

О.А. Ковалева, Д.В. Рябчук, А.Ю. Сергеев, В.А. Жамойда, Е.Н. Нестерова

АБРАЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ЮЖНОЙ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ ФИНСКОГО ЗАЛИВА: ПРИЧИНЫ, ДИНАМИКА, ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ

O. Kovaleva, D. Ryabchuk, A. Sergeev, V. Zhamoida, E. Nesterova

EROSION OF SOUTHERN COASTAL ZONE OF THE GULF OF FINLAND: REASONS, DYNAMICS AND PREDICTION OF ITS EVOLUTION

В ходе исследования проведен детальный анализ процессов переработки берегов (абразии): установлена скорость абразии, ее причины и предпосылки, рассчитана емкость вдольберегового потока наносов, а также его реальный объем, выделены особо уязвимые участки береговой зоны и даны рекомендации по проведению берегозащитных мероприятий.

Ключевые слова: абразия, южная береговая зона Финского залива, вдольбереговой перенос наносов.

Detailed analysis of coastal erosion was carried out for this research work including a determination of a rate of erosion, its reasons and preconditions, a calculation of a long-shore sediment transport capacity and its real volume. Also particularly sensitive regions of the southern coastal zone were distinguished and recommendations relating coastal protection were developed.

Key words: erosion, southern coastal zone of the Gulf of Finland, long-shore sediment transport.

Введение

Лито- и морфодинамические процессы береговой зоны восточной части Финского залива долгое время не привлекали к себе достаточного внимания исследователей. Преобладало представление о рассматриваемой береговой зоне как об области слабой активности береговых процессов [7]. В статье, посвященной обзору состояния берегов РФ [6], отмечалось, что «берега Ленинградской области практически никак не освещены в литературе».

Первые систематические исследования береговых зон региона, включавшие изучение литодинамики (в том числе стационарные наблюдения), были организованы в конце 1980-х гг. группой сотрудников Ленинградского Государственного университета под руководством Л.К. Баркова [3, 13]. В 1987–1990 гг. специалисты Академии наук Эстонии провели маршрутные обследования берегов восточной части Финского залива,

результатом которых было их монографическое описание и первая классификация, опубликованные К. Орвику в книге «Геология Финского залива» [15].

Изучение динамики берегов, с одной стороны, было вызвано необходимостью теоретического осмысления закономерностей лито- и морфодинамических процессов, с другой стороны, диктовалось практическими задачами берегозащиты. Во время экстремальных штормов 1975, 1982, 1983, 1985 и 1986 гг. песчаные пляжи Нарвского залива были размывы на значительном протяжении, абразия затронула подножие авантюн. С 1975 по 1990 г. ширина пляжей западнее пос. Лебяжье уменьшилась на 25–30 м, а у пос. Большая Ижора на 60–70 м. При этом были частично размывы сформировавшиеся здесь ранее песчаные аккумулятивные косы — в первом случае (пос. Лебяжье) на протяжении 230 м, во втором (пос. Большая Ижора) — 300 м. В Лоцманском селении (пос. Лебяжье) в результате абразии был разрушен жилой дом (рис. 1) [15]. Таким образом, к началу 1990-х гг. была установлена высокая интенсивность береговых процессов рассматриваемого района. В Лоцманском селении для защиты жилых построек сооружен вдольбереговой мол из валунного материала, на северном берегу залива (в районе пос. Комарово) ЛенМорНИИПроектом был реализован экспериментальный проект берегозащиты с помощью создания искусственного пляжа. В середине 1990-х гг. как научные и мониторинговые проекты, так и работы по технико-экономическому обоснованию берегоукрепления были прерваны.

В «период безвременья», на рубеже XX–XXI вв. в результате сильных штормов в Лоцманском селении в первой (прибрежной) линии лоцманских домов был разрушен памятник истории и культуры — дом, много лет арендовавшийся семьей писателя В.В. Бианки [9].



Рис. 1. Частный дом, разрушенный в 1989 г. в результате абразии берега (пос. Лоцманское селение) (фото проф. К. Орвику и фрагмент космического снимка Google Earth)

Новый этап береговых исследований в восточной части Финского залива связан с работами ВСЕГЕИ при участии НИИКАМ и РГГМУ, начавшимися в 2004 г. и ведущимися до настоящего времени в режиме мониторинга. В ходе исследований

было установлено, что на наиболее ценных в рекреационном отношении побережьях (Курортный район Санкт-Петербурга, Невская губа, южный берег Финского залива в районе пос. Большая Ижора — Лебяжье), преобладают процессы абразии и отступления береговой линии со скоростями от 0,3–0,5 до 2 м/год [18].

Одним из интереснейших объектов геолого-геоморфологических исследований является южный берег залива — уникальная природная система, сочетающая в себе процессы разрушения берегов, аккумуляции пляжевого материала в виде песчаных кос и их последующей трансформации. В 2012–2013 гг. в рамках проекта «Исследование влияния процессов переработки российских участков берега Балтийского моря, испытывающих существенное антропогенное воздействие, на качество морских вод и разработка рекомендаций по предотвращению загрязнения и засорения вод Балтики», выполнявшегося ВСЕГЕИ по заказу Невско-Ладожского Бассейнового водного управления (БВУ), были осуществлены комплексные детальные исследования южной береговой зоны залива на участке от форта Красная Горка до Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС). Целью проекта было исследование динамики прибрежной зоны, прогноз развития переработки (абразии) берега и разработка научно обоснованных мероприятий по смягчению негативного воздействия морских вод на берега.

Постановка задачи была связана с экстремальными размывами берегов на ряде участков рассматриваемого района в результате осенне-зимних штормов 2011–2012 гг. При штормовых нагонах были зафиксированы максимальные по сравнению с наблюдениями предыдущих лет зоны затопления прибрежных территорий в районе пос. Лебяжье и Большая Ижора. В районе песчаных кос наблюдался перехлест штормовых волн через вершину авантюны и были зафиксированы крайне высокие скорости размыва берега. На 57 км автодороги (в районе пос. Лебяжье), произошел подмыв основания проезжей части с частичным разрушением дорожного полотна, в результате чего движение было временно приостановлено; по краю проезжей части образовался абразионный уступ [5, 9].

Методы и материалы

В период с 2004 по 2012 г. в береговой зоне рассматриваемого района были выполнены комплексные геолого-геофизические исследования, включавшие различные виды обследования подводного берегового склона: гидролокация бокового обзора (ГЛБО) и прецизионное эхолотирование (164 км) по сети профилей, перпендикулярных береговой линии, непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСП) (60 км), поверхностный донный пробоотбор (85 станций) на подводном береговом склоне, а также ежегодные вдольбереговые маршруты с отбором проб пляжевых осадков (более 300 образцов) и нивелированием на опорных профилях (от 5 до 10 профилей в различные годы наблюдений). Результатом работ стало получение детального представления о характере поверхностного покрова донных отложений и особенностях рельефа берегов и подводного берегового склона. Измерения, выполнявшиеся в режиме мониторинга, позволили выявить динамику микрорельефа дна и распределение зон подводного размыва, транзита и аккумуляции осадочного материала, трансформации

берегового рельефа и конфигурации береговой линии. Для определения динамики береговой зоны производился ретроспективный анализ данных дистанционных наблюдений (в том числе, аэрофотосъемки 1990 г. из архива НИИКАМ).

В 2013 г. полигон исследований был расширен в западном направлении — 52 км ГЛБО (СМ2 производства английской фирмы C-MAX Ltd) и эхолотирования (с использованием эхолота фирмы HUMMINBIRD (США) — модель 450TX TRI BEAM и эхолот FURUNO), 30 км НСП (с применением сейсмоакустического приборно-аппаратурного комплекса GEONT–HRP (производство ООО «Спектр-Геофизика», Россия)). Для заверки результатов геофизического профилирования на 30 станциях отобраны пробы поверхностных осадков; впервые на 7 станциях выполнена подводная видеосъемка с использованием подводной телевизионной установки «Супер-ГНОМ», усовершенствованной камерой высокого разрешения GoPro HD HERO. На берегу в 2013 г. были организованы обзорные вдольбереговые маршруты общей протяженностью 25 км. Проводилось детальное описание и картирование пляжа, измерение морфологических параметров пляжа, установление состава береговых осадков и определение состояния песчаных дюн. С целью актуализации имеющейся информации выполнено описание состояния берегов и берегозащитных сооружений, отбор проб осадков пляжей (30 проб) и приурезовой части подводного берегового склона (15 проб), нивелировки по опорным профилям (рис. 2). В пределах аварийного участка берега (57-й км шоссе Санкт-Петербург — Ручьи) было проведено георадиолокационное профилирование (георадар марки SIR System-2000 производства фирмы GSSI (США)) для выявления строения верхней части геологического разреза и интерпретационное бурение (с применением бензобура STIHL BT 121).

Работы по навигационно-гидрографическому и геодезическому обеспечению заключались в проведении плановой привязки всех видов наблюдений с помощью систем спутниковой привязки «Garmin» и «Furuno».

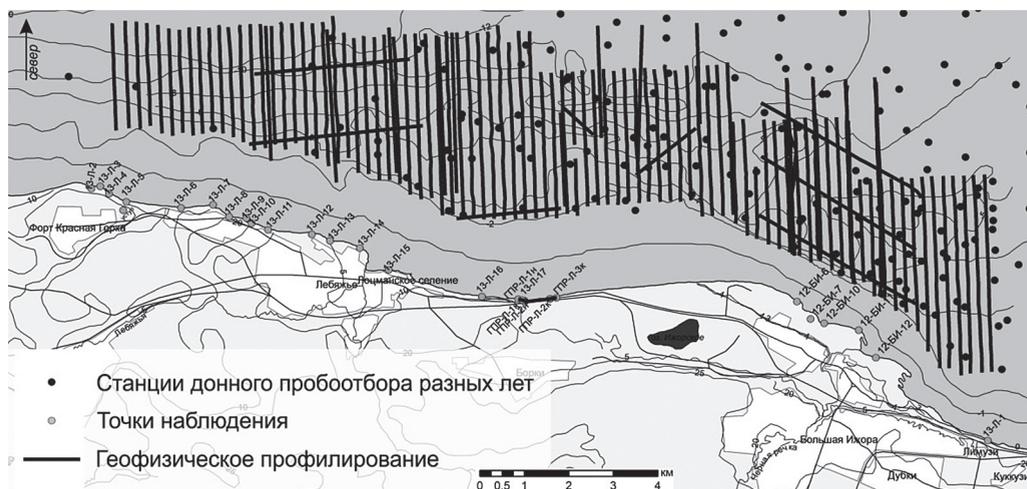


Рис. 2. Карта фактического материала

Результаты

Геологическое строение и геоморфология береговой зоны. Южная береговая зона восточной части Финского залива в районе поселка Лебяжье и Большая Ижора сложена четвертичными отложениями поздне-неоплейстоценового — голоценового возраста [2, 4]. Важной особенностью исследуемого района является достаточно глубокое залегание кровли ледниковых отложений (за исключением западного участка в районе форта Красная Горка), в результате чего здесь практически отсутствуют выходы морены на поверхность дна и берега. Наличие в зоне волнового воздействия выходов морены приводит к формированию валунных бенчей, бронирующих берег от дальнейшего размыва и, в то же время, являющихся причиной дефицита осадочного материала. Берега и подводный склон в рассматриваемом районе преимущественно сложены песчаными отложениями, в отличие от других районов залива. Таким образом, особенности геологического строения верхней части разреза не предполагают наличия дефицита песчаного материала как одного из определяющих факторов развития береговой зоны.

Рассматриваемый участок береговой зоны находится в области относительных опусканий со скоростями от 0 до -2 мм/год [21]. Относительное повышение уровня моря подтверждается также анализом современных тенденций лито- и морфодинамических процессов (в частности, постепенным надвиганием песчаных кос на лагуны с размывом прикорневых и наращиванием дистальных участков) [14].

Рельеф побережья характеризуется сложной террасированной поверхностью. Слабонаклонная в сторону залива поверхность морской равнины располагается на абсолютных отметках 10–12 м, и отделена от расположенной гипсометрически выше озерно-ледниковой равнины четким абразионным уступом (высотой от 3 до 7 м, с крутизной склонов от 10 до 15°) или береговыми валами [4], находящимся на расстоянии от 1,5 км (пос. Большая Ижора) до нескольких десятков метров (форт Красная Горка) от современной береговой линии. Морская равнина сложена песчаными отложениями, преимущественно мелкозернистыми, кварцево-полевошпатовыми песками мощностью 0,5–8 м с линзами разнозернистого песка. На поверхности морской равнины развиты реликтовые береговые валы, дюны, косы и пляжи. Важно отметить, что как абразионные уступы максимальной фазы литориновой трансгрессии (7600–6700 кал.л.н.), так и береговые аккумулятивные формы этого возраста, имеют направление, аналогичное современным.

Нижний ярус рельефа побережья представлен современными абразионными террасами, пляжами и песчаными косами. Генезис и механизмы современного развития песчаных кос рассмотрены авторами в ряде публикаций [10, 17, 24]. Формирование кос началось в период от 4000 до 3000 кал.л.н. Основным литодинамическим механизмом их развития как в позднем голоцене, так и в настоящее время является перемещение в направлении потока наносов волнообразных контуров береговой линии («вдольбереговых песчаных волн»), формирующих чередующиеся зоны размыва, транзита и аккумуляции.

Берега исследуемой территории относятся к выравнивающимся бухтовым (абразионный валунный (моренный) в районе форта Красная Горка, абразионный песчаный в центральной части изучаемой площади) и вторично-расчлененным (абразионно-аккумулятивный песчаный в пос. Лебяжье и Большая Ижора) [2]. Береговые формы рельефа

сложены отложениями, различными по степени устойчивости к абразии, морена — в западной части береговой зоны, пески и глины на остальном ее протяжении, относятся к IV и V классам соответственно [12].

В рельефе подводного берегового склона, достаточно отмелого, исследованиями ВСЕГЕИ выявлена серия аккумулятивных песчаных террас (рис. 3), сформировавшихся на протяжении позднего голоцена [1, 17]. По данным ГЛБО, мористее уступа нижней подводной террасы находится зона интенсивного подводного размыва, с выделяющимися в рельефе эрозионными ложбинами стока, имеющими СЗ-ЮВ простирание (рис. 4). Крупные знаки ряби на поверхности дна ложбин служат индикатором непрерывного движения материала. Параметры микрорельефа эрозионных ложбин свидетельствует о периодическом воздействии на него довольно интенсивных (до 40–50 см/с) придонных течений.

Характеристика современных лито- и морфодинамических процессов. По результатам наблюдений и ретроспективного анализа материалов дистанционного зондирования установлено, что рассматриваемая береговая зона характеризуется чередованием стабильных зон и участков высоких скоростей отступления берегового уступа, причем интенсивность абразионных процессов резко возросла в последние годы. К аварийным участкам береговой зоны, на которых требуются безотлагательные меры по берегозащите, относятся:

- 1) участок **активизации абразионных и обвальнo-осыпных процессов в районе пос. Красная Горка**, угрожающих сохранности частной застройки (как исторически сложившейся, так и вновь возведенной) и автодороги. Неустойчивости склонов способствует наличие в разрезе уступов глинистых слоев и зон разгрузки подземных вод. Установлено, что резкая активизация процессов наблюдается в последние два года. В 2011 г. осыпные склоны были стабилизированы растительностью, летом 2013 г. все склоны активны, произошел отрыв крупных масс грунта, падение древесной растительности и резкое отступление бровки уступа. Для минимизации негативных последствий опасных экзогенных геологических процессов необходимо осуществление эффективных мероприятий по берегозащите и укреплению склонов для всего аварийного участка длиной 700 м.
- 2) участок **периодической (сезонной) активизации абразионных процессов в Лоцманском Селении (пос. Лебяжье)**; под угрозой историческая частная жилая застройка. За период с 1990 по 2010 г. береговой уступ сместился на 8 м в сторону берега, была уничтожена древесная растительность, площадь береговой террасы сократилась на 260 м². По состоянию на лето 2012 г. здесь располагался один из аварийных участков. К лету 2013 г. в тыловой части пляжей была сооружена бетонная волноотбойная стенка, опоясывающая основание зданий. Примененный вид берегоукрепления, очевидно, является в данном случае необходимым, однако, возможно, недостаточным. При эксплуатации порта МЧС, расположенного к западу от рассматриваемого аварийного участка, крайне важным является схема использования песка, изъятого при дноуглублении фарватера, расположенного к западу от устья реки Лебяжьей, впадающей в залив. В случае изъятия песка из вдольберегового потока наносов значительно усилится угроза размыва на соседних (восточных) сегментах берега. Для оценки направленности и скорости происходящих

процессов необходим дальнейший мониторинг, как данного участка, так и вновь построенного порта МЧС, где уже начались процессы вымывания песка из-под бетонного основания.

- 3) участок *активизации абразионных процессов, угрожающих полотну автодороги (57-й км шоссе Санкт-Петербург — Ручьи)*. Берег в районе 57-го км автодороги Санкт-Петербург — Ручьи отступил на 30 м за 20 лет (средняя скорость отступления около 1,5 м/год). Сократившаяся площадь береговой террасы на отрезке 700 м составила 13,7 тыс. м². Исследования с применением георадиолокации показали, что основной причиной деструктивных экзогенных геологических процессов в данном случае являются особенности строения разреза отложений. На глубине от 4–4,5 м (на участках максимальной высоты берегового уступа к востоку и западу от зоны размыва шоссе) до 2,5–3 м под слоем песков прослеживаются выходы серых пластичных глин. Глины являются водоупором, по кровле слоя происходит разгрузка подземных вод, что резко снижает прочностные свойства залегающих выше песчаных образований и способствует активизации абразии.
- 4) *песчаные косы в районе пос. Большая Ижора*. Данный участок характеризуется сложной динамикой контура береговой линии (в западной части — вдольбереговые песчаные волны, перемещающиеся в восточном направлении со скоростью 10–15 м/год, с чередованием зон активного размыва, транзита и аккумуляции; в центральной части — формирование крупного аккумулятивного песчаного тела; в восточной части (к востоку от устья р. Черная) — рост песчаной косы с размывом прикорневой и ростом дистальной части). В настоящее время активные экзогенные геологические процессы не выходят на уровень опасных вследствие отсутствия здесь жилой и промышленной застройки, а также транспортных коммуникаций, однако в случае реализации существующих планов по застройке зоны песчаных кос, ситуация может коренным образом измениться.

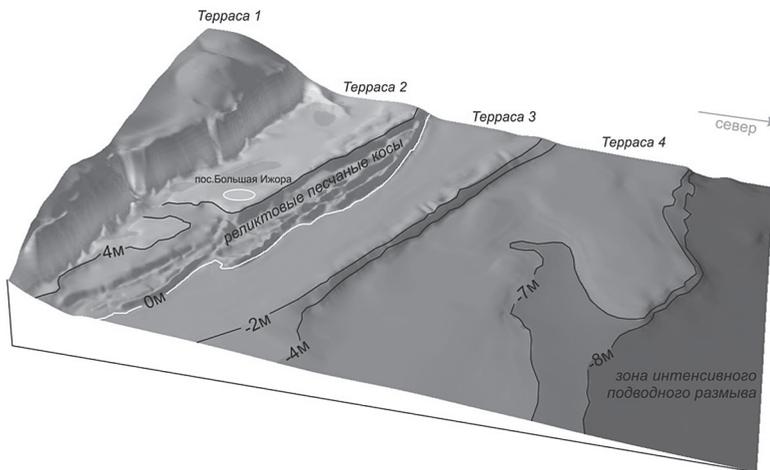


Рис. 3. Морфология подводного берегового склона в районе пос. Большая Ижора

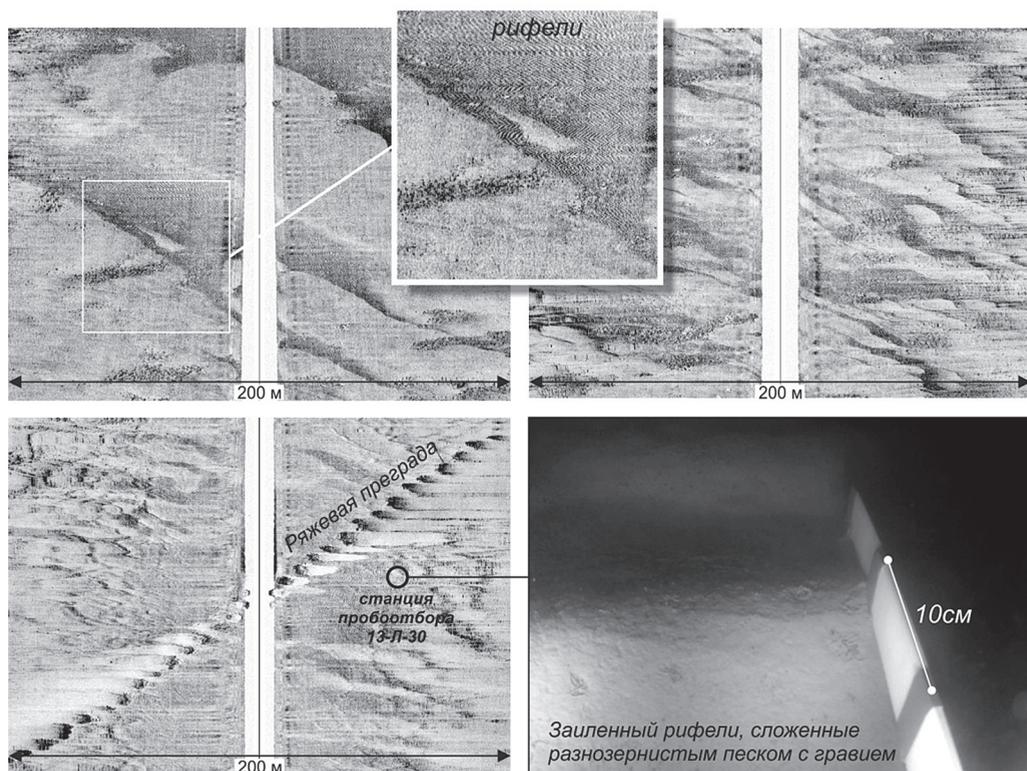


Рис. 4. Эрозионные ложбины стока у подножия подводной террасы в районе пос. Большая Ижора, 2012 г. и ложбины, пересекающие ряжевую преграду. На правом нижнем рисунке — подводная фотография рифелей на дне эрозионной ложбины

Результаты расчетов мощности и емкости вдольберегового потока наносов

Направленность литодинамических процессов береговой зоны во многом определяется качественными и количественными параметрами вдольберегового потока наносов, движение которого в восточном направлении определяется как по морфологическим признакам (ориентировка аккумулятивных форм, отклонение устьев рек), так и по результатам анализа изменения гранулометрических характеристик пляжевых осадков. Анализ статистических коэффициентов гранулометрических распределений образцов, отобранных в приурезовой зоне пляжей вдоль береговой линии, по методике П. Мак Ларена [23] выявил наличие вдольберегового потока наносов восточного направления с высоким уровнем значимости ($p = 0,01$).

Количественная оценка потока наносов представляет собой значительно более сложную задачу. В условиях конкретного участка берега расход наносов не может превышать определенного предела, называемого ***емкостью вдольберегового потока наносов***. Расчет емкости потока наносов заключается в определении количества

осадочного материала, который может быть вовлечен во вдольбереговую транспорт при данных гидрометеорологических условиях. Для расчета емкости потока наносов для субширотного участка берега (от форта Красная Горка до поворота береговой линии к юго-востоку в районе пос. Большая Ижора) использовалась формула, предложенная Научным центром береговой инженерии, США (Coastal Engineering Research Center, USA) в 1984 г. [22]. Основная идея данного метода заключается в том, что количество материала, который может быть транспортирован в ходе вдольберегового переноса, пропорционален отношению энергии вдольбереговых волн к единице длины берега [26]. К сожалению, вследствие отсутствия в открытом доступе рядов гидрометеорологических данных непосредственно для рассматриваемого района, для определения статистики возникновения ветров различных румбов были использованы данные, полученные сотрудниками Таллиннского Технологического Университета для станции Каллбадагруд (Финляндия); измерения на данной станции проводились в период 1981–2012 гг.

В восточной части Финского залива доминируют южные, западные и юго-западные ветры. Расчеты показали, что наибольший перенос материала происходит при волновых воздействиях, вызванных ветрами северо-западного направления, при этом волны, подходящие к берегу под другими углами так же вызывают перемещение песка, но уже в меньшем количестве (рис. 5). Проведенные расчеты подтвердили восточное направление вдольберегового потока наносов. Результаты показали, что при наличии доступного материала с каждого метра береговой зоны (по профилю от глубины начала воздействия волн на поверхность дна до линии максимального ежегодно-повторяющегося заплеска прибойного потока) может быть транспортировано до 76000 м³ песка ежегодно.

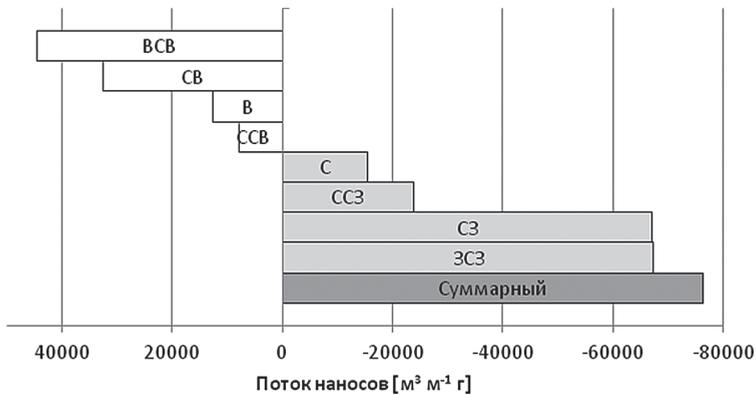


Рис. 5. Распределение вдольберегового потока наносов, вызванного ветрами различных направлений (отрицательные значения соответствуют направлению потока наносов с запада на восток, положительные — с севера на юг)

Изменение лито-, гидро- и морфологических условий вдоль береговой линии обуславливает изменение емкости потока в сторону уменьшения (в этом случае избыток наносов выпадет из потока, вызвав аккумуляцию их на надводной и подводной частях

берегового склона и возможное выдвигание линии уреза в сторону моря) или увеличения (тогда дефицит наносов будет возмещен за счет размыва пляжа и берегового уступа, и береговая линия сместится в сторону суши). В пределах рассматриваемого участка уменьшение емкости потока наносов наблюдается в районе формирования песчаных кос в пос. Большая Ижора и связано с поворотом береговой линии к юго-востоку.

Второй важнейшей характеристикой вдольберегового потока наносов является его реальный расход, называемый *мощностью потока наносов*. При недостаточном количестве осадочного материала на подводном береговом склоне мощность потока наносов составляет некоторую часть от емкости. Л.К. Барков с соавторами предложили определять направление перемещения и его мощность по объему материала, слагающего аккумулятивные формы рельефа дна и по интенсивности заносимости оградительных сооружений (13). Был исследован ряд ключевых точек на южном берегу, включая пос. Шепелево, Большая Ижора, Лебяжье. Расчеты показали, что величина наносодвижущей силы, а, следовательно, и мощность потока наносов уменьшается с запада на восток. По данным наблюдений наибольший размыв был зафиксирован на глубине 2–3,5 м, в то время как в приурезовой зоне преобладает транзитный перенос материала вдоль берега. Мощность потока наносов восточного направления для южного берега была оценена в 20000 м³ в год для района пос. Лебяжье и 10000 м³ в год для района пос. Большая Ижора.

Математическое моделирование с использованием формулы расхода наносов, разработанной И.О. Леонтьевым [10, 20], позволяет получить более точные результаты. Вычисления включают последовательные расчеты трансформации волн, скоростей вдольбереговых течений, обусловленных волнами и ветром, а также расходов наносов в каждой точке профиля в береговой зоне. Для исследуемой территории был выбран профиль между пос. Лебяжье и Большая Ижора. Для данного профиля результирующая мощность потока наносов составляет 4300 м³ в год [10].

Сравнение имеющихся результатов расчета мощности потока наносов (от 4 до 20 тыс. м³ в год) и его емкости (до 76 тыс. м³ в год) на субширотном участке береговой зоны (от форта Красная Горка до поворота береговой линии в районе пос. Большая Ижора) указывает на дефицит наносов в береговой зоне, что создает предпосылки для активного развития абразионных процессов.

Обсуждение полученных результатов

Основные геолого-геоморфологические условия и гидрометеорологические факторы, определяющие развитие абразионных процессов в береговой зоне восточной части Финского залива и их интенсивность, рассмотрены в работах [18, 19]. Развитию деструктивных процессов благоприятствуют прочностные свойства четвертичных отложений, слагающих береговую зону, и рельеф подводного берегового склона. На значительном протяжении прибрежные мелководья восточной части Финского залива представляют собой валунно-галечные бенчи, формирующиеся в результате размыва морены и являющиеся однозначным индикатором дефицита свободных наносов. Вдоль северного берега залива выявлена подводная терраса, поверхность которой расположена на глубинах 3–5 м. Мористый край террасы размывается и отступает в

сторону берега. Вдоль подножия террасы (на глубинах 8–12 м) выявлены подводные эрозионные ложбины, по которым происходит отток воды и перемещение осадочного материала от берега к морю [19].

Как показали проведенные исследования дефицита наносов на рассматриваемом участке береговой зоны (за исключением западной части, в районе форта Красная Горка) не наблюдается. Район пос. Лебяжье — Большая Ижора является единственным участком современной береговой зоны, где на глубинах 1–2 м продолжает формироваться аккумулятивная песчаная терраса. Терраса, в свою очередь, является источником донного питания для песчаных кос. Вторым источником осадочного материала для формирования кос являются абразионные уступы высотой от 1–2 до 5–7 м, расположенные выше по направлению потока наносов. Указанные факторы теоретически должны исключать высокие скорости размыва берегов, однако наблюдения и анализ МДЗ свидетельствуют об обратном. В отличие от северного берега залива (Курортный район Санкт-Петербурга) участки активных абразионных процессов в рассматриваемом районе распространены значительно более локально, однако интенсивность их проявления здесь чрезвычайно высока.

Как показали исследования 2013 г., зоны наиболее интенсивной абразии пространственно связаны с выходами в пределах береговой зоны глин, представляющих собой наиболее легко размываемый тип отложений из спектра четвертичных образований восточной части Финского залива. Большую роль в данном случае играют также водоупорные свойства глин и разгрузка по их кровле подземных вод. Совокупность данных факторов обуславливает наличие отдельных участков берега, характеризующихся аномально высокими скоростями отступления береговых уступов.

Гидрометеорологические процессы контролируют экстремальные размывы берегов, наблюдающиеся при сочетании трех условий: подъем уровня воды, шторма западных — юго-западных и северо-западных румбов и отсутствие ледяного покрова вдоль берегов. На протяжении последнего десятилетия активизация абразионных процессов наблюдалась в осенне-зимние периоды 2006–2007, 2011–2012 гг. [19] и 2013 г. Интенсификации абразионных процессов на рассматриваемом участке береговой зоны на протяжении последнего десятилетия могут способствовать: 1) наблюдающаяся тенденция к потеплению в зимний период и более позднее, чем ранее даты установления ледяного покрова; 2) увеличение частоты подъемов уровня (наводнений) в осенне-зимний период [16]; 3) наблюдающееся в северной Балтике изменение направлений циклонов (усиление западных и ослабление северо-восточных ветров) [25]. Следует отметить, что интенсификации абразии могут способствовать и антропогенные процессы.

До 1990-х гг. на морском месторождении песчаного материала «Лондонская отмель» велась подводная разработка. В последующие годы месторождение было законсервировано, но с недавнего времени добыча песка возобновилась. При проведении полевых работ в 2011–2013 гг. были выявлены следы работы землесосов на поверхности подводной песчаной террасы. Изъятие больших объемов песчаного материала из потока наносов может нарушить баланс седиментационной системы. Как уже говорилось, предыдущий пик интенсивности абразионных процессов наблюдался в конце 1980-х гг., однако оценить вклад антропогенного фактора сложно.

Важным фактором, воздействующим на лито- и морфодинамику береговой зоны стал ввод в строй Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений. При закрытых створах КЗС угроза размыва берегов с его внутренней стороны (в Невской губе) понижается, однако с внешней стороны, в том числе в пределах рассматриваемого участка южного берега, интенсивность абразии резко возрастает. Прогнозируемое эвстатическое повышение уровня моря в будущем [8], которое для рассматриваемого района может составить более 1 м за 100 лет, также вызовет активизацию размыва берегов.

Наконец, негативную роль играет отсутствие научно обоснованной системы берегозащиты. Проводимые в настоящее время берегозащитные мероприятия носят локальный характер и не способны решить проблему устойчивости береговой системы в целом. О локальном берегоукреплении в пос. Лоцманское Селение уже упоминалось. В 2012 г. реализованы комплексные работы по укреплению склона и берегозащите в пос. Красная Горка, где недавно построенные коттеджи располагаются в опасной близости от отступающей бровки уступа. Судя по внешнему виду склона, работы осуществлены с применением современных эффективных методов и включают водоотведение подземных вод, отсыпку склона, закрепление его основания габионами и стабилизацию растительностью (рис. 6).



Рис. 6. Восточная часть аварийного участка береговой зоны в районе пос. Красная Горка

Выполненные работы создают уникальный прецедент попытки решения задачи берегоукрепления на одном из наиболее сложных участков береговой зоны российской части Финского залива. В то же время, закрепление одного из участков склона еще более ухудшает ситуацию на соседних. При таком подходе следует ожидать активизацию разрушения соседних участков склонов и постепенного образования техногенного «мыса» на укрепленном участке, после чего начнется и его разрушение не только со стороны моря, но и с краев. В данном случае необходимо осуществление эффективных мероприятий по берегозащите и укреплению склонов для всего аварийного участка длиной 700 м. В целом же, учитывая существующие сценарии климатических изменений, предполагающие дальнейшее уменьшение длительности ледового периода и повышение, как среднего уровня моря, так и увеличение частоты экстремальных

подъемов воды, задача минимизации негативных последствий опасных экзогенных процессов может быть реализована только в рамках разработки единой стратегии берегозащиты на региональном или федеральном уровне.

Заключение

В целом, по результатам работ ВСЕГЕИ в южной береговой зоне Финского залива можно сделать следующие выводы:

Особенности геологического строения определяют субширотную ориентировку береговой линии и ее относительную выровненность, и, как следствие, незащищенность от волнового воздействия штормов западных и северо-западных направлений. Геологическое строение верхней части разреза субаэральной части береговой зоны, сложенной неустойчивыми к размыву песками и глинами, способствует активному проявлению абразионных (размывных) процессов. Характер современных тектонических движений (опускание со скоростями до 2 мм/год) создает благоприятный фон для проявления абразии.

Геологическое строение и рельеф подводного берегового склона (наличие вдоль береговой песчаной террасы шириной от 1 до 1,5 км, поверхность террасы расположена на глубинах около 4 м), а также преобладание на подводном береговом склоне песчаных осадков, не позволяло выявить наличие дефицита наносов в качестве одного из факторов, определяющих развитие береговых процессов. В то же время, сравнение имеющихся результатов данных о мощности потока наносов и выполненных расчетов его емкости на субширотном участке береговой зоны (от форта Красная Горка до поворота береговой линии в районе пос. Большая Ижора) выявило наличие недостатка осадочного материала, что и создает предпосылки развития абразионных процессов.

На поверхности дна батиметрически ниже прибрежной подводной террасы (глубины 2,5–10 м) преобладают зоны подводного размыва и транзита (зоны динамичных песков) осадков; характер микрорельефа дна зон динамичных песков свидетельствует о периодическом воздействии на него достаточно интенсивных (до 40–50 см/с) придонных течений. На ряде участков мощность покровных песков не превышает 10–20 см.

Изъятие песка с подводного берегового склона в ходе разработки месторождения «Лондонская отмель» повышает риск возникновения опасных размывов берегов. По данным пробоотбора в отработанных карьерах происходит накопление алевропелитовых илов.

Экстремальные размывы берегов наблюдаются при следующем сочетании гидрометеорологических факторов: подъем уровня воды, шторм западных — юго-западных румбов и отсутствие ледового покрова вдоль берегов. За период с 2004 по 2012 г. такие условия наблюдались трижды — в осенне-зимние периоды 2006–2007 гг., 2011–2012 гг. и 2013 г., что привело к резкой активизации экзогенной геодинамики в береговых зонах, опасным размывам берегов и существенному повреждению инфраструктуры прибрежных территорий.

Примеры осенне-зимних сезонов 2006–2007 гг., 2011–2012 гг. и 2013 г., когда наиболее позднее установление ледового покрова соответствовало наибольшим размывам песчаных пляжей, выявили общую тенденцию в нарушении ритма действия

режимообразующих факторов: ледяной покров, обеспечивающий естественную защиту берега от волнового воздействия, не успевал установиться, в то время как шторма происходили в обычный для них срок. Результаты исследований по Балтийскому морю в целом, показывают уменьшение периода развития льда на акватории на протяжении последнего столетия. Таким образом, в будущем следует ожидать существенного увеличения интенсивности размыва берегов исследуемого района именно в период, предшествующий установлению ледового покрова.

Ввод в строй Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга (КЗС) коренным образом повлиял на развитие литодинамических процессов в их экстремальных проявлениях. При закрытых створах КЗС угроза размыва берегов с внутренней стороны сооружений (в Невской Губе) понижается, однако с внешней, морской стороны, в том числе в пределах рассматриваемого ключевого участка (пос. Лебяжье — пос. Большая Ижора), интенсивность абразии резко возрастает. Результаты моделирования, подтвердившиеся во время наводнений осени — зимы 2011 г. прогнозируют дополнительный (по сравнению с условиями, существовавшими до строительства КЗС) подъем уровня воды в районе пос. Большая Ижора на 40–50 см, что приведет к существенному увеличению площадей затапливаемых территорий.

На выделенных аварийных участках необходима срочная реализация комплексных берегозащитных мероприятий.

Литература

1. *Амантов А.В., Жамойда В.А., Рябчук Д.В., Спиридонов М.А., Сапелко Т.В.* Геологическое строение подводных террас восточной части Финского залива и моделирование условий их формирования на послеледниковом этапе развития региона. // Региональная геология и металлогения, 2012, № 50, с. 15–27.
2. Атлас геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря. Гл. ред. О.В. Петров. — СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. — 78 с.
3. *Барков Л.К.* О литодинамике прибрежной зоны и дна восточной части Финского залива. // Вестник ЛГУ, 1989, № 28, с. 25–32.
4. Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Ильменская. Лист О-35-VI. Объяснительная записка. Составили: В.А. Селиванова, И.С. Недригайлова. Редактор Т.Н. Алиханова. — М.: «Недра», 1964.
5. Информационный бюллетень о состоянии геологической среды прибрежно-шельфовых зон Баренцева, Белого и Балтийского морей в 2011 г. — СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012. — 80 с.
6. *Калинина Л.И., Лукьянова С.А., Соловьева Г.Д.* Картирование абразионных берегов России. // Вестник МГУ. Сер.5. География, 1992, №3, с.46–59.
7. *Каплин П.А., Леонтьев О.К., Лукьянова С.А., Никифоров Л.Г.* Берега. Сер. Природа Мира. — М.: изд-во «Мысль», 1991. — 479 с.
8. *Каплин П.А., Павлидис Ю.А., Селиванов А.О.* Развитие береговой зоны морей России в условиях повышения их уровня и потепления климата. // Человечество и береговая зона Мирового океана в XXI веке, 2001, с. 16–27.
9. *Карлин Л.Н., Денисов В.В., Шилин М.Б.* Основные концепции современного берегопользования. // СПб.: РГГМУ, 2010. — 293 с.
10. *Леонтьев И.О.* Динамика профиля песчаного берега на различных масштабах времени. // Сборник научных трудов «Фундаментальная и прикладная гидрофизика», 2010, № 4(10), с.78–89.
11. *Леонтьев И.О., Рябчук Д.В., Сергеев А.Ю., Сухачева Л.Л.* О генезисе некоторых форм рельефа дна и берегов восточной части Финского залива. // Океанология. Июль-Август, 2011, т. 51, № 4, с. 734–745.
12. *Леонтьев О.К., Никифоров Л.Г., Сафьянов Г.А.* Геоморфология морских берегов. — М.: изд-во МГУ, 1975. — 336 с.

13. *Логвиненко Н.В., Барков Л.К., Усенков С.М.* Литология и литодинамика современных осадков восточной части Финского залива. — Л.: изд-во ЛГУ, 1988. — 148 с.
14. *Малинин В.Н., Митина Ю.В., Шевчук О.И.* К оценке затопления побережья Курортного района Санкт-Петербурга при прохождении экстремальных наводненческих циклонов. // Ученые Записки РГГМУ, 2013, № 29, с. 136–142.
15. *Орвику К., Гране О.* Современные берега. В кн.: Геология Финского залива. Под ред. А. Раукаса и Х. Хюваринена. — Таллинн: изд-во АН Эстонии, 1992. — 422 с.
16. *Павловский А.А.* Изменение гидрологических характеристик Финского залива в XXI столетии и градостроительное планирование Санкт-Петербурга. // Наш общий Финский залив. Сборник материалов I научной конференции СПбГУ, посвященной «Году Финского залива — 2014», 2012, с. 180–184.
17. *Сергеев А.Ю., Рябчук Д.В., Жамойда В.А., Неввин И.А., Дронь О.В.* Голоценовая история образования литоморфодинамической аномалии в южной береговой зоне Финского залива (район пос. Большая Ижора). // Региональная геология и металлогения, 2014, т. 56 (в печати).
18. *Спиридонов М.А., Рябчук Д.В., Орвику К.К., Сухачева Л.Л., Нестерова Е.Н., Жамойда В.А.* Изменение береговой зоны восточной части Финского залива под воздействием природных и антропогенных факторов. // Региональная геология и металлогения, 2010, № 41, с. 107–118.
19. *Рябчук Д.В., Колесов А.М., Сергеев А.Ю., Спиридонов М.А., Жамойда В.А., Чубаренко Б.И.* Абразионные процессы в береговой зоне восточной части Финского залива и их связь с многолетними трендами режимобразующих факторов. // Геоморфология, 2012, № 4, с. 99–105.
20. *Хабидов А.Ш., Леонтьев И.О., Марусин К.В., Шлычков В.А., Савкин В.М., Кусковский В.С.* Управление состоянием берегов водохранилищ. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. — 239 с.
21. *Ядута В.А.* Новейшая тектоника Санкт-Петербурга и Ленинградской области. // Минерал, 2006, № 1. — [<http://www.mineral-journal.ru/Article/yaduta.htm>].
22. *Kovaleva O.* Coastal erosion and coastal protection in the Baltic Sea: master thesis. — Saint Petersburg: State University, 2013. — 52 p.
23. *McLaren P., Bowles D.* The effect of sediment transport on grain-size distribution. // Journal of sedimentary petrology, 1985, 55-4, p. 0457–0470.
24. *Ryabchuk D., Leont'ev I., Sergeev A., Nesterova E., Sukhacheva L., Zhamoïda V.* The morphology of sand spits and the genesis of long-shore sand waves on the coast of the eastern Gulf of Finland. // Baltica, 2011, 24(1), p. 13–24.
25. *Tõnisson H., Orviku K., Jaagus J., Suursaar U., Kont A., Ravis R.* Coastal damages on Saaremaa Island, Estonia, caused by the extreme storm and flooding on January 9, 2005. // Journal of Coastal Research, 2008, 24(3), p. 602–614.
26. *Van Rijn L. C.* Long-shore sand transport. // 28th ICCE, Cardiff, UK, 2002, p. 2439–2451.