Научная статья

УДК 711.45:551.465.7

ПЛАНИРОВОЧНЫЕ ПОДХОДЫ К АДАПТАЦИИ ПРИБРЕЖНЫХ ПОСЕЛЕНИЙ К РИСКАМ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ МОРЯ

Ситдиков Венер Мунирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Уфимский университет науки и технологий, Россия, Уфа, vener_sitdikov@mail.ru

Аннотация. В статье обоснованы методологические подходы к стратегическому пространственному планированию прибрежных агломераций и сельских населённых пунктов, подверженных совместному воздействию климатической трансгрессии и антропогенного проседания земной поверхности (субсиденции). На основе сценариев CMIP6 (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5), цифровой модели рельефа и гидродинамического моделирования штормовых нагонов выполнена вероятностная оценка границ зон затопления с учётом межмодельной неопределённости. Предложена трёхступенчатая дифференциация прибрежной территории по периодам повторяемости подтопления, служащая основой для установления красных линий застройки и нормативных ограничений капитального строительства. Рассмотрены стратегии инженерной защиты, приспособления застройки и планового отступления применительно к поселениям различной плотности и функционального профиля. Обоснована роль плавневых комплексов, приморских дюн, солончаков в снижении нагрузки на защитные сооружения. Показано, что адаптация прибрежных территорий требует перехода от статичного функционального зонирования к модели с периодическим пересмотром планировочных ограничений по мере уточнения климатических проекций. Результаты применимы при разработке генеральных планов и схем территориального планирования прибрежных муниципальных образований.

Ключевые слова: прибрежные поселения, повышение уровня моря,

пространственное планирование, штормовой нагон, зоны затопления, красные линии застройки, субсиденция, водно-болотные угодья, CMIP6 SSP, градостроительное зонирование, адаптация.

Original article

PLANNING APPROACHES TO ADAPTATION OF COASTAL SETTLEMENTS TO THE RISKS OF SEA LEVEL RISE

Sitdikov Vener Munirovich, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russia, vener_sitdikov@mail.ru

Abstract. The article substantiates methodological approaches to strategic spatial planning of coastal agglomerations and rural settlements subject to the combined impact of climate transgression and anthropogenic subsidence. Based on CMIP6 scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5), a digital elevation model, and hydrodynamic modeling of storm surges, a probabilistic assessment of flood zone boundaries is performed, taking into account inter-model uncertainty. A three-stage differentiation of the coastal territory by flood recurrence periods is proposed, serving as the basis for establishing redlines for development and regulatory restrictions on capital construction. Strategies for engineering protection, development adaptation, and planned retreat are considered in relation to settlements of varying densities and functional profiles. The role of floodplain complexes, coastal dunes, and salt marshes in reducing the load on protective structures is substantiated. It is shown that coastal adaptation requires a shift from static functional zoning to a model with periodic revision of planning restrictions as climate projections become more accurate. The results are applicable to the development of master plans and territorial planning schemes for coastal municipalities.

Keywords: coastal settlements, sea level rise, spatial planning, storm surge, floodplains, building redlines, subsidies, wetlands, CMIP6 SSP, urban zoning,

adaptation.

Актуальность исследования. На протяжении последних трёх десятилетий проблема устойчивого развития территорий, непосредственно примыкающих к морской акватории, приобрела характер междисциплинарного вызова, затрагивающего одновременно градостроительную теорию, инженерную геологию, экономику природопользования и демографическое прогнозирование. Причиной тому служит зафиксированное инструментальными средствами ускоренное повышение среднего глобального уровня океана: по данным спутниковой альтиметрии, охватывающей период 1993-2009 гг., средняя скорость подъёма водной поверхности составила 3,3 ± 0,4 мм/год, что существенно превышает показатель 1,7 ± 0,3 мм/год, характерный для второй половины XX в. по приливным наблюдениям [1]. Вклад отдельных компонентов, например, термического расширения водной массы, таяния горных ледников и малых ледяных шапок, потери массы Гренландским и Западно-Антарктическим ледниковыми щитами, перераспределяется во времени. Если в 1993-2003 гг. ледниковые щиты обеспечивали менее 15% суммарного прироста, то после 2003 года их доля практически удвоилась, компенсируя замедление термического расширения верхних слоёв океана [1]. Полуэмпирические экстраполяции, связывающие темп подъёма с радиационным форсингом или глобальной температурой, дают диапазон прогнозов 30-180 см к 2100 году, причём верхняя граница заметно превосходит оценки, приведённые в Четвёртом оценочном докладе МГЭИК [2], [3]. Значительная неопределённость проекций не даёт градостроительному сообществу возможности использовать единственный сценарий и требует учитывать в территориальных планах несколько вариантов изменения береговой линии.

Пространственное распределение подъёма крайне неравномерно. В западной части Тихого океана локальные темпы трансгрессии втрое превышают глобальное среднее, а в отдельных районах Балтики и Гудзонова залива

наблюдается относительное понижение водной поверхности за счёт гляциоизостатического поднятия суши [1]. Для задач планировки прибрежных населённых мест значение приобретает так называемый относительный уровень моря, складывающийся из тектонических движений, консолидации аллювиальных отложений, антропогенной субсиденции по причине извлечения подземных вод, нефти и газа, а также сокращения наносов в речных дельтах из-за гидротехнического строительства. Величина субсиденции в ряде городов многократно превышает климатический сигнал: за XX столетие Токио опустился на 5 м, Шанхай - на 3 м, Бангкок - на 2 м [1]. В дельтовых зонах Ганга-Брахмапутры, Меконга и Янцзы сочетание этих процессов формирует наиболее острую угрозу для существующей застройки и инженерной инфраструктуры.

Демографическая нагрузка на низко расположенные прибрежные территории продолжает нарастать. В полосе ниже 10-метровой изобаты сосредоточено порядка 10% мирового населения [4], причём значительная его часть сконцентрирована в крупных портовых агломерациях Юго-Восточной и Восточной Азии, Западной Африки и Латинской Америки. Халлегатт и соавторы, выполнившие оценку среднегодовых убытков от наводнений для 136 крупнейших прибрежных городов, показали, что уже в 2005 году совокупные потери составляли около 6 млрд долл. США в год, а при учёте лишь социально-экономического роста без изменения климата к 2050 году эта цифра возрастает до 52 млрд долл. [5]. Если к экономическому развитию прибавить субсиденцию и подъём океана без соответствующей модернизации защитных сооружений, потенциальные убытки достигают 1 трлн. долл. и более, что делает бездействие в сфере территориального планирования экономически неприемлемым.

Важно, что концентрация риска в прибрежных городах крайне неравномерна. На Майами, Нью-Йорк и Новый Орлеан приходится 31% глобальных совокупных потерь, а вместе с Гуанчжоу на эти четыре города приходится 43% расчётного ущерба [6]. Вместе с тем рейтинг по относительному показателю, то есть отношению среднегодовых убытков к валовому городскому

продукту, обнаруживает иную картину: в первой двадцатке преобладают города развивающихся стран, где доля потерь достигает 0,7-1,3 % локального ВВП. Для Гуанчжоу и Нового Орлеана данный коэффициент превышает 1%, что фактически означает необходимость ежегодно резервировать более сотой части валового городского продукта на покрытие ожидаемого ущерба от затоплений [6]. Подобная диспропорция между абсолютными и относительными индикаторами уязвимости указывает на то, что вторичные города и малые прибрежные поселения, не обладающие финансовыми ресурсами мегаполисов, оказываются в существенно более тяжёлом положении, хотя и не привлекают сопоставимого исследовательского и управленческого внимания.

Сельские населённые пункты, расположенные в прибрежной полосе, подвержены аналогичным гидрологическим и геоморфологическим процессам, однако их адаптационный потенциал несопоставимо ниже. Отсутствие капитальных защитных дамб, ограниченные возможности инженерной подготовки территории и зависимость хозяйственной деятельности от состояния мангровых зарослей, солончаков и нерестилищ делают эти поселения чувствительными даже к незначительному подтоплению. Автор подчёркивает, что деградация прибрежных водно-болотных угодий при недостаточном наносном питании на фоне ускоряющейся трансгрессии лишает сельские территории естественного буфера, который исторически смягчал воздействие штормовых нагонов [1]. Утрата данного буфера не компенсируется автоматически инженерными решениями, поскольку стоимость строительства и эксплуатации защитных сооружений в условиях рассредоточенной малоэтажной застройки с низкой плотностью населения зачастую превышает экономически обоснованный порог.

Сценарное моделирование, проведённое в [7], демонстрирует, что даже при адаптационной политике, поддерживающей неизменную вероятность затопления посредством повышения дамб, среднегодовые потери к 2050 году возрастают до 60-63 млрд долл. по причине субсиденции и подъёма океана.

Иными словами, сохранение прежней частоты наводнений не тождественно сохранению прежнего уровня риска: каждое отдельное событие, превышающее расчётный стандарт защиты, причиняет ущерб, превышающий современный на 50% и более. В Александрии, например, при повышении защитного стандарта со 100-летнего до 270-летнего расчётного периода суммарные последствия гипотетического прорыва защитных сооружений утраиваются, с 17 до 51 млрд долл., за счёт подъёма относительного уровня воды на 60 см [8]. Данный вывод имеет отношение к градостроительному проектированию, потому что функциональное зонирование прибрежных территорий должно предусматривать пространственные резервы, допускающие контролируемое отступление застройки от береговой линии и перераспределение хозяйственных функций вглубь территории.

С учётом изложенного стратегическое пространственное планирование прибрежных поселений приобретает статус определяющего инструмента управления рисками. Расчёты свидетельствуют о том, что инвестиции в адаптационные меры в размере 2 млрд долл. и более на один город при ежегодных эксплуатационных затратах около 2% первоначальных вложений способны удержать совокупный ущерб ниже уровня, соответствующего бездействию [9]. Однако распределение этих ресурсов между агломерациями и сельскими поселениями, выбор между защитой, приспособлением застройки и плановым отступлением, определение допустимой плотности освоения в зонах потенциального подтопления - это вопросы территориального планирования, решение которых требует интеграции климатических проекций, геоморфологических данных и социально-экономических прогнозов в единую градостроительную модель.

Исследование направлено на разработку методологических основ такого интегрированного планирования применительно к прибрежным агломерациям и сельским населённым пунктам, подверженным совместному воздействию климатической трансгрессии и антропогенной субсиденции. В работе

последовательно рассматриваются критерии выделения зон дифференцированного градостроительного регулирования, механизмы учёта неопределённости сценариев подъёма уровня моря в документах территориального планирования и принципы размещения объектов критической инфраструктуры с учётом многолетних тенденций изменения береговой линии. Автор исходит из того, что заблаговременное закрепление в генеральных планах и схемах территориального планирования пространственных ограничений, привязанных к вероятностным характеристикам затопления, способно предотвратить формирование новой застройки в зонах неприемлемого риска и, тем самым, снизить будущие потери по сравнению с инерционным сценарием освоения прибрежной полосы.

Степень разработанности проблемы. Количественная оценка угрозы затопления прибрежных территорий и вытекающие из неё задачи территориального регулирования на протяжении последних двух десятилетий привлекают внимание исследователей, работающих на стыке климатологии, гидродинамики и градостроительного проектирования. Обобщив данные спутниковой альтиметрии за 1993-2009 гг., автор зафиксировал среднюю скорость подъёма глобального уровня океана, составившую 3,3 ± 0,4 мм/год и показали, что вклад ледниковых щитов Гренландии и Западной Антарктики, составлявший менее 15% суммарного прироста в начале наблюдательного периода, к концу рассматриваемого интервала практически удвоился [1]. Указанное перераспределение источников трансгрессии делает линейную экстраполяцию прежних тенденций методологически некорректной и требует перехода к сценарному моделированию, учитывающему нестационарность ледниковой динамики. Полуэмпирические проекции, связывающие темп подъёма водной поверхности с радиационным форсингом либо глобальной температурой приземного слоя атмосферы, дают разброс оценок от 30 до 180 см к 2100 году [2], [3], причём верхняя граница данного диапазона существенно превосходит значения, приведённые в Четвёртом оценочном докладе МГЭИК

для сценария A1FI. Значительная неопределённость проекций приводит к неопределённости границ зон затопления и, следовательно, параметров нормативного регулирования застройки [10].

Экономическое измерение проблемы было детализировано автором, оценившим среднегодовые убытки от наводнений в 136 крупнейших портовых агломерациях мира [11]. Автор продемонстрировал, что при сохранении существующего уровня защиты и учёте только социально-экономического роста совокупные потери возрастают с 6 млрд долл. в 2005 году до 52 млрд долл. к 2050 году, а учёт субсиденции и повышения уровня океана без модернизации защитных сооружений увеличивает расчётный ущерб до триллиона долларов и более. Принципиальным для градостроительного планирования является вывод о том, что даже при адаптационной политике, поддерживающей неизменную вероятность затопления посредством наращивания дамб, относительные потери, то есть отношение среднегодовых убытков к валовому городскому продукту, продолжают расти: для Джакарты данный показатель увеличивается на 54%, для Абиджана на 24% [12]. Иначе говоря, каждое отдельное событие, превышающее расчётный стандарт защиты, причиняет ущерб, многократно превосходящий современный, что ставит под сомнение достаточность инженерных подходов к обеспечению безопасности прибрежной застройки.

Вопросы пространственного планирования в условиях нарастающей гидрологической угрозы разрабатывались в контексте управления прибрежными зонами, где автор обосновал триаду адаптационных стратегий - защиту, приспособление и плановое отступление [1]. Нидерландская программа Delta Works, предусматривающая повышение стандарта безопасности до вероятности прорыва защитных сооружений 1:100000 посредством намыва пляжей и расширения дюнного пояса, рассматривается как прецедент интеграции инженерной защиты с ландшафтным планированием [13]. Вместе с тем для сельских населённых пунктов и малых прибрежных поселений, не обладающих финансовыми ресурсами мегаполисов, вопросы выбора между указанными

стратегиями и их нормативного закрепления в документах территориального планирования остаются проработанными в значительно меньшей степени, что определяет исследовательский пробел, на заполнение которого направлена настоящая работа.

Материалы и методы исследования. Методологическую основу картографирования зон затопления составляет последовательное сопряжение климатических проекций, цифровой модели рельефа и гидродинамического моделирования штормовых нагонов. В качестве исходных климатических данных используются сценарии шестой фазы Программы сравнения моделей общей циркуляции (CMIP6), а именно траектории SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5, пришедшие на смену репрезентативным концентрационным траекториям RCP и отличающиеся более детальной увязкой социально-экономических допущений с целевыми уровнями радиационного форсинга [10]. Для горизонта 2050 года проекции повышения глобального среднего уровня океана составляют ориентировочно 15-30 см по сценарию SSP1-2.6, 20-40 см по SSP2-4.5 и 25-50 см по SSP5-8.5; к 2100 году разброс расширяется до 40-80, 50-100 и 60-180 см соответственно [13]. Указанные диапазоны отражают как неопределённость эмиссионных траекторий, так и структурную неопределённость климатических моделей, в особенности в части вклада ледниковой динамики.

Цифровая модель рельефа (ЦМР) строится на основе данных аэрофотосъёмки с пространственным разрешением не крупнее 1 м и верифицируется по материалам спутниковой альтиметрии ICESat-2 для прибрежной полосы шириной до 5 км от уреза воды. Для дельтовых участков и территорий с выраженной антропогенной микротопографией, дамбами обвалования, каналами, насыпными площадками, выполняется дополнительная коррекция высотных отметок по данным воздушного лазерного сканирования (LiDAR). Абсолютная погрешность итоговой ЦМР не должна превышать ±5 см в плане и ±3 см по высоте, что обеспечивает корректное выделение зон затопления при глубинах подтопления от 10 см.

Гидродинамическое моделирование штормовых нагонов реализуется в программной среде Delft3D или ADCIRC, позволяющей решать нелинейные уравнения мелкой воды на неструктурированной сетке с переменным шагом, сгущающимся вблизи береговой линии и в устьях водотоков. Граничные условия по внешней границе расчётной области задаются из результатов глобальных волновых моделей (WAVEWATCH III, SWAN), а ветровое поле принимается по реанализу ERA5 для исторических событий и по стохастически сгенерированным траекториям тропических и внетропических циклонов для проектных сценариев. Вероятностная характеристика экстремальных уровней воды формируется путём статистического анализа пиковых значений за период не менее 30 лет с последующей экстраполяцией на расчётные периоды повторяемости 10, 50, 100, 200 и 500 лет методом обобщённого распределения экстремальных значений (GEV).

Неопределённость моделирования оценивается с использованием ансамблевого подхода: для каждой траектории SSP выполняется серия расчётов с варьированием коэффициента шероховатости подстилающей поверхности, скорости консолидации грунтов, величины субсиденции и интенсивности штормового ветра. Итоговая граница зоны затопления фиксируется по 90-ому перцентилю ансамбля, что обеспечивает консервативную оценку риска, необходимую для целей нормативного регулирования. Даже при использовании упрощённых моделей разрушения защитных сооружений относительное влияние подъёма уровня и субсиденции на потери слабо зависит от выбора конкретного варианта модели [4], что позволяет распространять выводы на широкий класс расчётных схем.

Результаты исследования. По итогам ансамблевого моделирования выделены три категории территории, различающиеся по характеру и частоте ожидаемого подтопления, и, соответственно, по типу градостроительного регулирования, которое надлежит для них установить. Концепция дифференциации представлена на рисунке 1.

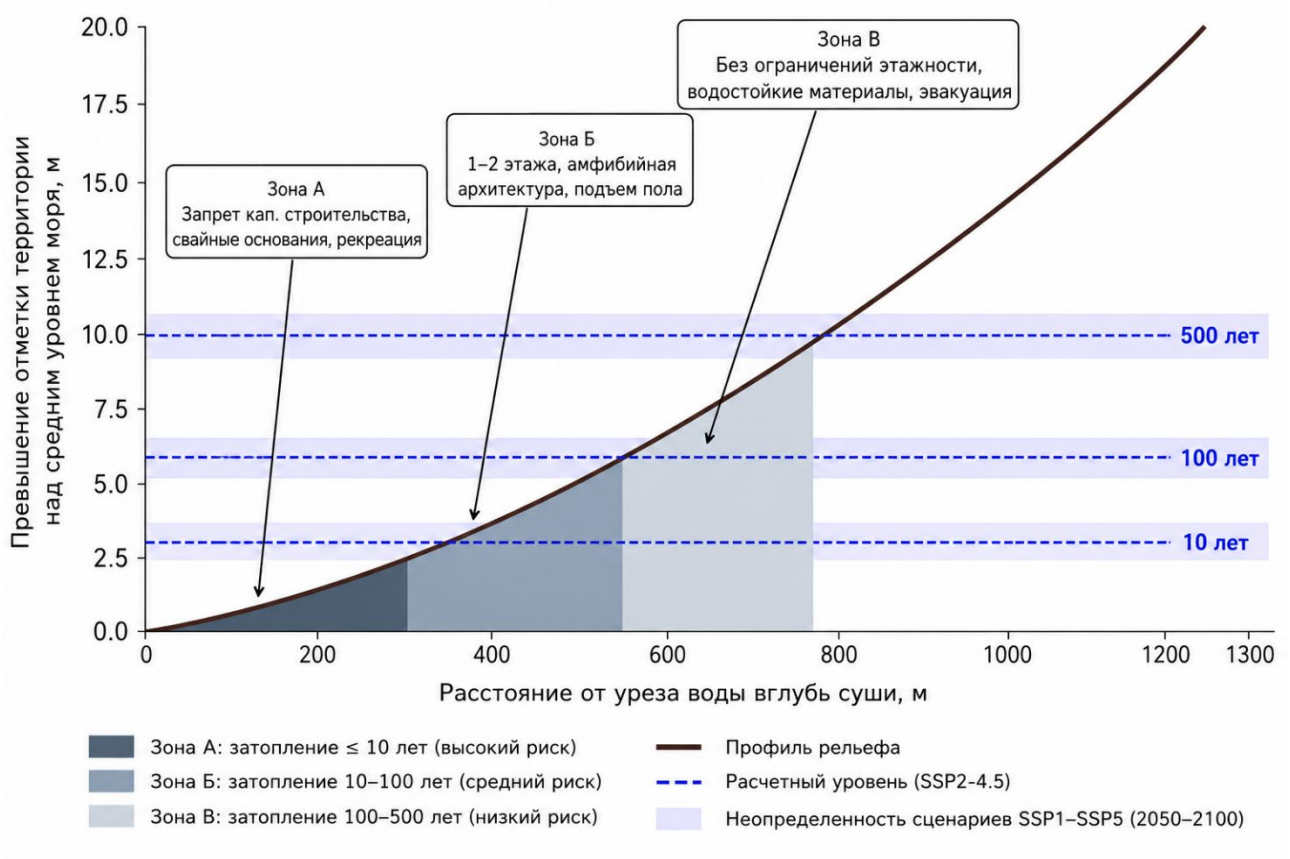


Рисунок 1 - Концептуальная схема зонирования прибрежной территории по степени гидрологической угрозы с привязкой к расчётным периодам повторяемости затопления и сценариям CMIP6 SSP (источник: разработано автором)

При переходе от сценария SSP1-2.6 к SSP5-8.5 граница зоны А смещается вглубь территории на расстояние от 120 до 450 м в зависимости от уклона берегового профиля, а ширина полосы Б увеличивается на 25-60 %. Для пологих дельтовых участков с уклоном менее 1‰ абсолютная величина отступания береговой линии к 2100 году при наихудшем сценарии способна достигать нескольких километров, что делает бессмысленным сохранение существующей функциональной планировки без существенной её переработки (таблица 1).

Таблица 1 - Сравнительная характеристика сценариев CMIP6 SSP применительно к задачам прибрежного территориального планирования на горизонт 2050 года и 2100 года

Параметр	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Целевой радиационный форсинг к 2100 г., Вт/м²	2,6	4,5	8,5
Проекция повышения глобального уровня океана к 2050 г., см	15-30	20-40	25-50
Проекция к 2100 г., см	40-80	50-100	60-180
Ширина неопределённости (межмодельный разброс), % от медианы	±18	±24	±35
Рекомендуемый расчётный период повторяемости для зоны А	10 лет	10 лет	10 лет
Рекомендуемый расчётный период для границы зоны В	200 лет	300 лет	500 лет
Необходимость учёта субсиденции в ЦМР	да, при темпе > 2 мм/год	да, при темпе > 1 мм/год	да, безусловно
Целесообразность пересмотра генерального плана	при изменении границы > 50 м	при изменении границы > 30 м	безусловно

Источник: разработано автором.

При умеренном сценарии SSP2-4.5 ширина неопределённости проекций достигает почти четверти медианного значения, что исключает возможность проектирования защитных сооружений по единственной детерминированной отметке. Градостроительные решения в таких условиях должны закладываться с запасом, перекрывающим межмодельный разброс, либо предполагать поэтапное повышение стандарта защиты по мере уточнения климатических прогнозов. Для удержания относительного риска на постоянном уровне необходимо последовательно снижать вероятность затопления, повышая расчётный стандарт защиты: для Александрии, например, переход от 100-летнего к 270-летнему стандарту требуется при локальном подъёме уровня на 60 см [6]. Аналогичная логика распространяется и на планировочные ограничения: красные линии застройки должны отступать от берега на величину, дополненную резервом, покрывающим неопределённость сценария.

Полученные картографические данные служат основанием для дифференцированного выбора адаптационной стратегии применительно к

конкретному участку прибрежной территории.

Инженерная защита реализуется посредством возведения дамб обвалования, волноломов, бунов, а также формирования искусственных дюнных гряд, выполняющих функцию волногасящего барьера. Нидерландский опыт, на который ссылается автор, демонстрирует, что стратегия наращивания береговой полосы путём намыва песка способна одновременно повышать стандарт безопасности и сохранять рекреационную ценность побережья [1]. Вместе с тем повышение дамб привлекает новую застройку в ранее опасные зоны, вследствие чего при прорыве или переливе ущерб оказывается существенно выше, чем до строительства защиты [1].

Приспособление застройки предполагает сохранение хозяйственного использования территории при условии, что отдельные здания и инфраструктурные объекты проектируются с учётом периодического контакта с водой. К данному классу решений относятся свайные и столбчатые фундаменты, выносящие жилой этаж выше расчётного уровня затопления, амфибийные конструкции, допускающие временное погружение нижних ярусов без потери несущей способности, а также плавучие жилые кварталы, закреплённые на направляющих сваях и способные следовать за колебаниями водной поверхности. Для сельских населённых пунктов дельтовых территорий подобный подход представляет интерес в тех случаях, когда полная защита экономически нецелесообразна, а переселение сопряжено с утратой хозяйственного уклада. В странах с ограниченной адаптационной способностью именно приспособление может оказаться единственной реализуемой стратегией на горизонте ближайших десятилетий [3].

Плановое отступление состоит в организованном переносе застройки и инфраструктуры за пределы зон неприемлемого риска с формированием буферных полос, исключающих последующее капитальное освоение. Распространённое представление о неизбежности массового отступления от берега при подъёме уровня океана не подтверждается анализом затрат и выгод:

для густонаселённых участков стоимость защиты, как правило, оказывается ниже стоимости перемещения активов [3]. Тем не менее, для территорий с низкой плотностью застройки, деградирующими береговыми экосистемами и высоким темпом субсиденции плановое отступление представляет экономически обоснованную альтернативу, позволяющую высвобожденные площади использовать в качестве водно-болотных угодий, рекреационных зон или сельскохозяйственных территорий, не требующих капитальных сооружений (таблица 2).

Таблица 2 - Матрица выбора адаптационной стратегии в зависимости от типа поселения, плотности застройки и темпа относительного подъёма уровня воды

Тип поселения	Плотность застройки, тыс. чел./км²	Темп относительного подъёма, мм/год	Предпочтительная стратегия	Градостроительный инструмент
Крупная портовая агломерация	> 5	< 5	Защита + приспособление застройки	Модернизация дамб, зонирование по периодам повторяемости
Крупная портовая агломерация	> 5	> 5	Защита + частичное плановое отступление	Поэтапный перенос критической инфраструктуры, повышение стандарта защиты
Малый прибрежный город	1–5	< 5	Приспособление застройки + инженерная защита	Свайные фундаменты, локальные волноломы, красные линии
Малый прибрежный город	1–5	> 5	Плановое отступление + приспособление застройки	Буферные зоны, перенос жилой застройки, плавучие конструкции
Сельское поселение (дельтовое)	< 1	< 5	Приспособление застройки	Амфибийная архитектура, сезонное использование территорий
Сельское поселение (дельтовое)	< 1	> 5	Плановое отступление	Плановое переселение, восстановление водно-болотных угодий

Источник: разработано автором.

Для малых прибрежных поселений с низкой плотностью населения и выраженной тенденцией относительного опускания земной поверхности планировочная адаптация должна основываться на сравнительной оценке инженерных, природоориентированных и организационных мероприятий. При скорости локальной субсиденции более 5 мм/год повышается значимость долгосрочного анализа относительного изменения уровня моря и устойчивости существующей инженерной инфраструктуры. В зависимости от особенностей территории могут рассматриваться укрепление береговой линии, восстановление природных защитных элементов, ограничение нового капитального строительства в зонах риска и изменение функционального использования наиболее уязвимых участков. Организованное переселение населения допускается рассматривать как один из альтернативных сценариев при высокой степени территориальной опасности, однако его экономическая и социальная целесообразность требует самостоятельного обоснования. Для крупных прибрежных агломераций приоритетные мероприятия также определяются сопоставлением инженерной защиты, территориальной адаптации и допустимого уровня остаточного риска.

Картографические результаты моделирования получают юридическое закрепление через установление красных линий, отделяющих территорию, на которой капитальное строительство запрещено или существенно ограничено, от зон допустимого освоения. В зоне А (повторяемость затопления 10 лет и чаще) не допускается размещение жилых зданий, объектов социальной инфраструктуры и производственных сооружений; разрешаются лишь временные постройки, объекты рекреации без капитальных фундаментов и инженерные сооружения берегоукрепления. Зона Б (повторяемость 10-100 лет) допускает строительство при условии подъёма отметки пола первого этажа выше расчётного уровня затопления для данного периода повторяемости не менее чем на 0,5 м и применения водостойких материалов в конструкциях ниже этой

отметки. В зоне В (повторяемость 100-500 лет) капитальное строительство не ограничивается, однако инженерные сети следует проектировать с учётом возможности кратковременного подтопления и предусматривать эвакуационные маршруты.

Границы указанных зон подлежат пересмотру не реже одного раза в десять лет с учётом обновления климатических проекций и данных мониторинга субсиденции.

Наряду с инженерными и планировочными мерами адаптации возрастающую роль приобретут подходы, основанные на использовании экосистемных функций прибрежных ландшафтов. Прибрежные водно-болотные угодья (солончаки, мангровые заросли, марши) способны аккумулировать наносы и наращивать собственную высоту со скоростью, сопоставимой с темпом трансгрессии, при условии достаточного седиментационного питания [3]. Деградация данных экосистем лишает прибрежную территорию естественного буфера, смягчающего воздействие штормовых нагонов, и, тем самым, увеличивает нагрузку на инженерные защитные сооружения.

Применительно к Азово-Черноморскому побережью Российской Федерации природным аналогом мангровых зарослей и тропических маршей выступают плавни и лиманные комплексы дельты Кубани, а также солончаковые участки Таманского полуострова. Плавневые территории, занятые тростниковыми и рогозовыми ассоциациями, выполняют функцию естественного волногасящего барьера шириной от нескольких сотен метров до нескольких километров, снижая высоту нагонной волны на 30-60 % в зависимости от плотности растительного покрова и глубины подтопления. Включение плавневых полос в состав буферных зон отступления позволяет не только сократить затраты на инженерную защиту расположенных за ними населённых пунктов, но и сохранить рыбохозяйственное значение лиманов, являющихся нерестилищами ценных видов. Для Калининградского побережья аналогичную роль играют приморские дюнные комплексы с растительностью

колосняка песчаного и приморских лужаек, а также заболоченные участки Куршской косы, где ограничение рекреационной нагрузки и восстановление растительного покрова дюн рассматриваются как элемент адаптационной стратегии наряду с берегоукрепительными сооружениями (рисунок 2).

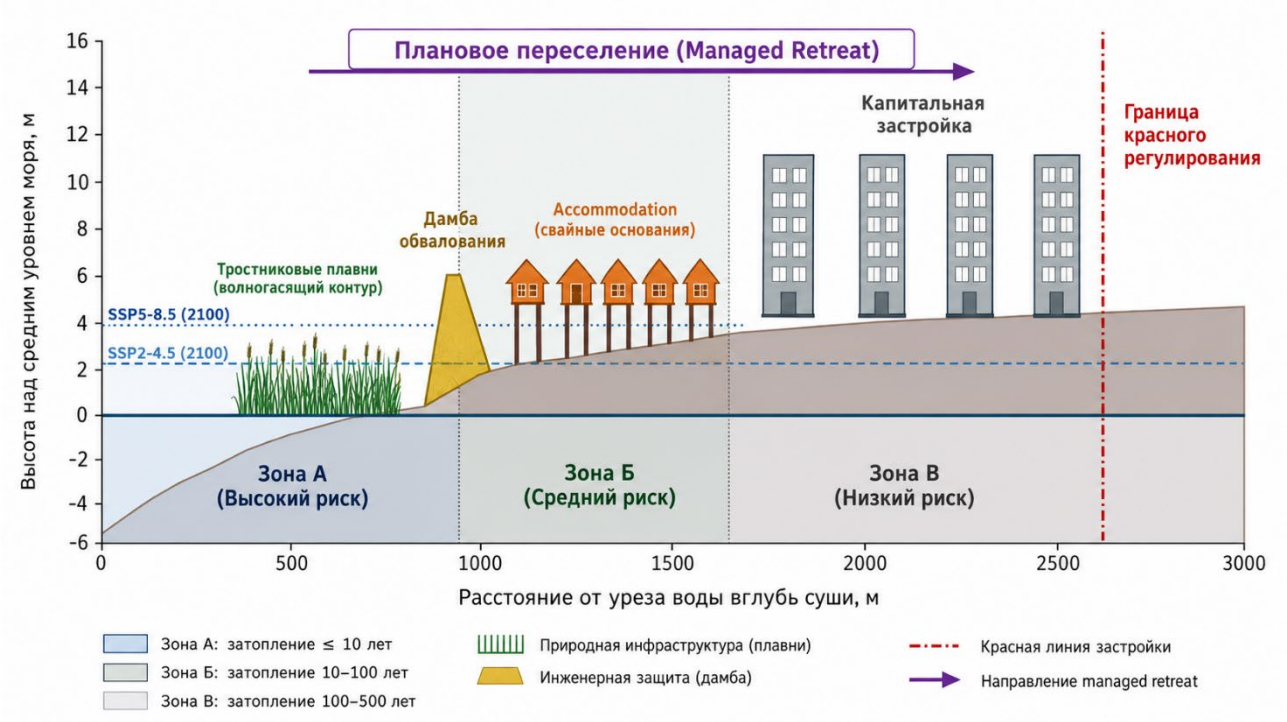


Рисунок 2 - Схема интеграции природной инфраструктуры в систему зонирования прибрежной территории (на примере дельтового участка Азово-Черноморского побережья) (источник: разработано автором)

Плавневая или маршевая полоса, занимающая внешнюю часть зоны А, не является зоной капитального строительства, однако выполняет защитную функцию, снижая расчётную высоту нагона для расположенной за ней дамбы или дюны. Это позволяет уменьшить требуемую высоту инженерного сооружения на 0,5-1,2 м по сравнению с вариантом незащищённого берега, что при значительной протяжённости побережья даёт существенную экономию капитальных вложений. Одновременно данная полоса служит экологическим коридором и местом нереста, что особенно значимо для сельских поселений, хозяйственный уклад которых связан с рыболовством и аквакультурой.

Обсуждение результатов исследования. Представленные данные моделирования и предложенная схема зонирования позволяют выявить ряд

закономерностей, имеющих значение для теории и практики территориального планирования прибрежных поселений. Прежде всего, обращает на себя внимание то обстоятельство, что неопределённость климатических проекций, составляющая 18-35 % медианного значения в зависимости от сценария (таблица 1), делает невозможным установление единственной фиксированной границы зоны затопления на весь расчётный период. Градостроительный регламент, привязанный к конкретной отметке, устаревает по мере поступления новых наблюдательных данных и уточнения моделей ледниковой динамики. Для планировочной практики это означает, что красные линии и границы функциональных зон целесообразно устанавливать как адаптивные, подлежащие сдвигу по мере пересмотра проекций.

Результаты международных сравнительных исследований климатических рисков для совокупности 136 прибрежных городов [3] свидетельствуют о неравномерном распределении потенциальных экономических потерь между территориями различного масштаба и уровня социально-экономического развития. Рассматриваемый массив используется в настоящей работе как внешний аналитический источник и не представляет собой самостоятельную эмпирическую выборку исследуемых российских поселений. При оценке распределения рисков необходимо разграничивать абсолютную величину ожидаемого экономического ущерба и его относительную значимость для местной экономики. Крупные агломерации могут характеризоваться наиболее высокими абсолютными потерями вследствие значительной концентрации населения и капитальных объектов, тогда как для малых населённых пунктов даже сравнительно ограниченный материальный ущерб способен создавать существенную нагрузку на местные бюджеты. Применительно к прибрежным территориям России данные международных сопоставлений следует использовать для обоснования направлений анализа.

Анализ стратегий адаптации показывает, что инженерная защита, оставаясь необходимым элементом обеспечения безопасности, не является

достаточной. При поддержании неизменной вероятности затопления посредством повышения дамб величина потерь при событиях, превышающих расчётный стандарт, возрастает более чем на 50%. Зависимость от защитных сооружений возрастает, однако одновременно повышается уязвимость в случае их отказа или перелива. Данный вывод подкрепляет аргумент в пользу сочетания инженерных мер с планировочными ограничениями: красные линии, запреты на капитальное строительство в зонах высокой повторяемости затопления, требования к отметкам первых этажей и типу фундаментов должны рассматриваться как компонент системы обеспечения безопасности.

Выводы. Итогом работы является обоснование того, что планировочный регламент, фиксирующий допустимые параметры освоения в зависимости от вероятностных характеристик подтопления, выступает первичным инструментом управления риском, а дамбы, волноломы и иные технические конструкции выполняют подчинённую роль, обеспечивая реализацию уже принятого планировочного решения. Подобная инверсия приоритетов составляет, по мнению автора, сдвиг, без которого адаптация прибрежных поселений к прогрессирующей трансгрессии остаётся фрагментарной и экономически неэффективной.

Методологический аппарат, апробированный в настоящей работе, строится на сопряжении климатической проекции, цифровой модели рельефа и гидродинамического расчёта нагонных явлений. Ни один из этих компонентов в отдельности не способен служить основанием для установления нормативных границ застройки; только их совместное использование с оценкой неопределённости по 90-ому перцентилю ансамбля обеспечивает уровень достоверности, достаточный для закрепления результатов в документах территориального планирования. При этом проведённый анализ подтверждает вывод исследователей о том, что неклиматические компоненты относительного подъёма водной поверхности на локальном уровне способны втрое и более перекрывать климатический сигнал [1], что делает мониторинг вертикальных

движений земной поверхности обязательной процедурой при актуализации планировочной документации.

Полученные результаты вносят вклад в развитие теоретических основ планировки сельских населённых пунктов, расположенных в прибрежной полосе, и в совершенствование методического обеспечения территориального планирования в условиях нарастающей гидрологической нестабильности. Сформулированные положения о приоритете планировочного регулирования над инженерной защитой, об адаптивном характере нормативных границ и о необходимости интеграции природных буферных ландшафтов в систему обеспечения безопасности прибрежной застройки могут быть использованы при подготовке нормативных и методических документов федерального и регионального уровней, а также в учебном процессе по направлению подготовки в области градостроительства и территориального планирования.

Список литературы

1. Загребин С. О., Янковская Ю. С. Закономерности развития систем расселения прибрежных арктических регионов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2026. – Т. 28. – №. 2. – С. 9-23.
2. Спирин П. П. Определение морского пространственного планирования в градостроительной системе Российской Федерации // Вестник МГСУ. – 2025. – Т. 20. – №. 7. – С. 1000-1016.
3. Родионов Д. Г., Еремина И. А., Золотарев Т. В. Стратегическое планирование пространственного развития крупных городов в условиях цифровой регионализации // Вестник Академии знаний. – 2025. – №. 5 (70). – С. 338-348.
4. Глигич-Золотарева М. В. Стратегия пространственного развития Российской Федерации: старые проблемы, новые решения // Федерализм. – 2024. – Т. 29. – №. 3. – С. 5-23.
5. Дружинин А. Г., Вольхин Д. А., Кузнецова О. В. Приморские муниципалитеты в пространственном развитии России: многомерная типологизация // Балтийский регион. – 2025. – Т. 17. – №. 3. – С. 81-101.

6. Петровская Е. И., Халилова Н. К., Андрияничева К. А., Юлаева Р. И. Особенности развития Балтийских курортов // Architecture and Modern Information Technologies. – 2026. – №. 1 (74). – С. 128-156.

7. Гогоберидзе Г. Г., Косьян Р. Д., Огородов С. А., Чубаренко Б. В., Бурнашов Е. М., Румянцева Е. А. Кадастр морских берегов России: заделы, проблемы, перспективы // Океанологические исследования. – 2024. – Т. 52. – №. 2. – С. 183-205.

8. Грушина О. В., Русановский В. А. Управление агломерационными процессами в развитии субурбанизированных территорий на примере Иркутского региона // Государственное управление. Электронный вестник. – 2023. – №. 97. – С. 112-137.

9. Дубино А. М. Зарубежный опыт включения водно-зеленого каркаса в градостроительную документацию //Architecture and Modern Information Technologies. – 2025. – №. 3 (72). – С. 275-292.

10. Дубино А. М. Многоуровневый подход к формированию водно-зеленого каркаса города с применением водосберегающих технологий // Architecture and Modern Information Technologies. – 2025. – №. 2 (71). – С. 232-248.

11. Рюмкин С. В., Рюмкина И. Н., Терютина М. М. Сельские территории как объект развития // Естественно-гуманитарные исследования. – 2023. – №. 3 (47). – С. 208-216.

12. Тутыгин А. Г., Чижова Л. А., Носырев Н. С. Социальная функция транспортного потенциала территории (на примере Архангельской агломерации) // Региональные проблемы преобразования экономики. – 2024. – №. 11 (169). – С. 25.

13. Дусаева Е. М. Научно-технологическое развитие регионов Арктической зоны Российской Федерации для промышленного рыболовства // Пространство науки. – 2025. – Т. 2. – №. 3. – С. 574-597.

References

1. Zagrebin S. O., Yankovskaya Yu. S. Zakonomernosti razvitiya sistem rasseleniya

pribrezhny`x arkticheskix regionov // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arxitekturno-stroitel`nogo universiteta. – 2026. – T. 28. – №. 2. – S. 9-23.

2. Spirin P. P. Opredelenie morskogo prostranstvennogo planirovaniya v gradostroitel`noj sisteme Rossijskoj Federacii // Vestnik MGSU. – 2025. – T. 20. – №. 7. – S. 1000-1016.

3. Rodionov D. G., Eremina I. A., Zolotarev T. V. Strategicheskoe planirovanie prostranstvennogo razvitiya krupny`x gorodov v usloviyax cifrovoj regionalizacii // Vestnik Akademii znanij. – 2025. – №. 5 (70). – S. 338-348.

4. Gligich-Zolotareva M. V. Strategiya prostranstvennogo razvitiya Rossijskoj Federacii: stary`e problemy`, novy`e resheniya // Federalizm. – 2024. – T. 29. – №. 3. – S. 5-23.

5. Druzhinin A. G., Vol`xin D. A., Kuzneczova O. V. Primorskie municipalitety` v prostranstvennom razvitii Rossii: mnogomernaya tipologizaciya // Baltijskij region. – 2025. – T. 17. – №. 3. – S. 81-101.

6. Petrovskaya E. I., Xalilova N. K., Andriyanicheva K. A., Yulaeva R. I. Osobennosti razvitiya Baltijskix kurortov // Architecture and Modern Information Technologies. – 2026. – №. 1 (74). – S. 128-156.

7. Gogoberidze G. G., Kos`yan R. D., Ogorodov S. A., Chubarenko B. V., Burnashov E. M., Rumyanceva E. A. Kadastr morskix beregov Rossii: zadely`, problemy`, perspektivy` // Okeanologicheskie issledovaniya. – 2024. – T. 52. – №. 2. – S. 183-205.

8. Grushina O. V., Rusanovskij V. A. Upravlenie aglomeracionny`mi processami v razvitii suburbanizirovanny`x territorij na primere Irkutskogo regiona // Gosudarstvennoe upravlenie. E`lektronny`j vestnik. – 2023. – №. 97. – S. 112-137.

9. Dubino A. M. Zarubezhny`j opy`t vklyucheniya vodno-zelenogo karkasa v gradostroitel`nuyu dokumentaciyu //Architecture and Modern Information Technologies. – 2025. – №. 3 (72). – S. 275-292.

10. Dubino A. M. Mnogourovnevy`j podxod k formirovaniyu vodno-zelenogo karkasa goroda s primeneniem vodosberegayushhix texnologij // Architecture and Modern

Information Technologies. – 2025. – №. 2 (71). – S. 232-248.

11. Ryumkin S. V., Ryumkina I. N., Teryutina M. M. Sel`skie territorii kak ob``ekt razvitiya // Estestvenno-gumanitarny`e issledovaniya. – 2023. – №. 3 (47). – S. 208-216.

12. Tuty`gin A. G., Chizhova L. A., Nosy`rev N. S. Social`naya funkciya transportnogo potenciala territorii (na primere Arxangel`skoj aglomeracii) // Regional`ny`e problemy` preobrazovaniya e`konomiki. – 2024. – №. 11 (169). – S. 25.

13. Dusaeva E. M. Nauchno-texnologicheskoe razvitie regionov Arkticheskoj zony` Rossijskoj Federacii dlya promy`shlennogo ry`bolovstva // Prostranstvo nauki. – 2025. – T. 2. – №. 3. – S. 574-597.

Статья поступила в редакцию 28.05.2026; одобрена после рецензирования 14.07.2026; принята к публикации 08.10.2026.

The article was submitted 28.05.2026; approved after peer review 14.07.2026; accepted for publication 08.10.2026.