

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2026, Том 18, № 1 / 2026, Vol. 18, Iss. 1 <https://esj.today/issue-1-2026.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/15SAVN126.pdf>

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)

2.1.14. Управление жизненным циклом объектов строительства (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Саинов, М. П. История сейсмостойкого строительства дамб хвостохранилищ в Чили и Перу / М. П. Саинов, Д. А. А. Анампа, А. И. Картышов, А. И. Крюков // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 1. — URL: <https://esj.today/PDF/15SAVN126.pdf>.

For citation:

Sainov M.P., Anampa D.A.A., Kartyshov A.I., Kruykov A.I. History of seismic safe construction of tailings dams in Chile and Peru. *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(1): 15SAVN126. Available at: <https://esj.today/PDF/15SAVN126.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 624.953

Саинов Михаил Петрович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия
Заведующий кафедрой «Энергетических и гидротехнических сооружений»
Доктор технических наук, доцент
E-mail: SainovMP@mpei.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1139-3164>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=427608
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6506150284>

Анампа Донайре Антони Анибал

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия
Аспирант
E-mail: AnampaA@internet.ru

Картышов Андрей Иванович

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия
E-mail: alexkr200413092004@mail.ru

Крюков Александр Игоревич

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»,
Москва, Россия
E-mail: kartyshova092@gmail.com

История сейсмостойкого строительства дамб хвостохранилищ в Чили и Перу

Аннотация. Чили и Перу занимают лидирующие позиции в мире по добыче цветных металлов, это требует складирования большого количества отходов переработки горных пород, которые называют хвостами. В Чили и Перу располагаются несколько сотен хранилищ. Однако строительство и эксплуатация хвостохранилищ осложняется высокой сейсмической активностью региона. В статье представлен исторический обзор случаев разрушения хвостохранилищ, а также описаны технические решения по обеспечению сейсмостойкости дамб, которые разработаны и применены в Чили и Перу.

В большинстве случаев разрушению подверглись хвостохранилища, ограждающие дамбы которых были возведены непосредственно из хвостов путём намыва. Разрушение в 1965 г. дамб El Cobre (Чили) и в 1996 г. дамбы Amatista (Перу) заставило принять меры государственного регулирования по обеспечению безопасности хвостохранилищ. Был введён полный запрет на наращивание дамб в сторону хранилища, а также установлены требования к техническим решениям дамб и геотехническому контролю укладываемого грунта.

Комплекс технических решений дамб хвостохранилищ включает требования к выбору их профиля, а также меры по защите тела дамбы от водонасыщения (дренаж и устройство противоточной перегородки). Принятые меры показали свою эффективность при мощном землетрясении 2010 года. Благодаря разработанным решениям к настоящему времени в Чили и Перу построен целый ряд хвостохранилищ, высота которых превышает 100 м.

Ключевые слова: хвосты; хвостохранилище; намывная дамба; авария; землетрясение; дренаж

Введение

Добыча металлов сопровождается образованием так называемых хвостов. Хвосты — это отходы обогащения минерального сырья, полученные путём в результате его механической обработки и состоящие из мелких фракций. Объекты размещения (хранения и захоронения) отходов горнодобывающей промышленности, соответственно, называют хвостохранилищами.

При мокром способе размещения хвосты доставляются и складываются в хвостохранилища в виде суспензии, которая состоит из воды, частиц горной породы и химических реагентов, оставшихся после процесса добычи металла из породы. Из-за наличия химических реагентов складываемые отходы могут быть токсичными и представляют опасность для человека и окружающей среды.

Резервуар хвостохранилища как правило образуется ограждающими дамбами, эти дамбы являются гидротехническими сооружениями. Разрушение дамбы хвостохранилища часто влечёт за собой большой экономический, экологический ущерб, человеческие жертвы и негативные социальные последствия. Известны катастрофические последствия разрушения хвостохранилищ El Cobre (28 марта 1965 г., Чили), Val di Stava (Италия, 19 июля 1985 г.) [1], Baia Mare (Румыния, 30 января 2000 г.), Ajka (4 октября 2010 г., Венгрия), Mount Polley (4 августа 2014 г., Канада), Brumadinho (25 января 2019 г, Бразилия), Jagersfontein (11 сентября 2022 г., ЮАР) [2].

По статистике разрушения хвостохранилищ происходят в несколько раз чаще, чем плотин водохранилищ — в среднем, ежегодно из 3500 хвостохранилищ в мире разрушаются три [3].

Одной из причин разрушения и аварий хвостохранилищ являются землетрясения, которые часто происходят в богатых рудами горных местностях [4; 5]. По статистике 14–16 % аварий хвостохранилищ вызваны землетрясениями [6; 7]. Помимо аварий чилийских хвостохранилищ известны случаи разрушения хвостохранилищ Ak-Tüz (Кыргызстан, декабрь 1964 г.) [8], Mochikoshi № 1, № 2 (Япония, 14 января 1978 г.) [5; 9; 10], Таро Canyon высотой 24 м (США, 17 января 1994 г.) [5; 11], Kayakari (Япония, 11 марта 2011 г.) [10; 12]. При разрушении хвостохранилища Ak-Tüz относительно слабое землетрясение инициировало обрушение дамбы, находившейся в предаварийном состоянии.

Проблема обеспечения сейсмостойкости ограждающих дамб хвостохранилищ является актуальной и для России, т. к. многие месторождения находятся в сейсмоопасных регионах — в Забайкалье, Магаданской области, на Алтае, в Якутии и на Камчатке.

В этой связи интерес представляет опыт обеспечения сейсмостойкости дамб хвостохранилищ таких стран, как Чили и Перу. Чили и Перу расположены в Андах, чрезвычайно сейсмически активном регионе. Именно в Андах произошло самое мощное землетрясение в истории сейсмологических наблюдений Великое Чилийское землетрясение 22 мая 1960 г., магнитуда которого достигала 9,2–9,5.

Анды богаты рудами цветных металлов (меди, золота, серебра), их добыча является одной из ключевых отраслей экономики Чили и Перу. Чили обладает 28 % мировых запасов меди и является крупнейшим её производителем [13]. Перу является вторым в мире производителем серебра и третьим по добыче меди.

Интенсивная добыча приводит к образованию большого количества отходов, которые необходимо складировать. По данным на 2022 г. [13] в Чили насчитывалось в общей сложности 742 хвостохранилища, из которых два находились в стадии строительства, 104 — в эксплуатации, 463 — не использовались, а 173 — являлись заброшенными.

Методы и принципы исследования

Для изучения опыта Чили и Перу была собрана и проанализирована информация о произошедших там авариях хвостохранилищ, вызванных землетрясениями, а также о сейсмостойких конструкциях дамб хвостохранилищ.

Сведения о хвостохранилищах Чили и Перу были получены из актуальных открытых источников, из научно-технических публикаций зарубежных авторов.

Результаты

Начальный период использования хвостохранилищ

В Перу и Чили добыча металлов осуществлялась задолго до индустриальной эпохи, но бурное развитие горнодобывающей промышленности произошло в середине XIX века. Однако к концу XIX века все руды высоким содержанием металла были исчерпаны.

Дальнейшее развитие горнодобывающей промышленности было связано с применением технологии флотации, которая позволяет эффективно отделять минералы металлов от пустой горной породы. Благодаря этому стала возможной промышленная добыча меди, в Чили она началась в 1905 г. [13].

При применении технологии флотации образуются жидкие отходы — пульпа, смесь хвостов с водой. Эти отходы могут быть токсичными, поэтому во избежание загрязнения ими окружающей среды в начале XX в. были построены первые хвостохранилища.

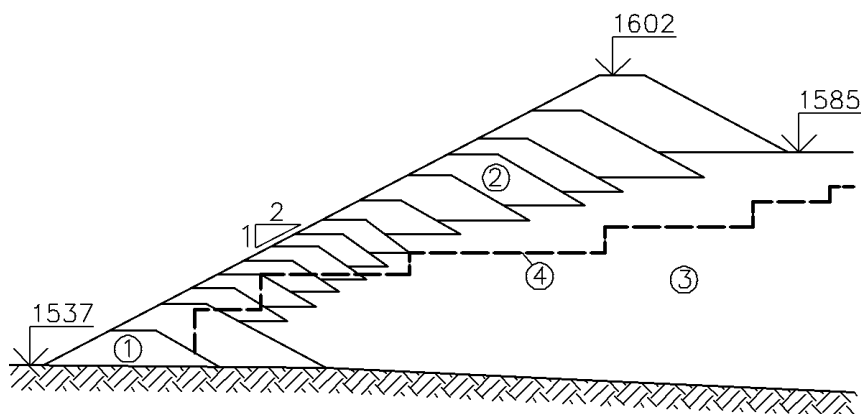
Следует отметить, что уже через нескольких лет эксплуатации эти дамбы были размывы при наводнениях [13].

Для доставки пульпы к хвостохранилищу применялся гидравлический транспорт — по стальным трубам, а также деревянным и железобетонным лоткам.

Однако вскоре устроители хвостохранилищ столкнулись с угрозой разрушения дамб вследствие высокой сейсмической активности региона.

1 декабря 1928 года в результате землетрясения магнитудой 8,2 была разрушена дамба Barahona № 1 [10; 13; 14].

Это дамба рудника El Teniente имела высоту 65 м (рис. 1), и её разрушение повлекло серьёзные последствия, в результате аварии погибли 54 человека.



1 — дамба первой очереди; 2 — ограждающие дамбочки из классифицированного песка; 3 — хвосты; 4 — примерная поверхность сооружения после обрушения

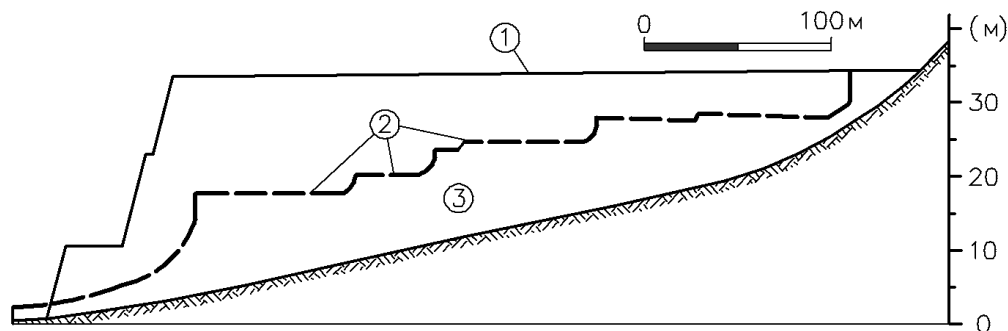
Рисунок 1. Схема состояния дамбы Varahona № 1 [10]

Аварию дамбы Varahona № 1 объясняют разжижением хвостов при землетрясении. Эта дамба возводилась путём намыва хвостов, и практически полностью состояла из них, только внешний откос был сформирован из насыпных ограждающих дамбочек. Нарращивание дамбы осуществлялось в сторону верхнего бьефа.

Несмотря на эту аварию, применение намывных дамб продолжилось. Этому способствовали успехи в развитии технологий гидромеханизации. Гидротранспорт позволил доставлять хвосты на большие расстояния. Для выделения из хвостов наиболее крупных фракции стали применять гидроциклоны. Гидроциклон — это устройство, которое использует центробежные силы в водногрунтовой смеси для сегрегации содержащихся в ней частиц по крупности и плотности. Сегрегированные (или циклонированные) хвосты стали использовать для строительства ограждающих дамб, что удешевляло строительство. Первое хвостохранилище, в ограждающей дамбе которой использовались сортированные с помощью гидроциклонов хвосты, начало функционировать в феврале 1939 года [13].

Но вновь сильные землетрясения приводили к авариям. Землетрясения стали причиной разрушения нескольких дамб и Перу. Это дамбы хвостохранилищ Casapalca (1952, примерная высота $H = 60$ м), Millpo № 3 (29 октября 1956 г., $H = 60$ м), Almivirca (18 апреля 1962 г. и 31 мая 1970 г., $H = 40$ м), Tisarampa Alianza (27 ноября 1971 г., $H = 20$ м) [15].

28 марта 1965 года землетрясение магнитудой 7,5 по шкале Рихтера вызвало разрушение в Чили двух хвостохранилищ El Cobre [10]. Эпицентр землетрясения находился в 60 км от места разрушения хвостохранилища. Одна из двух разрушенных дамб была построена в 1930 году и простаивала, использование второго хвостохранилища было начато в 1963 году. Высота самой большой из дамб составляла 36 м (рис. 2). В результате аварии погибли более 300 человек [14].



1 — профиль хвостохранилища до аварии; 2 — профиль хвостохранилища после обрушения; 3 — массив хвостов

Рисунок 2. Схема состояния хвостохранилища El Cobre [10]

Разрушение дамб произошло вследствие разжижения водонасыщенных хвостов, эти дамбы были намывными и возводились способом наращивания в верховую сторону. До разрушения осреднённое заложение внешнего откоса дамбы составляло 2,5 (угол уклона 22 градуса).

Нормативное регулирование строительства хвостохранилищ

После аварии на хвостохранилищах El Cobre в Чили стало ясно, что намывные дамбы обладают низкой сейсмостойкостью и представляют серьёзную опасность. По этой причине в некоторых проектах стали отдавать предпочтение насыпным дамбам, возводимых из карьеров скальных грунтов. Насыпными были построены дамбы Colihues высотой $H = 83$ м, El Indio ($H = 74$ м) и Los Leones ($H = 160$ м) [16]. Однако намывные дамбы требовали меньших затрат на строительство и требовалось продолжать эксплуатировать множество уже построенных намывных дамб, поэтому нужно было найти другой способ обеспечения безопасности намывных хвостохранилищ.

В 1970 г. в Чили был принят указ, регулирующий проектирование, строительство и эксплуатацию хвостохранилищ. Он рекомендовал не применять способ наращивания намывных дамб в сторону верхнего бьефа, а отдавать предпочтение способам наращивания в сторону нижнего бьефа и по центру [13; 17; 16]. Кроме того, были установлены требования к плотности укладки хвостов и было рекомендовано устраивать дренаж в основании дамбы для уменьшения их водонасыщения [16]. Был установлен нормативное значение коэффициента запаса при расчёте сейсмостойкости сооружений (1,2).

Применение новых правил положительно сказалось на обеспечении безопасности дамб хвостохранилищ. Когда 3 марта 1985 г. в Чили произошло землетрясение магнитудой 7,8, пострадали только относительно небольшие хвостохранилища. Разрушились дамба Cerro Negro высотой 30 м [10], Veta de Agua № 1 высотой 24 м [10; 13] и образовались трещины на гребне дамбы El Cobre № 4. Дамба Cerro Negro возводилась намывной с наращиванием в верховую сторону и по оси.

12 ноября 1996 г. во время землетрясения в Наске магнитудой 7,5 разрушились дамбы в Перу: Amatista и Caravelí [15]. Причиной разрушения стало разжижение хвостов [13].

Стало понятным, что принятые меры оказались недостаточными.

В 2006 году в Чили были ужесточены требования к проектированию, строительству и эксплуатации дамб хвостохранилищ, они были установлены новым указом № DS248. Был введён полный запрет на способ наращивания дамб в верховую сторону. Аналогичный запрет на был введён и в Перу. Кроме того, были введены требования к геометрическим параметрам профиля дамбы, в частности, было установлено, запас высоты дамбочек обвалования над уровнем воды в прудке должен составлять не менее 1 м [16]. Было рекомендовано увеличивать длину пляжа от дамбочек до уреза воды. Было установлено ограничение на содержание в складываемых хвостах пылеватых и тонкозернистых фракций (менее 0,076 мм) — не более 20 %. В нормах также были установлены требования к мониторингу деформаций и фильтрационного режима хвостохранилищ.

Своевременность принимаемых мер была доказана практикой. В 2010 году в Чили произошло мощное землетрясение Maule. Основное землетрясение 27 февраля 2010 г. имело магнитуду 8,8 и является шестым по силе в мире [10; 13]. Ещё несколько афтершоков произошли в марте, апреле и мае 2010 г. Землетрясение Maule повлекло разрушение нескольких чилийских хвостохранилищ [10; 18]. Разрушились хвостохранилище Las Palmas с насыпной дамбой высотой 15 м, дамба Veta de Agua высотой 17 м, дамба Bellavista высотой 14 м и была повреждена дамба Chancón.

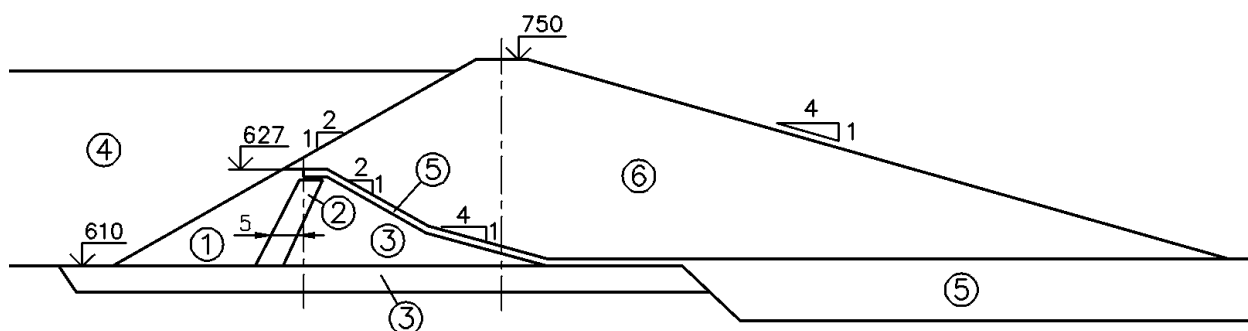
По данным [16] с начала XX века в Чили произошло 38 разрушения дамб хвостохранилищ, в большинстве случаев это дамбы высотой менее 40 м с довольно крутым внешним откосом (уклон от 1:1,2 до 1:1,7). 53 % дамб в момент аварии находились в эксплуатации, а 47 % — в состоянии консервации или закрытия.

Механизмы обрушения дамб были различными. В [16] выделены три основных механизма разрушения. По данным [16] почти 50 % аварий были вызваны разжижением грунта с последующим обрушением дамбы, 32 % — потерей устойчивостью приоткосных зон и сейсмически индуцированными деформациями, а 18 % — размывом водой, переливающейся через осевшее тело дамбы.

Однако землетрясение Maule успешно перенесла высокая дамба хвостохранилища Las Tórtolas [10]. Текущая высота дамбы составляет около 90 м.

Разработка сейсмостойких конструкций дамб

При проектировании дамбы Las Tórtolas использовались нормы 1970-х, стала первой земляной дамбой усовершенствованной сейсмостойкой конструкции (рис. 3).



1 — отсыпка глина в теле дамбы первой очереди; 2 — дренаж дамбы первой очереди из песчано-гравийного грунта; 3 — грунт полезных выемок; 4 — хранилище хвостов; 5 — пластовый дренаж из гравия; 6 — тело дамбы из циклонированных песчаных хвостов

Рисунок 3. Схема конструкции дамбы Las Tórtolas (Чили) [10]

Строительство хвостохранилища Las Tórtolas началось в 1992 г., оно продолжается до сих пор. Дамба Las Tórtolas устраивается способом наращивания в низовую сторону, возводится из циклонированных песков с коэффициентом уплотнения 0,95 [17]. Внешний откос дамбы выполняется пологим — с уклоном 1:4.

Аналогичную конструкцию имеют ещё более высокие дамбы: Quillayes (1998 г.) проектной высотой 198 м и El Mauro высотой 237 м (2006 г.). 16 сентября 2015 года неиспользовавшаяся дамба Quillayes успешно перенесла землетрясение магнитудой 8,4 [10].

Это подтверждает эффективность принятого инженерного решения о выполаживании низового откоса намывной дамбой. Кроме того, важнейшую роль в обеспечении безопасности намывных дамб играет их дренирование. Об этом свидетельствует случай плотины Adosado в Чили.

Намывная дамба Adosado высотой 13 м была выполнена с пологим низовым откосом (уклон 1:4,5). В 2009 году обследование её технического состояния показало, что хвосты имеют очень низкую плотность и высокое водонасыщение [16], поэтому её состояние было признано неудовлетворительным. Для обеспечения её безопасности были предприняты меры по понижению уровня грунтовых вод и ускорению рассеивания порового давления воды — в дамбе были выполнены дренажные траншеи. Уже в феврале 2010 г. дамба Adosado испытала землетрясение магнитудой 8,8, сейсмическое ускорение составило 0,34 g [16]. В хвостохранилище

произошло разжижение хвостов, образовались крупные трещины, но разрушения дамбы не произошло. Принятые превентивные меры позволили избежать аварии.

Крайне важным является дренирование внешней, приоткосной зоны дамбы. В инженерной практике Чили применяют правило, что циклонированные пески, из которых выполняются ограждающие дамбочки, должны быть как минимум в 100 раз более проницаемыми по сравнению с хвостами [16]. По данным [16] коэффициент фильтрации циклонированных песков составляет от 10^{-3} до 10^{-4} см/с.

Принятые меры нормативного регулирования и разработанные технические решения в Чили и Перу достигли ожидаемого эффекта, об свидетельствуют успехи строительства высоких хвостохранилищ. В [10; 17] перечислены несколько дамб Чили и Перу, проектная высота которых превышает 100 м. Такую высоту имеют дамбы из циклонированного песка: в Чили — Los Quillayes (198 м), El Mauro (237 м), Ovejería (130 м), Las Tortolas (150 м), Quebrada Blanca (310 м), в Перу — Quebrada Linga (305 м), Quebrada Enlozad (200 м), Quebrada Honda (180 м), Quebrada Cortadera (300 м).

В высоких дамбах для защиты насыпи от водонасыщения выполняют противofiltrационный экран из геомембраны. Примером является хвостохранилище Los Quillayes с дамбой высотой 198 м [17].

Кроме того, в Перу и Чили выполнен ряд высоких каменно-набросных дамб: в Чили — Candelaria (160 м), Los Diques (156 м), Andacollo (150 м), Los Leones (160 м), в Перу — Quebrada Ayash (265 м), Las Bambas (220 м), Constancia (170 м), Quebrada Tunshuruco (245 м), Antamina (130 м).

Отдельно следует проинформировать о расчётном обосновании сейсмостойкости хвостохранилищ Чили. Национальный стандарт № DS248 предусматривает выполнение оценки устойчивости в четыре этапа [19]. На первом этапе выполняется расчёт псевдостатическим методом исходя из предположения полного разжижения хвостов. На втором этапе псевдостатическим методом выполняется упрощенная оценка порового давления воды. На третьем этапе расчёт выполняется динамическим методом с помощью численного моделирования. На четвёртом этапе расчёт сейсмостойкости выполняется для закрытого, неэксплуатируемого хвостохранилища.

В 2015 г. в Чили был утверждён национальный стандарт, устанавливающий требования к расчётному обоснованию сейсмостойкости хвостохранилищ [19]. Расчёты по динамической теории выполняются только для хвостохранилищ высотой более 30 м и объёмом более 30 млн м³. Они должны быть рассчитаны на землетрясения магнитудой 8,5.

В [20] приведён пример современного расчёта сейсмостойкости одного из хвостохранилищ в Перу.

Заключение

1. В истории строительства и эксплуатации Чили и Перу хвостохранилищ неоднократно сталкивались с масштабными авариями, вызванными сейсмическими воздействиями. Это привело к необходимости решить проблему сейсмостойкости дамб хвостохранилищ и к настоящему времени в решении этой проблемы достигнут значительный прогресс.
2. В хвостохранилищах Чили и Перу чаще других применяются дамбы намывного типа. Для обеспечения их сейсмостойкости применяют ряд принципиальных технических решений. Во-первых, в этих странах осуществлён полный отказ от способа наращивания ограждающих дамб в сторону верхнего бьефа. Во-вторых,

внешний откос выполняется пологим, с уклоном 1:4. В-третьих, для недопущения водонасыщения тела дамбы выполняют ленточный дренаж основания и противофильтрационный экран верхового откоса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Simeoni L., Tosatti G., Lucchi G., Longo M. The Stava catastrophic failure of July 19, 1985 (Italy): technical-scientific data and socioeconomic aspects // City Safety Energy. 2017. 1. Pp. 17–30. URL: <https://journals.lepenseur.it/index.php/cse/article/view/111> (дата обращения 04.02.2026).
2. Marais L., Kemp D., Watt P., Matebesi S., Cloete J., Harris J., Ang Li Ern M., Owen J.R. The catastrophic failure of the Jagersfontein tailings dam: An industrial disaster 150 years in the making // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2024. 109. 104585. DOI: 10.1016/j.ijdr.2024.104585.
3. Lyu Z., Chai J., Xu Z., Qin Y., Cao J. A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History // Advances in Civil Engineering. 2019, 4159306. DOI: 10.1155/2019/4159306.
4. Kossoff D., Dubbin W.E., Alfredsson M., Edwards S.J., Macklin M.G., Hudson-Edwards K.A. Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation // Applied Geochemistry. 2014. 51. Pp. 229–245. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2014.09.010.
5. Lyu Z., Chai J., Xu Z., Qin Y., Cao J. A Comprehensive Review on Reasons for Tailings Dam Failures Based on Case History // Advances in Civil Engineering, 2019. 4159306. DOI: 10.1155/2019/4159306.
6. Piciullo L., Storrøsten E.B., Liu Z., Nadim F., Lacasse S. A new look at the statistics of tailings dam failures // Engineering Geology. 2022. 303, 106657. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106657.
7. Stark T.D., Moya L., Lin J. Rates and Causes of Tailings Dam Failures // Advances in Civil Engineering. 2022. 7895880. DOI: 10.1155/2022/7895880.
8. Жолочубеков Н.Ж., Дженбаев Б.М., Баширова Н.М. Загрязнение радионуклидами почв месторождения Ак-Тюз и его окрестностей // Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. 2018. № 6. С. 37–39.
URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36423545_29316384.pdf (дата обращения 04.02.2026).
9. Okusa S., Anma S. Slope failures and tailings dam damage in the 1978 Izu-Ohshima-Kinkai earthquake // Engineering Geology. 1980. 16(3-4). Pp. 195–224. DOI: 10.1016/0013-7952(80)90016-2.
10. Valenzuela L. Design, construction, operation and the effect of fines content and permeability on the seismic performance of tailings sand dams in Chile // Obras y Proyectos. 2016. 19. Pp. 6–22. DOI: 10.4067/S0718-28132016000100001.
11. Harder Jr.L.F., Stewart J.P. Failure of Tapo Canyon tailings dam // Journal of Performance of Constructed Facilities. 1996. 10(3). Pp. 109–114. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3828(1996)10:3(109).
12. Ishihara K., Ueno K., Yamada S., Yasuda S., Yoneoka T. Breach of a tailings dam in the 2011 earthquake in Japan // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2015. 68. Pp. 3–22. DOI: 10.1016/j.soildyn.2014.10.010.

13. Cacciuttolo, C., Atencio, E. Past, Present, and Future of Copper Mine Tailings Governance in Chile (1905–2022): A Review in One of the Leading Mining Countries in the World // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022, 19, 13060. DOI: 10.3390/ijerph192013060.
14. Williams D.J. Lessons from Tailings Dam Failures — Where to Go from Here? // *Minerals*. 2021. 11, 853. DOI: 10.3390/min11080853.
15. Quintana-Castro J.J., Salas-Cachay L.R., Espinoza-Ayala K.K., Escalante-Pillaca G.H., Cubas-Parimango N.O., Gallarday-Bocanegra T.E., BediaGuillen C.S., Guia-Pianto M.B., Soto Juscamayta L.M. Historical Cases of Tailings Dam Failures in Peru: An Analysis of The Triggering Factors // *International Journal of Religion*. 2024. 5(11). Pp. 8494–8518. DOI: 10.61707/x7xfvp19.
16. Villavicencio G., Espinace R., Palma J., Fourie A., Valenzuela P. Failures of sand tailings dams in a highly seismic country. *Canadian Geotechnical Journal*. 2014. 51. Pp. 449–464. DOI: 10.1139/cgj-2013-0142.
17. Cacciuttolo C., Pastor A., Valderrama P., Atencio E. Process Water Management and Seepage Control in Tailings Storage Facilities: Engineered Environmental Solutions. Applied in Chile and Peru // *Water*. 2023, 15. 196. DOI: 10.3390/w15010196.
18. Verdugo R., Sitar N., Frost J.D., Bray J.D. Candia G., Eldridge T., Hashash Y., Olson S.C., Urzua A. Seismic Performance of Earth Structures during the February 2010 Maule, Chile, Earthquake: Dams, Levees, Tailings Dams, and Retaining Walls // *Earthquake Spectra*. 2012. 28(51). Pp. S75–S96. DOI: 10.1193/1.4000043.
19. Olivares J., Pastén C., Monsalve K., Novoa G., Gesche, R. Seismic coefficients adopted in the design of Chilean tailings dams. 2025. 38. 4–26. DOI: 10.21703/0718-2813.2025.38.3628.
20. Salvador C., Robles F., Romanel C. Seismic behaviour of a tailings dam in Peru. 10th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering. 2023. DOI: 10.53243/NUMGE2023-383.

Sainov Mikhail Petrovich

National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia

E-mail: SainovMP@mpei.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1139-3164>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=427608

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6506150284>

Anampa Donayre Anthony Anibal

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

E-mail: AnampaA@internet.ru

Kartyshev Andrei Ivanovich

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

E-mail: alexkr200413092004@mail.ru

Krutykov Alexander Igorevich

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia

E-mail: kartyshova092@gmail.com

History of seismic safe construction of tailings dams in Chile and Peru

Abstract. Chile and Peru are the world leaders in extraction of non-ferrous metals, which requires storing of a great number of rock wastes called tailings. There are hundreds of tailings storage facilities in Chile and Peru. However, construction and operation of tailings storage facilities are complicated by high seismicity of the territory. The article presents a review of tailings storage facilities failure as well as description of technical solutions on providing seismic stability of dams which were elaborated and used in Chile and Peru.

In most cases there were failed the tailings storage facilities whose protection dams have been constructed of tailings by hydraulic fill. Failure in 1965 of dam El Cobre (Chile) and in 1996 of dam Amatista (Peru) required taking measures of government control to provide safety of tailings storage facilities. It was fully prohibited to construct dams towards the tailings storage facility as well as requirements were stated on technical solutions of dams and technical control of the placed soil.

Complex of technical solutions on dams of tailings storage facilities includes requirements for selection of their profile as well as measures on protection of the dam body against water saturation (drainage and providing seepage control face). The taken measures showed their effectiveness during the strong earthquake in 2010. Due to the worked-out solutions, by present a number of tailings storage facilities with heights exceeding 100 m have been constructed in Chile and Peru.

Keywords: tailings; tailings storage facility; hydraulic fill dam; failure; earthquake; drainage