

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

BASES AND FOUNDATIONS, SUBSURFACE STRUCTURES



УДК 624.138: 624.131.4

Научная статья

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-27-47>

Обзор зарубежного опыта инженерной защиты морских берегов и склонов

А.Ю. Прокопов , Н.А. Адоньев

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ prokopov72@rambler.ru



EDN: ZBEPOK

Аннотация

Введение. При проектировании, строительстве и эксплуатации зданий и сооружений в прибрежных зонах возникает серьезная проблема инженерной защиты берегов и склонов от опасных геологических процессов, к которым относятся абразия берегов, подтопление территорий, склоновая эрозия, гравитационные (склоновые) процессы, включая активизацию оползней, и др. В результате таких процессов часто возникает значительный экономический ущерб, связанный с безвозвратной потерей ценных прибрежных территорий, деформациями зданий и сооружений, повреждением и разрушением объектов транспортной и инженерной инфраструктуры. В этой связи изучение передового зарубежного опыта инженерной защиты прибрежных территорий и оценка возможности их использования в России является актуальной научно-технической задачей.

Материалы и методы. Для подготовки обзора использовались: данные натурных наблюдений с фотофиксацией объектов инженерной защиты морских берегов и склонов, полученные авторами в период командировки в Китайскую Народную Республику (КНР) в октябре–ноябре 2023 г.; изучение и анализ литературных источников по исследуемой тематике, включая методы и технологии, применяемые в Нидерландах, Японии, США, Великобритании, Италии; обобщение и систематизация методов берегозащиты для дальнейшей разработки их классификации и оценки возможности использования в РФ.

Результаты исследования. Установлены основные принципы проектирования, современные методы и технологии берегозащиты, применяемые в КНР. К ним относятся: устройство многоуровневых защитных сооружений, включая многорядные волноломы специальной формы в сочетании со ступенчатыми подпорными стенами, вертикальные стены из забивных свай, анкерно-набрызгбетонные покрытия склонов в сочетании с металлическими сетками; террасирование в комбинации с удерживающими перекрестными (горизонтальными и вертикальными) железобетонными балками; пологие железобетонные волногасящие поверхности; защитные сетчатые сооружения и заборы от эоловых процессов и др.

Определены основные методы, применяемые в Нидерландах, Японии, США, Италии для комплексной защиты больших территорий, включая системы дамб, плотин, волнорезов, мощение берегов, регулирование потоков шлюзами и барьерами, создание искусственных защитных островов; искусственное пополнение песком; зеленые насаждения вдоль побережья; создание дюн — естественных или искусственных возвышенностей из песка или гальки, которые располагаются вдоль побережья; создание бетонных структур, каменных молов, плавучих флотсамов и даже искусственных рифов.

Отмечена важность организационных мероприятий, включая системы раннего предупреждения о штормах и цунами, системы мониторинга погоды и морских условий, а также распространение предупреждающих сообщений и эвакуационных планов для населения в зоне потенциальной угрозы.

Обсуждение и заключение. Сформулированы основные выводы по результатам обзора. Даны рекомендации о возможных направлениях совершенствования берегозащиты на Черноморском побережье Кавказа и других прибрежных зон в Российской Федерации на основе передового зарубежного опыта.

Ключевые слова: абразия берегов, опасные геологические процессы, инженерная защита берегов, склоновые процессы, волноломы, молы, террасирование, искусственные острова, дамбы

Для цитирования: Прокопов А.Ю., Адоньев Н.А. Обзор зарубежного опыта инженерной защиты морских берегов и склонов. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2024;3(1):27–47. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-27-47>

Research article

Foreign Experience Review on Engineering Protection of Seashores and Hillslopes

AYu. Prokopov , NA. Adoniev

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ prokopov72@rambler.ru

Abstract

Introduction. During design, construction and operation of buildings and structures in the coastal areas there arises a serious problem of engineering protection of coasts and hillslopes from the dangerous geological processes, which include the coastal erosion, underflooding of territories, hillslope erosion, gravitational (slope) processes, such as intensification of landslides, etc. These processes often result in significant economic damage usually related to the non-recoverable loss of valuable coastal territories, deformation of buildings and structures, damage and destruction of the objects of transport and engineering infrastructure. In this regard, the study of the advanced foreign experience in engineering protection of the coastal areas and the evaluation of the possibility of it to be implemented in Russia is a relevant scientific and engineering task.

Materials and methods. To prepare the review, the following data was used: field observation data with photographic evidences of the objects of engineering protection of seashores and hillslopes obtained by the authors during a business trip to the People's Republic of China (PRC) in October–November 2023; study and analysis of literature sources in the subject area, including the methods and technologies implemented in the Netherlands, Japan, the USA, Great Britain, Italy; summary and systematisation of the coastal protection methods for further development of their classification and evaluation of the possibility of implementing thereof in the Russian Federation.

Research results. The main principles of design, the advanced methods and technologies of coastal protection used in China have been defined. They include: construction of the multi-level protective structures, such as the multiple-row breakwaters of special shape in combination with the stepped retaining walls, the vertical walls consisting of the driven piles, anchoring and spray-concrete covering of the slopes in combination with the metal meshes; terracing in combination with the retaining reinforced concrete (horizontal and vertical) crossbeams; the sloping wave-absorbing reinforced concrete surfaces; the meshy structures and fences combating the Aeolian processes, etc.

The main methods used in the Netherlands, Japan, the USA and Italy for comprehensive protection of the large territories have been defined. Such as: the network of dams, weirs, wave breakers, coast paving, regulation of the flows by water locks and barriers, creation of the artificial protective islands; artificial replenishment with sand; creation of the green spaces along the coast; forming the dunes — natural or artificial hills of sand or pebbles located along the coast; creation of the concrete structures, stone jetties, floating constructions and even artificial reefs.

The importance of management was emphasised, including the early warning systems for storms and tsunamis, weather and marine condition monitoring systems, as well as dissemination of the warning messages and evacuation plans among the population in the areas of potential threat.

Discussion and conclusion. Based on the results of the review, the main conclusions were formulated. The recommendations were given on the possible ways of improving the coastal protection of the Caucasian Black Sea Coast and other coastal areas of the Russian Federation based on the advanced foreign experience.

Keywords: coastal erosion, hazardous geological processes, engineering protection of coasts, hillslope processes, breakwaters, jetties, terracing, artificial islands, dams

For citation: Prokopov AYu, Adoniev NA. Foreign Experience Review on Engineering Protection of Seashores and Hillslopes. *Modern Trends in Construction, Urban Planning and Territorial Planning*. 2024;3(1):27–47. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2024-3-1-27-47>

Введение. Проблема берегозащиты актуальна для прибрежных территорий всего мира, особенно в густонаселенных районах, для которых характерны плотная застройка, размещение в прибрежных зонах отелей, парков, рекреационных зон и пр. Строительство жилых комплексов в непосредственной близости от водоемов тоже становится популярным и привлекательным как с точки зрения инвесторов, так и потенциальных покупателей недвижимости.

Развитие транспортной инфраструктуры тоже часто связано с освоением прибрежных территорий, так как вдоль водоемов (рек, озер, морей) чаще наблюдается более пологий рельеф, наиболее благоприятный для строительства автомобильных и железных дорог, магистралей, к трассированию и продольным профилям которых предъявляются повышенные требования.

Однако строительство и эксплуатация зданий, сооружений, объектов транспортной инфраструктуры в непосредственной близости от водоемов связано с комплексом проблем, включающих действие климатических, гидрологических, гидрогеологических, сейсмических, тектонических, геоэкологических и других факторов. Одной из главных проблем является разрушение берегов (береговая эрозия) в результате действия речных и морских течений, волн, приливов и отливов, штормов, ураганов, цунами и других опасных природных процессов. В результате интенсивных осадков, паводков, таяния ледников может происходить переувлажнение склонов и возникать оползневые процессы [1], сдвиги и провалы земной поверхности [2], приводящие к значительному ущербу объектов жилой и транспортной инфраструктуры.

В России применяют самые разнообразные методы берегозащиты, наибольшее распространение из которых получили конструктивные методы, применяемые как на берегах рек [3], так и на морском побережье [4]. Особенное внимание уделяется мониторингу состояния объектов транспортной инфраструктуры (железным, автомобильным дорогам и искусственным сооружениям на них), расположенных в зонах потенциального разрушения берегов, активизации эрозионных и оползневых процессов [5].

Целью настоящей статьи является изучение зарубежного опыта инженерной защиты берегов и склонов, применяемых в ведущих странах мира с протяженной береговой линией — Китае, Нидерландах, Японии, США, Великобритании, Италии, — и оценка возможности использования этого опыта в гидрологических, инженерно-геологических и гидрогеологических условиях прибрежных территорий, прежде всего, Черного моря и других морей России, где требуется инженерная защита берегов.

Материалы и методы. Для подготовки обзора применялся метод натурного обследования прибрежных участков и элементов инженерной защиты, расположенных в КНР на побережье Желтого моря, включая города-курорты Шаньдунского полуострова Яньтай, Вэйхай, Жунчэн: автомобильные дороги в непосредственной близости от морского берега; набережные и побережье в черте Циндао — крупнейшего города-порта на Желтом море; заливы Цзяочжоу, Тайпинь, Лаошань и др., а также внутренние озера и водоемы провинции Шаньдун. При изучении объектов инженерной защиты выполнена их фотофиксация, результаты которой приведены в настоящей статье, произведена оценка их технического состояния, и определены конструктивные особенности.

Для обзора передового зарубежного опыта берегоукрепления в других странах использовался анализ общедоступных литературных источников, включая научные статьи, диссертации, обзоры на иностранных языках, результаты инженерных изысканий, географические и геологические карты и другие источники информации.

В результате выполненных натурных обследований и анализа литературных источников установлено следующее.

Инженерная защита берегов — это комплекс мероприятий и технических решений, применяемых для защиты береговой линии от разрушительного воздействия водных потоков, таких как реки, озера или океаны [6]. Она включает в себя различные инженерные конструкции и методы, разработанные для предотвращения эрозии почвы, обеспечения стабильности берегов и защиты соседних объектов от наводнений.

Инженерная защита берегов обычно включает в себя следующие элементы [7]:

1. Ограждения и сооружения: это могут быть насыпные или вкопанные стены, дамбы, причалы, дюкеры, мощение берегов и другие конструкции, созданные для предотвращения проникновения воды на сушу и защиты берегов от волн и течений.

2. Пляжи и наносы: создание или восстановление пляжей и песчаных наносов, которые служат естественным барьером для защиты береговой линии от эрозии.

3. Растительность и растительные насаждения: посадка растений, таких как деревья, кустарники и травянистые растения, способствует укреплению почвы и удержанию береговой линии.

4. Морские и речные стены: создание искусственных барьеров в виде стен или волнорезов для защиты берегов от прямого воздействия волн и приливов.

5. Дренажные системы: установка дренажных систем для отвода излишков воды и предотвращения накопления влаги, что может способствовать эрозии берегов.

Инженерная защита берегов является важной составляющей водоуправления и позволяет предотвращать ущерб от наводнений, сохранять природные и экологические ресурсы и обеспечивать безопасность населения и инфраструктуры, расположенной вблизи водных объектов.

Далее приведем примеры инженерной защиты берегов и склонов, применяемых в разных странах с протяженной береговой линией и имеющих риски возникновения опасных геологических процессов (абразия берегов, подтопление территорий, склоновая эрозия, гравитационные (склоновые) процессы, включая активизацию оползней, и др.).

1. Китайская Народная Республика. Китай постоянно сталкивается с проблемами эрозии берегов, особенно на побережье Желтого и Восточно-Китайского морей. В стране используются дюкеры, волнорезы, плотины и другие сооружения для защиты берегов от эрозии и приливов. Китай имеет значительный опыт инженерной защиты берегов из-за своего обширного побережья и проблем, связанных с эрозией, наводнениями и другими природными бедствиями. Страна разработала разнообразные стратегии и проекты, которые включают в себя строительство дамб, волнорезов, островных барьеров и других сооружений для защиты берегов.

В этой связи авторами в период командировки в провинцию Шаньдун (КНР) в октябре–ноябре 2023 г. был изучен опыт применения мер защиты берегов и склонов от эрозионных и оползневых процессов. Концепция берегозащиты в КНР строится на детальном научном изучении комплекса таких факторов, как теплофизические характеристики и термодинамические процессы в морской акватории [8], установленных фронтов и их динамики [9], особенностей приливов и отливов на разных участках морского побережья [10], формирования и развития штормов, тайфунов, цунами [11] и ряда других природных и техногенных факторов.

Представляют интерес конструкции многорядных железобетонных волноломов специальной формы, широко применяющихся для берегозащиты набережных в сочетании со ступенчатыми подпорными стенами и другими сооружениями (рис. 1).

Например, форма и количество рядов волноломов, используемых для защиты набережной в г. Циндао (провинция Шаньдун, КНР), подобраны таким образом, чтобы обеспечивалась их максимальная устойчивость и эффективность в части гашения энергии волн и максимального снижения динамических нагрузок на конструкции набережной. Волноломы имеют сложную форму и укладываются, сцепляясь между собой в ряду и между рядами и образуя разветвленную поверхность, направленную против фронта волн.

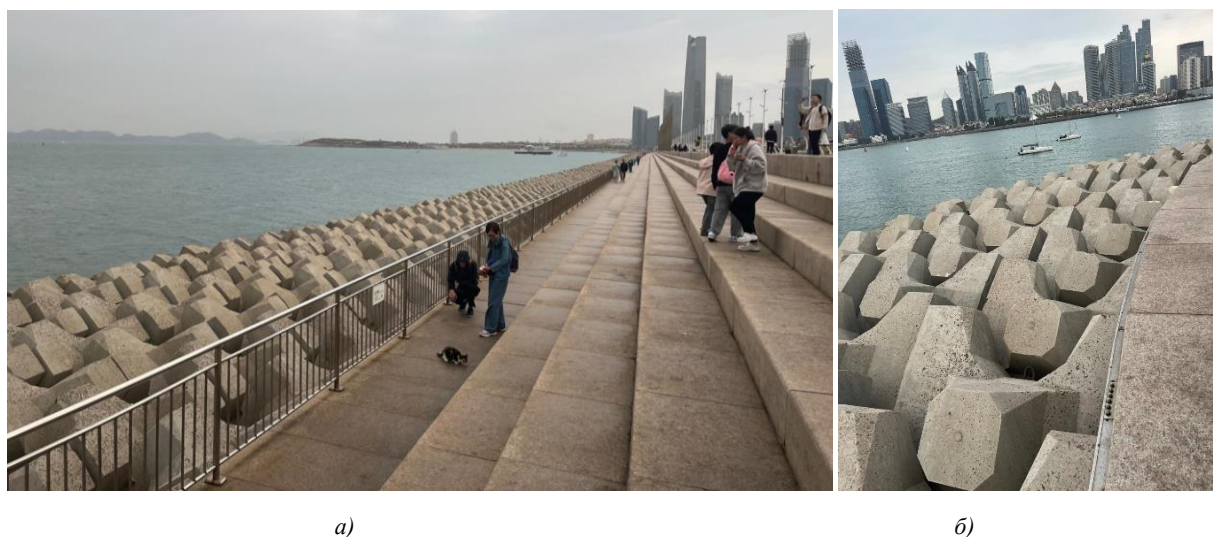


Рис. 1. Система берегозащиты набережной Желтого моря в районе Олимпийского парусного центра г. Циндао (КНР):

- а* — ступенчатая подпорная стена и многорядная защита из волноломов;
б — способ укладки железобетонных волноломов специальной формы

На закрытых участках заливов, для которых не характерно образование высоких волн со значительной энергией и турбулентностью потока, а также при наличии вдали от береговой линии дополнительных волнорезов, искусственных островов и других сооружений, гасящих энергию волн, непосредственно на берегу устраивают протяженные пологие железобетонные конструкции в виде сборных плит или монолитных участков, основной целью которых является плавное регулирование водного потока без образования интенсивного ударного воздействия волн, характерных для вертикальных подпорных стен. Такие сооружения берегозащиты (рис. 2)

позволяют постепенно гасить энергию волны, которая скользит, поднимаясь и опускаясь по поверхности такой конструкции, расположенной под углом 15–30° к горизонту. Расположение таких конструкций в плане и по высоте проектируется с учетом преобладающего направления волн и вероятного подтопления территории.

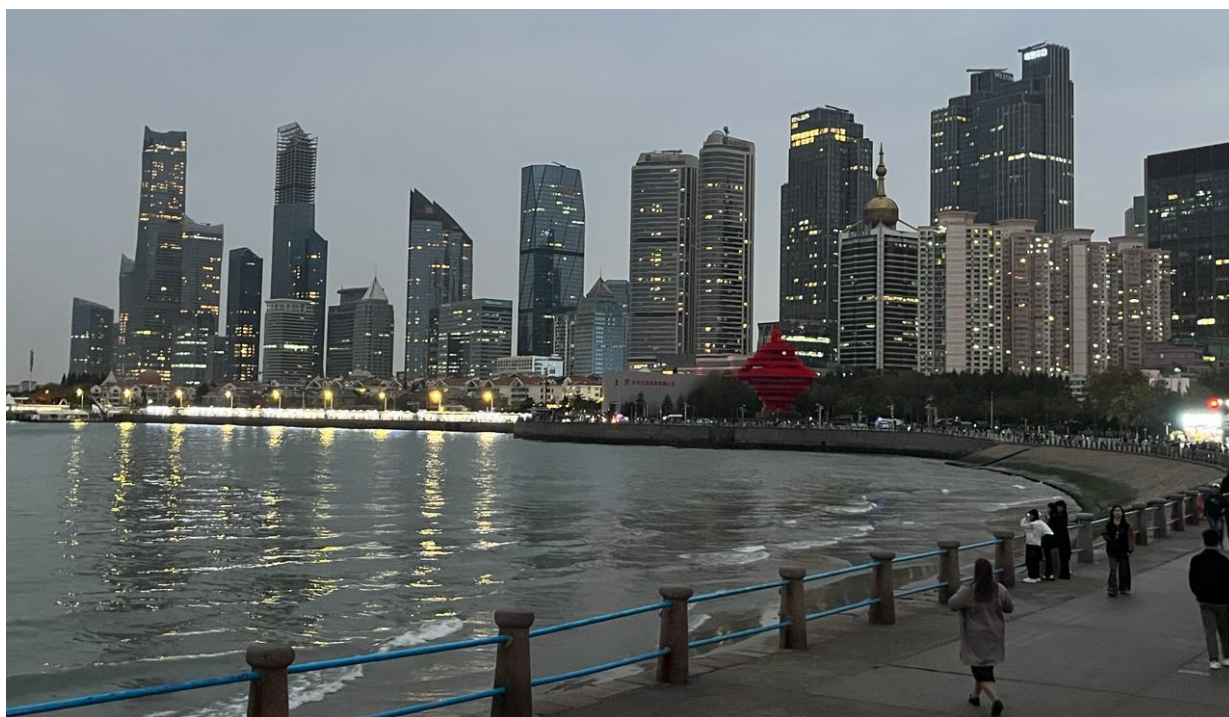


Рис. 2. Инженерная защита набережной г. Циндао (КНР) на закрытом участке залива в виде пологих наклонных железобетонных конструкций

В высокогорных прибрежных районах, для которых характерны крутые склоны, сложенные скальными или полускальными горными породами, также происходит медленная абразия, трещинообразование и разрушение склонов, при этом возникает опасность обрушения, как мелких кусков породы, так и крупных отдельных. Учитывая сверхвысокую плотность населения в восточных и юго-восточных прибрежных районах КНР, продолжается освоение даже сложных в орографическом отношении участков, на которых располагаются рекреационные зоны, национальные природные парки, оборудуются туристические маршруты и др. Поэтому проблема инженерной защиты таких территорий тоже остается весьма актуальной.

Для крутых скальных берегов используется инженерная защита с применением методов искусственного закрепления и усиления природных скальных массивов с целью снижения их трещиноватости и повышения устойчивости. В частности, находит широкое применение анкерование, многослойное набрызгбетонирование и оштукатуривание природных склонов в сочетании с возведением высоких (до 20–30 м) подпорных стен из монолитного бетона, железобетона или кладки из природного камня (рис. 3 а). По берегу моря и склонам таких национальных парков проложены и оборудованы пешеходные маршруты.

Отличительной особенностью ряда берегоукрепительных сооружений является их архитектурная выразительность с использованием китайской национальной символики и знаковости (рис. 3, б). Часть берегоукрепительных сооружений, в т. ч. сохранившихся со времен китайско-японской войны 1894–95 гг., реконструированных и восстановленных в последующие периоды, выполняла роль не только инженерной защиты, но и фортификации.

В прибрежных участках Желтого моря, даже со сложным рельефом, очень развито сельское хозяйство, в особенности чаеводство, для которого здесь сложились весьма благоприятные климатические условия. Для повышения площади чайных плантаций и одновременной защиты береговых склонов от оползневых процессов выполняется террасирование склонов с формированием горизонтальных площадок, разделенных заглубленными железобетонными или каменными подпорными стенками (рис. 4).



а)



б)

Рис. 3. Инженерная защита берегов и склонов в Национальном природном парке Чэншань (Chengshan National Scenic Area), район г. Вэйхай, КНР:

- а — комбинированное берегоукрепление с помощью набрызгбетонирования, оштукатуривания природных скал и устройства высоких подпорных стен из каменной кладки, опирающихся на скальное основание;
б — массивная каменная подпорная стенка, стилизованная под Великую китайскую стену



Рис. 4. Террасирование прибрежных склонов с устройством заглубленных вертикальных подпорных стен для использования в сельском хозяйстве (чайные плантации), район Лао Шань, провинция Шаньдун, КНР

На берегах прудов, озер и других водоемов, где не возникает значительных волн и динамических воздействий на берег, используют более простые, но тоже многоуровневые системы берегозащиты, состоящие, как правило, из вертикальных подпорных стен, набрызгбетонных покрытий и удерживающих сооружений в виде рядов забивных призматических свай. На рис. 5 показан пример такой системы берегоукрепления, применяющейся в Национальном парке на озере Чаоян Ган вблизи г. Вэйхай в провинции Шаньдун.



Рис. 5. Многоуровневая берегозащита озера Чаоян Ган (Шаньдун, КНР): металлические ограждения, железобетонная подпорная стена, набрызгбетонирование, ряд забивных призматических свай

Кроме абразии берегов и оползневых процессов, на песчаных морских берегах могут возникать эоловые процессы, обусловленные геологической деятельностью ветра, который способен перемещать большие массы песчаного грунта, тем самым нанося значительный ущерб для берегов, используемых для обустройства пляжей и других рекреационных зон. На исследованном побережье Желтого моря существуют участки с особым

ветровым режимом, используемым с одной стороны для получения ветровой энергии на многочисленных ВЭС, построенных в этом районе, но с другой стороны опасных с точки зрения переноса песчаных масс. Для защиты от таких эоловых процессов на многих песчаных пляжах и прибрежных территориях монтируют и закрепляют специальные сетчатые заграждения, препятствующие уносу песка, но не создающих большого аэродинамического сопротивления и не опрокидываемых ветром (рис. 6).

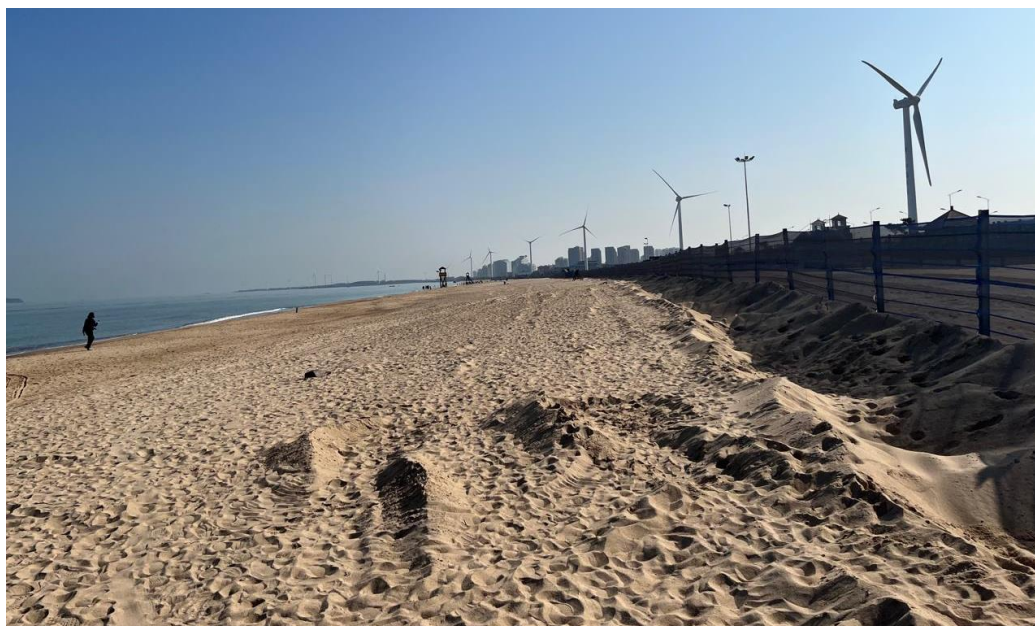


Рис. 6. Сетчатые заграждения для защиты от эоловых процессов в районах с особым ветровым режимом, пляж на побережье Желтого моря на участке Вэйхай — Жунчэн (КНР)

Для стабилизации оползнеопасных склонов в КНР разработаны и широко применяются методы террасирования в комбинации с удерживающими перекрестными железобетонными балками (рис. 7). Такое решение позволяет разбить оползнеопасный склон на небольшие участки как по высоте (террасы — не более 3–4 м), так и в плане, и удерживать каждый участок заглубленными в склон горизонтальными несущими балками, связанными вертикальными элементами.

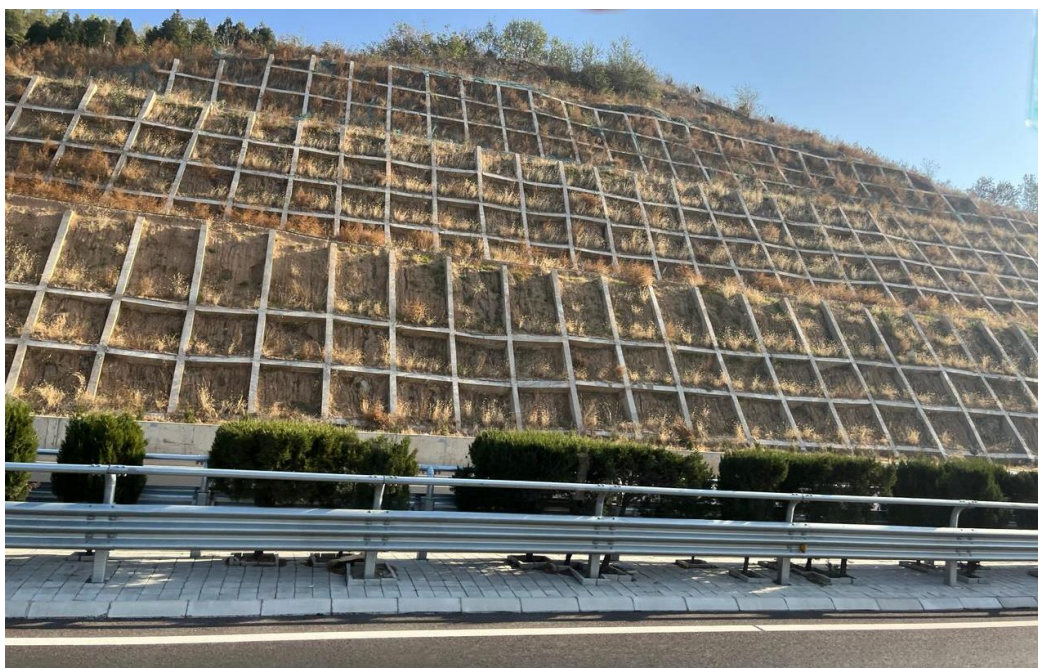


Рис. 7. Система удерживающих перекрестных сооружений в комбинации с террасированием склона вдоль скоростной автодороги G104 на участке г. Цзинань — г. Тайань, провинция Шаньдун, КНР

Одним из наиболее известных примеров инженерной защиты речных берегов в Китае является Гребной Мур, расположенный в устье Желтой реки. Гребной Мур — один из крупнейших инженерных проектов в мире, представляющий собой систему дамб, построенных для защиты берегов от наводнений и эрозии. Он состоит из серии водохранилищ, шлюзов, дамб и насыпей, которые образуют преграду для уменьшения энергии волн и стока реки.

Еще один пример — это Шанхайская набережная, где была создана крупномасштабная система волнорезов для защиты от штормов и наводнений. Волнорезы предотвращают проникновение сильных волн на берег, уменьшая их энергию и защищая население и инфраструктуру.

Китай также применяет методы искусственных островов для защиты берегов. Например, в районе Перловой реки в городе Гуанчжоу были созданы искусственные острова и противоволновые сооружения, чтобы смягчить воздействие прилива и штормов на прибрежные зоны.

В последние годы Китай активно разрабатывает и применяет инновационные технологии в области инженерной защиты берегов. Это включает в себя использование искусственного интеллекта и системы мониторинга для более точного прогнозирования приливов и волн, а также разработку экологически устойчивых решений, таких как использование природных материалов и систем водоотведения.

Опыт инженерной защиты берегов в Китае подчеркивает важность комплексного подхода и учета экологических последствий. Он включает в себя прогнозирование и управление природными явлениями, сотрудничество с научными и исследовательскими учреждениями, а также широкое обсуждение и вовлечение местных сообществ и заинтересованных сторон.

2. Нидерланды. Страна известна своими инженерными решениями в области защиты берегов и водопользования. Здесь применяются системы дамб, плотин и волнорезов, а также мощение берегов и регулирование речных потоков. Нидерланды являются одной из стран, которые активно борются с проблемой подтоплений и обеспечивают защиту своих берегов. Рассмотрим основные подходы, применяемые в Нидерландах [12, 13].

Дамбы и земляные насыпи. Нидерланды известны своими системами дамб и земляных насыпей, которые предназначены для защиты прибрежных территорий от наводнений. Система дамб называется «Дельта» и включает в себя огромные бетонные дамбы, земляные насыпи, плотины и шлюзы. Эти сооружения защищают прибрежные города и земли от приливов и штормовых нагонов (рис. 8).



Рис. 8. Карта дельты Рейна и проекта «Дельта». Синими отрезками отмечены защитные сооружения, кружками — города Роттердам и Антверпен [13]

Нидерланды имеют долгую историю борьбы с природными угрозами со стороны воды. Большая часть территории Нидерландов находится ниже уровня моря, и поэтому страна активно занимается строительством дамб и земляных насыпей для обеспечения защиты берегов.

Опыт возведения дамб и земляных насыпей в Нидерландах отражает множество технологических и инженерных достижений. Здесь реализованы инновационные подходы и передовые системы водоправления, которые обеспечивают безопасность и защиту территории страны от наводнений [14].

Одной из наиболее значимых инженерных конструкций в Нидерландах является «Дельта» (Deltawerken) — система дамб, шлюзов, барьеров и искусственных островов, которая предназначена для защиты от наводнений великого масштаба. Она была разработана и построена после наводнения в 1953 году, когда множество областей Нидерландов были серьезно затоплены.

Дельта-работы включают в себя несколько дамб, включая Зюйдерзееверкеринг (Zuiderzee Works) и Оостерсхелдекеринг (Oosterscheldekering), а также многочисленные шлюзы и барьеры. Они предназначены для контроля уровня воды и предотвращения наводнений от Северного моря.

Строительство дамб и земляных насыпей в Нидерландах основывается на современных гидротехнических принципах. Важным элементом является использование инновационных материалов и технологий, таких как специальные геотекстильные материалы, которые укрепляют землю и предотвращают смещение грунта.

Безопасность и стабильность дамб обеспечиваются постоянным контролем и техническим обслуживанием. В Нидерландах также активно исследуются и разрабатываются инновационные методы управления водными ресурсами, такие как использование плавающих фундаментов и искусственных островов.

Опыт Нидерландов в области возведения дамб и земляных насыпей может быть важным уроком для других стран, сталкивающихся с проблемами наводнений и защиты берегов. Эта страна демонстрирует, как инженерные решения и современные технологии могут помочь справиться с угрозами природы и обеспечить безопасность населения и инфраструктуры [15].

Искусственные острова. Нидерланды также создают искусственные острова и полуострова вдоль побережья, которые служат естественными барьерами для защиты береговой линии от волн и приливов. Эти острова строятся с использованием подходящих материалов, таких как песок и гравий, и засаживаются растительностью для укрепления почвы.



Рис. 9. Искусственный остров Маркен (Нидерланды) [14]

В Нидерландах опыт строительства искусственных островов для обеспечения защиты берегов является одним из ключевых аспектов их инженерных работ по управлению водными ресурсами. Искусственные острова играют важную роль в защите береговой линии от наводнений и эрозии, а также создают дополнительное пространство для жизни, работы и отдыха.

Один из примеров успешного строительства искусственных островов в Нидерландах — Маркен (Marken). Ранее Маркен был островом, но в результате строительства дамб и насыпей он был присоединен к материковой части Нидерландов. Однако, чтобы обеспечить защиту от наводнений и эрозии, было решено создать искусственный остров Маркен [14].

Остров Маркен был спроектирован с использованием современных технологий и инженерных решений. Была создана система искусственных насыпей и дамб, которые обеспечивают защиту от наводнений и укрепляют береговую линию. Кроме того, остров оснащен специальными системами дренажа и дренажными каналами, которые помогают управлять поверхностными водами и предотвращать их скопление на острове.

Искусственные острова в Нидерландах также имеют множество функций помимо защиты берегов. Некоторые из них используются для размещения промышленных и портовых инфраструктур, а также для жилых и коммерческих целей. Это позволяет оптимизировать использование ограниченной земли и предоставляет дополнительные возможности для развития и роста.

Опыт строительства искусственных островов в Нидерландах подчеркивает важность комплексного подхода к управлению береговыми зонами. Он включает в себя глубокие исследования природных условий, анализ рисков, разработку инновационных технологий и систем, а также активное взаимодействие с местным сообществом и заинтересованными сторонами.

Нидерланды являются примером успешного применения искусственных островов в качестве средства обеспечения защиты берегов и устойчивого развития. Опыт строительства и использования этих островов может быть ценным для других стран, сталкивающихся с аналогичными вызовами, и позволит им разработать и реализовать собственные инженерные решения для защиты береговых территорий [15].

Планы затопления. В некоторых районах Нидерландов, где риск наводнений высок, применяется концепция контролируемого затопления. Вместо того, чтобы бороться с природными силами, нидерландские инженеры разрабатывают планы, при которых определенные области могут быть намеренно затоплены, чтобы предотвратить проблемы в других более критических зонах. Это позволяет управлять и распределять наводнения.

Один из примеров планов затопления в Нидерландах — план «Room for the River» (Место для реки) (рис. 10). Он был разработан в ответ на угрозу повышенных уровней рек, особенно в периоды сильных дождей или таяния снега. Целью плана было создание дополнительного пространства для рек, позволяющего им разливаться и увеличивать свою пропускную способность, тем самым снижая вероятность наводнений вниз по течению.



Рис. 10. Плановое затопление «Room for the River» [15]

План «Room for the River» включал несколько мероприятий, таких как расширение речных русел, создание плотин и дамб, а также формирование затопляемых площадей. Затопляемые площади были специально предназначены для контролируемого затопления в периоды повышенного речного стока. Эти площади были выбраны и разработаны с учетом воздействия на окружающую среду и местные сообщества.

Основным преимуществом плана «Room for the River» и других подобных планов затопления является то, что они предотвращают увеличение нагрузки на главные дамбы и способствуют распределению риска наводнений. Затопляемые площади служат как временные резервуары, которые могут принять избыточную воду и затем постепенно выпускать ее в течение более продолжительного периода времени.

Планирование затоплений в Нидерландах включает в себя глубокие исследования гидрологических характеристик, прогнозирование погодных условий и потенциальных наводнений, а также моделирование воздействия затоплений на окружающую среду и население. Оно также учитывает социально-экономические аспекты и взаимодействие с заинтересованными сторонами.

Поднятие уровня земли. В некоторых нидерландских городах и регионах, которые подвержены регулярным наводнениям, применяется метод поднятия уровня земли. Это означает, что уровень земли и фундаменты зданий строятся выше уровня моря, чтобы снизить риск наводнений [13].

Одним из примеров поднятия уровня земли в Нидерландах является проект «Полдер». Полдер — это низко расположенная область, огороженная дамбами, в которой уровень земли поднят выше уровня воды. Это достигается путем высушивания местности и удаления излишков воды с помощью систем дренажа и насосов.

Проекты по созданию полдеров в Нидерландах включают в себя использование дренажных систем, которые позволяют удалить излишки воды из полей и территорий, находящихся ниже уровня моря. Затем насыпается слой грунта, песка или глины для повышения уровня земли. В конечном итоге создается плодородный и безопасный участок, который может быть использован для сельского хозяйства, жилых зон, инфраструктуры и других целей.

Поднятие уровня земли в Нидерландах требует совокупности усилий и интегрированного подхода, который включает в себя гидрологические исследования, инженерные работы, мониторинг и управление водными ресурсами. Опыт Нидерландов в этой области является ценным и может служить примером для других стран, сталкивающихся с проблемами подтоплений и защиты береговых территорий.

Управление водными ресурсами. Нидерланды имеют сложную систему управления водными ресурсами, включая сеть каналов, шлюзов и насосных станций. Это позволяет контролировать уровень воды в реках и озерах, а также обеспечивает отвод воды в море. Страна разработала инновационные подходы и системы, которые обеспечивают эффективное управление водой, поддерживают безопасность и способствуют устойчивому развитию.

Один из важных элементов управления водными ресурсами в Нидерландах — это сеть дамб, насыпей и искусственных барьеров. Они предназначены для защиты берегов и контроля уровня воды, предотвращая проникновение воды в низко расположенные области. Дамбы и насыпи регулируют водосток и предупреждают наводнения от Северного моря и рек. Для эффективного управления водой Нидерланды также разработали системы дренажа и насосных станций. Они используются для удаления избыточной воды из затопленных областей и контроля уровня подземных вод. Системы дренажа обеспечивают эффективное осушение земель, что позволяет использовать их для сельского хозяйства и других целей [14].

Опыт Нидерландов в управлении водными ресурсами может быть ценным уроком для других стран, сталкивающихся с проблемами защиты берегов и наводнений. Он демонстрирует необходимость интегрированного подхода, применения инновационных технологий и систем, а также активного участия сообщества. Это позволяет строить устойчивые системы управления водными ресурсами, которые обеспечивают безопасность, защиту окружающей среды и благополучие населения.

3. Япония, как островная страна, имеет длинное побережье и подвержена угрозе тайфунов и цунами. Инженерная защита берегов в Японии включает строительство волнорезов, дамб, искусственных островов и других сооружений для предотвращения повреждений от стихийных бедствий.

Япония состоит из 4 основных островов — Хоккайдо, Хонсю, Шикоку и Кюшу, которые вместе с многочисленными маленькими островами образуют немного изогнутую дугу на восточном крае Азиатского континента. Доминирующей географией этих островов являются относительно высокие горы, расположенные в центре, и узкие полосы плоской местности вдоль береговых линий. Именно на побережье располагаются основные промышленные и экономические зоны с плотно населенными районами. Весьма важно отметить, что Япония использует побережье наиболее эффективно для своего выживания и процветания, и этот тренд будет поддерживаться и в будущем для развития ее экономики.

Однако Японии характеризуют неблагоприятные природные условия и географическое положение, и она считается одной из самых часто страдающих от бедствий стран в мире. Острова Японии подвергаются тропическим циклонам и тайфунам, которые приносят с собой огромные бедствия. Кроме того, из-за географического положения в зоне землетрясений Япония также подвержена разрушительным последствиям землетрясений и цунами [16]. Многие побережья подвержены сильным ветровым волнам и океаническим волнам, что приводит к частой разрушаемости морских конструкций, эрозии берегов и накоплению отложений в гаванях.

Японские инженеры сталкиваются с рядом сложных проблем и приоритетно занимаются их преодолением и эффективным контролем, чтобы сохранить ценные побережья, которые они не могут себе позволить потерять.

Факторы, которые считаются связанными с проблемами побережья, могут быть классифицированы на четыре основные категории: геоморфологические аспекты, метеорологические и океанографические аспекты, осадки и искусственные вмешательства. Мы рассмотрим эти факторы с особым уклоном на особенности, характерные для Японии [17].

Геоморфологические аспекты. Острова Японии расположены вдоль зоны сейсмической активности в Тихоокеанском регионе. Землетрясения на этих островах часто приводят к поднятию и опусканию уровня земли на побережье и на морском дне. Геоморфологические движения являются одним из основных факторов, влияющих на процессы на побережье в Японии.

Метеорологические и океанографические аспекты. Япония подвергается воздействию сильных ветров и волн, вызываемых тайфунами и циклонами. Важную роль также играют цунами, порождаемые землетрясениями в морском пространстве. Побережье Японии подвержено длительным волнам, которые имеют значительную высоту.

Осадки. Осадки, такие как песок и гравий, являются важными составляющими побережья и могут влиять на его эрозию.

Искусственные вмешательства. Искусственные сооружения, такие как дамбы, волнорезы и причалы, а также деятельность человека, такая как добыча песка, также оказывают влияние на побережье.

В Японии существуют уникальные географические и климатические условия, которые сказываются на проблемах побережья. Это включает землетрясения, цунами, сильные ветры, тайфуны и длительные волны. Разработка и применение мер защиты берегов является необходимостью для сохранения ценных прибрежных зон и предотвращения разрушительных последствий.



Рис. 11. Системы берегозащиты от цунами в Японии [18]

Япония применяет различные инженерные решения для обеспечения безопасности своих берегов (рис. 11). Вот некоторые из них [17, 18]:

Береговые дамбы и морские стены. Строительство береговых дамб и морских стен является одним из основных способов защиты от штормовых нагонов и цунами. Эти сооружения предназначены для предотвращения проникновения воды во внутренние районы и защиты прибрежных поселений и инфраструктуры от разрушений. Береговые дамбы и морские стены обычно строятся из железобетона или природного камня и могут иметь различные конфигурации в зависимости от местных условий.

Морские волноотбойные сооружения. Морские волноотбойные сооружения, такие как перебоины и погружные ломбы, устанавливаются вдоль береговой линии для разрушения и разбиения сильных волн, проникающих на побережье. Эти сооружения помогают снизить силу удара волн и предотвращают эрозию пляжей и разрушение береговых сооружений.

Искусственное пополнение песком. Для борьбы с эрозией пляжей Япония применяет метод искусственного пополнения песком. Песок или другие подходящие материалы перевозятся и распределяются на пляжах с целью увеличения их объема и восстановления природной защиты от волн.

Зеленые насаждения. Одним из подходов к береговой защите является создание зеленых насаждений вдоль побережья. Растительность, такая как мангровые заросли и прибрежные леса, может служить естественной защитой от штормовых волн и цунами, а также удерживать почву и предотвращать эрозию.

Системы раннего предупреждения. Япония также активно развивает системы раннего предупреждения о штормах и цунами. Эти системы включают мониторинг погоды и морских условий, а также распространение предупреждающих сообщений и эвакуационных планов для населения в зоне потенциальной угрозы.

Одна из наиболее популярных форм волнорезов, применяемых в Японии — это тетраподы. Фигурные волнорезы, представляющие собой четырёхпалые блоки из усеченных конусов (рис. 12 а). В Японии первой их стала производить компания «Футо Тетра» еще в 1961 г., попутно зарегистрировав «тетрапод» как свой товарный знак. Ряды таких фигурных волнорезов установлены у основания скал, вдоль берега или на мелководье от Хоккайдо до Окинавы практически везде, где проходят автодороги, железные дороги или находятся здания вблизи побережья [19].



а)



б)

Рис. 12. пляж в г. Атами, Сидзуока, Япония: а — защита берега тетраподами (фото 2003 г.); б — вид пляжа после реализации программы «Мероприятия по созданию красивой страны» (фото 2015 г.)¹

Из-за большой распространенности тетраподов слово в японском обиходе стало нарицательным и порой может обозначать любой волнорез. Однако в публичном поле — на телевидении, в печатной продукции — слово «тетрапод» не употребляют из-за наличия товарного знака. Для обозначения всех конструкций подобного типа используется общий термин «сё ха бурокку» — «волнорассеивающий блок», то есть волнорез. Кроме упомянутого тетрапода, в Японии и в других странах используют волнорезы и других форм — плоские, фигурные, ступенчатые, коробчатые (рис. 13). Волнорезы могут быть разного размера, формы и веса — есть небольшие до 80 см и весом в 200 кг, а есть и гиганты весом в несколько десятков тонн.

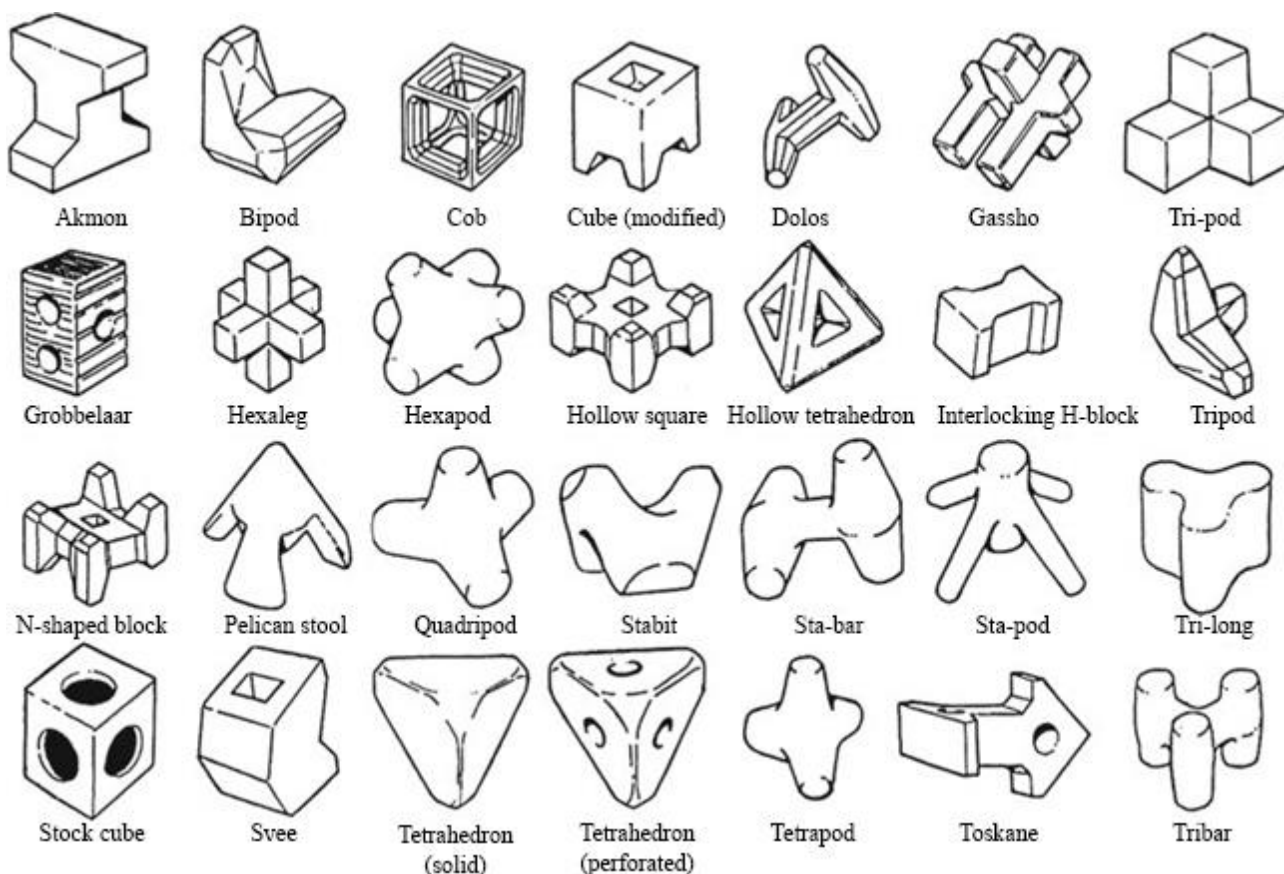
Главным недостатком такого способа берегозащиты являются неудобства, доставляемые отдыхающим в пляжных и других рекреационных зонах, а также не всегда эстетический вид этих сооружений и утрата живописных прибрежных пейзажей, что негативно сказывается и на туризме.

В этой связи в Японии отмечается тенденция к постепенной замене береговых волноотбойных сооружений устройством искусственных рифов в прибрежной акватории. Это высвобождает береговую зону и делает ее более привлекательной для отдыха и туризма.

В 2003 году Министерство земли, инфраструктуры, транспорта и туризма Японии запустило программу по улучшению внешнего вида страны. Один из пунктов этой программы — сокращение количества волнорезов и полное избавление от волнорезов в 9 наиболее живописных районах страны. Вместо волнорезов для защиты этих прибрежных территорий стали создавать искусственные рифы. Удачным примером такого решения можно считать реконструкцию пляжа и прибрежной территории курортного города Атами (рис. 12 б), расположенного на востоке (Тихоокеанском) побережье о. Хонсю в 100 км от г. Токио.

Комбинация вышеперечисленных инженерных решений и систем предупреждения позволяет Японии повысить безопасность своего побережья и снизить риски, связанные с природными бедствиями и эрозией.

¹ Тетраподы и другие бетонные обитатели японских побережий. Культурный центр «Японский дом». Блог. URL: <http://saison-group.ru/blog/733> (дата обращения 06.03.2024)

Рис. 13. Формы волнорезов, применяемых в Японии и других странах²

4. Соединенные Штаты Америки. В США защита берегов широко используется на побережье Атлантического океана, Тихого океана, Мексиканского залива и Великих озер. Здесь применяются насыпные стены, дюкеры, дамбы и другие конструкции для предотвращения эрозии берегов и защиты от ураганов и штормов.

США имеют богатый опыт инженерной защиты берегов, особенно на побережьях океанов, заливов и озер. Инженерные решения применяются для предотвращения эрозии береговой линии, защиты от ураганов и штормов, а также сохранения прибрежной инфраструктуры и экосистем³.

Один из известных примеров инженерной защиты берегов в США — это система дюн. Дюны представляют собой естественные или искусственные возвышенности из песка или гальки, которые располагаются вдоль побережья. Они служат естественным барьером против прилива и волн, предотвращая эрозию берега и защищая прибрежные территории. В США, особенно на побережье Атлантического океана и Мексиканского залива, созданы искусственные дюны, которые являются важным элементом защиты берегов от ураганов и штормов.

Применяются и другие инженерные решения для защиты берегов в США. Одним из них является строительство дамб и насыпей. Наиболее знаменитыми примерами таких инженерных сооружений являются система дамб в Новом Орлеане и система дамб в Долине Сан-Хоакин (рис. 14).

Также в США применяются различные морские инженерные сооружения, такие как штормовые барьеры, защитные фалы и прибрежные стены. Они предназначены для смягчения воздействия сильных волн и штормов, предотвращения эрозии берегов и защиты прибрежных поселений и инфраструктуры [19].

Помимо инженерных сооружений, США также активно используют методы управления побережьем. Это включает в себя управление песчаными пляжами, периодическое пополнение песчаных отложений, регулярную деградацию и переработку материалов на пляжах. Эти методы помогают сохранять и восстанавливать пляжи, обеспечивая естественную защиту береговой линии [20].

² Тетраподы и другие бетонные обитатели японских побережий. Культурный центр «Японский дом». Блог. URL: <http://saison-group.ru/blog/733/> (дата обращения 06.03.2024)

³ Coastal Engineering. Preserve and protect shorelines and coastal resources, assets and communities. URL: <https://www.wsp.com/en-us/services/coastal-engineering> (дата обращения 06.03.2024).



Рис. 14. Система дамб в Сан-Хоакин (США) [19]

Опыт инженерной защиты берегов в США показывает необходимость комбинированного подхода, который включает в себя разнообразные методы и технологии. Это включает в себя строительство инженерных сооружений, управление песчаными пляжами, прогнозирование погодных условий и гидрологических параметров, а также широкое сотрудничество с местными и федеральными органами, научными учреждениями и сообществами.

5. Великобритания. В Великобритании инженерная защита берегов широко применяется на побережье Северного моря, Атлантического океана и Канала Ла-Манш. Здесь используются стены, волнорезы, дамбы и другие меры для предотвращения эрозии и защиты от штормов.

Великобритания имеет значительный опыт инженерной защиты берегов из-за своего протяженного побережья и угрозы приливов, штормов и эрозии. Страна разработала разнообразные стратегии и инженерные решения для защиты прибрежных территорий и сохранения береговой линии.

Один из примеров инженерной защиты берегов в Великобритании — это строительство волнорезов. Волнорезы являются структурами, установленными на берегу или в море, чтобы смягчить воздействие сильных волн и предотвратить эрозию берегов. Великобритания имеет разнообразные типы волнорезов, включая бетонные структуры, каменные молы, плавучие флотсамы и даже искусственные рифы. Эти структуры играют важную роль в защите побережья и поддержании его целостности.

Еще один пример — это строительство морских дамб. Морские дамбы представляют собой искусственные структуры, соединяющие прибрежные точки и создающие барьер против наводнений и штормовых волн. Примером такой инженерной защиты является Темзис-барьер в Лондоне, который предотвращает наводнения от Северного моря и защищает прибрежные районы столицы [21].

Великобритания также активно использует пляжные регенерации, чтобы поддерживать и восстанавливать песчаные пляжи. Пляжные регенерации включают в себя перенос песчаного материала на пляжи, чтобы компенсировать эрозию и обеспечить естественную защиту береговой линии.

Опыт инженерной защиты берегов в Великобритании также подкрепляется широким использованием гидрологических моделей и прогнозных систем, которые помогают прогнозировать приливы, волны и наводнения. Это позволяет принимать своевременные меры по защите берегов и предупреждению потенциальных угроз.

Важным аспектом инженерной защиты берегов в Великобритании является учет экологических аспектов и воздействия на окружающую среду. Проекты строительства и реконструкции проводятся с учетом сохранения природных биотопов, местной фауны и флоры, а также с учетом экологической устойчивости.

Опыт Великобритании в области инженерной защиты берегов может быть ценным для других стран, сталкивающихся с аналогичными проблемами. Он демонстрирует важность разнообразных подходов, включающих в себя строительство инженерных сооружений, использование природных процессов, применение прогнозных систем и учет экологических последствий.

6. Италия имеет значительный опыт инженерной защиты берегов, особенно в связи с проблемами эрозии, наводнений и устойчивого развития побережий. Страна разработала различные стратегии и инженерные решения для защиты берегов и сохранения прибрежных территорий [22].

Один из наиболее известных примеров инженерной защиты берегов в Италии — это система молов (molo). Молы представляют собой искусственные структуры, которые простираются в море параллельно берегу и служат для смягчения воздействия волн, предотвращения эрозии и сохранения песчаных пляжей. Молы могут быть выполнены из бетона, камня, дерева или комбинации различных материалов.

В Италии также широко используются дамбы и волнорезы для защиты береговых зон от штормовых волн и приливов. Некоторые из наиболее известных примеров включают Гребной Мур в Венеции, который предотвращает наводнения в городе, и систему волнорезов в Сицилии для защиты от волн в Средиземном море.

Кроме того, Италия активно использует прибрежные регенерации для поддержания и восстановления пляжей и прибрежной экосистемы. Прибрежные регенерации включают в себя перенос песчаного материала на пляжи для компенсации эрозии и обеспечения естественной защиты береговой линии.

Италия также разрабатывает и применяет инновационные подходы к инженерной защите берегов. Например, экологические решения, такие как создание искусственных островов и восстановление морских прибрежных зон, предлагаются в качестве устойчивых альтернатив для защиты берегов и развития прибрежных территорий.

Важным аспектом инженерной защиты берегов в Италии является сотрудничество с учеными, научными учреждениями и сообществами. Италия активно проводит исследования в области гидрологии, гидрографии и морской экологии для разработки наиболее эффективных и устойчивых решений [23].

Опыт инженерной защиты берегов в Италии может служить важным уроком для других стран, сталкивающихся с аналогичными проблемами. Это подчеркивает необходимость комплексного подхода, включающего разнообразные инженерные решения, экологические аспекты, учет местных условий и активное взаимодействие с заинтересованными сторонами.

Это только несколько примеров стран, где активно применяется инженерная защита берегов. Однако по мере необходимости подобные меры могут применяться практически во всех странах с прибрежными зонами.

Результаты исследования. Обзор зарубежного опыта инженерной защиты берегов показывает, что различные страны разработали разнообразные стратегии и инженерные решения для защиты берегов от эрозии, наводнений и других природных угроз. Важными аспектами этого опыта являются [24]:

Разнообразие инженерных сооружений: разные страны используют различные типы инженерных сооружений для защиты берегов. Примерами являются дюны, дамбы, волнорезы, молы, искусственные острова и другие структуры. Каждый тип сооружения имеет свои преимущества и применяется в зависимости от особенностей местных условий и угроз.

Учет экологических аспектов: многие страны придают большое значение сохранению экосистем и устойчивому развитию при разработке инженерных решений для защиты берегов. Включение природных процессов, использование природных материалов, создание искусственных рифов и восстановление прибрежных зон — все это направлено на минимизацию негативного воздействия на окружающую среду.

Интегрированный подход: успешные стратегии инженерной защиты берегов обычно включают интегрированный подход, который объединяет инженерные сооружения, гидрологические исследования, прогнозные системы, учет экологических последствий и широкое вовлечение сообществ и заинтересованных сторон. Сотрудничество между государственными органами, научными учреждениями, местными сообществами и экспертами играет важную роль в разработке эффективных и устойчивых решений.

Непрерывное исследование и инновации: страны постоянно исследуют новые технологии и инновационные подходы для улучшения инженерной защиты берегов. Это включает в себя использование новых материалов, применение искусственного интеллекта и развитие прогнозных систем для более точного прогнозирования и управления угрозами.

Обсуждение и заключение. Обзор зарубежного опыта инженерной защиты берегов показывает важность комплексного подхода, учета экологических аспектов и непрерывного исследования. На основе этого опыта можно выделить лучшие практики, которые могут быть адаптированы и применены в других странах, с учетом их конкретных потребностей и местных условий.

Положительный опыт защиты берегов и склонов от опасных геологических процессов может использоваться для решения аналогичных задач на Черноморском побережье Кавказа и других регионов России.

Список литературы

1. Прокопов А.Ю., Акопян В.Ф., Ким Р.В. О причинах и последствиях оползневых процессов в районе ул. Медовой Адлерского района г. Сочи. *Известия РГСУ*. 2015;20:48–57.
2. Хамидуллина Н.В., Прокопова М.В., Прокопов А.Ю. Физическое моделирование провалов земной поверхности. *Вестник РГУПС*. 2019;2(74):124–131.
3. Прокопов А.Ю., Лебидко В.А. Выбор и обоснование методов берегоукрепления (на примере р. Кубань в г. Краснодаре). *Известия РГСУ*. 2015;20:41–48.
4. Прокопов А.Ю., Адоньев Н.А. Анализ существующих методов берегозащиты, применяемых на Черноморском побережье Кавказа. В: *Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки и техники. 2023»*. Ростов-на-Дону: ДГТУ; 2023. С. 287–289.
5. Куштин В.И., Турчик С.Е., Глинская О.С. Анализ современных методов получения геопространственной информации при мониторинге объектов железнодорожной инфраструктуры. *Инженерный вестник Дона*. 2022;11(95):18–25. <http://ivdon.ru/magazine/archive/n11y2022/8004> (дата обращения 09.03.2024).
6. Звезгинцева А.А., Василенко М.И. Некоторые аспекты благоустройства прибрежных зон населенных пунктов. В: *Сборник докладов Всероссийской научной конференции «Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования»*. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова; 2020. С. 289–293.
7. Ефремова Т.В., Долотов В.В. Последствия техногенного воздействия на южные и западные берега Черного моря. В: *Материалы VI Всероссийской научной конференции молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана»*. Москва: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН; 2021. С. 449–450.
8. Sun J., Zhu Z., Song J., Guo J., Cai Y., Fu Y. et al. Research on multivariate Yellow sea SST week prediction method based on Encoder-Decoder LSTM. *Системы контроля окружающей среды*. 2022;1(47):5–14. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2022-1-5-14>
9. Kazmin A.S. Fronts in the Yellow and East China Seas: the Case Study. *Journal of Oceanological Research*. 2018;46(3):20–34. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2018.46\(3\).2](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(3).2)
10. Мороз В.В., Богданов К.Т., Ростов В.И., Ростов И.Д. *Атлас приливов Берингова, Охотского, Японского и Восточно-Китайского морей. Том 10*. Владивосток: Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 2007.
11. Долгих Г.И., Будрин С.С., Швеиц В.А., Яковенко С.В. Определение областей формирования волн «предвестников» тайфунов, проходящих над Восточно-Китайским и Японским морями. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2023;513(2):245–249.
12. Турлов А.Г. Математическая модель системы инженерной защиты берегов водохранилища с использованием дренажных вод на орошение. *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии»*. 2021;3(19):64–76.
13. Dörrie R., Laghi V., Arrè L., Kienbaum G., Babovic N., Hack N. et al. Combined Additive Manufacturing Techniques for Adaptive Coastline Protection Structures. *Buildings*. 2022;12(11):1806. <https://doi.org/10.3390/buildings12111806>
14. Kok S., Bisaro A., de Bel M., Hinkel J., Bouwer L.M. The Potential of Nature-Based Flood Defences to Leverage Public Investment in Coastal Adaptation: Cases from the Netherlands, Indonesia and Georgia *Ecological Economics*. 2021;179:106828. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106828>
15. Singhvi A., Luijendijk A.P., van Oudenhoven A.P.E. The Grey–Green Spectrum: A Review of Coastal Protection Interventions. *Journal of Environmental Management*, 2022;311:114824. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114824>
16. Huang Z., Zhao D., Wang L. Seismic heterogeneity and anisotropy of the Honshu arc from the Japan Trench to the Japan Sea. *Geophysical Journal International*. 2011;184(3):1428–1444. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.04934.x>
17. Shimozone T., Tajima Y., Kumagai K., Arikawa T., Oda Y., Shigihara Y. et al. Coastal Impacts of Super Typhoon Hagibis on Greater Tokyo and Shizuoka Areas, Japan. *Coastal Engineering Journal*. 2020;62(2):129–145. <https://doi.org/10.1080/21664250.2020.1744212>
18. Udo K., Ranasinghe R., Takeda Y. An Assessment of Measured and Computed Depth of Closure Around Japan. *Scientific Reports*. 2020;10(1):2987. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59718-5>

19. Luan Y-n, Li D, Chen H-b, Geng B-l, Liu H-y. Review of Ecological Coast Construction Technology. In: *Proceedings of the International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS)*. Vientiane. Laos; 2020. P. 181-186. <https://doi.org/10.1109/ICITBS49701.2020.00045>
20. Ysebaert T., Walles B., Haner J., Hancock B. Habitat Modification and Coastal Protection by Ecosystem-Engineering Reef-Building Bivalves. In book: *Goods and Services of Marine Bivalves*. Cham: Springer; 2019. P. 253–273. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96776-9_13
21. Staudt F., Gijsman R., Ganai C., Mielek F., Wolbring J., H. Hass C. et al. The Sustainability of Beach Nourishments: a Review of Nourishment and Environmental Monitoring Practice. *Journal of Coastal Conservation*. 2021;25(34):1–24. <https://doi.org/10.1007/s11852-021-00801-y>
22. Bruno M.F., Saponieri A., Molfetta M.G., Damiani L. The DPSIR Approach for Coastal Risk Assessment Under Climate Change at Regional Scale: The Case of Apulian Coast (Italy). *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020;8(7):531. <https://doi.org/10.3390/jmse8070531>
23. Davoli L., Raffi R., Baldassarre M.A., Bellotti P., Di Bella L. New Maps Relative to the Special Protection Area of the Palude Di Torre Flavia (Central Tyrrhenian Sea-Italy) Prone to Severe Coastal Erosion. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*. 2019;2:5–12. <https://doi.org/10.4408/IJEGE.2019-02.O-01>
24. Morris R.L., Bilkovic D.M., Boswell M.K., Bushek D., Cebrian J., Goff J. et al. The Application of Oyster Reefs in Shoreline Protection: Are We Over-Engineering for an Ecosystem Engineer? *Journal of Applied Ecology*. 2019;56(7):1703–1711. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13390>

References

1. Prokopov AYu, Akopyan VF, Kim RV. On The Causes and Consequences of Landslide Processes in the Area of Medovaya Street, Adler District, Sochi. *Izvestiya RGSU*. 2015;20:48–57. (In Russ.).
2. Hamidullina NV, Prokopova MV, Prokopov AYu. Physical Modeling of Failures of the Ground Surface. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya* (Vestnik RGUPS. 2019;(2(74)):124-131. (In Russ.).
3. Prokopov AYu, Lebedko VA. Selection and Justification of Shore Protection Methods (on the Example of the Kuban River in Krasnodar). *Izvestiya RGSU*. 2015;20:41–48. (In Russ.).
4. Prokopov AYu, Adoniev NA. Analysis of Existing Coastal Protection Methods Used at the Black Sea Coast. In: *Proceedings of the All-Russian (National) Scientific and Practical Conference "Topical Problems of Science and Technology. 2023"*. Rostov-on-Don: DSTU; 2023. P. 287-289. (In Russ.).
5. Kushtin VI, Turchik SE, Glinskaya OS. The Analysis of the Modern Methods of Obtaining Geospace Information for Railway Infrastructure Objects Monitoring. *Engineering Journal of the Don*. 2022;(11(95)):18-25. <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/> (accessed: 9.03.2024). (In Russ.).
6. Zvegintseva AA, Vasilenko MI. Some Aspects of the Improvement of Coastal Areas of Settlements. In: *Proceedings of the All-Russian Scientific Conference "Safety, Protection and Preservation of the Natural Environment: Fundamental and Applied Research"*. Belgorod: BSTU named after V. G. Shukhov; 2020. P. 289-293. (In Russ.).
7. Efremova TV, Bolotov VV. Consequences of man-made impact on the southern and western shores of the Black Sea. In: *Proceedings of the VI All-Russian Scientific Conference of Young Scientists "Integrated Research of the World Ocean"*. Moscow: P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences; 2021. P. 449-450. (In Russ.).
8. Sun J, Zhu Z, Song J, Guo J, Cai Y, Fu Y, et al. Research on Multivariate Yellow Sea SST Week Prediction Method Based on Encoder-Decoder LSTM. *Monitoring systems of environment*. 2022;1(47):5–14. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2022-1-5-14>
9. Kazmin AS. Fronts in the Yellow and East China Seas: the Case Study. *Journal of Oceanological Research*. 2018;46(3):20–34. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2018.46\(3\).2](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(3).2)
10. Moroz VV, Bogdanov KT, Rostov VI, Rostov ID. *Atlas of Tides of the Bering, Okhotsk, Japanese and East China Seas*. Volume 10. Vladivostok: V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch RAS; 2007. (In Russ.).
11. Dolgikh GI, Budrin SS, Shvets VA, Yakovenko SV. Determination of “Forerunner”-Waves Formation Zones for Typhoons Passing over the East China and Japan Sea. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o Zemle*. 2023;513(2):245–249. (In Russ.).
12. Turlov AG. Mathematical Model of the Engineering Protection of the Shore Reservoirs with the Use of Drainage Water for Irrigation. *Vestnik of Volga State University of Technology Series «Forest. Ecology. Nature Management*. 2021;3(19):64–76. (In Russ.).
13. Dörrie R, Laghi V, Arrè L, Kienbaum G, Babovic N, Hack N, et al. Combined Additive Manufacturing Techniques for Adaptive Coastline Protection Structures. *Buildings*. 2022;12(11):1806. <https://doi.org/10.3390/buildings12111806>

14. Kok S, Bisaro A, de Bel M, Hinkel J, Bouwer LM. The Potential of Nature-Based Flood Defences to Leverage Public Investment in Coastal Adaptation: Cases from the Netherlands, Indonesia and Georgia. *Ecological Economics*. 2021;179:106828. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106828>
15. Singhvi A, Luijendijk AP, van Oudenhoven APE. The Grey–Green Spectrum: A Review of Coastal Protection Interventions. *Journal of Environmental Management*, 2022;311:114824. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114824>
16. Huang Z, Zhao D, Wang L. Seismic heterogeneity and anisotropy of the Honshu arc from the Japan Trench to the Japan Sea. *Geophysical Journal International*. 2011;184(3):1428–1444. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.04934.x>
17. Shimozono T., Tajima Y., Kumagai K., Arikawa T., Oda Y., Shigihara Y. et al. Coastal Impacts of Super Typhoon Hagibis on Greater Tokyo and Shizuoka Areas, Japan. *Coastal Engineering Journal*. 2020;62(2):129–145. <https://doi.org/10.1080/21664250.2020.1744212>
18. Udo K, Ranasinghe R, Takeda Y. An Assessment of Measured and Computed Depth of Closure Around Japan. *Scientific Reports*. 2020;10(1):2987. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59718-5>
19. Luan Y-n, Li D, Chen H-b, Geng B-l, Liu H-y. Review of Ecological Coast Construction Technology. In: *Proceedings of the International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS)*. Vientiane. Laos; 2020. P. 181-186. <https://doi.org/10.1109/ICITBS49701.2020.00045>
20. Ysebaert T, Walles B, Haner J, Hancock B. Habitat Modification and Coastal Protection by Ecosystem-Engineering Reef-Building Bivalves. In book: *Goods and Services of Marine Bivalves*. Cham: Springer; 2019. P. 253–273. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96776-9_13
21. Staudt F, Gijsman R, Ganai C, Mielck F, Wolbring J, Hass HC, et al. The Sustainability of Beach Nourishments: A Review of Nourishment and Environmental Monitoring Practice. *Journal of Coastal Conservation*. 2021;25:34. <https://doi.org/10.1007/s11852-021-00801-y>
22. Bruno MF, Saponieri A, Molfetta MG, Damiani L. The DPSIR Approach for Coastal Risk Assessment under Climate Change at Regional Scale: The Case of Apulian Coast (Italy). *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020;8(7):531. <https://doi.org/10.3390/jmse8070531>
23. Davoli L, Raffi R, Baldassarre MA, Bellotti P, Di Bella L. New Maps Relative to the Special Protection Area of the Palude Di Torre Flavia (Central Tyrrhenian Sea-Italy) Prone to Severe Coastal Erosion. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*. 2019;2:5–12. <https://doi.org/10.4408/IJEGE.2019-02.O-01>
24. Morris RL, Bilkovic DM, Boswell MK, Bushek D, Cebrian J, Goff J, et al. The Application of Oyster Reefs in Shoreline Protection: Are We Over-Engineering for an Ecosystem Engineer? *Journal of Applied Ecology*. 2019;56(7):1703–1711. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13390>

Об авторах:

Альберт Юрьевич Прокопов, заведующий кафедрой «Инженерная геология, основания и фундаменты» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-7000), [ScopusID](https://scopus.org/authors/details/prokopov72@rambler.ru), [ResearcherID](https://researcherid.com/profile/prokopov72@rambler.ru), prokopov72@rambler.ru

Никита Александрович Адоньев, аспирант кафедры «Инженерная геология, основания и фундаменты» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), nikitaad1999@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

А.Ю. Прокопов — постановка цели, проведение натурных обследований и фотофиксации объектов в КНР, описание и систематизация методов инженерной защиты берегов и склонов в КНР.

Н.А. Адоньев — поиск, анализ и систематизация литературных данных об инженерной защите берегов, применяемых в Нидерландах, Японии, США, Великобритании и Италии, формулировка заключения и выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Поступила в редакцию 01.03.2024

Поступила после рецензирования 11.03.2024

Принята к публикации 12.03.2024

About the Authors:

Albert Yu. Prokopov, Dr.Sci. (Engineering), Professor, Head of the Engineering Geology, Footings and Foundations Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), prokopov72@rambler.ru

Nikita A. Adoniev, PhD Student of the Engineering Geology, Footings and Foundations Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), nikitaad1999@gmail.com

Claimed contributorship:

AYu Prokopov: setting the objective, conducting field research and photographic evidences of objects in the People's Republic of China, describing and systematising the methods of engineering protection of coasts and hillslopes in the People's Republic of China.

NA Adoniev: search, analysis and systematisation of literature sources on coastal engineering protection used in the Netherlands, Japan, the USA, Great Britain and Italy, formulating the recap and conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.

Received 01.03.2024

Revised 11.03.2024

Accepted 12.03.2024