

# ТЕХНИЧЕСКАЯ ЗАПИСКА 7 ХВОСТОХРАНИЛИЩА

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 7 ХВОСТОХРАНИЛИЩА

© 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 о Хвостохранилищах является дополнительным документом к Рекомендации по применению передовой практики по Безопасности Плотин. Ссылка на данный документ должна оформляться следующим образом: World Bank. 2021. “Good Practice Note on Dam Safety – Technical Note 7: Tailings Storage Facilities.” 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: Хвостохранилища проекта Waihi Gold, Новая Зеландия © OceanaGold Ltd.

Дизайн обложки: Билл Праглуски, Critical Stages, LLC.



# Техническая Записка 7: Хвостохранилища

## Содержание

Введение	1
Хвостохранилища и водохранилища	2
Характеристика рисков хвостохранилищ	4
Доступные руководства и нормативная документация	6
Управление жизненным циклом	7
Ключевые функции сторон	10
Элементы хвостохранилищ	11
Управление опасными материалами и отходами	12
Проба и испытание хвостохранилищ для оценки риска для окружающей среды и здоровья людей	13
Структурная устойчивость	14
Гидрологическая безопасность	15
Категории опасности/последствий	17
Управление безопасностью плотин	17
Программы наблюдений и мониторинга	18
Готовность к чрезвычайным ситуациям	18
Планирование вывода из эксплуатации и консервации хвостохранилища	19
Планирование и проектирование	21
Основные направления и мероприятия при эксплуатации хвостохранилища	25
Приложение А: Руководства и справочная документация	27
Приложение В: История прорыва хвостохранилища: Córrego do Feijão	29
Справочная литература	38

## Введение

Хвостохранилища — это инженерные сооружения, состоящие из ограничивающих дамб (обычно называемых хвостохранилищами) и сопутствующих сооружений и предназначенные для хранения хвостов (отходы обогащения металлической руды) и управления хвостовыми водами. Хвостохранилища хранят различные отходы горнодобывающих производств в текучей или шламовой форме, поэтому к управлению хвостохранилищами необходимо подходить с ответственностью, во избежание негативного воздействия на здоровье и безопасность людей, окружающую среду и другие объекты инфраструктуры. Тем не менее, исторически с хвостохранилищами возникало больше проблем, чем с водохранилищами. На международном уровне в истории водохранилищ было зафиксировано в среднем более одного крупного инцидента или прорыва год.

Для ответственного управления горнодобывающими объектами собственник хвостохранилища должен осознавать физические и химические риски, связанные с хвостохранилищем, и применять меры контроля для снижения рисков, связанных с потенциальным воздействием на здоровье, безопасность, окружающую среду, общество, бизнес и экономику в соответствии с нормативными требованиями.

Международные организации, регулирующие органы и промышленные предприятия разработали руководства для содействия собственникам в управлении хвостохранилищ. Эти руководства были использованы при разработке данной Технической записки. В настоящей записке содержится минимальный уровень технической детализации, что делает возможным ее использование неспециалистами. Основная цель - предоставить руководство на ранних этапах подготовки проекта, для того чтобы аспекты безопасности хвостохранилища рассматривались на протяжении всего его жизненного цикла. Записка предназначена для повышения осведомленности и информирования о конкретных изысканиях и исследованиях, необходимых во время разработки проекта. Представленный материал следует использовать для подготовки технического задания на такие изыскания/исследования. Также предполагается, что, ознакомившись с запиской, рабочая группа сможет оценить необходимость включения в состав проектной группы специалистов по хвостохранилищам.

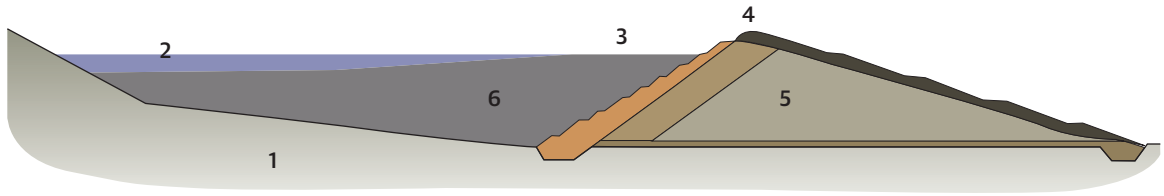
## **Хвостохранилища и водохранилища**

Водохранилища — это сооружения, построенные для хранения или пропуска воды для орошения, выработки электроэнергии, борьбы с наводнениями, промышленных или рекреационных целей. Хвостохранилища используются для складирования и хранения твердых хвостов и отходов горнодобывающих предприятий. Катастрофические экологические и медико-санитарные последствия разрушения хвостохранилищ, а также длительность хранения потенциально опасных отходов должны подразумевать еще более внимательное управление хвостохранилищами, в сравнении с водохранилищами, которое осуществляется в течение длительного времени после прекращения горной добычи. Однако хвостохранилища часто привлекают меньше внимания и финансовых ресурсов, из-за отсутствия прямого коммерческой выгоды.

Хвосты часто размещаются в виде пульпы с высоким начальным содержанием воды. Дальше пульпа может быть уплотнены до состояния пасты или дегидрированы до ненасыщенного состояния, для снижения рисков, связанных с прорывом. Дамбы, образующие хвостохранилища, могут быть построены из грунта или материалов хвостохранилища. Несмотря на то, что многие принципы проектирования и оценки безопасности, используемые для обычных водохранилищ, также применяются к хвостохранилищам, между ними существует достаточно различий, что дает основание разработать для них специальные руководства. К существенным отличиям хвостохранилищ от плотин водохранилищ относятся:

- Дамбы должны быть рассчитаны на хранение твердых отходов, таких как шлам и хвостовая вода.
- По типу конструкции плотины хранилища три существует основных типа с наращиванием путем намыва/налива: в сторону верхнего бьефа, в сторону нижнего бьефа и по центру (см. рисунок 2).
- Срок эксплуатации хвостохранилищ может быть довольно коротким (около 10–20 лет), но хвосты будут храниться в течение длительного времени (более 100 лет). Консервация хвостохранилища должно обеспечить создание устойчивого, безопасного и мало обслуживаемого хранилища, не вызывающего долгосрочных рисков безопасности или воздействия на окружающую среду для будущих поколений. Проектирование хвостохранилища должно осуществляться с учетом необходимости консервации.
- Одно из неперенных условий безопасности хвостохранилищ – технологическое соблюдение баланса между объемом поступления хвостовых вод в отстойный пруд и возвратом осветленных вод в технологический процесс

**РИСУНОК 1. Устройство и основные элементы хвостохранилища**

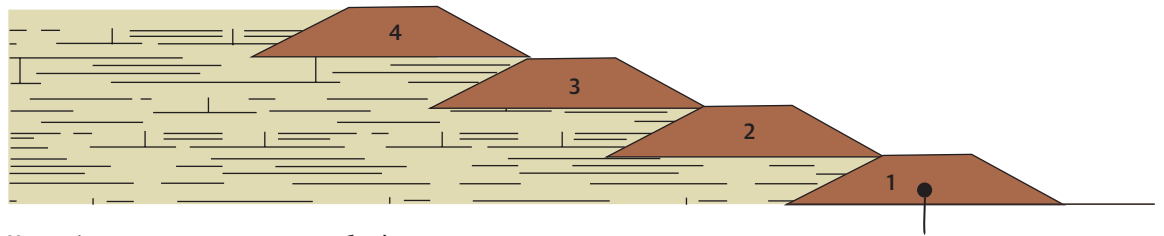


*Источник:* Хвостохранилища OceanaGold-Waihi, Новая Зеландия. <https://www.waihigold.co.nz/mining/waste-rock-andtailings/tailings-storage-facilities/>

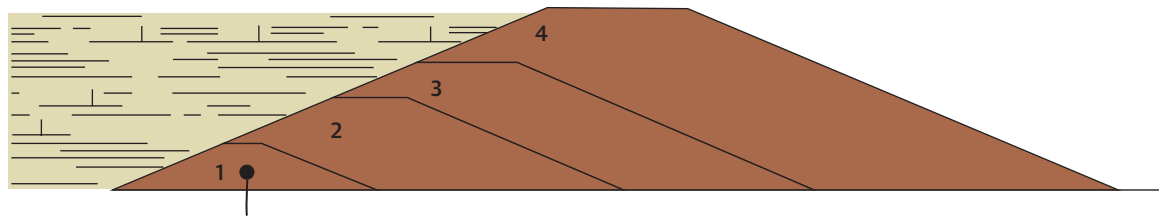
*Примечание:* 1 = естественный рельеф; 2 = отстойник; 3 = пляж; 4 = гребень; 5 = тело дамбы первичного обвалования; 6 = отходы (хвосты).

**РИСУНОК 2. Методы строительства хвостохранилищ**

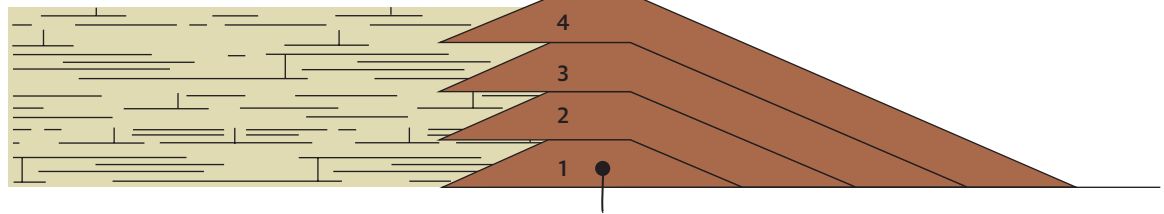
**Намыв/налив со стороны верхнего бьефа**



**Намыв/налив со стороны нижнего бьефа**



**Намыв/налив по центру**



*Источник:* Адаптировано с ВНР. Хвостовые дамбы. 2019. [https://www.bhp.com/-/media/documents/media/reports-andpresentations/2019/190607\\_esgbriefingtailingsdams.pdf?la=en](https://www.bhp.com/-/media/documents/media/reports-andpresentations/2019/190607_esgbriefingtailingsdams.pdf?la=en)

(разумеется, с учетом количества атмосферных осадков и объема испарения). Данный процесс называется балансом воды и является критически важным, особенно когда в хвостах содержатся вредные материалы.

- Твердые вещества и хвостовая вода, хранящиеся в хвостохранилище, могут содержать загрязняющие вещества, которые могут нанести вред здоровью человека и окружающей среде. В отдельных случаях хвостохранилище может включать в себя геомембранную основу для обеспечения надежной изоляции.

- Фильтрация и пыль могут оказывать вредное воздействие на окружающую среду.
- Строительство, вероятно, будет осуществляться поэтапно в течение нескольких лет. Это может привести к изменениям свойств хвостов и материалов для строительства дамб и обвалования с течением времени, которые зависят от горных работ и переработки минералов. Для поддержания безопасности также требуется надлежащее планирование, активный надзор на объекте и контроль качества.
- Строительство может осуществляться работниками шахты и может не соответствовать уровню инженерного обеспечения и контроля качества, используемого при строительстве водохранилищ.
- Исходные данные для проектирования являются изменяющимися; скорость заполнения, предельная высота и общий объем хранилища могут непредсказуемо изменяться в ходе строительства и эксплуатации.
- В течение всего срока службы хвостохранилищ могут меняться проектировщики и персонал, ответственный за строительство и эксплуатацию.
- Устойчивость хвостохранилищ меняется в течение жизненного цикла и зависит от нескольких факторов, таких как проектирование, стадирование строительства, горные работы и активное управление балансом воды.
- Характеристики хранящихся хвостов зависят от того, как они транспортируются и складываются в хвостохранилище. Часто сброс хвостов приводит к образованию «пляжа» в хвостохранилище, состоящего из более крупных материалов, оседающих вблизи выпускных патрубков сбросных труб.
- Характеристики хранящихся хвостов зависят от того, как они транспортируются и складываются в хвостохранилище. Часто сброс хвостов приводит к образованию «пляжа» в хвостохранилище, состоящего из более крупных материалов, оседающих вблизи выхода пульповоды.
- Наилучшая доступная технология (НДТ) используется для достижения целей работы и управления рисками. Выбор НДТ предполагает рассмотрение ряда методов разработки месторождений полезных ископаемых с целью определения того, как будет перерабатываться горный материал, сколько воды будет удерживаться в хвостах, где будут храниться хвосты, как будет осуществляться надлежащий контроль территории хвостохранилища после консервации, а также будет ли вероятность или последствия разрушения хвостохранилища надлежащим образом снижена с помощью этих методов.

## Характеристика рисков хвостохранилищ

По данным базы данных, включающей 18401 шахту по всему миру, коэффициент прорыва хвостохранилищ за последние 100 лет оценивается в 1.2 процента (Азам и Ли 2010). Это примерно на три порядка выше, чем коэффициент разрушения плотин водохранилищ, который, по имеющимся данным, составляет 0.001 процента (МКБП 2001). Частота прорыва хвостохранилищ составляет в среднем от одного до двух разрушений в год по всему миру. В основном разрушения происходят на малых и средних плотинах высотой до 30 метров с максимальным объемом хвостов в пять миллионов кубических метров. В результате аварии в среднем происходит выброс около 20 процентов хвостов, содержащихся в хвостохранилище. С течением времени частота прорывов не уменьшилась. Разрушения хвостохранилищ могут привести к самым значительным экологическим последствиям



в горнодобывающей промышленности. Этот риск существует не только во время эксплуатации, но и в течение длительного времени после консервации рудника или обогатительной фабрики.

Поскольку основное внимание в горнодобывающей промышленности уделяется производству ценного минерального продукта, хранению хвостов в хвостохранилищах часто не уделяется должного внимания, в отличие от горнодобывающей деятельности. Во время эксплуатации и рудника может возникнуть большой соблазн минимизировать затраты, и после чего не финансировать должным образом консервацию хвостохранилища. Низкий уровень управления и заинтересованности в безопасности плотины, низкий уровень инвестиций и недостаточные технические ресурсы стали факторами, способствующими историческим авариям и инцидентам на хвостохранилищах. И эти инциденты могут иметь серьезные последствия в социальном, экологическом и экономическом плане.

Из исторических примеров прорыва хвостохранилища можно извлечь много выводов. Наиболее распространенными видами разрушений для хвостохранилищ являются:

- Перелив через гребень плотин
- Неустойчивость откосов
- Землетрясения
- Разрушение основания
- Фильтрация и суффозия

Для хвостохранилищ, построенных методом намыва/налива со стороны верхнего бьефа и по центру, потенциальные режимы отказов (ПРО), в основном были связаны с:

- Неустойчивость откосов в хвостохранилище при нормальных условиях эксплуатации. Эта неустойчивость может возникнуть из-за потери контроля над фильтрационным давлением в результате потери контроля над управлением баланса воды и неэффективности дренажных систем.
- Неустойчивость откосов из-за низкопрочных или сжимающихся пластов в основании или в хвостохранилище или при строительстве дамб вторичного обвалования со стороны верхнего бьефа. Это также может проявляться в виде статического разжижения.
- Разжижение хвостов при сейсмической нагрузке, приводящее к большим деформациям и потере высоты превышения гребня над уровнем воды.
- Перелив через гребень из-за потери контроля над уровнем воды, скопившейся в хвостохранилище.

Эти ПРО существенно отличаются от ПРО водохранилищ.

К основным факторам, способствующим разрушению хвостохранилищ, относятся:

- Ошибки в проектировании

- Ненадлежащее управление балансом воды, а также неспособность поддерживать достаточную высоту гребня над уровнем воды.
- Некачественное строительство и надзор
- Недостаточное управление и отсутствие ответственности за безопасность плотин
- Недостаточные ресурсы; неадекватное обучение; отсутствие конкретных обязанностей, структуры отчетности и понимания особенностей, которые контролируют безопасную работу и управление безопасностью плотины

Хвостохранилища, построенные методом намыва/налива со стороны нижнего бьефа, в значительной степени похожи на традиционные водохранилища и имеют более низкий процент разрушений.

После недавних чрезвычайных происшествий, произошедших на хвостохранилищах, некоторые страны ввели запрет на строительство хвостохранилищ методом намыва/налива со стороны нижнего бьефа.

На рисунке 3 представлено количество разрушений хвостохранилищ серьезными и очень серьезными последствиями. Степень последствий разрушений основана на трех переменных, которые были разработаны Международной Комиссией по Большим Плотинам (МКБП, 2011): (а) объем выброса, (б) расстояние выброс хвостов и (в) количество погибших. Определение степени разрушения следующее:

- Очень серьезные последствия - выброс объемом не менее 1 миллиона кубических метров или распространение на 20 километров (12.4 мили) или более, или множественные человеческие жертвы (в среднем 20 или более человек).
- Серьезные последствия - выброс 100 000 кубических метров или человеческие жертвы

В Приложении В приводится недавний трагический случай, связанный с разрушением хвостохранилища № 1 Córrego do Feijão, расположенного в Бразилии.

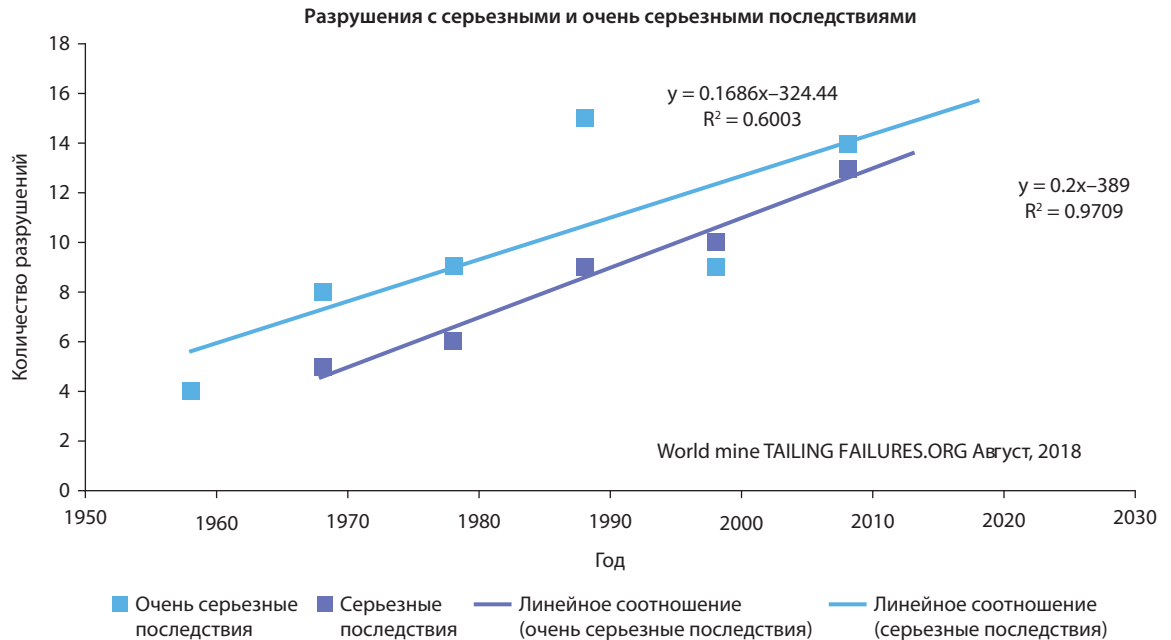
## **Доступные руководства и нормативная документация**

Международные организации, регулирующие органы и промышленные предприятия разработали качественные технические руководства для использования при проектировании, строительстве и эксплуатации хвостохранилищ.

В приложении А приведен перечень основных руководящих технических документов. Эти документы содержат большой объем информации, на которую следует ссылаться в процессе разработки и управления проектом с участием хвостохранилища. В некоторых юрисдикциях определены требования к проектированию, строительству и эксплуатации.

В некоторых странах требования являются недостаточными или неактуальными, при этом стандарты могут противоречить друг другу. В таких ситуациях ответственные собственники хвостохранилища обычно перенимают передовую международную практику. Одно из следующих четырех руководств может стать основным руководящим документом для проекта, связанного с хвостохранилищем:

**РИСУНОК 3. Количество разрушений хвостохранилищ серьезными и очень серьезными последствиями**



Источник: World Mine Tailings Failure. <https://worldminetailingsfailures.org/>

- Австралийский национальный комитет по большим плотинам (ANCOLD) (2012)
- Международный совет по горнодобывающей и металлургической промышленности (ICMM), Принципы ответственного инвестирования (PRI), Программа ООН по окружающей среде (UNEP) (2020).
- Ассоциация горнодобывающей промышленности Канады (MAC) (2019)
- Европейская экономическая комиссия ООН (ЕЭК ООН) (2014)

## Управление жизненным циклом

Механизм управления хвостохранилищами должен внедряться на всех этапах жизненного цикла. Ключевыми элементами механизма являются политика и ответственность, планирование, реализация, оценка эффективности и анализ управления. На рисунке 4 показан обзор того, как эти элементы распределены по жизненному циклу. Управление хвостохранилищем должно следовать методу «планируй-делай-проверяй-актуализируй» для обеспечения постоянного совершенствования. Эта модель соответствует другим моделям систем управления окружающей средой.

К этапам жизненного цикла хвостохранилища относятся:

1. *Концепция и планирование проекта.* Это раннее планирование и разработка концепции предлагаемого рудника и хвостохранилища, включая план рудника и концепцию по переработке сырья. Этот этап должен включать в

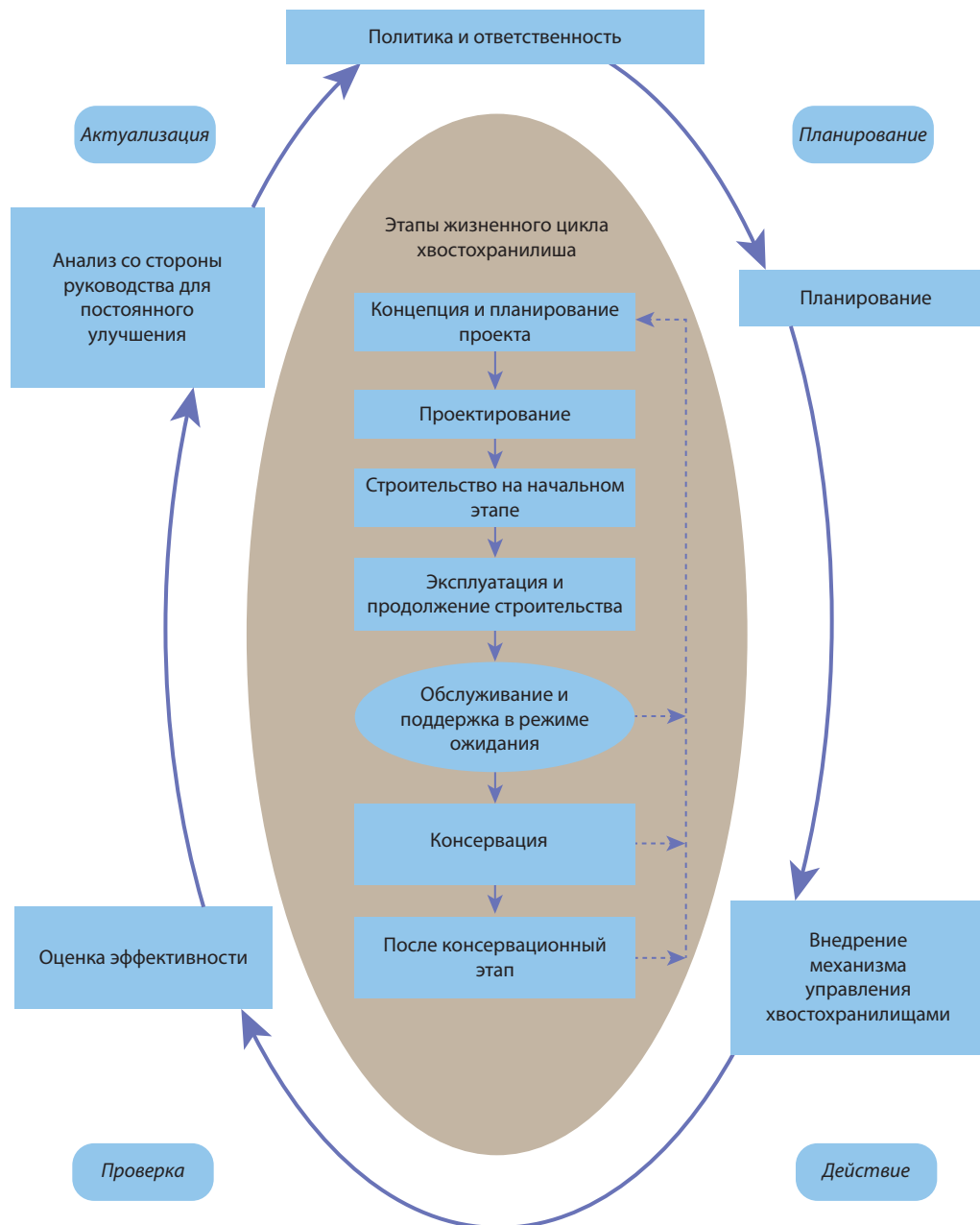
себя строгие инструменты принятия решений для поддержки выбора места строительства хвостохранилища и внедрения НДТ для управления хвостами.

2. *Проектирование.* Проектирование начинается после выбора места строительства и НДТ для хвостохранилища. В проектирование входит детальное планирование и детальное инженерное проектирование всех аспектов предлагаемого рудника и хвостохранилища.
3. *Строительство на начальном этапе.* Это строительство сооружений и инфраструктуры, которые необходимы для начала складирования и хранения хвостов. Оно включает, например, удаление растительности и слоя растительного грунта, строительство первичной дамбы, пульповодов, подъездных дорог и соответствующей водохозяйственной инфраструктуры.
4. *Эксплуатация и продолжение строительства.* Хвосты транспортируются к хвостохранилищу и складированы в нем. В соответствии с проектом хвостохранилища могут быть построены дамбы вторичного обвалования или добавлены новые хранилища. В зависимости от общего производственного плана рудника, фаза эксплуатации и продолжения строительства хвостохранилища может совпасть или не совпасть с периодом промышленной эксплуатации рудника.
5. *Обслуживание и поддержка в режиме ожидания.* Иногда рудник прекращает коммерческую добычу, и складирование хвостов останавливается. Когда собственник ожидает возобновления коммерческой добычи в какой-то момент в будущем, наблюдение и мониторинг хвостохранилищ продолжается, а связанная с хвостохранилищем инфраструктура не выводится из эксплуатации и консервация не инициируется.
6. *Консервация.* Под консервацией намытого или отсыпанного хранилища следует понимать прекращение складирования хвостов - отходов обогащения руды и сохранение его массива в безаварийном состоянии, исключая загрязнение окружающей среды в течение неопределенного срока, с использованием территории хранилища для сельского хозяйства или других народнохозяйственных целей. В мероприятия по консервации могут включаться демонтаж инфраструктуры, рекультивация, благоустройство и использование в народнохозяйственных целях территории хранилища и прилегающих к нему земель.
7. *После консервационный этап.* После завершения мероприятия по консервации и приведения необходимых конструктивных решений консервации, хвостохранилища переходят в режим долгосрочного обслуживания и наблюдения. В после консервационный период ответственность за хвостохранилище может перейти от собственника к местной администрации.

ПРИМЕЧАНИЕ: Вышеизложенные определения предназначены строго для описания ключевых мероприятий и этапов жизненного цикла хвостохранилищ. Кроме того, существуют различные юридические определения, связанные с терминами «этап консервации» и «после консерваций этап», которые могут сильно отличаться в разных странах и региональных юрисдикциях.

В разделе «Планирование вывода из эксплуатации и консервации хвостохранилища» содержится дополнительная информация о каждой фазе жизненного цикла хвостохранилища.

РИСУНОК 4. Жизненный цикл управления хвостохранилищами



Источник: МАС 2017.



## Ключевые функции сторон

### Проектировщик

Кроме опыта в изыскании, проектировании и строительстве, проектировщик хвостохранилища должен иметь опыт геотехнического проектирования.

Проектировщику необходимо понимать, как будет эксплуатироваться хвостохранилище, включая управление водного баланса и уязвимые геотехнические условия, которые могут быстро привести к разрушению дамб хвостохранилища.

Обеспечение преемственности и постоянства опыта и знаний проектировщиков на протяжении всего проектирования и строительства является критически важным, поскольку хвостохранилища строятся и наращиваются с течением времени. Проектировщики могут меняться в течение срока эксплуатации хвостохранилища, и управление этим процессом должно осуществляться с должной осторожностью. Часто разрушения хвостохранилищ происходили одновременно со сменой проектировщика. Поэтому очень важно, чтобы новый проектировщик обладал соответствующими знаниями и опытом и знал предшествующие проектные предположения, решения и историю строительных работ. Особенно важна передача документации и знаний при смене инженеров. Во время смены проектировщика рекомендуется провести семинар по анализу ПРО.

Также рекомендуется возлагать на проектировщика ответственность за постоянный анализ и проверку состояния хвостохранилища в течение всего срока эксплуатации. Этот анализ подразумевает предоставление поддержки и консультаций персоналу, осуществляющему надзор за строительством и эксплуатацией хвостохранилища, а также проведение ежегодных инспекций, анализа состояния и безопасности.

### Авторский Надзор

Собственник должен привлечь инженера по авторскому надзору для обеспечения технического контроля от имени собственника. Инженер по авторскому надзору контролирует следующее:

- Соответствие разработанного проекта целям и критериям проекта, применимым руководствам, стандартам и нормативным требованиям; и
- Соответствие строительства и эксплуатационных показателей на протяжении всего жизненного цикла требованиям и целям проекта, применимым руководствам, стандартам и нормативным требованиям.

В большинстве случаев роль авторского надзора выполняет проектировщик, но в некоторых крупных проектах авторский надзор осуществляется независимой стороной.

### Независимый эксперт

Важной частью управления хвостохранилищем на протяжении всего его жизненного цикла является независимая оценка. Независимые экспертизы и оценки третьей стороны должны проводиться на критических этапах жизненного цикла, таких как концепция, технико-экономическое обоснование, проектирование, строительство и консервация. В некоторых законодательствах данное требование является обязательным. Периодические проверки должны проводиться и в процессе эксплуатации. Большинство современных руководств по плотинам содержат рекомендации по проведению независимых оценок безопасности плотин. Те же принципы применимы

для хвостохранилищ. Такие оценки обычно называются комплексными оценками безопасности плотины и проводятся каждые пять лет. Некоторые собственники назначают независимую экспертную комиссию для проведения экспертизы проектирования, строительства и эксплуатации хвостохранилищ. В ходе проектирования комиссия может представлять отчеты более регулярно, а в процессе эксплуатации - ежегодно.

## Элементы хвостохранилищ

В зависимости от устройства, метода складирования и консервации существует множество типов и компонентов хвостохранилищ.

Стратегия управления хвостами описывает методы транспортировки, складирования и дальнейшего хранения хвостов и отходов. Тип хвостохранилища, используемый в стратегии управления, зависит от нескольких факторов, таких как геология участка и сейсмическая опасность, объем и свойства материалов, доступных для строительства хвостохранилища, метода разработки месторождения, характеристики хвостов, доступной площади складирования, климата и долгосрочных требований. Основные элементы хвостохранилищ включают следующее.

Транспортировка хвостов на участок хранения включает в себя:

- Трасса пульповодов, пульповоды-лотки и пульпонасосная станция
- Системы конвейерной транспортировки или транспортировки грузовыми автомобилями (шламовый кек)
- Сбросные сооружения
- Прочие специализированные системы транспортировки или хранения

Транспортировка, распределение и сброс хвостов в пределах хранилища:

- Пульповыпускные сооружения
- Гидроциклоны для разделения грунта и раствора хвостов, часто используются в случаях, когда значительная часть песка применяется для строительства дамб
- Стуженная пульпа с центральной выпуском
- Удаление грубых отходов или пустой породы
- Сооружения механического или солнечного обезвоживания и сухого складирования

Замыв хранилища:

- Схема заполнения и намыва хранилища предусматривающее пляжный склон для отвода хвостовой воды в пруд-отстойник.
- Зоны расположения хвостов ниже горизонта воды (пляжа), приводящие к образованию более крутого осевшего склона
- Зоны расположения хвостов выше горизонта воды, где хвосты подвергаются воздействию атмосферы, составляющие большую часть хранилища

Конструкция гидротехнического сооружения хранилища:

- Плотины и дамбы для хранилищ намывного типа, возводимые сразу в одну или несколько очередей на проектную высоту из местных грунтов, в основном из грунтов полезных выемок
- Ограждающие дамбы первичного и вторичного обвалования, возводимые в процессе замыва хранилища отходами (после гидроциклона) обогащения руды
- Уплотнение сухих хвостов на месте для получения устойчивой насыпи и наращивания ограждающей дамбы.
- Котлованный тип, располагающийся в котлованах старых карьеров, при котором возможно складирование отходов без возведения дамбы.
- Пойменный тип, располагающийся на поймах рек с обвалованием с двух или трех сторон в зависимости от рельефа местности;

Также предусматриваются меры по управлению водным балансом и охране окружающей среды.

При строительстве дамб для хвостохранилищ обычно применяется поэтапное строительство. Сначала строится дамба первичного обвалования. Эта дамба обычно имеет короткий проектный срок эксплуатации - от одного до трех лет. При проектировании необходимо учитывать будущие потребности хвостохранилища в процессе эксплуатации и консервации. Водонепроницаемые, дренажные и противофильтрационные устройства и так далее, устраиваются при строительстве первичного обвалования хранилища. Часто в ходе дальнейшей разведки на руднике обнаруживаются дополнительные запасы руды, и требуемый объем хранилища для хвостов увеличивается. При необходимости проектировщику необходимо обеспечить гибкость проекта и возможность расширения в будущем. После возведения дамбы первичного обвалования поэтапное строительство может осуществляться тремя методами (рисунок 2):

- Наращивание путем намыва/налива в сторону нижнего бьефа, где вторичная дамба возводится со стороны нижнего бьефа первичной дамбы
- Наращивание путем намыва/налива по центру, где часть вторичной дамбы возводится на хвостах, а остальная часть - со стороны нижнего бьефа
- Наращивание путем намыва/налива в сторону верхнего бьефа, где вторичная дамба возводится на хвостах

Не исключены случаи, где используются комбинированная конструкция. Увеличение хвостохранилища может начаться путем намыва/налива в сторону нижнего бьефа, перейти на намыва/налива по центру, а затем, в конце концов, переместиться в сторону верхнего бьефа.

## **Управление опасными материалами и отходами**

Возможность как постоянного загрязнения, так и острого риска, связанного с хвостовыми отходами шахт, может сохраняться в течение длительного времени. Есть много примеров того, что хвосты и отходы, накопленные несколько столетий или даже тысячелетий назад, продолжают производить загрязнение в количествах, вредных

для окружающей среды. Данная ситуация подчеркивает важность надлежащего проектирования, строительства, эксплуатации, технического обслуживания и тщательного рассмотрения вопроса о консервации современных хвостохранилищ и отвалов, во избежание неприемлемых рисков или негативного воздействия в будущем.

Для подтверждения минимизации рисков при работе с опасными материалами, в рамках управления хвостохранилища требуется проведение оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) и плана управления окружающей средой (ПУОС).

ОВОС следует выполнить на этапах разработки концепции и планирования. ОВОС должна учитывать следующие критерии:

- Месторасположение
- Особенности местности (климат, геология, гидрогеология, топография и сейсмическая опасность)
- Параметры и физико-механические характеристики хвостов
- Эксплуатация
- Управление
- Концепции и требования консервации

После принятия и утверждения ОВОС необходимо подготовить ПУОС для обеспечения минимизации воздействия на окружающую среду для:

- Сообществ, расположенных ниже по течению или в непосредственной близости к сооружению
- Источников воды, включая принимающий водоток, подземные воды, водохранилища и источники питьевой воды
- Качество воздуха, который может подвергаться воздействию пылевых загрязнений и летучих газов
- Фауны и флоры
- Объектов культурного наследия

## **Проба и испытание хвостохранилищ для оценки риска для окружающей среды и здоровья людей**

Соответствующее понимание и знание свойств хвостов необходимо для снижения опасности, связанной с ними. Испытания хвостов должны обеспечить понимание:

- Физических характеристик хвостов как шлама, так и твердых частиц, включая возможность частичной разделения.
- Свойств материал, включая объемную плотность, сухую плотность, удельный вес, коэффициент уплотнение, прочность и проницаемость.

- Химического состава для хвостовой воды
- Минералогии/геохимии
- Реологических свойств, таких как зависимость деформации от напряжения и вязкость

Хвосты и хвостовая вода могут содержать вредные вещества. Знание минералогии и химии хвостов необходимо для правильного экологического проектирования. Знание этих свойств также помогает в прогнозировании поведения материала во время хранения. В хранилище могут происходить следующие химические реакции:

- Окисление сульфидов и образование кислой воды
- Катионообмен с цианистыми соединениями с образованием нерастворимых форм для предотвращения улетучивания этого очень токсичного химиката в воздух
- Впитывание токсичных металлов в глинистые частицы
- Выделение вредных газов

## Структурная устойчивость

Оценка устойчивости хвостохранилищ отличается от оценки устойчивости водохранилищ, где:

- Как правило, дамбы обвалования отличаются меньшей шириной и размерами
- Дамбы обвалования хвостохранилищ строятся поэтапно в течение многих лет
- Строительство дамб обвалования путем намыва/налива в сторону верхнего бьефа полагается на физико-механические и прочностные характеристики хвостов. Устойчивость может меняться в зависимости от степени консолидации грунта, и существует вероятность статического разжижения.
- Поровое давление представляет собой совокупность давления фильтрации и консолидации
- Анализ предельного равновесия используется для оценки устойчивости дамбы обвалования хвостохранилища в условиях статической нагрузки. Числовое моделирование может потребоваться, если коэффициенты безопасности являются маргинальными. Для анализа устойчивости необходимо учитывать условия нагрузки.

Условия при неводонасыщенном состоянии включают:

- Долгосрочная устойчивость на предельной проектной высоте
- Долгосрочная устойчивость после консервации

Условия при насыщенном состоянии включают:

- Устойчивость во время строительства, когда меняется объем и поровое давление
- Насыщенные сжимающийся материалы (включая хвосты и несвязные основания)



- Новое строительство над существующими склонами
- Возобновление складирования хвостов на старых хвостохранилищах
- Устойчивость откосов при выемке упорной призмы
- Статическое и вызванное землетрясением разжижение
- Постсейсмическая устойчивость при землетрясениях низкой магнитуды, когда вероятность разжижения невысокая, но вероятность возникновения насыщенности грунта достаточно велика
- Постсейсмическая устойчивость при землетрясениях высокой магнитуды, когда вероятность разжижения высокая

Сейсмические аспекты проектирования хвостохранилищ аналогичны проектам для плотин водохранилищ, но при этом необходимо учитывать сейсмические характеристики хвостохранилищ. Для дополнительной информации по сейсмостойкости см. Техническую записку по Сейсмическим Рискам. При оценке сейсмических характеристик хвостохранилища следует учитывать дополнительные инерционные нагрузки и смещения за счет нагрузки хвостов.

## Гидрологическая безопасность

Объем хвостохранилищ отличаются от водохранилищ. Для обеспечения безопасности дамб обвалования и предотвращения прорывов, загрязняющих окружающую среду необходимо учитывать, что объем хвостохранилища постоянно уменьшается из-за складирования твердых хвостов и изменения объема воды. Качество хвостовой воды в хранилище также может быть непригодным для отвода в реки и водоемы ниже по течению.

Гидрологические аспекты при проектировании хвостохранилищ включают следующее.

**Объем хвостохранилища** - Расчет и определение объема может быть затруднено поэтапным строительством, неопределенностью в прогнозах выхода отходов и конечной плотности сухих отходов в отвале.

**Минимальный объем отстойного пруда** - Объем отстойного пруда должен быть достаточным для хранения и удержания: воды, содержащейся в пульпе хвостохранилища, которая выделяется при первоначальном намыве хвостов; трещинно-поровой воды в отвалах, которая вытесняется по мере уплотнения хвостов; атмосферных осадков и поверхностного стока, накапливающихся в более влажные периоды года и в результате ливневых дождей; волн, создаваемых ветром; требуемой высоты гребня над уровнем воды; и скорости, с которой накопленная вода может отводиться для последующего использования на обогатительных фабриках, очистки или возможного прямого сброса.

**Сброс вредной осветленной воды из хранилища** - Если качество воды не соответствует требованиям для отвода при нормальных условиях, следует предусмотреть соответствующее хранение, для минимизации риска перелива во время сильных проливных дождей или после сильных землетрясений. В рамках процесса управления рисками проекта хвостохранилищ следует предусмотреть аварийный водосброс для контролируемого сброса хвостовой воды, или предусмотреть объем хранилища на случай наихудшего варианта развития событий.

**Водосбросные сооружения** - Расчетный паводок для конструкции водосброса хвостохранилища аналогичен расчетному паводку для водохранилищ. Подробная информация по теме приведена в Технической Записке по Гидрологическим Рискам.

**Водный баланс хвостохранилища** - Моделирование водного баланса позволяет определить необходимую высоту гребня над МПУ для безопасного хранения воды и оценить устойчивость хвостохранилища при проектировании. В процессе эксплуатации баланс можно скорректировать в целях безопасной эксплуатации хвостохранилища.

Водный баланс определяет эксплуатационные характеристики дренажных устройств. К этим характеристикам относятся скорость фильтрации, которая должна регулироваться в процессе эксплуатации и консервации.

Моделирование водного баланса должно учитывать изменения свойств хвостов, их объем, уровни хранения и план увеличения дамбы обвалования наряду с изменениями климатических условий.

**Регулирование стока** - Хвостохранилища обычно располагаются вне русла реки. Рекомендуется разграничивать зоны хранения от зон стока ливневых вод.

Как и в случае с водохранилищами, расчеты количества осадков и стока должны быть выполнены как часть водного баланса и требуемого минимального объема отстойника. При строительстве хвостохранилищ в русле реки необходимо учитывать сток с водосборных бассейнов выше по течению и влияние на превышения гребня над уровнем воды, если паводковый сток проходит через хвостохранилище.

**Фильтрация** - Потери при фильтрации могут быть несущественными для водного баланса, однако, фильтрация может оказать значительное воздействие на окружающую среду. Аналогично оценке для водохранилищ при проектировании хвостохранилища следует провести оценку фильтрации для анализа устойчивости, понимания скорости намыва хвостов, оценки воздействия на окружающую среду и определения размеров дренажных устройств.

Для каждого хвостохранилища следует разработать уникальный план контроля качества и баланса воды. В плане должны быть предусмотрены следующие пункты:

- Гидрология/гидрогеология
- Расчетный паводок
- Водный баланс
- План управления поверхностными водами
- Критерии для отвода воды
- Процедура очистки воды
- Параметры сточных вод

## Категории опасности/последствий

Существует две категории опасности<sup>1</sup>/последствий, которые необходимо оценивать для хвостохранилищ: прорыв дамбы и утечка, загрязняющая окружающую среду.

Оценка уровня последствий разрушения дамбы хвостохранилища аналогична оценке плотины водохранилища. Наивысшая классификация, полученная в результате оценки прорыва плотины или и утечки, загрязняющей окружающую среду, определяет уровень опасности/последствий для проекта. Уровень опасности/последствий для хвостохранилища связан с последствиями аварии с учетом человеческих жертв, экологического ущерба, экономического ущерба и влияния на общество. Методология классификации варьируется от страны к стране, и для оценки классификации хвостохранилища в конкретной стране следует использовать местные руководства.

Поскольку хвостохранилища постоянно увеличиваются в течение своего жизненного цикла, последствия аварий могут меняться по мере изменения хвостохранилища или условий ниже по течению. Следовательно, классификацию хвостохранилищ необходимо периодически оценивать в течение ее жизненного цикла.

## Управление безопасностью плотин

Основной целью обеспечения безопасности плотины является защита людей, их имущества и окружающей среды. Система управления безопасностью плотины обеспечивает собственнику основу для деятельности по управлению безопасностью плотины, принятия решений и вспомогательных процессов. Система управления безопасностью плотины должна быть разработана для каждого хвостохранилища. Элементы системы включают:

- Управление
- Люди
- Эксплуатация и техническое обслуживание
- Наблюдение и мониторинг
- Промежуточные (ежегодные) оценки безопасности плотины
- Комплексная оценки безопасности плотин
- Специальные инспекции и анализ безопасности плотин
- Выявление и управление проблем безопасности плотины
- Управление информацией
- Аудиты и проверки

---

<sup>1</sup> В то время как в других разделах настоящей записки опасность используется как угроза или состояние, которое может возникнуть в результате внешних причин (например, землетрясения или наводнения) или потенциального источника неблагоприятного воздействия на здоровье и окружающую среду, здесь опасность используется как мера последствий в случае разрушения плотины и/или неконтролируемого сброса хвостов в соответствии с практикой проектирования плотин.

## Программы наблюдений и мониторинга

Программы наблюдений, состоящие из мониторинга КИА и визуальных осмотров, являются важной практикой управления рисками для хвостохранилищ. Руководство по эксплуатации, техническому обслуживанию и наблюдению (ЭиТО) должно быть разработано для каждого хвостохранилища. В этом руководстве должны быть описаны требования к ЭиТО, основанные на классификации опасности/последствий для хвостохранилища, текущих стандартах инженерного проектирования и особенностях объекта. Руководство по ЭиТО для хвостохранилища должно включать:

- Описание конструкции дамбы обвалования
- Описание системы транспортировки пульпы на хвостохранилища
- Описание всех процедур наблюдения для инспекций и мониторинга КИА
- Аварийные уставки и уровни сигнализации для контролируемых параметров
- Процедуры отчетности о несоответствии, инцидентах и нарушениях
- Действия по исправлению ситуации в случае несоответствия и инцидентов
- Внутренний план действий в чрезвычайных ситуациях
- Параметры оценки эффективности и соответствия руководства по эксплуатации

Результаты визуальных осмотров и мониторинга КИА должны использоваться для пересмотра исходных данных проекта. Геотехнические исходные данные, такие как расчетная фильтрация и фильтрационное давление, часто основаны на ограниченных данных и являются основой для проектирования и ожидаемых характеристик. Данные наблюдений должны использоваться для проверки этих проектных прогнозов и, если они будут отличаться, может потребоваться повторный анализ устойчивости хвостохранилища. Фактические показатели программы наблюдения в сравнении с проектными предположениями должны проверяться на протяжении всего жизненного цикла хвостохранилища. Для дополнительной информации см. в Техническую Записку Геотехническим Рискам.

## Готовность к чрезвычайным ситуациям

Готовность к чрезвычайным ситуациям имеет важное значение при управлении хвостохранилищами для снижения риска человеческих жертв в случае прорыва или аварии. План аварийной готовности (ПАГ) — это инструмент для снижения риска и документальное подтверждение обязанности собственника по обеспечению устойчивого развития. ПАГ для хвостохранилища должен быть аналогичен ПАГ для водоподпорных сооружений. ПАГ необходимо разрабатывать для каждой фазы жизненного цикла хвостохранилища. Как и для водоподпорных сооружений, должны быть подготовлены внутренние и внешние планы аварийного реагирования.

ПАГ необходимо пересмотреть и испытать при следующих случаях:

- При смене аварийной службы или ее руководящего персонала
- При обновлении информации относительно состояния хвостохранилища или выявлении новых рисков

- В случае эксплуатационных изменений, неправильного управления, конструкционных проблем, модификации оборудования или природных явлений, создающих угрозу превышения допустимых расчетных значений проектирования
- В соответствии с требованиями ПАГ по периодическому пересмотру

В зависимости от опасностей, последствий и особенностей объекта, ПАГ для каждого хвостохранилища будет разным. Условия хвостохранилищ обычно отличаются по следующим пунктам:

- Генплан хвостохранилища, площадки, и безопасных путей доступа
- Определение потенциально заинтересованных сторон
- Назначение ПАГ, включая цели и область применения
- Аварийные сценарии, риски, территория, подверженная риску, и опасности/последствия
- Структура, порядок взаимодействий и ответственность каждого участника
- Системы коммуникаций и связи
- Процедуры и системы оповещения при чрезвычайных ситуациях
- Процедуры реагирования на чрезвычайные ситуации для каждого сценария
- Собственное и стороннее оборудование и ресурсы, необходимые для оперативного реагирования на чрезвычайную ситуацию чрезвычайная ситуация
- Процедуры устранения нарушений для возвращения к нормальной работе
- Требования к регулярным обучениям

## **Планирование вывода из эксплуатации и консервации хвостохранилища**

Предпочтительно на стадии планирования проекта необходимо разработать план консервации хвостохранилища.

Несмотря на то, что срок активной эксплуатации хвостохранилища недолгий, планирование, проектирование, строительство, эксплуатация и консервация должны осуществляться с расчетом того, что хвостохранилища являются постоянными сооружениями. После консервации хвостохранилища становятся частью рельефа, который должен оставаться физически и химически устойчивым в течение длительного времени. Важно исключить превалирование краткосрочных финансовых или эксплуатационных приоритетов над лучшими методами проектирования и эксплуатации, которые могут иметь меньшее долгосрочное воздействие, сложность или риски.

Планирование консервации хвостохранилища переплетается с первоначальным проектом и изменениями в проекте, которые могут произойти в течение жизненного цикла. Планирование должно включать в себя:

- Оценка рисков и подготовка плана управления рисками
- Определение рельефа местности



- Определение гидрогеологии поверхностных и коренных пород
- Определение состояния грунта и геотехнических характеристик
- Подтверждение нормативных требований
- Обеспечение нормативных требований
- Проектирование хвостохранилища, включая любые отклонения от проекта на этапе эксплуатации и строительства
- Определение физических и химических характеристик хвостохранилищ
- Оценка климата, включая долгосрочные прогнозы изменения климата
- Подтверждение гидрологических данных
- Подготовка плана транспортировки и намыва хвостов
- План контроля качества и баланса воды
- Обновление руководства ЭИГО, описывающего требования к долгосрочному наблюдению и мониторингу
- Определение существующей инфраструктуры и инфраструктуры, которая будет сохранена во время и после консервации объекта
- Оценка потенциала для рекультивации
- Подтверждение наличия условий для рекультивации

Разработка плана консервации должна охватывать следующие темы:

- План постепенной рекультивации, в котором рассматриваются мероприятия по рекультивации, которые будут проводиться на этапе эксплуатации и строительства в течение жизненного цикла
- План вывода из эксплуатации для определения мероприятий на этапе консервации объекта
- План рекультивации и восстановления растительного покрова
- План проведения долгосрочного технического обслуживания и наблюдения
- ПАГ для вывода из эксплуатации и консервации объекта
- План по обеспечению постоянного контроля документации

Как и в случае с другими аспектами проектирования и управления рисками, план консервации должен быть пересмотрен в течение жизненного цикла хвостохранилища. Долгосрочным считается срок более 1000 лет, в то время как большинство хвостохранилищ выведены из эксплуатации только один или два десятилетия назад. Опыт, накопленный по состоянию этих объектов после консервации, должен быть учтен в плане консервации других хвостохранилищ.

## Планирование и проектирование

На рисунке 5 показан процесс планирования и проектирования хвостохранилища.

Оценка альтернативных вариантов расположения является одним из первых этапов планирования и разработки концепции проекта. Выбор площадки для хвостохранилища является основой процесса планирования и влияет на все последующие решения и планирование. При оценке альтернативных вариантов необходимо учитывать следующие факторы:

- Характеристика рассматриваемого рудного месторождения
- Расчетные физико-механические характеристики хвостов
- Расчетные характеристики доступных материалов и грунтов для насыпных ограждающих дамб хранилища
- План контроля качества и баланса воды. Контроль за загрязнением воздуха
- Прочие воздействия на окружающую среду

Для каждого из альтернатив размещения хвостохранилища необходимо провести скрининг (для предварительного сравнительного анализа), в которой учитываются следующие факторы:

- Основная информация о местоположении хранилища (прим. расстояние до горнодобывающих предприятий, топография участка и площадь участка для хранения хвостов)
- Расположения всего комплекса горнорудного предприятия, перечень существующей и планируемой инфраструктуры
- Флора и фауна, которые могут воспрепятствовать строительству хвостохранилища в данном участке
- Существующие опасности для участка, включая оползни, геологические разломы, геотехнические условия и гидрологические условия
- Социальные или культурные особенности
- Вопросы по консервации хвостохранилища на конкретном участке
- Предварительное технико-экономическое сравнение вариантов выбора площадок

Более детальная оценка выполняется после предварительного скрининга для детальной оценки альтернатив, прошедших предварительный скрининг. Детализация данной оценки ниже, чем при детальном проектировании, но достаточна для понимания и оценки ключевых факторов, влияющих на местоположение, проектирование, строительство, эксплуатацию и консервацию. При проведении детальной оценки необходимо учитывать следующие факторы:

- План управления хвостохранилищем
- Проект консервации хвостохранилища

- Детальная топография с использованием системы лазерного формирования изображения (LiDAR)
- Коренные породы и гидрогеология
- Гидрогеология и геология поверхностных отложений
- Гидрология в пределах площади хвостохранилища
- План контроля качества и баланса воды
- Опасности природного характера
- Наземная и водная среда
- Потенциальные воздействия на археологию
- Права и интересы коренных народов и культурное воздействие
- Социально-экономические последствия
- Технико-экономическое сравнение

После выбора места расположения площадки для хранилища проводится детальное проектирование с оценкой всех этих факторов.

## Строительство

Целью строительства является возведение безопасного, устойчивого хвостохранилища, соответствующего проектным требованиям, отвечающего нормативным требованиям и обеспечивающего управление хвостохранилищем и водным балансом. Ключевыми аспектами являются начальное строительство и текущее строительство.

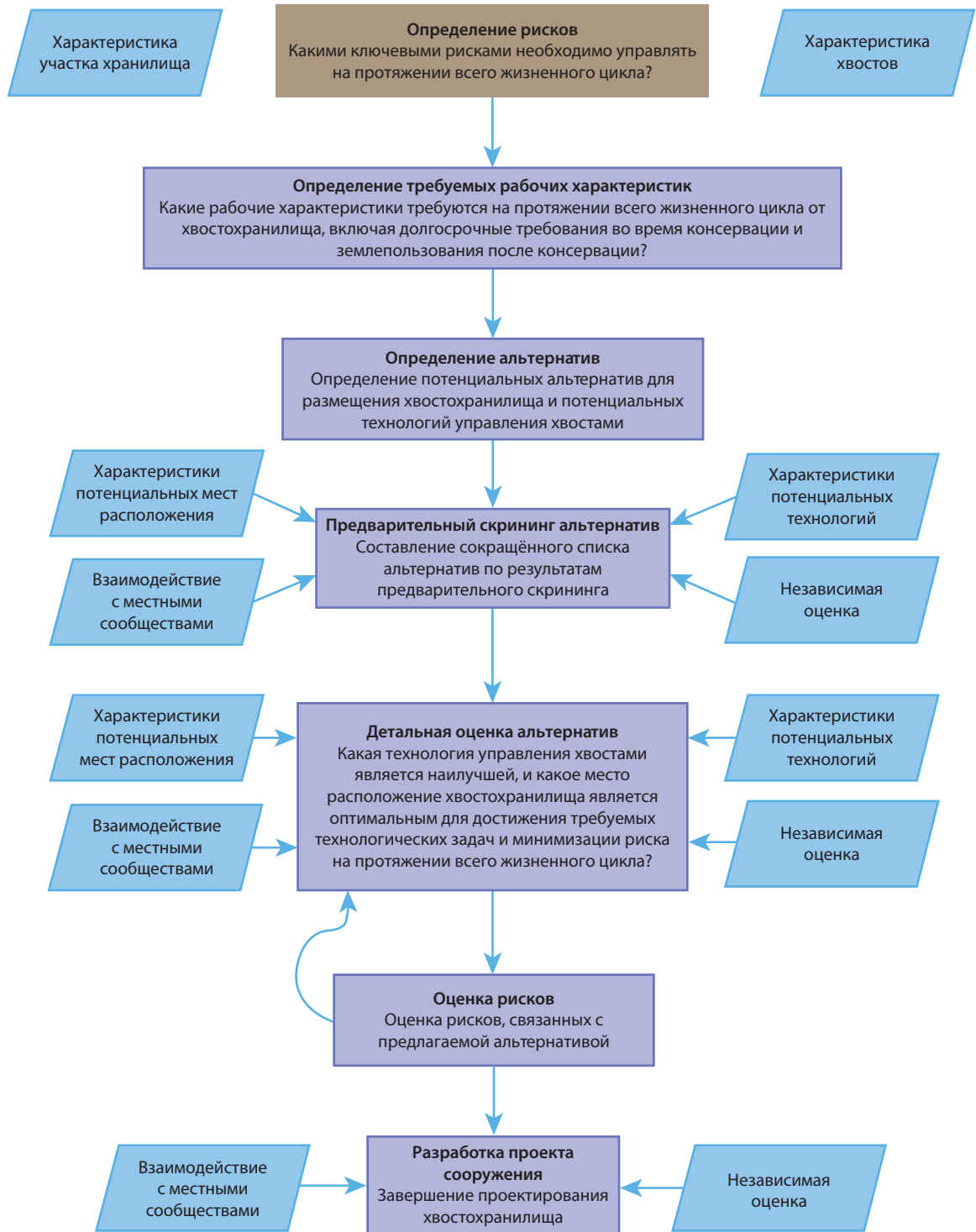
Первоначальное строительство включает в себя:

- Подготовку основания, строительство дренажных устройств и дамб первичного обвалования перед началом эксплуатации
- Реализацию плана по контролю качества
- Привлечение авторского надзора, обеспечивающего соблюдение проектных требований и стандартов
- Строительные работы, выполняемые собственником, подрядчиком или совместно

Текущее строительство включает в себя:

- Строительство дамб вторичного обвалования
- Продолжение реализации плана по контролю качества

**РИСУНОК 5. Планирование и проектирование хвостохранилища**



Источник: MAC 2017.

- Привлечение авторского надзора, обеспечивающего соблюдение проектных требований и стандартов
- Смена строительного персонала между начальным и текущим строительством. Текущее строительство обычно осуществляется работниками шахт
- Верификация проектных предположений по данным наблюдения за хвостохранилищем

## Эксплуатация

Целью на этапе эксплуатации является надлежащее хранение хвостов для сведения рисков для эксплуатации и окружающей среды во время горно-обогатительных работ и временной консервации к минимуму. Эксплуатация должна проводиться:

- В соответствии с руководством по ЭиТО
- В соответствии с законодательными требованиями
- Последовательно для достижения экологических целей
- В соответствии с планом консервации

## Консервация

Основной целью консервации месторождения должно быть обеспечение долгосрочной устойчивости физического и химического состояния, экологических и социальных условий, сохранение массива хранилища в безаварийном состоянии в течение разумно обоснованного времени. Ключевыми задачами являются:

- Рекультивация и хранение не должны требовать какого-либо текущего обслуживания или расходов, помимо обычных требований по землепользованию.
- Хвостохранилище после консервации не должно представлять неприемлемый риск для здоровья и безопасности людей.
- Хвостохранилище после консервации не должно представлять неприемлемый риск для экологии.
- Консервация территории хранилища должна предусматривать использование территории хранилища для сельского хозяйства или других народнохозяйственных целей.

## Оценка опасностей/последствий

В ходе проектирования и эксплуатации хвостохранилища необходимо проводить оценки опасности/последствий для определения рисков и управления ими. Эти оценки должны быть пересмотрены по мере необходимости в течение всего срока службы хвостохранилища. Эти оценки включают:

- Оценка опасности для окружающей среды
- Анализ возможного прорыва плотины и оценка опасности/последствий
- Геотехнические и сейсмические оценки



## Эксплуатация, Техническое Обслуживание и Наблюдение

Руководство по ЭИТО должно быть внедрено и обновляться в течение всего жизненного цикла хвостохранилища. Руководство по ЭИТО должно свидетельствовать и содержать:

- Приверженность разработке, внедрению, пересмотру и поддержанию политики в отношении управления хвостохранилищ
- Цели для планирования и стратегической деятельности, относящихся к технологическим задачам и управлению рисками хвостохранилищ
- Постоянное совершенствование системы управления хвостохранилищами
- Наличие, поддержание, внедрение и проверка внутреннего контроля и процедур для подготовки, надлежащего анализа, рассмотрения и раскрытия технической, научной, экологической и социальной информации
- Наличие эффективных, прозрачных и соответствующих уровней полномочий и компетенции для принятия решений
- Наличие систем для оценки, рекомендаций и утверждения технических, управленческих, экологических, социальных и экономических аспектов, связанных с управлением хвостохранилищ и водными ресурсами
- Наличие подтверждаемых проверкой, четко сформулированных и обновляемых критических механизмов контроля и процедур для управления рисками

## Готовность к чрезвычайным ситуациям

Во взаимодействии с соответствующими заинтересованными сторонами для каждого объекта необходимо разработать ПАГ.

ПАГ должен:

- Определять возможные аварийные ситуации, которые могут возникнуть на первоначальном этапе строительства, во время эксплуатации, а также текущего строительства и консервации, и могут представлять риск для населения, инфраструктуры и окружающей среды.
- Описывать меры по реагированию на аварийные ситуации, а также по предотвращению и смягчению воздействия на окружающую среду и безопасность на территории объекта и за его пределами.

## Основные направления и мероприятия при эксплуатации хвостохранилища

При управлении новым или существующим хвостохранилищами необходимо принять во внимание ряд мер для обеспечения надлежащего управления рисками. Ниже представлены основные меры и направления по этой теме. Дополнительные сведения также приведены в разделе «Планирование и проектирование».

### Оценка жизненного цикла

На этапе разработки концепции и планирования проекта хвостохранилища необходимо провести оценку жизненного цикла. Эта оценка должна учитывать риски проекта, которые могут возникнуть в течение срока

службы проекта. При оценке следует использовать наилучшие доступные технологии. Оценка должна учитывать требования к окончательному сроку службы, то есть требуемую проектную емкость хранилища, долгосрочные цели консервации и землепользования после консервации. На основании требования к окончательному сроку службы следует определить альтернативы и провести оценку на уровне предварительного скрининга для определения обоснованности и рисков каждой альтернативы. В ходе оценки учитываются характеристики хвостохранилища, информация о местоположении, инфраструктура, опасности, последствия, экологические и социальные аспекты, консервация и экономические аспекты.

### **Оценка опасности/последствий для территории нижнего бьефа**

После завершения оценки на уровне предварительного скрининга необходимо провести детальную оценку. В ходе детальной оценки необходимо рассмотреть опасности/последствия, которые могут возникнуть ниже по течению в случае прорыва хвостохранилища. Оценка опасности/последствий аналогична оценке для плотин и оценивает человеческие жертвы, ущерб окружающей среде и экономические последствия в случае разрушения хвостохранилища.

### **Верификация детального проектирования по результатам мониторинга и наблюдения**

Детальное проектирование является непрерывным процессом на протяжении всего срока службы хвостохранилища. Детальное проектирование должно быть завершено с учетом технологических задач, соответствующих руководств, нормативных требований и консервации. Мониторинг и наблюдения обеспечивают данные и заполняют потенциальные информационные недостатки в отношении состояния хвостохранилища. Данные мониторинга и наблюдения должны оцениваться и учитываться при проектировании и оценке в течение всего жизненного цикла хвостохранилища.

### **Готовность к чрезвычайным ситуациям**

Хвостохранилища должны проектироваться, строиться и эксплуатироваться с учетом готовности к чрезвычайным ситуациям для снижения человеческих жертв в случае прорыва или аварии. ПАГ — это инструмент для снижения риска человеческих жертв и документального подтверждения ответственности собственника за устойчивое развитие. ПАГ следует разрабатывать для каждой фазы жизненного цикла хвостохранилища.

## Приложение А: Руководства и справочная документация

ANCOLD. 2012. *Guidelines on Tailings Dams Planning, Design, Construction, Operation, and Closure*. Hobart, Australia: ANCOLD. Azam, S., Li, Q. 2010. Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years. Waste GeoTechnics. Geotechnical news.

ICMM, Principles for Responsible Investment (PRI), United Nations Environment Programme (UNEP). 2020. Global Industry Standard on Tailings Management. London: ICMM.

ICMM. 2016. Review of Tailings Management Guidelines And Recommendations For Improvement. Prepared by Golder Associates. London: ICMM.

ICOLD 1994. *Bulletin 97: Tailings Dams—Design of Drainage*. Paris: ICOLD.

———. 1995. *Bulletin 98: Tailings Dams and Seismicity—Review and Recommendations*. Paris: ICOLD.

———. 1996a. *Bulletin 103: Tailings Dam and Environment*. Paris: ICOLD.

———. 1996b. *Bulletin 104: Monitoring of Tailings Dam*. Paris: ICOLD.

———. 1996c. *Bulletin 106: A Guide to Tailings Dams and Impoundments*. Paris: ICOLD.

———. 2001. *Bulletin 121: Tailings Dams: Risk of Dangerous Occurrences*. Paris: ICOLD.

———. 2011. *Bulletin 139: Improving Tailings Dam Safety - Critical Aspects of Management, Design, Operation and Closure*. Paris: ICOLD.

———. 2013. *Bulletin 153: Sustainable Design and Post-Closure Performance of Tailings Dams*. Paris: ICOLD.

———. 2020. *Bulletin 181. Preprint: Tailings Dam Design, Technology Update*. Paris: ICOLD.

International Standards Organization (ISO).

———. 2015. ISO 9000 - Quality Management. Geneva: ISO

———. 2015. ISO 14000 - Environmental Management. Geneva: ISO

———. 2018. ISO 31000 – Risk Management - Principles and Guidelines. Geneva: ISO

MAC. 2017. *Developing and Operation, Maintenance, and Surveillance Manual for Tailings and Water Management Facilities, Second Edition*. Ottawa: MAC.

———. 2019. *A Guide to Management of Tailings Facilities, Third Edition*. Ottawa: MAC.

United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). 2014. *Safety Guidelines and Good Practices for Tailings Management Facilities*. Geneva: UNECE.

World Mine Tailings Failure. <https://worldminetailingsfailures.org/>

В дополнение к ANCOLD, ICMM, ICOLD, ISO, MAC, PRI, UNEP и UNECE, выпустивших вышеуказанные и прочие полезные рекомендации, существуют и другие международные организации, регулирующие органы и отрасли, которые также разработали качественные технические руководства для помощи в проектировании, строительстве и эксплуатации хвостохранилищ. Среди них:

- Правительство Австралии, Министерство Промышленности, Науки, Энергетики и Ресурсов: Передовые Практики в Программах Устойчивого Развития Горнодобывающей Промышленности
- Канадская Ассоциация Плотины
- Правительство Канады, Министерство Охраны Окружающей Среды и Изменения Климата Канады
- Европейский Союз, Директива и справочный документ по наилучшим доступным технологиям
- Международный Институт Использования Цианида (ICMI): Международного кодекса обращения с цианидом для производства, транспортировки и использования цианида в производстве золота

- Правительство Южной Африки, Национальные стандарты Южной Африки (SANS) 10286 1998 г.
- Федеральное агентство по управлению чрезвычайными ситуациями США
- Правительство штата Виктория, Департамент занятости, районов и регионов (Секция земельных ресурсов)
- Правительство штата Западная Австралия, Департамент горнодобывающей и нефтяной промышленности

## Приложение В: История прорыва хвостохранилища: Córrego do Feijão

25 января 2019 года на хвостохранилище № 1 железорудного предприятия Córrego do Feijão, расположенное недалеко от города Брумадинью, внезапно произошел прорыв. Разрушение хвостохранилища привело к выбросу опасных хвостов, которые сразу же затопили офис горного управления, а затем хлынули вниз по течению и затопили город Брумадинью. В результате аварии TSF погибло 177 человек и 133 человека пропали без вести.

### Краткий обзор аварии

Внезапное обрушение ГТС было снято на видео и доступно по ссылке: <https://www.youtube.com/watch?v=sKZUZQytads>. На видео виден буровой агрегат на гребне плотины в момент обрушения.

В результате аварии 11.7 миллионов кубических метров опасных хвостов хлынули вниз по течению. Потoki достигали скорости 120 километров в час, и селевая масса накрыла административную территорию шахты и город Брумадинью, убив нескольких работников шахты и множество жителей прилегающей территории. В результате поток достиг реки Парапеба, оказав большое воздействие на окружающую среду и погубив диких животных и растительность.

На плотине была установлена система аварийного предупреждения, однако прорыв произошел так быстро, что рабочие не успели эвакуироваться и оповестить город, расположенный ниже по течению.

### Дамба № 1

Дамба №1 Córrego do Feijão — это хвостохранилище, спроектированное и построенное для хранения хвостов железного агломерата с рудника Córrego do Feijão. На карте В.1 показано местоположение хвостохранилища вблизи города Брумадинью в Бразилии.

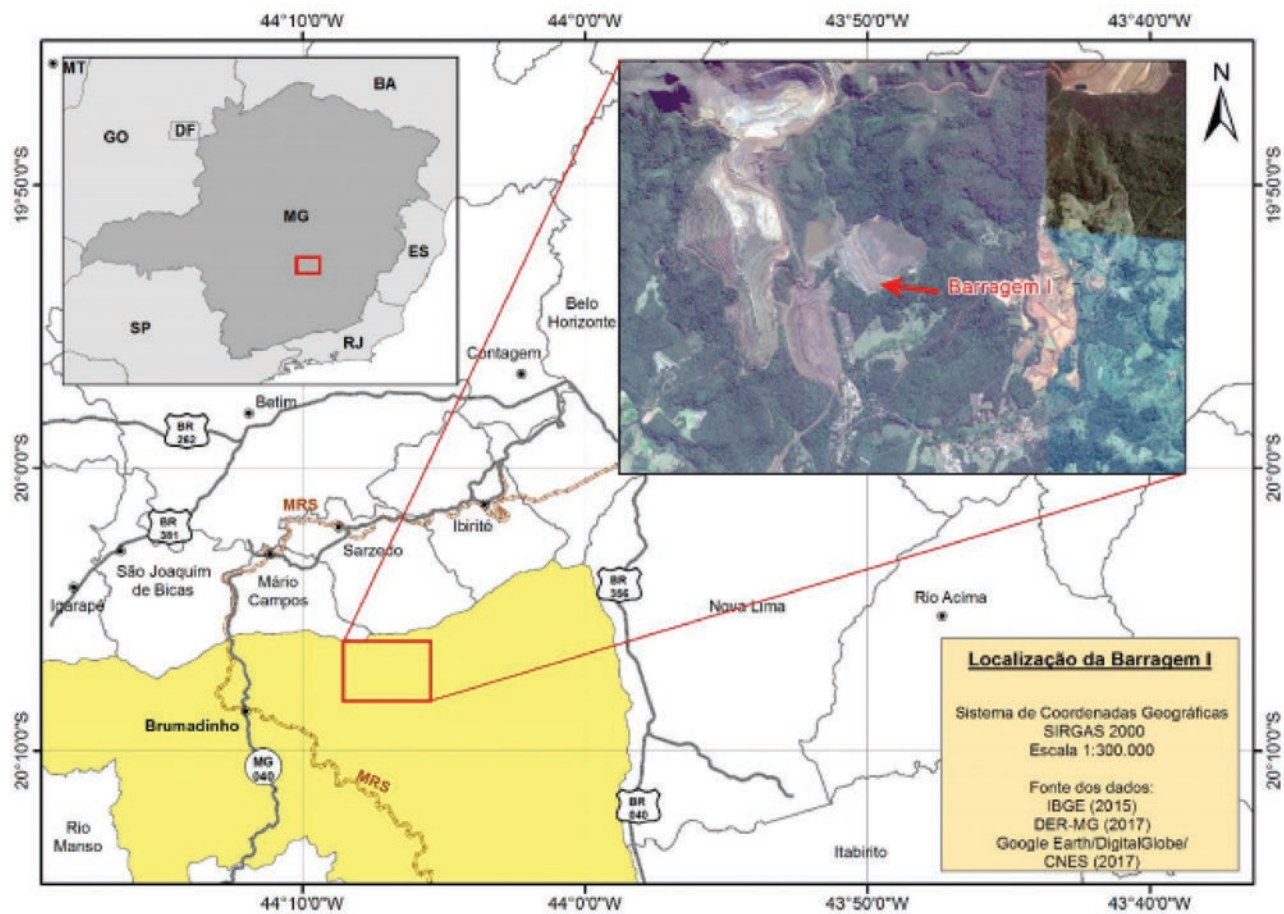
Добыча железной руды на Córrego do Feijão началась в 1963 году. Дамба № 1 была спроектирована в 1975 году, а строительство началось в 1976 году. Неизвестно, где в этот период складировались вскрышные породы и хвосты. Дамба № 1 является единственным хвостохранилищем, построенным для рудника Córrego do Feijão.

В таблице В.1 приведена история строительства хвостохранилища. На рисунке В.1 показано поперечное сечение дамб ограждения.

Дамба первичного обвалования была построена с высотой 18 метров из однородного грунта (высота гребня составляло 874 метра над уровнем моря). Уклон верхового и низового откоса дамбы составлял 1:1.5 и 1:1.75 и включал пятиметровую в ширину берму на высоте 864 м над уровнем моря. Материал тела дамбы обвалования состоял из ультрамелкозернистой руды с латеритным слоем толщиной четыре метра со стороны верхового откоса и толщиной один метр со стороны низового откоса. Дамба первичного обвалования была спроектирована Кристофом Эрбом. В документах отсутствует информация об оборудовании дамбы первичного обвалования отводящим коллектором дренажа.

Наращивание хвостохранилища производилось путем намыва/налива в сторону верхнего бьефа. Дамбы вторичного обвалования различались по высоте и были построены из уплотненных шахтных отходов, ила и глины. Для возведения дамб вторичного обвалования был привлечен второй проектировщик, компания TECNOSAN (рисунок В.1).

КАРТА В.1 Место расположения плотины



Источник: Tuv Süd 2017.

ТАБЛИЦА В.1 История строительства дамбы

Номер яруса	Год	Высота гребня (masl)	Высота дамбы (м)
1	1976	874	18
2	1982	877	21
3	1983	879	23
4	1984	884	28
5	1986	889	33
6	1990	891.5	35.5
7	1991	895	39
8	1993	899	43
9	1995	905	49
10	1998	910	54

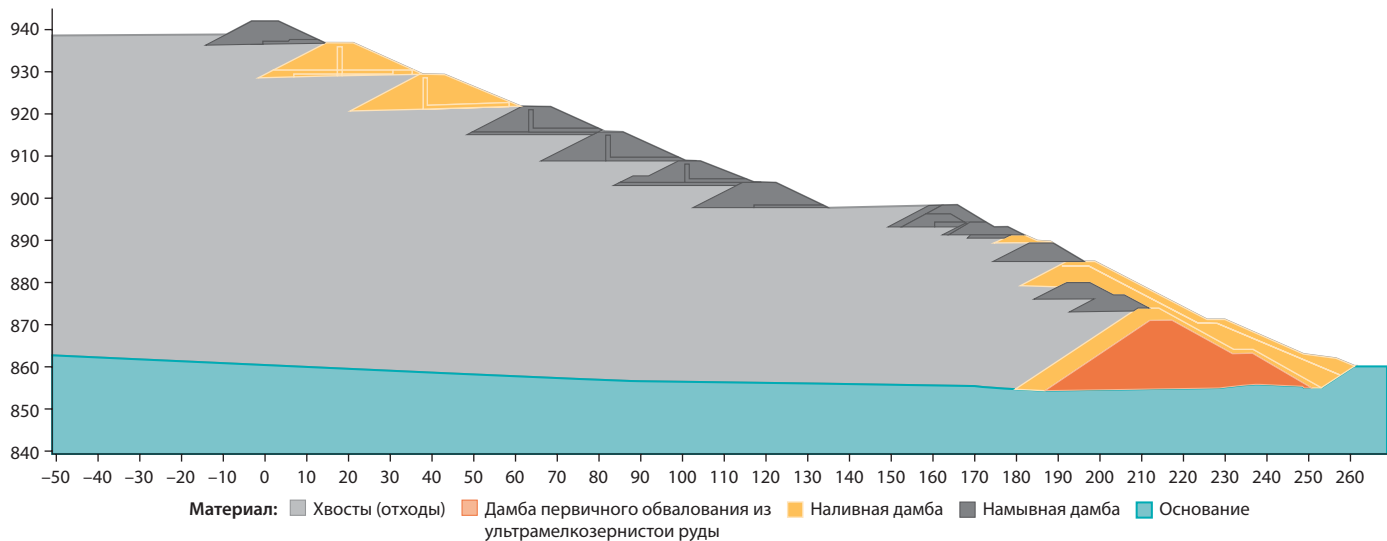
(продолжение таблицы на следующей странице)

**ТАБЛИЦА В.1** Продолжение

Номер яруса	Год	Высота гребня (masl)	Высота дамбы (м)
11	2000	916.5	60.5
12	2003	922.5	66.6
13	2004	929.5	73.5
14	2008	937	81
15	2013	942	86
Консервация	2016	Складирования хвостов прекращено	

Примечание: m = метры; masl = метры над уровнем моря.

**РИСУНОК В.1.** Поперечное сечение плотины № 1 через секцию 4-4



Источник: Tuv Süd 2017.

Подтверждение размещения дренажных устройств на ярусах с 1 по 4 дамб вторичного обвалования отсутствовало. Во время строительства четвертого яруса дамб вторичного обвалования коэффициент устойчивости составлял менее 1.3 (действующая стандартная практика). На этом этапе строительства ось плотины была смещена во сторону верхнего бьефа, в результате чего на нижней бровке откоса образовалась большая берма.

Дамбы, расположенные выше 889 метров над уровнем моря, были построены с вертикальными и горизонтальными обратными фильтрами с использованием агломерат (мелкие и средние частицы песка). Уклон верхового и низового откоса дамб был изменен на 1:2 и 1:5, соответственно.

Причины различия высоты ярусов дамб вторичного обвалования неизвестны, но в исторических документах говорится о «нагонах». Эти нагоны могли послужить причиной наращивания дамб вторичного обвалования на меньшую высоту и более медленными темпами. Независимый аудитор, компания Tuv Süd, отметила, что второй проектировщик не учел отсутствие нижнего дренажа, являющийся важной мерой обеспечения безопасности

плотины, которая не была учтена в проекте и строительстве хвостохранилища. В 2016 году складирования хвостов было остановлено.

Изначально хвостохранилище было спроектировано с проектной высотой 87 метров и объемом хранилища 12 миллионов кубических метров. На момент аварии общая высота хвостохранилища составляла 86 метров, а объем складированных хвостов - 11.7 миллионов кубических метров.

## Мониторинг

Для мониторинга состояния плотины № 1 была разработана программа наблюдений. Программа наблюдения включала мониторинг КИА, визуальный наблюдения и техническое обслуживание.

Приборы, установленные на плотине № 1, включали:

- 93 пьезометра
- 37 указателей уровня воды
- 7 маркеров поверхности
- 53 точки для измерения расхода через дренаж
- 1 расходомер
- 2 инклинометра
- 1 плювиометр

Показания приборов записывались ежемесячно, а визуальные осмотры проводились каждые две недели.

Компания Tüv Süd, провела независимую периодическую оценку безопасности плотины в 2017 году. В отчете был отмечен существенный приток воды в субгоризонтальные дренажи и ряд нарушений, связанных с наличием трещин и скоплением воды в каналах коллекторов, что вызывало частичное водонасыщение на откосах и необходимость укрепления низового откоса на высоте 895м над уровнем моря, где ранее произошел сползание откоса.

## Устойчивость

В Бразилии действуют технические стандарты по безопасности и устойчивости хвостохранилищ. Новейшее издание технического стандарта NBR-13028 было выпущено в 2017 году. NBR-13028 предписывает минимальный коэффициент устойчивости равный 1,5. Данное требование соответствует международным рекомендациям.

Дамба № 1 была первоначально спроектирована с минимальным коэффициентом устойчивости 1.3 для проектной высоты и объема хранилища. На тот момент это соответствовало техническим стандартам Бразилии по устойчивости откосов. При проектировании прочностные характеристики хвостов учитывались при их неводонасыщенном состоянии.

Компания Tüv Süd провела оценку безопасности хвостохранилища в 2017 году, в ходе которой была проведена детальная оценка устойчивости хвостохранилища. Рассматривались прочностные характеристики в



неводонасыщенном и водонасыщенном состоянии тела дамбы. Оценка устойчивости показала, что участок 4–4, имеющий самый крутой уклон откоса, является наиболее критическим с точки зрения безопасности плотины.

При анализе прочности для неводонасыщенного состояния дамбы в участке 4–4 коэффициент устойчивости составил 1.6, что превышает минимальный коэффициент устойчивости по стандарту NBR- 13028, равный 1.5.

Коэффициент устойчивости при водонасыщенном состоянии тела дамбы на участке 4–4 составил 1.09. Прочность при водонасыщенном состоянии была применена для моделирования разжиженных (статических) условий хвостов. Однако, примененная прочность была пиковой, а не остаточной. Остаточная прочность должна применяться для понимания устойчивости дамбы после возникновения разжижения. Стандарт безопасности плотин в Бразилии не предусматривает минимального значения коэффициента устойчивости при статическом разжижении.

Статическая разжижение является одной из проблем, возникающих в хвостохранилищах. В публикации МКБП 2011 говорится:

*Если рыхлая и водонасыщенная масса хвостов формирует часть дамбы или ее основания, то может произойти разжижение хвостов... В ряде случаев разжижения наблюдается «триггерный» эффект, например вибрация от взрывных работ, или от прохождения оборудования, вызывающего вибрацию, или любое другое изменение нагрузки, которое вызывает начало процесса разжижения.*

В ходе периодической оценки безопасности 2017 году было установлено, что только до 2.6 процента водонасыщенных хвостов подвержены статическому разжижению. Это заключение было основано на рыхлом (низкой плотности) состоянии и контракционном поведении (легко подверженные к разрушению) грунтов. При оценке использовались данные испытаний грунта коническим зондом. Компания Tüv Süd признала наличие неточностей (ошибок) в интерпретируемых параметрах, полученных на основе данных испытаний грунта коническим зондом.

Оценка состояния дамбы хвостохранилища была основана на прочностных характеристиках неводонасыщенных грунтов и коэффициент устойчивости составлял 1.6. Результаты анализа устойчивости с использованием водонасыщенного состояния грунтов были расценены как крайне маловероятный сценарий, ассоциировавшийся со статическим разжижением и требовавший триггерное событие. На самом деле большинство хвостов, скорее всего, были в водонасыщенном состоянии и представляли фактические условия на хвостохранилище без разжижения.

Промежуточная оценка безопасности 2017 года указала на ограниченность методов анализа устойчивости и необходимость более детального анализа наряду с улучшением определения геотехнических параметров хвостохранилища. В отчете оценки было рекомендовано провести геотехническое исследование и установка новых пьезометров, проведения дополнительных натурных испытаний и отбор проб.

Tüv Süd рекомендовала принять меры, снижающие вероятности возникновения триггерных событий для статического разжижения, в том числе исключение работ, вызывающих вибрации, запрет на взрывные работы вблизи хвостохранилища и недопущение движения тяжелой техники по дамбы. Tüv Süd также выразила свое беспокойство по поводу других работ по дренажированию, отметив, что эти операции являются очень непростыми,

а буровые работы представляют риск для устойчивости хвостохранилища. На видеозаписи в момент прорыва видно, что во время аварии на плотине присутствовала буровая установка. Для определения конкретных причин прорыва необходимы дальнейшие расследования.

### **Факторы, способствующие аварии**

Авария плотин, как правило, не являются внезапным событием, возникающим из-за одного фактора, события или ошибки. Аварии часто являются результатом целой цепи событий, которые начинаются еще на этапе строительства. В рамках программы обеспечения безопасности плотины собственник обязан постоянно оценивать и контролировать состояние сооружения. В данном разделе освещаются некоторые из потенциальных факторов, способствовавших прорыву дамбы № 1. Эти способствующие факторы обобщены из публикации «Прорыв хвостохранилища Córrego Do Feijão» (Баукер, 2019).

Изменения следующих компонентов во время проектирования и раннего срока службы хвостохранилища, вероятно, повлияли бы на долгосрочное состояние:

- Выбранный метод строительства
- Параметры и физико-механические характеристики хвостов
- Устройство откосов дамб
- Дренажные устройства
- Ремонтно-восстановительные работы
- Эксплуатация и проектирование

### **Выбранный метод строительства**

Проект хвостохранилища предусматривал строительство методом наращивания путем намыва/налива дамб вторичного обвалования в сторону верхнего бьефа. Строительство по данному методу является наиболее экономичным, но требует больших усилий при проектировании и может быть более сложным. Строительство путем намыва/налива дамб вторичного обвалования в сторону верхнего бьефа требует большей проработки системы сбора дренажа и понимания свойств хвостов, так как это влияет на устойчивость хвостохранилища. Эксплуатационные требования больше касаются метода намыва/складирования хвостов и поддержания надлежащего водного баланса. Эти проблемы не были должным образом учтены при проектировании и эксплуатации.

Исходные строительные документы хвостохранилища были недоступны. Отсутствие этих документов также способствовало недостаточному знанию конструкции.

### **Параметры и физико-механические характеристики хвостов**

Хвостовые отложения на Córrego do Feijão представляют собой агломерат мелких фракций. Во время проектирования хвостохранилища агломерационные отходы были охарактеризованы как «легко дренируемые». В 2010 году испытания на гранулометрический состав показали, что содержание мелких частиц в агломерационных хвостах было больше, чем указано в первоначальном проекте. Известно, что агломерационная крошка быстро

впитывает и медленно отводит воду. Низкопроницаемые материалы не подходят для использования в качестве строительного материала со стороны верхнего бьефа дамб, поскольку при постоянной нагрузке они могут создавать высокое фильтрационное давление при плохом дренаже. Высокое фильтрационное давление приводит к снижению прочности и возможному разрушению склона.

Кроме того, в первоначальной спецификации были указаны материалы, содержащие менее 60 процентов песка. В соответствии с передовой практикой для строительства со стороны верхнего бьефа необходимо использовать материал с более 60 процентам песка, что позволяет получить легко дренируемый устойчивый материал.

### **Устройство откосов дамб**

Первоначальный проектный уклон верхового откоса составлял 1.5:1, более крутой по сравнению с рекомендуемым в настоящее время уклоном 3:1. Более крутые склоны менее устойчивы и в большей степени зависят от хранящихся хвостов для обеспечения общей устойчивости хвостохранилища.

### **Дренажные устройства**

На хвостохранилище не была предусмотрена надлежащая система дренажа и коллекторов для отвода воды из складированных хвостов и их консолидации. Консолидация - процесс, в ходе которого вода вытесняется из хвостов, делая их более твердыми и прочными, что повышает их устойчивость. Особенности дренажной системы хвостохранилища включали:

- Отсутствие труб, которые обычно сооружаются вместе с дамбой первичного обвалования вдоль дна хранилища и основания плотины, для дренажа и отвода воды.
- До высоты 889 м над уровнем моря не было установлено ни одной трубы для сбора дренажа в пределах хранящихся хвостов. Эти трубы предусмотрены на промежуточных уровнях, чтобы обеспечить более короткий путь дренажа и обеспечить консолидацию хвостов.
- Дамбы до 889 м над уровнем моря не имели противоточные и дренажные зоны для защиты от суффозии и повышения порового давления. Это является базовой защитной проектной мерой для плотин водохранилищ.

### **Ремонтно-восстановительные работы**

Дамба № 1 была единственным хвостохранилищем для рудника, следовательно для поддержания бесперебойной работы обогатительной фабрики, хвостохранилище должно было непрерывно принимать хвосты. Исторически сложилось так, что отсутствие резервирования хвостохранилищ и невозможность остановки намыва хвостов в хвостохранилище, способствовали возникновению аварий.

### **Эксплуатация и проектирование**

Непрерывный замыв хвостов не является причиной проблем. Проблемы и аварии возникают, когда условия порового давления в хвостохранилище не изучены должным образом. Нижеследующие условия являются потенциально негативными последствиями эксплуатации в таких условиях:

1. При намыве новых хвостов нагрузка на нижележащие хвосты возрастает.
2. Состояние нижележащих хвостов зависит от обеспечения дренажа, метода и скорости намыва хвостов (образование пляжей), и водного баланса.
3. При недостаточном дренаже или быстром намыве хвостов, хвосты обычно не успевают консолидироваться, то есть они находятся в том же состоянии, в каком были при намыве (низкая прочность).
4. Намыв хвостов сверху неконсолидированных нижележащих хвостах, приводит к повышению порового давления в хвостах.
5. Увеличение порового давления приводит к снижению прочности (без деформации) и увеличению вероятности статического разжижения или разрушения откосов.
6. Статическое разжижение приводит к минимальной (так называемой остаточной) прочности при внезапных больших смещениях откоса.

Как минимум для хвостов ниже отметки 884 метров над уровнем море, результаты анализа устойчивости с использованием прочностных характеристик неводонасыщенных хвостов не отражали фактическое водонасыщенное состояние хвостов.

В настоящее время передовой практикой стало проведение анализа устойчивости с использованием прочностных характеристик неводонасыщенных и водонасыщенных хвостов и проектирование с использованием наименьшего коэффициента устойчивости.

### **Выводы, извлеченные из аварии**

В целях предотвращения будущих аварий важно определить причину (причины) и извлечь уроки из таких трагических аварий, как дамба №1 хвостохранилища Córrego do Feijão. Причина аварии все еще расследуется, но из этого происшествия можно извлечь несколько уроков. По мере получения дополнительной информации собственникам рекомендуется использовать извлеченные уроки при управлении существующими и будущими хвостохранилищами.

Федеральные нормы являются минимальным стандартом безопасности для хвостохранилищ. Проектирование и эксплуатация хвостохранилищ в соответствии с минимальными федеральными нормами не всегда гарантирует безопасность хвостохранилища. Безопасность плотины всегда должна быть наивысшим приоритетом при проектировании, строительстве, эксплуатации, обслуживании и консервации хвостохранилищ.

- На протяжении всего срока службы хвостохранилища состояние дамб обвалования необходимо регулярно оценивать и по мере необходимости проводить ремонт в соответствии с действующими отраслевыми нормами и стандартами.
- Первоначальный расчетный критерий минимального значения коэффициента устойчивости равной 1.3 не соответствовал современным стандартам.
- Дамба № 1 разрушилась после консервации. Высота и объем хранилища были близкими к проектным значениям.

- Оценка проектирования и состояния хвостохранилища должна основываться на наименьшем значении коэффициента устойчивости, полученном в результате использования прочностных характеристик неводонасыщенных и водонасыщенных хвостов. В современных публикациях и материалах анализ, проведенный с использованием прочностных характеристик водонасыщенных хвостов, признается консервативным. Это решение было принято без полного учета неопределенностей, выявленных в их исследованиях, особенно в отношении потенциальных условий в водоносных слоях.
- Строительство намывом/наливом в сторону верхнего бьефа имеет неотъемлемые риски, которыми необходимо управлять на протяжении всего жизненного цикла хвостохранилища (т. е. проектирования, строительства, мониторинга, технического обслуживания, эксплуатации и консервации).
- Намыв хвостов и наращивание ярусов дамб обвалования с течением времени осуществлялся непоследовательно и характеризовался как «беспорядочный». Эта непоследовательность привела к тому, что на пляже хвостохранилища образовались слои низкопроницаемого материала. Это не соответствовало проектным целям.
- Надлежащая система дренажа и коллекторов является важнейшим компонентом хвостохранилищ для обеспечения консолидации и набора необходимой прочности хвостов для долгосрочной стабильности.
- Правильное понимание параметров и физико-механических характеристик хвостов является решающим фактором для правильного проектирования и управления сооружениями.
- Документация по строительству нижних ярусов дамб обвалования хвостохранилища, (ярусы с 1 по 6, 1990 г.), была недостаточно подробной.
- В разное время проектирование вели два разных проектировщика, и для строительства дамб обвалования использовалось множество различных подрядчиков. Подрядчика по строительству ярусов 3 и 5 вообще не смогли определить.
- В течение последних лет продолжается изучение явлений статического разжижения и механизмов разрушения плотин и хвостохранилищ. Сооружения должны развиваться вместе с новыми знаниями и требованиями.
- Статическое разжижение — это область современных исследований для хвостохранилищ. Правильная оценка статического разжижения и понимание его рисков имеет решающее значение для оценки состояния хвостохранилища.

## Справочная литература

Bowker, L.N. 2019. Córrego Do Feijão Tailings Failure 1/25/2019. World Mine Tailings Failures website: [https://worldminetailingsfailures.org /corrego-do-feijao-tailings-failure-1-25-2019/](https://worldminetailingsfailures.org/corrego-do-feijao-tailings-failure-1-25-2019/) Stonington, Maine.

International Articulation of Those Affected by Vale (IATAV). 2019. “One Month after Crime-Tragedy of Brumadinho International Articulation of the Affected by Vale (AV).” IATAV (May 20). <https://atingidospelavale.wordpress.com/2019/03/13/report-one-month-after-the-crime-tragedy-of-brumadinho-international-articulation-of-the-affected-by-vale-av/>.

ICOLD (2011). International Commission on Large Dams A Guide to Bulletin Improving Tailings Dam Safety. Bulletin 139.

Jamasmie, C. 2019. “Vale Says Alarms Didn’t Go Off on Time in Brumadinho Due to ‘Speed’ of Sludge,” Mining.com (February 20). <http://www.mining.com/vale-says-alarms-didnt-go-off-time-brumadinho-due-speed-sludge/>.

Pollock, E. 2019. “Manufactured Disaster: How Brazil’s Dam Collapse Should Have Been Avoided,” Engineering.com (February 18). <https://www.engineering.com/BIM/ArticleID/18557/Manufactured-Disaster-How-Brazils-Dam-Collapse-Should-Have-Been-Avoided.aspx>.

Tüv Süd Brazil. 2017. Periodic Review Dam Mine Safety Stream Bean—Dam I Technical Report for Vale SA. Sao Paulo, Brazil: Tüv Süd Brazil.



