

*Д.В. Рябчук, А.Ю. Сергеев, О.А. Ковалева, И.О. Леонтьев,
В.А. Жамойда, А.М. Колесов*

ПРОБЛЕМЫ АБРАЗИИ БЕРЕГОВ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА: СОСТОЯНИЕ, ПРОГНОЗ, РЕКОМЕНДАЦИИ ПО БЕРЕГОЗАЩИТЕ

*D.V. Ryabchuk, A.Yu. Sergeev, O.A. Kovaleva, I.O. Leont'ev,
V.A. Zhamoida, A.M. Kolesov*

PROBLEMS OF COASTAL EROSION IN THE EASTERN GULF OF FINLAND: STATE, PROGNOSIS OF DEVELOPMENT, RECOMMENDATIONS ON COAST PROTECTION

Берега восточной части Финского залива характеризуются интенсивным развитием абразионных процессов. Ежегодный мониторинг состояния береговой зоны позволил выявить основные геолого-геоморфологические предпосылки активного развития абразии, а также гидрометеорологические факторы, контролирующие экстремальные размывы берегов. Установлена зависимость интенсивности абразии от изменений климата, выполнен прогноз скоростей отступления берега при различных сценариях климатических изменений.

Ключевые слова: береговая зона, Финский залив, абразия, изменения климата.

Coasts of the Eastern Gulf of Finland are characterized by intense erosion processes. Annual coastal zone monitoring allowed to establish the main geological and geomorphological reasons of active coastal erosion, as well as hydrometeorological driving forces of extreme erosion events. Links of erosion intensity with climate change were find, and prognosis of coastal zone development under different climate change scenarios is presented.

Keywords: Coastal zone, Gulf of Finland, erosion, climate change.

Введение

Берега восточной части Финского залива обладают большой рекреационной ценностью, поэтому отмечающаяся в последнее десятилетие активизация опасных экзогенных геологических процессов, к которым прежде всего относится береговая абразия, привлекает к себе пристальное внимание как специалистов, так и природопользователей.

Для разработки и успешного осуществления эффективных мер по берегозащите наиболее ценных в рекреационном отношении участков берегов необходимы понимание причин происходящих процессов и прогноз их дальнейшего развития. Особую

актуальность указанные проблемы приобретают в контексте возможных климатических изменений.

Фактический материал и методы исследований

С 2000 г. специалистами ВСЕГЕИ в ежегодном режиме выполняются комплексные геолого-геоморфологические и геофизические исследования береговой зоны восточной части Финского залива в рамках проектов, осуществляемых при поддержке Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Санкт-Петербурга и Федерального агентства по недропользованию. В 2011–2015 гг. основной объем работ был выполнен в рамках проектов «Государственный мониторинг состояния геологической среды (недр) прибрежно-шельфовой зоны Балтийского, Белого и Баренцева морей» и «Разработка Генеральной схемы берегозащиты Курортного района Санкт-Петербурга».

В пределах Курортного района Санкт-Петербурга эти работы включают в себя береговые маршруты, нивелировки по сети опорных профилей (в том числе, в оперативном режиме после сильных штормов), гранулометрический анализ осадков пляжа и подводного берегового склона. На прибрежных мелководьях выполнено более 1600 км профилирования методом гидролокации бокового обзора (ГЛБО) с использованием гидролокатора CM2 (C-MAX Ltd, UK) с полосами обзора 100, 50 и 25 м с каждого борта, осуществлен такой же объем эхолотирования, более 500 км непрерывного сейсмоакустического профилирования. Для заверки геофизических данных и получения материала для лабораторных исследований применяется донный пробоотбор и подводная видеосъемка. Пробы донных осадков отбираются дночерпателем, бокс-корером и герметичной грунтовой трубкой. В 2012–2013 и 2014–2015 гг. для отдельных участков берега было выполнено лазерное сканирование (в том числе, в повторном режиме после экстремальных штормов), что позволило впервые выполнить количественную оценку объемов потери песчаного материала под воздействием абразии, а также многолучевое эхолотирование в пределах дна акватории.

Для анализа изменений гидрометеорологических факторов были использованы материалы ГУ Санкт-Петербургский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ГУ СПб ЦГМС-Р).

Благодаря длительной истории хозяйственного освоения территории Курортного района в открытом доступе имеется большое количество архивного картографического материала, что, наряду с использованием результатов аэрофотосъемки высокого разрешения, выполнявшейся в исследуемом районе НИИКАМ в 1981 и 1990 г., позволяет выполнять оценки скоростей размыва берегов с использованием ретроспективного анализа материалов дистанционного зондирования.

Характеристика интенсивности абразионных процессов северной береговой зоны Финского залива в пределах Курортного района

На всем протяжении рассматриваемой береговой зоны верхняя часть геологического разреза сложена легко поддающимися размыву четвертичными отложениями

Дополнительными факторами, способствующими активному развитию абразии, являются выявленные в ходе морских геолого-геофизических работ особенности рельефа прибрежных мелководий — постепенно размывающийся край подводной прибрежной террасы, существование которой несколько снижает волновое воздействие на берега, а также эрозионные ложбины стока, представляющие собой вытянутые в юго-западном направлении понижения рельефа дна длиной до нескольких сот метров, шириной 10–20 м и относительной глубиной до 1 м, по которым происходит вынос песчаного материала компенсационными течениями в сторону моря при сильных штормах [9].

Таким образом, геологическое строение, рельеф и тектонический режим береговой зоны Курортного района создают предпосылки для активного развития абразионных процессов. Результатом является преобладание абразионных и аккумулятивно-абразионных подтипов (более 60 %) среди морфогенетических типов берегов Курортного района (рис. 2). По данным ретроспективного анализа материалов дистанционного зондирования, средняя многолетняя скорость отступления берегов за период 1981–2005 гг. составляет 0,25–0,5 м/год [9].

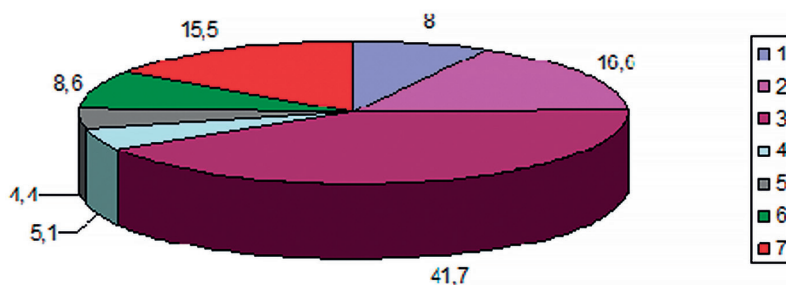


Рис. 2. Диаграмма распределения типов берегов Курортного района.

Условные обозначения: подтипы берегов: 1 — аккумулятивный песчаный, выравнивающийся мелкобухтовый; 2 — аккумулятивно-абразионный (аккумулятивный песчаный пляж с абразионными формами рельефа на подводном береговом склоне); 3 — абразионный моренный, мелкобухтовый; 4 — абразионный песчаный, мелкобухтовый; 5 — техногенный; 6 — аккумулятивный илистый с развитием водной растительности на подводном береговом склоне; 7 — выровненный аккумулятивный песчаный

Важнейшей особенностью развития абразионных процессов в восточной части Финского залива является их цикличность. Исследования и мониторинг состояния берегов позволили выявить комплекс гидрометеорологических факторов, контролирующих экстремальные размывы берегов. По данным повторных нивелировок было установлено, что скорость отступления абразионного уступа в дюнах может достигать 5 м за один шторм, что осенью–зимой 2011 г. привело к отступанию авандюны в пос. Комарово на расстояние до 10 м. Наиболее сильные размывы берегов происходят при сочетании трех факторов: подъема уровня воды, штормовых ветрах западного и юго-западного направлений и отсутствия ледового покрова. В наших работах [9, 16] приведен детальный анализ гидрометеорологических данных за 2000–2011 гг. и их сопоставление с наблюдениями за интенсивностью абразионных процессов.

Данный по результатам наблюдений прогноз подтвердился в 2012–2015 гг. Осенью 2012 г. при прохождении октябрьских и ноябрьских циклонов уровень подъема воды не превышал 140 см. Значительных размывов берегов зафиксировано не было, наблюдалось медленное восстановление авантюн. Осень 2013 г., напротив, характеризовалась исключительной активностью циклонических процессов. Наиболее штормовым в этой серии оказался циклон, зародившийся в северной Атлантике 28 октября и сместившийся с большой скоростью — 80–90 км/ч к южной Балтике. По мере своего продвижения на восток и углубления циклон превратился в ураган, который в европейских странах получил название «Святой Иуда». Утром и днем 29 октября по мере продвижения циклона по территории Южной Финляндии и Карелии скорость его снизилась до 60 км/ч. Усиление ветра с приближением этого циклона отмечалось на всей территории Северо-Запада — от Калининграда до Республики Карелия. Порывы ветра на большей части региона достигали от 16 до 24 м/с, а на акватории Финского залива превышали критерий опасного явления, достигая 25–28 м/с. Очень сильный ветер юго-западного, западного направлений способствовал нагону воды в Финский залив и создал угрозу наводнения в Санкт-Петербурге. Ввиду возможности опасного подъема воды утром 29 октября Комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС) был полностью закрыт и оставался в таком состоянии до 19 ч. Максимальный подъем уровня воды у гидрологического поста «Горный институт» к 15 ч составил 120 см, а к западу от КЗС — до 190–210 см.

Практически в течение всего ноября циклоны продолжали следовать через Балтийское море и территорию Финского залива. Усиления ветра, преимущественно западных направлений, наблюдались ежедневно на большей части Ленинградской области. В течение месяца было отмечено тринадцать дней с порывами ветра 12–16 м/с, до семи дней — с порывами 17–24 м/с. Наиболее сильный ветер наблюдался 17 ноября, когда глубокий циклон быстро сместился с центральных районов норвежского побережья к Архангельску. В его южной, а затем и в тыловой части произошло усиление западного, северо-западного ветров до 25–28 м/с. Очень сильный ветер отмечался по территории Ленинградской области и на акватории Финского залива. В Санкт-Петербурге в связи с влиянием этого циклона создавалась угроза очередного наводнения, которое было предотвращено после закрытия КЗС. Уровень воды в устье р. Невы вечером 17 ноября повысился до 135 см. В последнем месяце года наиболее сильный ветер наблюдался 13 декабря, когда штормовой циклон быстро сместился с норвежского побережья севернее Санкт-Петербурга. Усиление ветра западного направления до 25–26 м/с наблюдалось на акватории Финского залива. В течение месяца уровень воды в Невской губе оставался повышенным, постоянно поднимаясь до +100...+130 см и опускаясь в отдельные периоды до +20...+50 см.

В результате воздействия штормов вновь на всем протяжении пояса береговых дюн сформировался активный абразионный уступ, рекреационной инфраструктуре был нанесен значительный ущерб (рис. 3).

Механизм воздействия экстремальных штормов на профиль пляжа для участка берега в пос. Комарово удалось проследить благодаря выполненному в рамках совместного российско-финляндского проекта CliPLivE («Адаптация городской окружающей среды к негативным последствиям климатических изменений») Программы

«Юго-Восточная Финляндия — Россия» лазерному сканированию. Измерения в повторном режиме (осень 2012 г., в период стабилизации пляжа, и осень 2013 г., непосредственно после серии штормов) показали, что под воздействием шторма происходит активный вынос песчаного материала из тыловой части пляжа, сопровождающийся отступанием абразионного уступа (рис. 4).

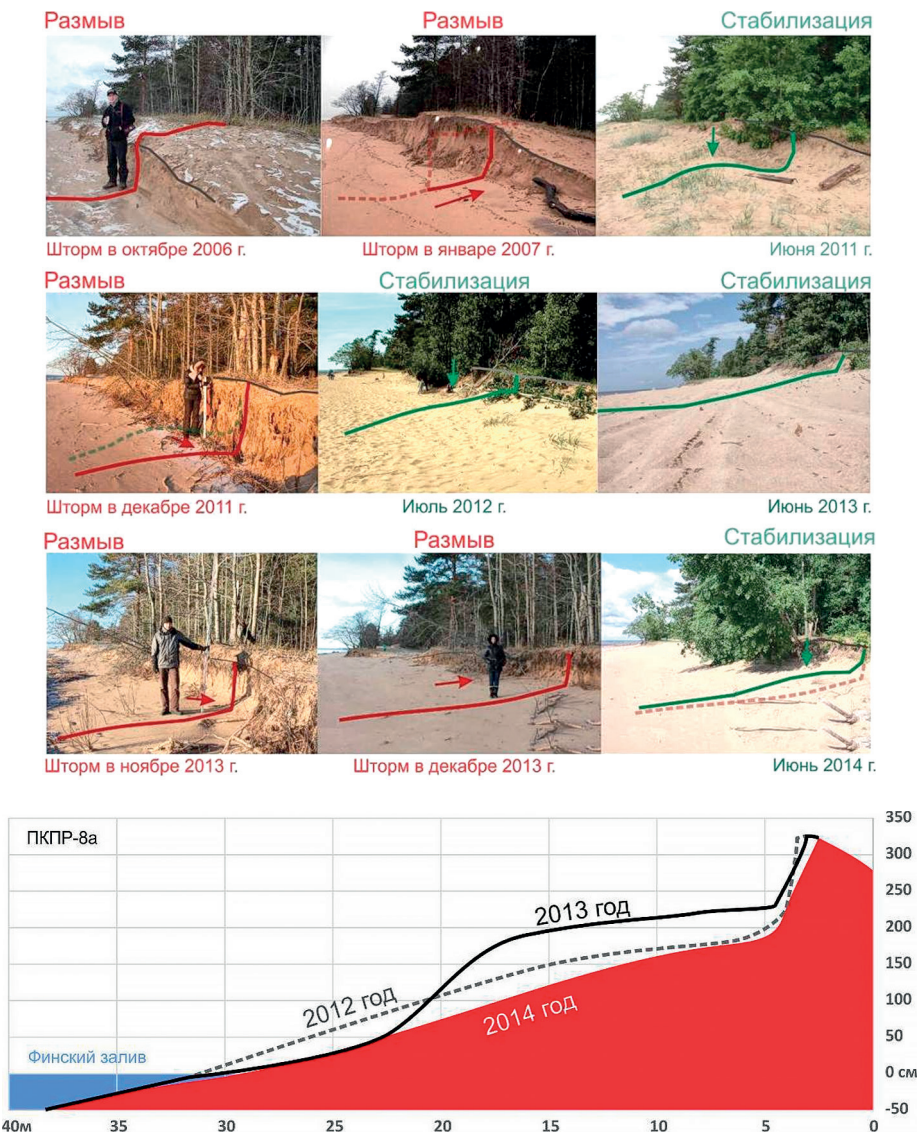


Рис. 3. Чередование процессов размыва и стабилизации в период с 2006 по 2014 г. и результаты повторных нивелировок за 2012–2014 гг. (опорный профиль 8а, пос. Комарово)

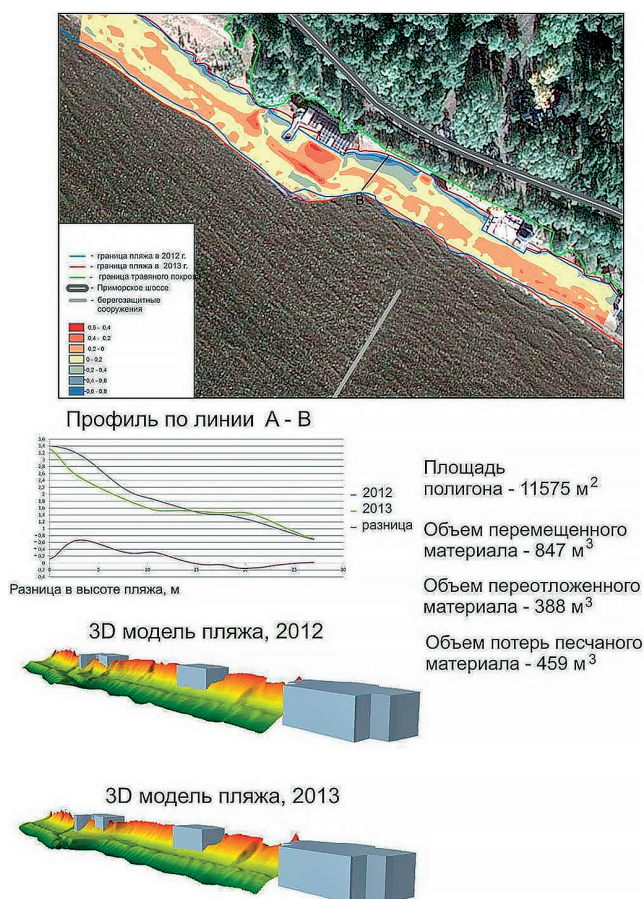


Рис. 4. Результаты лазерного сканирования в повторном режиме (песчаный пляж пос. Комарово)

Часть песка при этом откладывается на поверхности пляжевой ступени, в то же время в целом баланс осадочного материала оказывается отрицательным — часть песка безвозвратно теряется в результате выноса в нижнюю часть подводного берегового склона. В рассматриваемом случае объем потерь составил 459 м³ (около 90 м³ со 100 м протяженности пляжа).

Осень 2014 г. — зима 2015 г. были относительно спокойными. Несмотря на аномально теплые температуры опасных с точки зрения размыва берегов подъемов уровня, совпадающих с пиками штормовой активности, зафиксировано не было. Наиболее высокий уровень (148 см выше ординара) был зафиксирован 13 декабря в тылу активного циклона, сместившегося через Балтийское море в Финский залив.

Напротив, осень 2015 г. характеризовалась значительной циклонической активностью. Наиболее опасного уровня, с точки зрения размыва берегов, штормовое

воздействие достигло 5–7 декабря 2015 г., когда уровень воды в Финском заливе превысил отметку 227 см. Высота волн в открытой части залива в пиковые периоды шторма по данным модели (meteo.pl) составляла 3–4 м. Порывы юго-западного ветра достигали 23 м/с. Лед на акватории отсутствовал.

Берега Курортного района испытали очередной значительный размыв. По результатам лазерного сканирования [17] на пляже пос. Комарово размыв тыловой части пляжа составил 232 м³, безвозвратные потери песка — 4,5 м³ на 100-метровой береговой линии; в пос. Репино — 190 и 93 м³; в пос. Серово — 126 и 72 м³ соответственно.

Анализируя современные тенденции развития береговых процессов восточной части Финского залива, важно отметить, что по сравнению со второй половиной XX в., когда частота экстремальных штормов составляла один раз в 25 лет [2], в последнее десятилетие такие ситуации фиксируются значительно чаще (по данным наблюдений ВСЕГЕИ — четыре раза за 10 лет). Основными причинами являются климатические изменения: более теплые зимы приводят к более позднему установлению ледяного покрова, который играет защитную роль в абразионных процессах [9]. Кроме того, исследователями отмечается рост частоты экстремальных подъемов уровня Финского залива в зимний период [8].

Результаты мониторинга, выявившие резкую активизацию абразионных процессов в береговой зоне восточной части Финского залива, поставили задачу прогнозирования дальнейшего развития береговых процессов при различных сценариях климатических изменений. Попытка решения этой задачи была предпринята в ходе российско-финляндского проекта CliPLivE.

Прогнозирование развития береговой зоны восточной части Финского залива

Для создания трехмерной топографической ГИС-основы для прогнозирования использовались данные о рельефе Санкт-Петербурга масштаба 1 : 10 000, космические снимки высокого разрешения и топографические элементы генерального плана города. На первом этапе исследований с использованием указанных материалов и данных натурных наблюдений были построены карты распространения зоны волнового воздействия, соответствующая субэкральной границе береговой зоны. Для Курортного района эта величина колеблется в пределах 2–3 м.

При прогнозировании развития береговой зоны Курортного района Санкт-Петербурга на период до 2100 г. были рассмотрены различные случаи: 1) отсутствие климатических изменений (прогноз для текущей климатической ситуации); 2) «оптимистический» и 3) «пессимистический» сценарии климатических изменений.

Прогноз развития береговой зоны Курортного района для текущей климатической ситуации. При первом подходе за основу выполнения расчетов возможных скоростей отступления береговой линии принимались средние многолетние скорости размыва для различных участков берега, рассчитанные по данным ретроспективного анализа материалов дистанционного зондирования (МДЗ) и нивелировочного профилирования по опорным профилям, геологическое строение береговой зоны и экспозиция береговой линии.

Величина трансформации берегов была определена на основе анализа данных аэрофотосъемки и космосъемки с 1981 по 2011 г. Аэрофотоснимки были предоставлены НИИКАМ, космоснимки были получены из интернет-ресурса, предоставляемого bing maps. В ArcMap осуществлялась географическая привязка имеющихся снимков за разный период съемки к наиболее современному и наиболее детальному космоснимку (главному), имеющему встроенную геопривязку. Наложение отдельных фрагментов снимков для каждого участка позволило максимально исключить геометрические невязки, возникающие при наложении больших по площади космо- и аэрофотоснимков. Данные привязывались в системе координат WGS 84 UTM zone 35N. Наложение и привязка аэрофотоснимков и космоснимков к главному космоснимку осуществлялась по легко определяемым объектам, не изменяемым со временем, таких как углы сооружений, столбы линии электропередач и т.п. После этого производилась оцифровка положения берегового уступа или авандюны на каждом из снимков.

Для анализа временной изменчивости были выбраны наиболее типичные участки берега Санкт-Петербурга, выделяющиеся по своим морфометрическим и геологическим особенностям: экспозиция берега, расчлененность, литологический состав отложений, слагающих берег, неотектоническая направленность развития и т.п. По результатам анализа МДЗ выделялись участки с однонаправленным изменением тыловой части пляжа или со стабильным состоянием. На таких участках, свободных от техногенного вмешательства, ставились балансовые точки. В них измерялись величины трансформации береговой зоны: ширина пляжа относительно среднегодового уреза, положение уступа или авандюны. Также фиксировалось наличие валунно-галечной отмостки на мелководье, и гранулометрический состав пляжа. Всего было выделено 42 балансовые точки вдоль всего побережья Финского залива в пределах Санкт-Петербурга, для которых производился расчет относительной трансформации берега в каждой балансовой точке.

Полученные измеренных скоростей отступления берега были наложены на данные о типе отложений в приурезовой части пляжа и карту уровня залегания поверхности морены. Мощность песчаных отложений и глубина поверхности подстилающей их морены, при достижении которой скорость размыва берега резко уменьшается, играет при прогнозировании дальнейшего развития береговой зоны принципиальную роль (рис. 5).

Интерполяция значений трансформации береговой линии между балансовыми точками проводилась по методу кригинга с поиском ближайших 12 точек по сферической модели. Интерполяция проводилась между точками на участках берега с одинаковой экспозицией. Получившиеся grids служили основой для деления береговой линии на отрезки с шагом изменения положения береговой линии на 0,5 м в год. Каждому отрезку задавалась буферная зона, соответствующая прогнозу изменения береговой линии на 50 и 100 лет. После чего осуществлялась экспертная оценка трансформации береговой линии с учетом геологического строения и геоморфологических особенностей береговой зоны.

Следует отметить, что такой параметр, как «ширина пляжа», является довольно эфемерным критерием, так как обладает значительной сезонной изменчивостью,

сильно зависит от направленности и интенсивности штормов, продолжительности их фаз и способности береговой зоны к самопроизвольному восстановлению за счет перераспределения материала. Более правильным подходом к прогнозированию развития берега является отслеживание положения тыловой части пляжа. Однако в этом случае следует иметь в виду, что стабильность берегового уступа или авантюны обусловлена защитной функцией пляжа, рассеивающей разрушающую энергию волн. Таким образом, исключать скорость сокращения пляжа из прогноза было бы некорректно. Для учета прогноза скорости трансформации береговой линии была принята концепция, отраженная на графике (рис. 6).

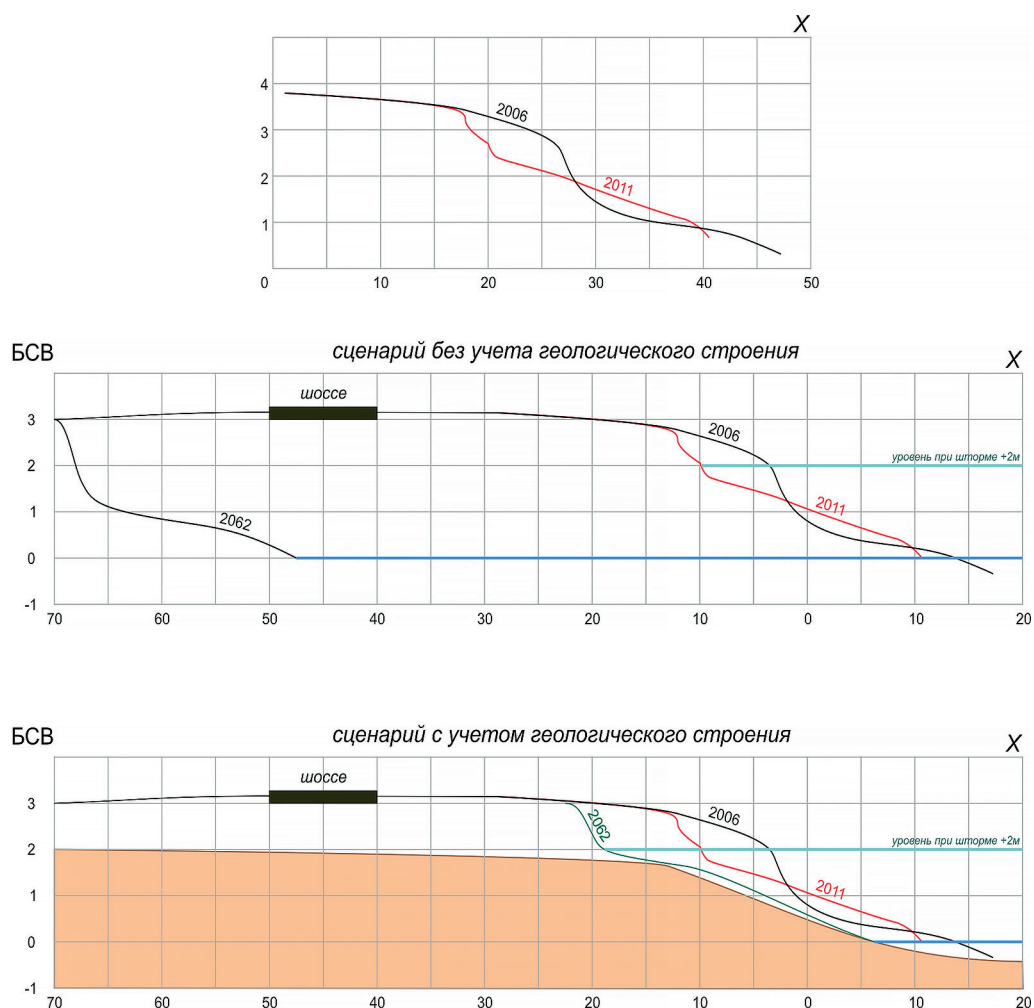


Рис. 5. Механизм развития абразионного песчаного берега без учета и с учетом глубины залегания поверхности морены

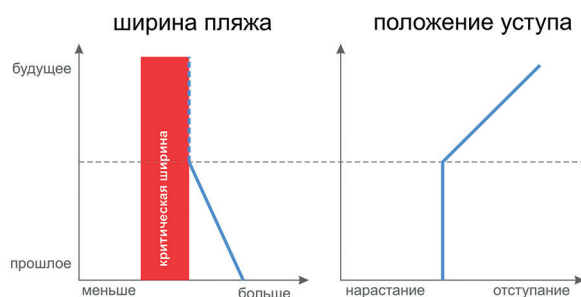


Рис. 6. Концептуальный график прогноза изменения береговой линии во времени, где слева показано среднее сокращение ширины пляжа до критической ширины, после которой пляж теряет защитные свойства; ломаная линия (справа) показывает изменение положения уступа

На участках береговой зоны, где в условиях штормовых нагонов воды пляж превращается в мелководную часть подводного берегового склона, береговой уступ легко подвергается разрушению. Важную роль в этом процессе играет экспозиция берега. Для северного побережья, по данным анализа МДЗ, наиболее уязвимым оказывается участок берега от пос. Комарово до пос. Солнечное: здесь наблюдается перманентное отступление берегового уступа, протекающее синхронно с сокращением пляжа. Таким образом, в существующих лито- и гидродинамических условиях пляж здесь достиг критической ширины. Наибольшей стабильностью обладает отрезок от пос. Солнечное до м. Дубовской.

Предложенная концепция (см. рис. 6) трансформации берега со временем может быть применима только к берегам, сложенным преимущественно песчаным материалом. Для моренных берегов, где под слоем пляжевых отложений расположены трудно размываемые валунно-галечные суглинки, график должен иметь иной вид, с достижением критической ширины пляжа (рис. 7).

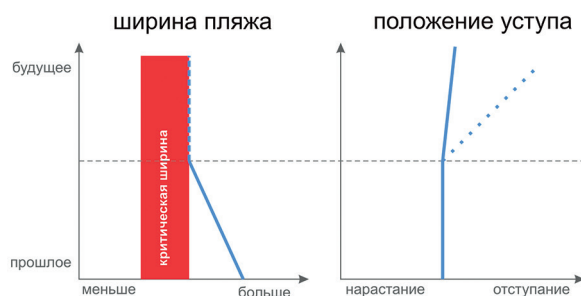


Рис. 7. Концептуальный график прогноза изменения береговой линии для моренных берегов

При более детальном рассмотрении механизма долгосрочного развития береговой зоны графики сокращения ширины пляжа и перемещения уступа приобретают ступенчатый вид (рис. 8). Резкие скачки на графике объясняются активизацией штормовых

процессов, приводящих к мгновенному отступанию берегового уступа и увеличению пляжа за счет мобилизации абразионного материала. В зависимости от продолжительности фаз шторма может происходить и уменьшение объема наносов, за счет выноса его на глубину за пределы зоны возврата.

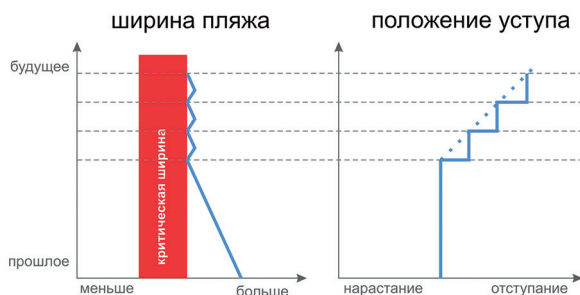


Рис. 8. Детализация графиков сокращения ширины пляжа и перемещения уступа

Таким образом, подход к выбору прогнозных скоростей отступания берега состоял из двух этапов: 1 — рассмотрение скорости сокращения пляжа как естественного барьера, защищающего побережье; 2 — рассмотрение скорости размыва тыловой зоны пляжа. Именно со вторым этапом связан значительный неблагоприятный эффект, оказывающий негативное влияние на прибрежные территории.

По результатам расчетов прогнозные карты развития береговой зоны Курортного района были построены в ArcGIS, визуализация результатов выполнена с использованием сервиса Google Earth. Расчеты показали, что при сохранении текущей климатической ситуации с учетом среднесуточных скоростей отступания береговой линии и геологического строения общая площади потерянных в результате абразии прибрежных территорий Курортного района составит около 1,3 км², максимальные величины отступания абразионных уступов на отдельных участках берега могут достичь 50 м.

Прогноз развития береговой зоны Курортного района для различных сценариев климатических изменений. Научно обоснованный прогноз развития береговых зон восточной части Финского залива в соответствии с существующими сценариями климатических изменений представляется сложной задачей. Как было показано выше, основными гидрометеорологическими факторами, контролирующими интенсивность абразии, являются штормовая активность, уровень моря и длительность существования ледяного покрова. Из указанных параметров в настоящее время поддаются прогнозу в соответствии и общепринятыми сценариями климатических изменений средние скорости подъема уровня моря и длительность ледового периода.

Расчетные оценки показывают, что при реализации «благоприятного» сценария эмиссий парниковых газов «B2» повышение уровня моря в районе Санкт-Петербурга на конец XXI в. составит около 40 см. В том случае, если реализуется «неблагоприятный» сценарий «A2», высота подъема уровня восточной части Финского залива может составить до 1 м [14].

В связи с прогнозируемым повышением температуры приземного воздуха, прежде всего в зимние месяцы, к 2100 г. продолжительность ледового сезона в Финском заливе может уменьшиться на 1,5–2 мес. по сравнению с наблюдающимися в настоящее время, толщина льда уменьшится до 20–30 см, и только самая восточная часть залива будет полностью замерзать [15].

В то же время для наиболее важных с точки зрения интенсивности абразионных процессов факторов — штормовой активности и частоты возникновения наводнений — для Балтийского моря и Финского залива достоверных прогнозов в настоящее время не существует [19].

Согласно моделированию по геострофическим ветрам, штормовая активность была максимальной в период с 1881 по 1910 г., затем уменьшалась до 1965 г. [11]. С 1960-х по 1990-е гг. наблюдалась более интенсивная западная циркуляция в зимнее время, которая совпала с трендом изменения NAO-индекса, который в предыдущие двести лет изменялся незакономерно. Это привело к увеличению частоты проникновения океанских воздушных масс, повышению зимних температур и увеличению влажности в районах, подверженных воздействию западных ветров, особенно в 1990-х гг. В первой половине 2000-х гг. в Балтике отмечалось снижение штормовой активности, со второй половины 2000-х вновь фиксируется ее рост [18]. Однако в целом, по мнению специалистов, столетние временные серии наблюдений в Скандинавии не позволяют выявить четких трендов изменения штормовой активности. Различные источники данных показывают несколько разные результаты изменения ветрового режима, особенно это касается экстремальных ветров. Важно отметить, однако, что, по мнению большинства специалистов, наблюдается усиление воздействия экстремальных ветров.

В связи с отсутствием достоверных прогнозов частоты экстремальных штормов и нагонов в основу прогнозирования развития береговой зоны на ближайшее столетие было положено математическое моделирование скоростей отступления берега для двух условных сценариев. «Оптимистический» сценарий предполагает подъем уровня Финского залива на 40 см при частоте экстремальных штормов, соответствующей средним показателям для второй половины XX в. — 1 раз в 25 лет. «Пессимистический» сценарий основан на расчетном повышении уровня моря на 1 м при частоте экстремальных штормов 1 раз в 10 лет.

Модель будущего развития рассматриваемых берегов можно представить как результат воздействия последовательных штормовых циклов, характеризующихся достаточно редкой повторяемостью. Речь идет об исключительно сильных штормах при высоте нагона не менее 2 м [6]. Как показали данные мониторинга, подтверждающие результаты математического моделирования [4], при экстремальных штормах наносы поставляются с авандюны на пляж, а в периоды более слабой волновой активности песок выносится с пляжа на подводный склон. В силу свойств действующих волнений потери материала из тела дюны оказываются необратимыми. Авандюна, таким образом, отступает. Рецессия имеет характер импульсов, которые совпадают с моментами экстремальных штормовых событий, воздействующих на верхнюю часть авандюны. В промежутках между этими событиями изменения затрагивают в основном приурезовую область пляжа, где доминирует размыв.

Результаты выполненных расчетов иллюстрирует рис. 9, где показаны положения берегового профиля после ряда последовательных экстремальных штормов (в количестве 10). В качестве начального (нулевого) принимается профиль 2011 г., зафиксированный до штормового периода.

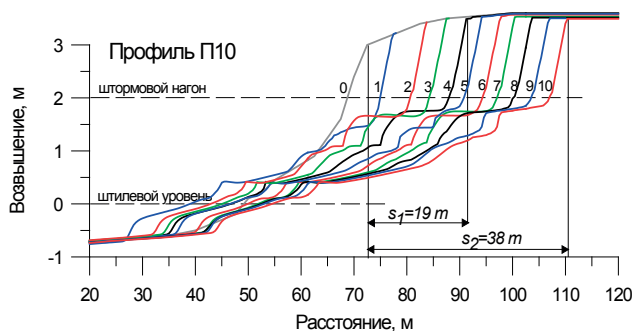


Рис. 9. Прогнозируемая рецессия берега в ближайшие 100 лет [5]

Согласно расчетам, береговой профиль постепенно отступает и становится более пологим, что характерно для берегов, развивающихся в условиях дефицита бюджета наносов, когда доминирует вынос материала [4]. Величина рецессии зависит от периода повторяемости экстремальных событий. Если считать, что он остается тем же, что и прежде (25 лет), то смещение бровки уступа в ближайшие 100 лет составит 19 м. Если же предположить уменьшение периода повторяемости до 10 лет, то рецессия через 100 лет достигнет вдвое большего значения — 38 м. Таким образом, скорость отступления берега будет находиться в интервале от 0,2 до 0,4 м/год. Соответствующие потери наносов, характеризующие дефицит бюджета, составят от 0,5 до 1 м³ м⁻¹ год⁻¹ [6].

Полученные величины согласуются с прежней оценкой рецессии 0,25 м/год, основанной на иных предпосылках и включающей эффект Бруна вследствие повышения уровня моря [5, 13]. Этот эффект дает прибавку скорости рецессии около 0,05 м/год. Однако с учетом тенденций климатических изменений, наблюдаемых в последние десятилетия, более вероятной представляется максимальная оценка рецессии 0,4 м/год [6].

Согласно методике моделирования, примененный подход к прогнозу предполагает наличие достаточного запаса песка на берегу и отсутствие выходов коренных пород (морены) на поверхность берегового склона. Поэтому полученные с помощью математического моделирования скорости отступления береговой линии для расчетных профилей, характеризующих различные сегменты берега, были скорректированы с учетом данных о глубине залегания поверхности морены, после чего, как и для случая текущей климатической ситуации, в ArcGIS были построены прогнозные карты развития береговой зоны Курортного района с визуализацией в Google Earth.

Расчеты показали, что в случае реализации «оптимистического» сценария при отсутствии эффективных адаптационных мер и учета результатов мониторинга в пространственном планировании прибрежных территорий максимальные величины размыва берега в Курортном районе достигнут 60 м, общая площадь потерянных

территорий составит $2,8 \text{ км}^2$; при «пессимистическом» сценарии береговая линия на отдельных участках отступит на расстояние до 200 м, площадь потерянных земель достигнет $4,6 \text{ км}^2$. Примеры визуализации различных сценариев для участков берега Курортного района показаны на рис. 10, 11.

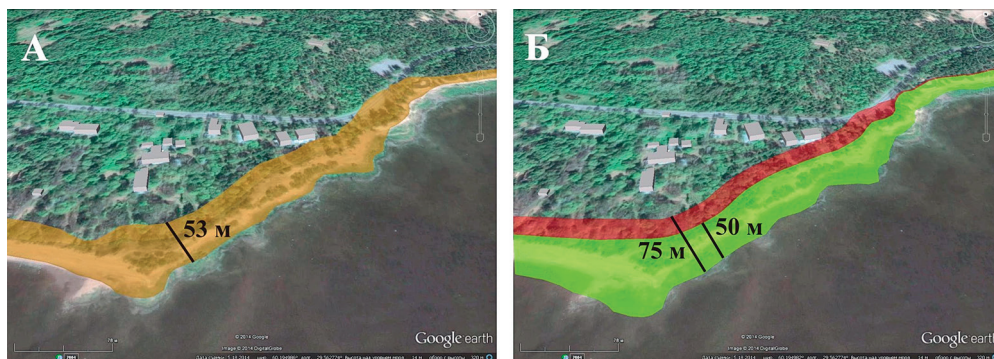


Рис. 10. Прогноз развития береговой зоны пос. Серово:
 А — отступление берега при текущей климатической ситуации к 2100 г.;
 Б — отступление береговой линии в соответствии с «оптимистическим» (светлая заливка)
 и «пессимистическим» (темная заливка) сценариями соответственно

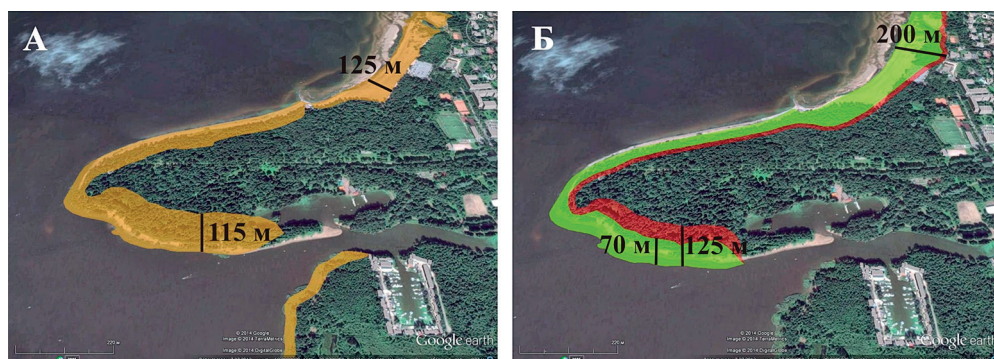


Рис. 11. Прогноз развития береговой зоны пос. Серово:
 А — отступление берега при текущей климатической ситуации к 2100 г.;
 Б — отступление береговой линии в соответствии с «оптимистическим» (светлая заливка)
 и «пессимистическим» (темная заливка) сценариями соответственно

Заключение

Таким образом, выполненные исследования показали, что геолого-геоморфологические причины создают долговременные предпосылки, а гидрометеорологические факторы определяют механизм развития абразионных процессов в береговой зоне

восточной части Финского залива. Результаты ежегодного мониторинга свидетельствуют об усилении негативных последствий абразии на протяжении последнего десятилетия. Анализ изменчивости основных гидрометеорологических факторов и результаты математического моделирования позволяют с высокой степенью вероятности прогнозировать дальнейшее развитие абразии, которое может привести к потере ценных приморских территорий. К концу XIX в., по различным сценариям, береговая линия на отдельных участках отступит на расстояние от 50 до 200 м, площадь потерянных земель достигнет от 1,3 до 4,6 км³.

Полученные результаты делают актуальным осуществление программы берегозащиты на основе междисциплинарного научного подхода, основанного на методах комплексного управления прибрежной зоной.

Литература

1. *Атлас геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря.* — СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. — 78 с.
2. *Барков Л.К.* Литодинамические процессы в прибрежной зоне восточной части Финского залива от м. Лаутаранта до м. Дубовский // Изв. ВГО. 1991. Т. 123. Вып. 1. — С. 60–67.
3. *Гордеева С.М., Малинин В.Н.* Изменчивость морского уровня Финского залива. — СПб.: РГГМУ, 2014. — 179 с.
4. *Леонтьев И.О.* Моделирование эволюции берегового профиля на временных масштабах от десятков до тысяч лет // Океанология. 2012. Т. 52. № 4. — С. 588–599.
5. *Леонтьев И.О., Рябчук Д.В., Спиридонов М.А., Куренной Д.Н.* Береговой профиль восточной части Финского залива: результаты наблюдений и реконструкция развития в позднем голоцене // Океанология. 2010. Т. 50. № 6. — С. 1034–1044.
6. *Леонтьев И.О., Рябчук Д.В., Сергеев А.Ю., Ковалева О.А.* Прогноз рецессии берегов восточной части Финского залива на ближайшее столетие // Океанология. 2015. Т. 55. № 3. — С. 480–487.
7. *Леонтьев О.К., Никифоров Л.Г., Сафьянов Г.А.* Геоморфология морских берегов. — М.: Изд-во МГУ, 1975. — 336 с.
8. *Павловский А.А., Менжулин Г.В.* О динамике Санкт-Петербургских наводнений в различные климатические периоды и оценке изменений уровня Финского залива при ожидаемом глобальном потеплении // Вест. Санкт-Петербургского ун-та. Сер. 7 (геология, география). 2010. Вып. 2. — С. 71–83.
9. *Рябчук Д.В., Колесов А.М., Сергеев А.Ю. и др.* Абразионные процессы в береговой зоне восточной части Финского залива и их связь с многолетними трендами режимообразующих факторов // Геоморфология. 2012. № 4. — С. 99–105.
10. *Ядута В.А.* Новейшая тектоника Санкт-Петербурга и Лен. обл. // Минерал. 2006. № 1. <http://www.mineral-journal.ru/Article/yaduta.htm>
11. *Alexandersson H., Schmith T., Iden K., Tuomenvirta H.* Long-term variations of the storm climate over NW Europe // The Global Atmosphere and Ocean System, 1998, vol. 6, p. 97–120.
12. *Harff J., Björck S., Hoth P.* The Baltic Sea Basin. — Springer, 2011. — 449 pp.
13. *Leont'ev I., Ryabchuk D., Zhamoïda V. et al.* Reconstruction of Late Holocene development of the submarine terrace in the eastern Gulf of Finland // Baltica, 2010, vol. 23, iss. 2, p. 105–112.
14. *Meier H.E.M., Broman D., Kjellstrom E.* Simulated sea level in past and future climates of the Baltic Sea // Climate Research, 2004, vol. 27(1), p. 59–75. — DOI:10.3354/cr027059.
15. *Neumann T.* Climate-change effects on the Baltic Sea ecosystem: A model study // Journal of Marine Systems, 2010, vol. 81(3), p. 213–224. — DOI:10.1016/j.jmarsys. 2009.12.001.
16. *Ryabchuk D., Kolesov A., Chubarenko B. et al.* Coastal erosion processes in the eastern Gulf of Finland and their links with geological and hydrometeorological factors // Boreal Environment Research, 2011, vol. 16 (suppl. A), p. 117–137.
17. *Sergeev A., Zhamoïda V., Leont'ev I.* Application of onshore scanning data for mathematical modeling of coastal profile changes // EMECS'11 — SeaCoasts'26 Conference Proceedings, 2016.

18. *Soomere T., Myrberg K., Leppäranta M., Nekrasov A.* The progress in knowledge of physical oceanography of the Gulf of Finland: A review for 1997–2007 // *Oceanologia*, 2008, vol. 50(3), p. 287–362.
19. *The BACC Author Team.* Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin // Series: Regional Climate studies. Eds.: H.-J. Bolle, M. Menenti, I. Rasool. — Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. — 473 p. — DOI:10.1007/978-3-540-72786-6.

Работа выполнена в рамках проектов «Государственный мониторинг состояния геологической среды (состояния недр) прибрежно-шельфовой зоны Балтийского, Белого и Баренцева морей» (по заказу Федерального агентства по недропользованию), российско-финляндского проекта «CliPLive» («Адаптация городской окружающей среды к негативным последствиям климатических изменений») Программы «Юго-Восточная Финляндия — Россия» и проекта «Комплексные геолого-геофизические исследования в береговой зоне Курортного района Санкт-Петербурга» в рамках создания Генеральной схемы берегозащиты (по заказу Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Санкт-Петербурга).