropower Sector Climate Resilience Guide. London: IHA.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by R. K. Pachauri and Meyer, L. A. Geneva, Switzerland: IPCC.
- Kundzewicz, Z.W. 2018. "Assessment of climate change and associated impact on selected sectors in Poland". Research Article Atmospheric and Space Sciences. Acta Geophys. 66, 1509–1523. <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0220-4>.
- Maidment, D. R. 1993. Handbook of Hydrology. New York: McGraw-Hill.
- Mondal, A., and D. Denzil. 2018. "Return Levels under Nonstationarity: The Need to Update Infrastructure Design Strategies," Journal of Hydrologic Engineering 24(1).
- Morris, G.L. and Fan, J. (1998). Reservoir Sedimentation Handbook – Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use.

Palmieri, A., F. Shah, G. W. Annandale, and A. Dinar. 2003a. "Reservoir Conservation Volume I: The RESCON Approach," Economic and Engineering Evaluation of Alternative Strategies for Managing Sedimentation in Storage Reservoirs. Washington, DC: World Bank.

———. 2003b. "Reservoir Conservation Volume II: RESCON Model and User Manual," Economic and Engineering Evaluation of Alternative Strategies for Managing Sedimentation in Storage Reservoirs. Washington, DC: World Bank.

Ray, P. A., and C. M. Brown. 2015. *Confronting Climate Uncertainty in Water Resources Planning and Project Design: The Decision Tree Framework*. Washington, DC: World Bank.

Sayers, P. B., Galloway, G., and Hall, J. 2012. "Chapter 11: Robust Decision Making under Uncertainty: Towards Adaptive and Resilient Flood Risk Management," Flood Risk. London: ICE Publishing. ISBN: 978-0-7277-4156-1.

Singh, V. P. (ed.). 1995. *Computer Models of Watershed Hydrology*. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications.

Singh, V. P., and D. Frevert. (eds.). 2002a. *Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications*. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications.

———. 2002b. *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publications.

Sitterson, J., Chris Knightes, R. Parmar, K. Wolfe, M. Mucic, and B. Avant. 2017. "An Overview of Rainfall-Runoff Model Types," U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC.

Soliman, M. M. 2010. *Engineering Hydrology of Arid and Semi-Arid Regions*. Boca Raton, Florida: CRC Press.

Volpi, E. 2018. "On Return Period and Probability of Failure in Hydrology," Wiley Wires Water. DOI: 10.1002/wat2.1340.

WB (World Bank). 2003. *Water Resources and Environment Technical Note C.1 - Environmental Flows: Concepts and Methods*. Washington, DC: World Bank.

———. 2017. *Hydropower Sector Climate Resilience Guidelines*. Washington, DC: World Bank (2020). Good Practice Note for Water Use (Working Draft)

WMO (World Meteorological Organization). 2008. *Guide to Hydrological Practices, Volume I Hydrology: From Measurement to Hydrological Information*, Geneva, Switzerland: WMO-No. 168, Sixth edition.

———. 2009a. *Guide to Hydrological Practices, Volume II: Management of Water Resources and Application of Hydrology Practices*, Geneva, Switzerland: WMO-No. 168, Sixth edition.

———. 2009b. *Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation*. Geneva, Switzerland: WMO-TD No. 1500.

Zielinski, A. et al. (2017). "System Approach and Simulation in Risk Assessment of Dams. ICOLD Annual Meeting. Prague. Czech.

## Дополнительные источники

Amiry, M. D., and A. A. Mohammadi. 2019. "Regional Model for Peak Discharge Estimation in Ungauged Drainage Basin Using GIUH, Snyder, SCS and Triangular Models," *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering* 4(4).

Bhunya, P. K., S. N. Panda, and M. K. Goel. 2011. "Synthetic Unit Hydrograph Methods: A Critical Review," *The Open Hydrology Journal* (5).

Biondić, D., D. Barbačić, and J. Petraš. 2007. *Creager and Francou-Rodier Envelope Curves for Extreme Floods in the Danube River Basin in Croatia*. Wallingford, United Kingdom: International Association of Hydrological Sciences (309).

Chaves, L. G., T. M. C. Studart, J. N. B. Campos, and F. A. S. Filho. 2017. "Regional Envelope Curves for the State of Ceará: A Tool for Verification of Hydrological Dam Safety," *Brazilian Journal of Water Resources* 22(29).

CSAS (Canadian Science Advisory Secretariat). 2012. *Review of Approaches and Methods to Assess Environmental Flows across Canada and Internationally*. CSAS Research Document 2012/39.

Edsel, B. D., J. V. Camp, E. J. LeBoeuf, J. R. Penrod, J. P. Dobbins, and M. D. Abkowitz. 2011. "Watershed Modelling and Its Applications: A State-of-the-Art Review," *The Open Hydrology Journal* (5).

Efthymiou, N. P., S. Palt, G. W. Annandale, and P. Karki. 2017. *Rescon 2 User Manual: Reservoir Conservation Model ResCon 2 Beta*. Washington, DC: World Bank.

Ewea, H. A., N. S. Al-Amri, M. A. Dawoud, and A. M. Elfeki. 2018. "Developing Models and Envelope Curves for Extreme Floods in the Saudi Arabia Arid Environment," *Natural Hazards* (August).

Fischer, E. M., and R. Knutti. 2016. "Observed Heavy Precipitation Increase Confirms Theory and Early Models," *Nature Climate Change* (6).

- Hattermann, F. F., T. Vetter, L. Breuer, B. Su, P. Daggupati, C. Donnelly, B. Fekete, F. Flörke, S. N. Gosling, P. Hoffmann, S. Liersch, Y. Masaki, Y. Motovilov, C. Müller, L. Samaniego, T. Stacke, Y. Wada, T. Yang, and V. Krysaova. 2018. "Sources of Uncertainty in Hydrological Climate Impact Assessment: A Cross-Scale Study," *Environmental Research Letters*.
- Hersch, R. 2003. "World Catalogue of Maximum Observed Floods," International Association of Hydrological Sciences. IAHS Publication 284.
- Horne, A., Webb, A., Stewardson, M., Richter, B., Acreman, M. 2017. *Water for the Environment: From Policy and Science to Implementation and Management*. Cambridge, MA: Academic Press.
- Hosking, J. R. M., and J. R. Wallis. 1997. *Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments*. New York: Cambridge University Press.
- IHP (International Hydrological Programme). 2001. *Urban Drainage in Specific Climates, Vol. III: Urban Drainage in Arid and Semi-Arid Climates*. Paris: UNESCO IHP.
- Kansal, M. L. T., and A. Thakur. 2000. "Flood Estimation for a Cloudburst Event in an Ungauged Western Himalayan Catchment," *International Journal of Hydrology* 1(6).
- Koutsoyiannis, D. 1999. "A Probabilistic View of Hershfield's Method for Estimating Probable Maximum Precipitation," *Water Resources Research* 35(4).
- Kovacs, Z. 1988. "Regional Maximum Flood Peaks in Southern Africa." Technical Report TR 137. Pretoria. Department of Water Affairs, South Africa.
- Kumar, R., and C. Chandranath. 2005. "Regional Flood Frequency Analysis Using L-Moments for North Brahmaputra Region of India," *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE* (January/February).
- McSweeney, C. F., and R. G. Jones. 2016. "How Representative Is the Spread of Climate Projections from the 5 CMIP5 GCMs used in ISI-MIP?" *Climate Services* (1).
- Nathan R. J., P. E. Weinmann, and S. Gato. 1994. *A Quick Method for Estimation of the Probable Maximum Flood in South-East Australia*. Adelaide: Proceedings of the International Water Resources Symposium: Water Down Under.
- Ouranos. 2015. *Probable Maximum Floods and Dam Safety in the 21st Century Climate*. Report submitted to Ottawa: Climate Change Impacts and Adaptation Division, Natural Resources Canada
- Papalexiou, S. S., and D. Koutsoyiannis. 2006. "A Probabilistic Approach to the Concept of Probable Maximum Precipitation," *Advances in Geosciences, European Geosciences Union* (7).
- Prein, A. F., R. M. Rasmussen, K. Ikeda, C. Changhai Liu, M. P. Clark, and G. J. Holland. 2016. "The Future Intensification of Hourly Precipitation Extremes," *Nature Climate Change* (December).
- Public Safety Canada. 2010. *Emergency Management Planning Guide (2010-2011)*. Ottawa, Ontario: Department of Public Safety and Emergency Preparedness. Government of Canada.
- Rakhecha, P. R., and V. P. Singh. 2017. "Enveloping Curves for the Highest Floods of River Basins in India," *International Journal of Hydrology* 1(3).
- Rodier, J. A., and M. Roche. 1984. "World Catalogue of Maximum Observed Floods," International Association of Hydrological Sciences 143.
- Saha, A. 2002. *Quick Estimation of Peak Discharge of North Bengal Catchments*. Kolkata: Proceedings at the International Conference on Water Related Disaster (ICWRD 2002).
- Salami, A. W., S. O. Bilewu, A. M. Ayanshola, and S. F. Oritola. 2009. "Evaluation of Synthetic Unit Hydrograph Methods for the Development of Design Storm Hydrographs for Rivers in South-West Nigeria," *Journal of American Science* 5(4).
- Singh, V. P. 2004. "Flow Routing in Open Channels: Some Recent Advances." Naples: Proceedings at the 2nd International Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow 2004).
- Singh, A., V. P. Singh, and A. R. Byrd. 2018. "Computation of Probable Maximum Precipitation and Its Uncertainty," *International Journal of Hydrology* 2(4).
- Sippel, S., J. Zscheischler, M. Heimann, H. Lange, M. D. Mahecha, G. J. van Oldenborgh, F. E. L. Otto, and M. Markus Reichstein. 2017. "Have Precipitation Extremes and Annual Totals Been Increasing in the World's Dry Regions over the Last 60 Years?" *Hydrology and Earth System Sciences* (21).
- Thompson, D. B. 2006. "The Rational Method." Report prepared at the Civil Engineering Department, Texas Tech University.
- Todini, E. 2007. "Hydrological Catchment Modelling: Past, Present and Future," *Hydrological Earth System Sciences* 11(1).
- Weaver, J. C. 2003. *Methods for Estimating Peak Discharges and Unit Hydrographs for Streams in the City of Charlotte and Mecklenburg County, North Carolina*. US Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 03-4108.
- Weinman, P. E., and E. M. Laurenson. 1979. "Approximate Flood Routing Methods: A Review." *ASCE Journal of the Hydraulics Division* 105 (HY12).
- Wishart, Marcus J., Satoru Ueda, John D. Pisaniello, Joanne L. Tingey-Holyoak, Kimberly N. Lyon, and Esteban Boj Garcia. 2020. *Laying the Foundations: A Global Analysis of Regulatory Frameworks for the Safety of Dams and Downstream Communities*. Sustainable Infrastructure Series. Washington, DC: World Bank.

## Приложение 1: Площадь водосбора и Максимальное Возможное Наводнение некоторых больших плотин

В таблице А1 указаны МВН и площадь водосбора некоторых крупных плотин. Несмотря на отсутствие конкретной корреляции между МВН и площадью водосбора в различных климатических регионах, таблица может дать определенные идеи для перекрестной проверки объема чрезвычайно крупных наводнений.

**ТАБЛИЦА А1. МВН и площадь водосбора некоторых больших плотин**

Страна	Плотина	Площадь водосбора [км <sup>2</sup> ]	МВН [м <sup>3</sup> /с]	Соотношение МВН/площадь водосбора [м <sup>3</sup> /с/км <sup>2</sup> ]
Китай	Three Gorges	1,005,501	102,500	0.1
США	Glen Canyon	173,772	19,737	0.1
Лаосская НДР	Xayaburi	272,000	47,500	0.2
Канада	Little Long	36,468	13,260	0.4
Канада	Bark Lake	2,690	1,410	0.5
Пакистан	Chakwal	4,044	3,790	0.9
Индонезия	Wonogiri	1,350	1,270	0.9
Индия	Sardar Sarovar	88,000	87,000	1.0
Пакистан	Talagangh	5,700	5,880	1.0
США	Folsom	4,823	6,700	1.4
Лаосская НДР	Nam Ngum	5,640	9,000	1.6
Чили	Puclaro	6,582	12,000	1.8
Китай	Yunfeng	17,572	36,800	2.1
Таиланд	Mae Sruai	434	990	2.3
Индия	Kol	3,595	10,000	2.8
США	286 mile	2,563	13,671	5.3
Малайзия	Sultan Mahmud	2,600	18,890	7.3
Китай	Banqiao	768	14,400	18.8
Малайзия	Sultan Abu Bakar	183	4,260	23.2
Индонезия	Logung	44	1,031	23.4

*Источник:* авторская таблица составленная для данной публикации

*Примечание:* км<sup>2</sup> - квадратный километр; м<sup>3</sup> - кубический метр; МВН - Максимальное Возможное Наводнение; с - секунда

## Приложение 2: Обзор актуальных исследований Всемирного банка

### Рассматриваемые документы

Рэй, П. А. и К. М. Браун. 2015. *Противодействие климатической неопределенности при планировании водных ресурсов и разработке проектов. Дерево принятия решений [Confronting Climate Uncertainty in Water Resources Planning and Project Design. The Decision Tree Framework]*. Вашингтон, округ Колумбия: Всемирный банк.

Международная Гидроэнергетическая Ассоциация. 2019. *Руководство по обеспечению климатической устойчивости гидроэнергетического сектора [Hydropower Sector Climate Resilience Guide]*. Лондон: МГА.

Важность первого документа заключается в ясной характеристике существующих ограничений современного климатического моделирования и очень подробном описании того, что можно и чего нельзя делать из результатов моделирования. В исследовании проводится различие между оценкой риска, понимаемой как анализ и оценка риска, и управлением риском, которое касается способов снижения и контроля риска. Это важное различие, поскольку недостатки климатического моделирования влияют на эти два вида деятельности по-разному и не в одинаковой степени. Существующие ограничения непосредственно влияют только на оценку риска. Этими основными ограничениями являются:

- Неопределенность в отношении общих результатов, полученных с помощью моделей общей циркуляции (МОЦ), не только неизвестна, но и неустранима из-за все еще во многом несовершенных знаний о поведении физических процессов, контролирующих климат и погоду.
- Результаты МОЦ дают еще меньше информации об этих аспектах будущего климата, что наиболее важно для управления водными ресурсами в целом и для управления безопасностью плотин в частности. Это касается времени и масштабов экстремальных явлений, приводящих к необычно большой интенсивности и количеству осадков, а также повышенной пространственной и временной изменчивости климатических данных для гидрологических моделей, и это лишь некоторые из них.
- Неспособность современной климатической науки и практики дать количественную характеристику неопределенности в вероятностных терминах.

С точки зрения гидрологического риска, неспособность климатических прогнозов обеспечить вероятностное представление неопределенности ограничивает их использование в любом формальном количественном, полуколичественном или качественном анализе и оценке такого риска.

Переходя ко второму виду деятельности (управление рисками), эти недостатки современного моделирования климата и климатических изменений могут быть в определенной степени смягчены путем применения другой стратегии оценки проектов и принятия решений. Переход от упреждающего подхода или подхода, основанного на сценариях, к выжидательному подходу уменьшает, а в некоторых случаях устраняет необходимость в полной вероятностной характеристике результатов климатических моделей. Основное внимание в этом подходе уделяется условиям, приводящим к отказу системы (прорыву плотины). Возможность существования таких условий может быть оценена с помощью анализа чувствительности к воздействию изменения климата на водные ресурсы и гидрологию, который может быть успешно проведен с помощью ансамблевых прогнозов. Такая оценка может дать



достаточную информацию для адаптивного и устойчивого проектирования плотин, адаптивного управления системой плотин и адаптивной эксплуатации плотин (о чем говорится в разделе «Управление гидрологическим риском» данной Технической записки).

Модели водных систем, использующие к выжидательным сценариям, проверяют работу системы в широком диапазоне потенциальных будущих событий (климатических и неклиматических перестановок), выходящих за рамки будущих событий, предложенных в материалах МГЭИК и сопутствующих моделях МОЦ. Сценарии, таким образом, определяются как те будущие события, в которых система будет бороться или потерпит неудачу. Сценарии, определенные постфактум, предназначены для выявления субоптимальных характеристик системы и с меньшей вероятностью недооценивают уязвимость. Кроме того, определение сценариев постфактум может облегчить присвоение сценариям относительных или субъективных вероятностей.

Второй документ содержит некоторые общие наблюдения и направления:

- Сбор гидроклиматических данных, контроль их качества и статистический анализ, информирующий о тенденциях и направлениях, должны осуществляться в соответствии с руководством ВМО (как указано в разделе «Управление данными» настоящей Технической записки).
- Оценка средних долгосрочных значений осадков и стока может быть подвержена значительной неопределенности. Документ предполагает, что, если возможно, эта неопределенность в долгосрочных средних значениях должна быть определена количественно. Однако такая цель может оказаться недостижимой. В одном из проектов по комплексной оценке риска системы плотин в восточной Канаде была предпринята попытка сделать это, но она оказалась безуспешной. Хотя было собрано большое количество гидроклиматических данных, включая отдельные штормы, с водосборного бассейна и соседнего региона, всестороннее статистическое тестирование не смогло установить нестационарность собранных временных рядов, даже при тестировании разделенных выборок, содержащих только последние данные. (Тестирование включало линейную регрессию для тенденции, тест Манна-Кендалла для тенденции, линейную регрессию с точкой изменения, тест Манна-Кендалла для точки изменения, двухвыборочный t-тест для равных средних с общей дисперсией, двухвыборочный тест для равного L-CV (коэффициент вариации) с неравной дисперсией, тест Петтита на точку изменения, расширенный тест Дики-Фуллера на нестационарность с единичным корнем, тест Квятковского-Филлипса-Шмидта-Шина (KPSS) на стационарность и тест Пристли-Субба-Рао на нестационарность дисперсии.) Поэтому существующие данные, вопреки распространенному мнению, могут оказаться недостаточными для получения информации, необходимой для разработки будущих прогнозов климата и речного стока.
- Прогнозы изменения климата, полученные с помощью МОЦ и региональных климатических моделей (РКМ), могут дать представление о поведенческих изменениях, которым может подвергнуться климат в будущем. Однако, как указывают авторы, к прогнозам изменения климата целесообразнее всего обращаться по вопросам изменений относительно исторических (например, больше или меньше общего количества годовых осадков, незначительно теплые или значительно более теплые зимы, больше или меньше чистой солнечной радиации), в отличие от вопросов, требующих базовой статистики местного будущего климата (например, будущие средние/вариации местных осадков или будущие местные максимальные дневные температуры).

Таким образом, из обоих документов следует общий вывод о том, что в настоящее время нет достаточного уровня знаний в области моделирования изменения климата и моделирования его влияния на гидрологию и водные ресурсы, чтобы предпринимать какие-либо попытки количественной оценки этих аспектов гидрологического риска. Тем не менее, из обоих документов также четко вытекает постулат о необходимости определения общего направления изменений и использования такой информации для применения принципов адаптивного проектирования и адаптивного управления в условиях неопределенности. Настоящая Техническая записка содержит общее руководство в этом направлении в разделе «Воздействие изменения климата».



