

УДК 551.465

ПРОГНОЗ РЕЦЕССИИ БЕРЕГОВ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА НА БЛИЖАЙШЕЕ СТОЛЕТИЕ

© 2015 г. И. О. Леонтьев¹, Д. В. Рябчук², А. Ю. Сергеев², О. А. Ковалева²¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва
e-mail: igor.leontiev@gmail.com² Всероссийский научно-исследовательский геологический институт
им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург
e-mail: Daria_Ryabchuk@vsegei.ru

Поступила в редакцию 24.02.2014 г., после доработки 2014 г.

Развитие значительной части побережий рассматриваемого региона связано с экстремальными штормовыми нагонами, которые размывают верхнюю часть авантюны и обуславливают рецессию берегов. Применен метод прогноза рецессии, использующий моделирование штормовых деформаций береговых профилей (на основе модели CROSS-P). Эффект изменения уровня моря учитывается с помощью правила Брууна. Выявлены три типа будущей эволюции берегов, связанные с уклоном активной части берегового профиля. Показано, что при реализации наиболее вероятных сценариев штормовой активности и повышения уровня моря, сравнительно крутые берега в районе Комарово – Солнечное могут отступить к концу ближайшего столетия на 3–4 десятка метров. На более пологих берегах ожидается рецессия в пределах 1–2 десятков метров (участки Ушково, Котлин-юг и Петродворец), а предельно отмелье берега (в районе Сестрорецка и северного края Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений) отступят на 50–100 м.

DOI: 10.7868/S0030157415030107

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования в данной работе служат песчаные берега, расположенные в Курортном районе Санкт-Петербурга, вблизи Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС) и в Невской губе (рис. 1). Согласно существующей классификации [3], рассматриваемые берега сформированы преимущественно волновыми процессами. Субширотный участок берега Курортного района и естественные берега Невской губы относятся к типу выравнивающихся абразионно-аккумулятивных бухтовых, субмеридиональный участок берега от п. Солнечное до Сестрорецка классифицируется как выровненный аккумулятивный [1]. В пределах абразионно-аккумулятивных бухтовых берегов выделяются как песчаные берега, так и зоны интенсивного размыва ледниковых отложений (абразионный моренный подтип береговой зоны). Последние характеризуются формированием валунных бенчей как в субаэральной, так и в субаквальной частях береговой зоны, и в данной работе не рассматриваются. Наиболее широко распространены абразионно-аккумулятивные берега с относительно узкими песчаными пляжами (20–30 м) и комплексом невысоких дюн (до 1.5–2 м) [8]. Мощность песчаных пляжевых отложений составляет от 1–2 до 10 м. На подводном береговом склоне отмечаются четко выраженные в рельефе вдольберего-

вые подводные песчаные валы (мощность песчаных отложений от 20–30 см до 1 м), развитые на поверхности консолидированных грубообломочных отложений или глинистой морены, обнажающихся в межваловых ложбинах.

Современное развитие рассматриваемых берегов определяется волновыми воздействиями на фоне исключительно высоких штормовых нагонов и потому заметно отклоняется от канонической схемы, согласно которой штормовые волны размывают пляж и выносят материал на подводный склон, а слабые волнения возвращают наносы и восстанавливают доштормовой профиль. На значительной части рассматриваемых берегов во время сильных штормов происходит размыв верхней части авантюны и аккумуляция смытого материала на пляже. В периоды же относительно слабой волновой активности аккумулятивное тело размывается, и наносы распределяются по подводному склону. В типичном случае описанный “конвейер” работает только в одном направлении, потери материала из тела дюны оказываются необратимыми, и дюнный пояс постепенно отступает [7]. Процесс может ускориться вследствие ожидаемого глобального повышения уровня моря и, таким образом, прогноз рецессии берегов рассматриваемого района на ближайшее столетие представляется достаточно актуальной задачей.

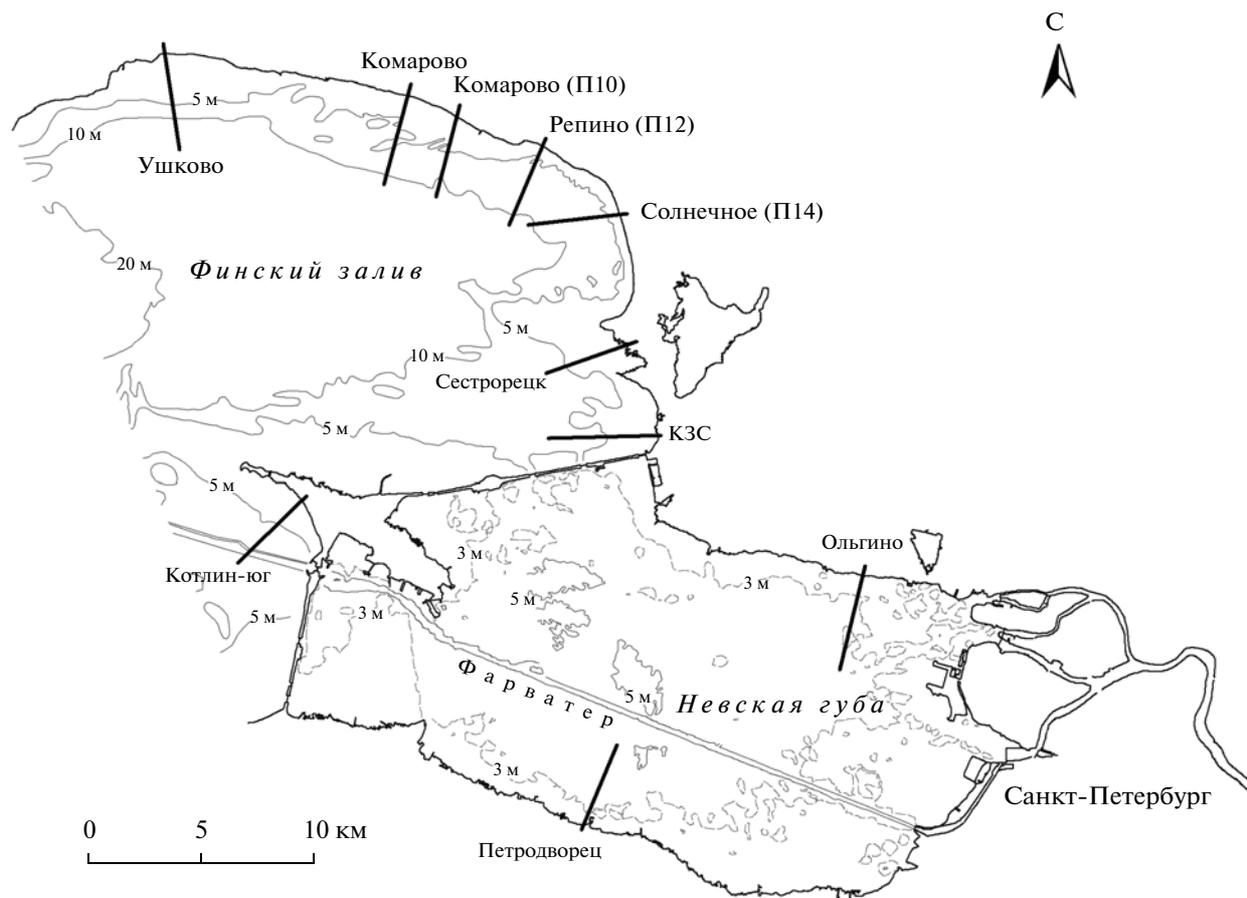


Рис. 1. Схема расположения расчетных профилей.

Эта задача решается в настоящей работе с помощью метода, основанного на математическом моделировании морфодинамики берегового склона. Оценивается отступление берегов, как вследствие штормового воздействия, так и за счет вероятного повышения уровня моря.

Прогнозирование рецессии выполнено для девяти береговых профилей (рис. 1), пять из которых располагаются в Курортном районе (Ушково, Комарово, Репино, Солнечное и Сестрорецк), два — около северного края КЗС и на южном побережье о. Котлин (профили КЗС—север и Котлин—юг), и еще два — в Невской губе (профили Петродворец и Ольгино). Профили выбирались таким образом, чтобы они максимально соответствовали понятию “песчаного берега”. Основой послужили результаты многолетнего мониторинга береговых зон исследуемого района, проводимого ВСЕГЕИ с 2004 г. (нивелирование и георадиолокационное профилирование по сети опорных профилей на берегу, эхолотный промер и профилирование методом гидролокации бокового обзора на подводном береговом склоне, а также пробоотбор).

КОНЦЕПЦИЯ ПРОГНОЗА

Процесс рецессии рассматриваемых берегов имеет характер последовательных импульсов, которые совпадают с моментами экстремальных штормовых событий, воздействующих на верхнюю часть авантюны. Речь идет об исключительно сильных штормах при высоте нагона не менее 2 м [7]. В Курортном районе Санкт-Петербурга подобные события случались в 20 веке примерно 1 раз в 25 лет [2]. Однако в последние десятилетия их повторяемость явно возросла. Сравнительно теплые зимы способствуют более позднему ледоставу, и наиболее жестокие зимние шторма все чаще обрушиваются на берега, лишенные защитного ледового покрова [9].

Следует отметить, что опубликованные данные о штормовой активности в Балтийском море и Финском заливе достаточно противоречивы [19]. Так, анализ штормовой активности для семи станций Балтийского моря свидетельствует о наличии слабого тренда к ее уменьшению в целом за период с 1880 по 2001 г. [11]. Аналогичные исследования, описанные в [14], выявили лишь изменчивость по десятилетиям ($\pm 10\%$) при отсутствии выражено-

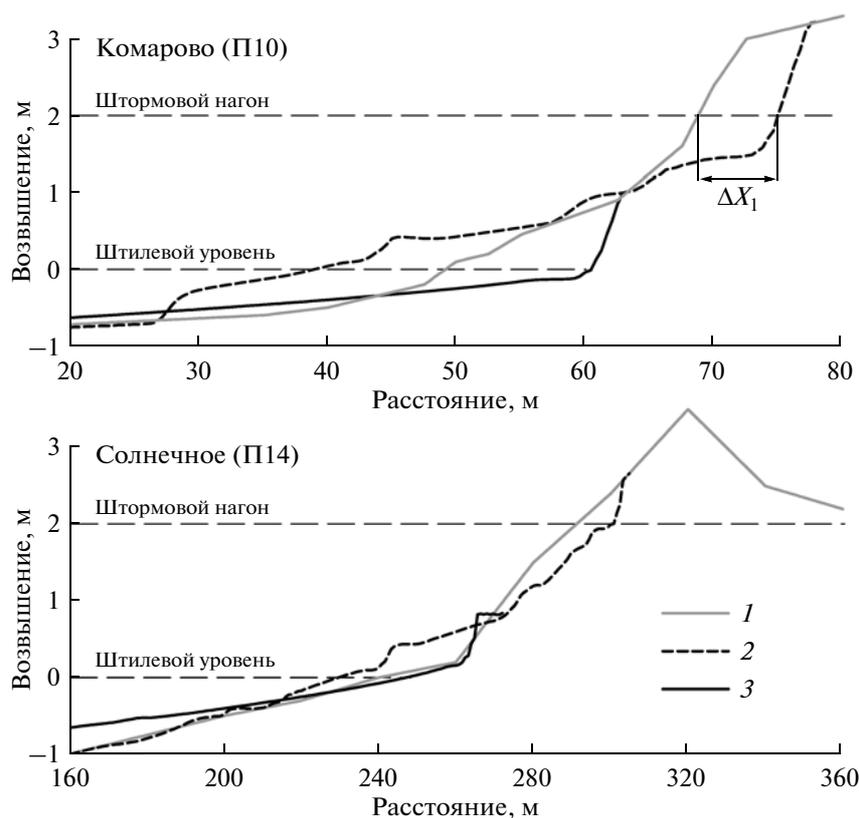


Рис. 2. Изменения берегового профиля при последовательных воздействиях экстремального шторма и продолжительного слабого волнения. Профили дна: 1 – начальный, 2 – после шторма, 3 – после действия слабого волнения. Сценарий шторма отражен в табл. 1. Слабое волнение характеризуется средней высотой 0.3 м, средним периодом 3 с и продолжительностью 25 суток. Расчеты основаны на модели CROSS-P [7].

го тренда. В то же время по данным расчетов с использованием модели NCEP–NCAR [20], для Балтийского моря выявлен слабый, но статистически значимый тренд увеличения частоты сильных ветров и, соответственно, роста штормовой активности. Большинство исследователей отмечает также рост годовых максимальных значений уровня моря на протяжении последних 70 лет, и особенно во второй половине XX века [17].

В период с 2004 г. экстремальные размывы берегов в Курортном районе наблюдались трижды – в осенне-зимние периоды 2006–2007 г., 2011–2012 г. и 2013–2014 гг. По данным повторных нивелировок, в ходе каждого из осенне-зимних штормов 2011 г. абразионный уступ в авандоне отступал на некоторых участках на расстояние до 5 м [9]. Активизация береговых процессов и, в частности, рост частоты экстремальных размывов берегов отмечается также эстонскими исследователями для южного побережья Финского залива [18].

Таким образом, при прогнозе развития берегов в ближайшее столетие необходимо принять во внимание возможность уменьшения периода повторяемости экстремальных событий с 25 лет до, скажем, 10 лет. Длительность периода непрерыв-

ных наблюдений пока недостаточна для достоверных статистических оценок, но приведенная цифра представляется вполне реальной.

В промежутках между экстремальными штормами изменения затрагивают в основном прибрежную область профиля, включая пляж, куда поступает смытый с авандюны материал. В эти периоды наносы могут перемещаться в ту или иную сторону под действием сравнительно небольших волн, течений (в том числе, вдольбереговых) и ветра, в результате чего объем пляжа может уменьшаться или увеличиваться. Однако следует принять во внимание, что локальные ветровые волнения в восточной части Финского залива характеризуются сравнительно малыми периодами (2–3 с), и в силу своих свойств перемещают наносы преимущественно от берега в море. А это, в свою очередь, способствует размыву аккумулятивного тела, сформированного на пляже, и последующему выносу песка на подводный склон. Такое поведение достаточно типично для района побережья между пунктами Комарово и Солнечное, о чем свидетельствуют результаты моделирования, приведенные на рис. 2.

Сказанное выше позволяет допустить, что конечный итог морфологических изменений пляжа в

Таблица 1. Сценарий экстремального шторма для восточной части Финского залива

Фазы шторма, ч	0–3	3–6	6–9	9–12	12–15	15–18	18–21	21–24
Ветер, м/с	10	15	18	20	16	13	10	5
Уровень моря, м	0.5	1.0	1.5	2.0	1.6	1.3	1.0	0.3
Высота волн, м	0.4	0.7	0.9	1.0	0.9	0.7	0.5	0.3
Период волн, м	3.0	3.5	4.0	4.5	4.5	4.0	3.7	3.5

период между экстремальными событиями можно представить как результат воздействия относительно слабого волнения в течение определенного времени. Возникает вопрос, какие параметры и какую оптимальную длительность слабых воздействий следует заложить в модель, чтобы адекватно отобразить результирующие изменения рельефа? Этот вопрос, по-видимому, можно решить только эмпирически с помощью численного моделирования деформаций профиля. При этом можно исходить из допущения, что на сравнительно малых временных отрезках между двумя последовательными экстремальными штормами (1–2 десятка лет) средний уклон профиля в пределах пляжа и авантюны существенно не изменяется. Это означает, что уклон профиля по окончании действия слабого волнения должен примерно соответствовать уклону доштормового профиля. Ясно, что к более длительным масштабам времени подобное предположение не применимо.

Как показал опыт расчетов, в случаях профилей 10 и 14, приведенных на рис. 2, указанное соответствие уклонов достигается при воздействии волн с высотой 0.3 м и периодом 3 с в течение 25 суток. Эти параметры достаточно типичны для Курортного района. При моделировании условий сравнительно малой акватории Невской губы должен использоваться меньший период волн (2.4 с). Указанные значения и были приняты за основу в дальнейших расчетах.

Таким образом, прогноз рецессии берегов предполагает ряд последовательных циклов расчетов, каждый из которых включает два шага. На первом из них моделируется собственно штормовой цикл, а на втором – воздействие относительно слабого продолжительного волнения. При прогнозе на 100 лет количество расчетных циклов составляет от 4 до 10 в зависимости от принятого периода повторяемости экстремальных штормов (25 или 10 лет).

В качестве индикатора рецессии в данном случае принимается смещение положения берега ΔX_1 на уровне максимального штормового нагона (рис. 2). Практическая значимость данного показателя определяется тем, что размыв верхней части дюны или бровки абразионного уступа особенно опасен для прибрежных построек и коммуникаций.

Эффект изменений уровня моря оценивается с помощью известного правила Брууна [12], согласно которому подъем уровня на величину ζ вызывает отступление берега на расстояние ΔX_2 :

$$\Delta X_2 = \zeta / \bar{\beta}, \quad \bar{\beta} = z_A / l_A. \quad (1)$$

Здесь $\bar{\beta}$ – средний уклон активной части профиля, которая характеризуется длиной l_A и возвышением z_A . Под активной понимается та часть профиля, в которой отмечаются деформации при сильных штормах. Величины z_A и l_A можно определить на основе результатов моделирования штормовых деформаций профиля.

Полная величина рецессии определяется суммой $\Delta X_1 + \Delta X_2$.

Расчеты по предложенной методике предполагают наличие достаточного запаса песка на берегу и отсутствие выходов коренных пород (морены) на поверхность берегового склона.

ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Сценарий экстремального шторма, типичный для Курортного района Санкт-Петербурга, представлен в табл. 1 [7]. Имеются в виду средние высоты и периоды волн в открытом море. В фазе развития параметры волн и ветра увеличиваются, уровень достигает максимума 2 м, а в фазе затухания соответствующие показатели уменьшаются.

В Невской губе создается свой режим волнения, так как из-за влияния комплекса защитных сооружений (КЗС) штормовые волны из Финского залива сюда не попадают. Средняя глубина в губе при нагоне близка к 5 м, а характерный разгон не превышает 15 км. Поэтому при скорости ветра 20 м/с средние параметры волн ограничиваются значениями 0.7 м и 3.1 с (это следует из расчетов по методике [4]). Кроме того, КЗС ограничивает подъем уровня в губе значениями около 1.6–1.7 м, причем снижение уровня после пика нагона замедляется за счет стока Невы. Соответствующий гипотетический сценарий экстремального шторма в Невской губе отражен в табл. 2. Как и прежде, предполагается, что период повторяемости такого сценария составляет либо 25, либо 10 лет.

Моделировалось воздействие штормов западных румбов. Углы подхода волн относительно

Таблица 2. Сценарий экстремального шторма для Невской губы

Фазы шторма, ч	0–3	3–6	6–9	9–12	12–15	15–18	18–21	21–24
Ветер, м/с	10	15	18	20	16	13	10	5
Уровень моря, м	0.5	1.0	1.4	1.7	1.6	1.5	1.3	1.0
Высота волн, м	0.4	0.5	0.6	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
Период волн, м	2.7	2.9	3.0	3.1	3.1	3.0	2.7	2.4

Таблица 3. Рецессия берегов в результате штормовых воздействий (ΔX_1) и подъема уровня моря (ΔX_2) в ближайшее столетие

Тип	Профиль	z_A , м	l_A , м	$\bar{\beta}$	ΔX_1 , м		ΔX_2 , м		$\Delta X_1 + \Delta X_2$, м
					$T_{ES} = 25$ лет	$T_{ES} = 10$ лет	$\zeta = 0.2$ м	$\zeta = 0.5$ м	
1	Комарово	4.5	70	0.064	19	38	3	8	41
	Репино	4.5	130	0.035	13	20	6	14	26
	Солнечное	4.0	100	0.040	20	30	5	12	35
	Ольгино	2.0	60	0.033	12	20	6	15	26
2	Ушково	2.5	100	0.025	8	9	8	20	17
	Котлин-юг	2.5	100	0.025	5	6	8	20	14
	Петродворец	2.5	100	0.025	5	6	8	20	14
3	КЗС-север	2.5	600	0.004	0	0	50	125	50
	Сестрорецк	2.5	1200	0.002	0	0	100	250	100

нормали к берегу изменялись в зависимости от экспозиции профиля от 0° до 70° . Использовалась усовершенствованная версия модели CROSS-R, протестированная по данным наблюдений в Курортном районе [7]. С учетом результатов гранулометрического анализа большого массива данных, полученных ВСЕГЕИ в ходе работ 2004–2013 гг., средняя крупность песка при расчетах принималась равной 0.25–0.3 мм.

Что же касается возможных изменений уровня моря в 21 веке, то известен ряд сценариев различающихся оценками термального увеличения объема океана и вклада таяния ледников [13]. На рис. 3 отражены два типичных сценария, A1FI и B1, каждый из них включает минимальный (Min) и максималь-

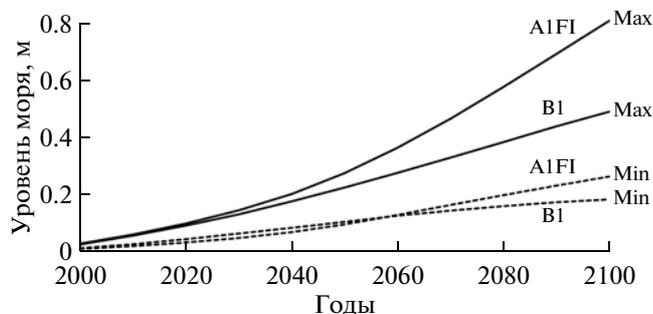
ный (Max) прогнозы. Иные известные оценки в основном не выходят за указанные пределы.

На основе косвенных признаков, можно предполагать, что скорость повышения уровня w у берегов Курортного района в последнее тысячелетие была в среднем около 0.5 мм/год [6, 15]. Сценарии A1FI Max и B1 Max предполагают внезапный рост w на порядок, что маловероятно, особенно с учетом начавшегося похолодания и увеличения ледовитости в Арктике [10]. На этом фоне более реалистичными выглядят сценарии A1FI Min и B1 Min, допускающие рост уровня моря к 2100 г. в среднем на 0.2 м.

ПРОГНОЗ РЕЦЕССИИ БЕРЕГОВ

Результаты моделирования эволюции, обусловленной штормовыми воздействиями, отражает рис. 4. Здесь показаны положения берегового профиля после ряда последовательных экстремальных штормовых циклов (4 или 10). В качестве начального принят профиль, зафиксированный в летний период 2011 или 2012 г. Полученные значения рецессии ΔX_1 для периодов повторяемости экстремальных штормов $T_{ES} = 25$ и $T_{ES} = 10$ лет отражены в табл. 3.

В зависимости от характера будущих изменений береговые профили на рис. 4 подразделяются на три типа.

**Рис. 3.** Типичные сценарии повышения уровня океана в 21 веке.

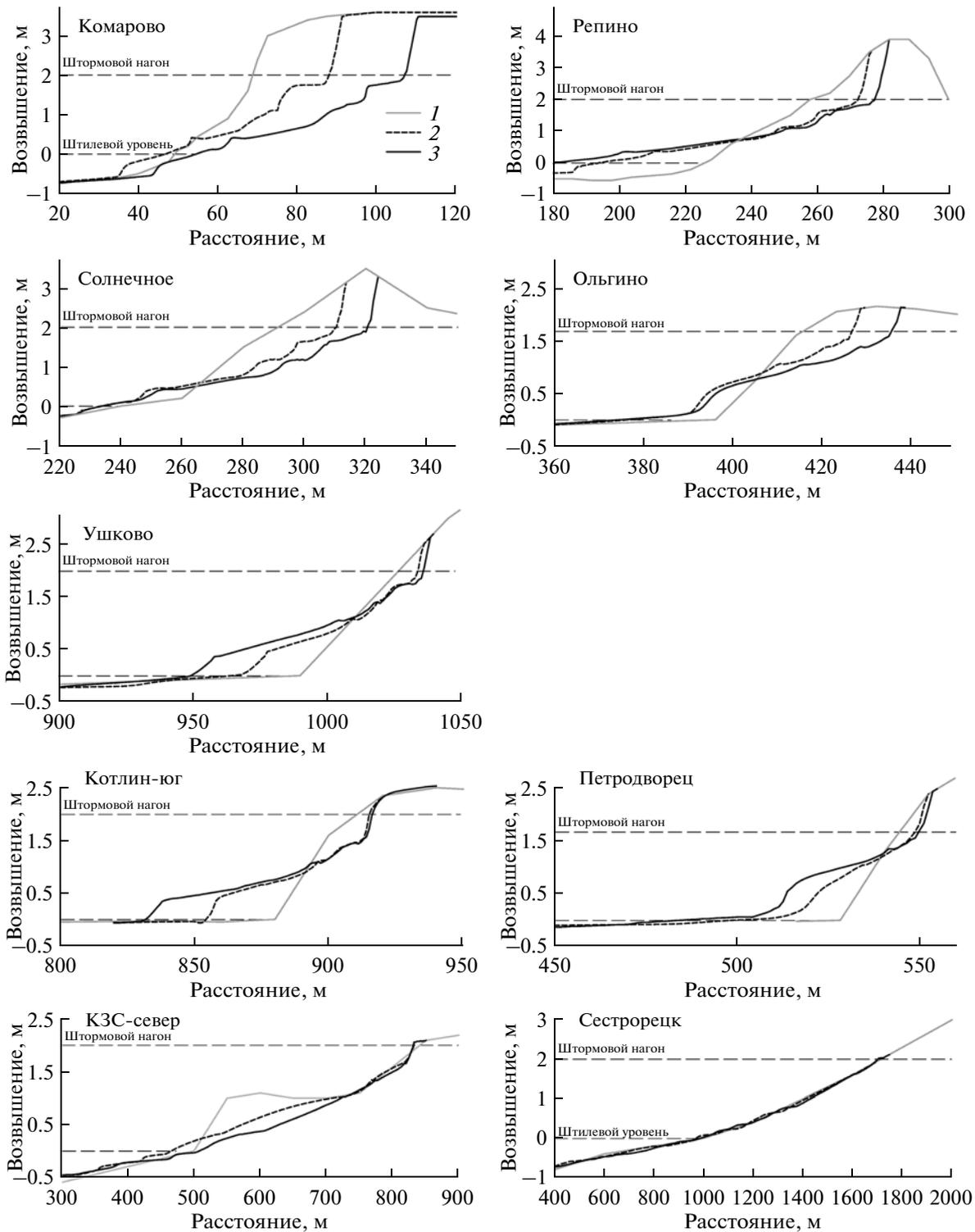


Рис. 4. Эволюция берегов в ближайшие 100 лет, обусловленная экстремальными штормовыми воздействиями. Профили дна: 1 – начальный, 2 и 3 – после 4 и 10 штормовых циклов (соответственно периоду их повторяемости 25 или 10 лет).

Первый тип характеризуется ясно выраженным размывом и отступанием авантюны (профили Комарово, Репино, Солнечное и Ольгино). Профиль со временем становится более пологим,

что характерно для берегов, развивающихся в условиях дефицита бюджета наносов [5]. Рецессия тем больше, чем меньше период повторяемости экстремальных событий T_{ES} . Так, на профилях Ко-

марово и Ольгино смещение авантюны в ближай-
шие 100 лет составит 19 и 12 м при $T_{ES} = 25$ лет и уве-
личится почти вдвое при $T_{ES} = 10$ лет. В последнем
случае скорость рецессии в Курортном районе будет
достигать 0.4 м/год, а в Невской губе – 0.2 м/год.
Потери наносов, характеризующие дефицит бюд-
жета на профилях Комарово и Ольгино, будут оце-
ниваться как 0.8 и 0.2 м³ м⁻¹ год⁻¹. Как видно из гра-
фиков, по мере выполаживания профилей процесс
с течением времени будет замедляться.

Второй тип берега выделяется весьма пологим
подводным склоном, проходя над которым волны
теряют энергию и подходят к пляжу значительно
ослабленными (профили Ушково, Котлин–юг и
Петродворец). В отличие от профилей первого ти-
па, эродирующее действие небольших волн здесь
малозаметно. Доминирует перемещение материала
к пляжу, что способствует его нарастанию. Величи-
на рецессии минимальна (всего несколько метров
за столетие) и почти не зависит от повторяемости
экстремальных штормов.

Третий тип – это предельно отмельный берег.
Примером служит профиль Сестрорецка, кото-
рый, по-видимому, находится в равновесии с
внешними воздействиями, и потому не претерпе-
вает изменений во время экстремальных штор-
мов. Такая ситуация, вероятно, будет сохраняться
и в дальнейшем. К тому же типу, скорее всего, от-
носится и профиль КЗС–север. В течение бли-
жайших десятилетий здесь вероятен размыв пля-
жа, но в дальнейшем профиль приблизится к со-
стоянию равновесия и стабилизируется.

Параметры профилей (z_A , l_A и $\bar{\beta}$), необходимые
для расчетов по формуле (1), грубо оценены на
основе графиков рис. 4 и приведены в табл. 3. Там
же даны значения рецессии ΔX_2 вследствие возмож-
ного повышения уровня моря ζ на 0.2 и на 0.5 м к
концу столетнего периода. Последняя графа табли-
цы отражает суммарную рецессию $\Delta X_1 + \Delta X_2$ в наи-
более вероятном случае $T_{ES} = 10$ лет и $\zeta = 0.2$ м.

В этом случае, как видно из табл. 3, показатель
 ΔX_2 для профилей типа 1 будет находиться в пре-
делах от 3 до 6 м, что существенно меньше вели-
чин ΔX_1 , обусловленных штормовыми размывами
(от 20 до 38 м). Таким образом, эффект подъема
уровня здесь будет мало заметен.

Для профилей типа 2 значения рецессии ΔX_1 и
 ΔX_2 близки друг к другу и в сумме дают 14–17 м за
столетие.

Профили типа 3 весьма чувствительны к изме-
нению уровня, и берега могут отступить на 50–
100 м. По сути, речь здесь идет скорее о пассив-
ном затоплении прибрежной территории.

Заметим, что даже в маловероятном случае $\zeta =$
 $= 0.5$ м основной вклад в отступление берегов типа 1
будет вносить штормовое воздействие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Особенность берегов рассматриваемого регио-
на заключается в том, что их развитие определя-
ется размывом авантюны при экстремальных
штормовых нагонах (с периодом повторяемости
порядка 10 лет) и размывом пляжа в промежутках
между штормами. В таких “экзотических” условиях
традиционные подходы к морфодинамическому
прогнозу малоэффективны. Поэтому сделана по-
пытка применить особый метод, принимающий во
внимание специфический импульсный характер
эволюции. Изменения морфологии в период между
экстремальными штормами представлялись как ре-
зультат действия слабого волнения определенной
продолжительности. Деформации профилей рас-
считывались на основе модели CROSS-P. Эффект
изменения уровня моря учитывался с помощью пра-
вила Брууна.

Проведенное исследование позволяет выде-
лить, по меньшей мере, три типа эволюции бере-
гов Восточной части Финского залива в зависи-
мости от уклона активной части берегового профи-
ля. При реализации наиболее вероятных сценариев
штормовой активности и повышения уровня моря
сравнительно крутые береговые участки (с уклоном
более 0.03) могут отступить к концу ближайшего
столетия на 3–4 десятка метров, причем основной
вклад в рецессию будет связан с размывом аван-
тюны при экстремальных штормах. Такая ситуация ха-
рактерна для Курортного района (на участке Кома-
рово–Солнечное), а также района Ольгино в Нев-
ской губе.

Для сравнительно пологих берегов ожидается
рецессия в пределах 1–2 десятков метров, которая
будет определяться в равной мере штормовым раз-
мывом и подъемом уровня (участки Ушково, Кот-
лин–юг и Петродворец).

Наконец, предельно отмельные берега (в районе
Сестрорецка и северного края КЗС) могут отсту-
пить на 50–100 м, в основном, за счет пассивного
затопления прибрежной территории.

Полученные оценки хорошо соотносятся со ско-
ростями отступления бровки абразионных уступов,
установленными ВСЕГЕИ по данным повторных
нивелировок и ретроспективного анализа материа-
лов аэро- и космосъемки. Для уточнения прогноза
потребуется более полные сведения о статистике
экстремальных штормов и возможных изменениях
уровня моря.

Работа выполнена при финансовой поддержке
РФФИ (проект № 13-05-00589), РНФ (грант № 14-
17-00547), а также международного проекта
CLIPLivE (Адаптация городской окружающей сре-
ды к негативным последствиям климатических из-
менений) Программы “Юго-Восточная Финлян-
дия – Россия” ENPI 2007–2013.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас геологических и эколого-геологических карт Российского сектора Балтийского моря / Гл. ред. Петров О.В. 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. Ионин А.С., Каплин П.А., Медведев В.С. Классификация типов берегов земного шара (применительно к картам физико-географического Атласа Мира) // Тр. Океаногр. комиссии АН СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1961. Т. XII. С. 94–108.
4. Лапто Д.Д., Стрекалов С.С., Завьялов В.К. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. Л.: ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева, 1990. 432 с.
5. Леонтьев И.О. Моделирование эволюции берегового профиля на временных масштабах от десятков до тысяч лет // Океанология. 2012. Т. 52. № 4. С. 588–599.
6. 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.
7. Леонтьев И.О., Рябчук Д.В., Сергеев А.Ю. Моделирование штормовых деформаций песчаного берега (на примере восточной части Финского залива) // Океанология. 2015. Т. 55. № 1. С. 147–158.
8. Рябчук Д.В., Спиридонов М.А., Сухачева Л.Л. и др. Рельеф, геологическое строение и экзогенные геологические процессы береговой зоны Курортного района Санкт-Петербурга // Региональная геология и металлогения. 2008. № 36. С. 109–120.
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 режимобразующих факторов // Геоморфология. 2012. № 4. С. 99–105.
10. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П. и др. Климатические изменения ледовых условий в арктических морях Евразийского шельфа // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 75. С. 149–160.
11. Alexandersson H., Vedin H. Stormar det mera nu? (Do we have more storms today?) // SMHI Vader och Vatten. 2002. P. 10–18 (in Swedish).
12. Bruun P. The Bruun rule of erosion by sea-level rise: a discussion on large-scale two- and three-dimensional usages // J. of Coastal Res. 1988. V. 4. № 4. P. 627–648.
13. IPCC AR4 Sea-level projections. 2012. http://www.cmar.csiro.au/sealevel/sl_proj_21st.html.
14. Johansson C., Bergstrom H. Variabiliteten i vindens energiinnnehall over Skandinavien mellan 1900–2000 (Variability in wind energy over Scandinavia during 1900–2000) // Elforsk Rapport. 2004. № 04. 36 p. Elforsk AB SE-10153 Stockholm, Sweden (in Swedish).
15. Leont'yev I., Ryabchuk D., Zhamoïda V. et al. Reconstruction of Late Holocene development of the submarine terrace in the eastern Gulf of Finland // Baltica. 2010. V. 23. № 2. P. 105–112.
16. Orviku K., Jaagus J., Kont A. et al. Increasing activity of coastal processes associated with climate change in Estonia // J. of Coastal Res. 2003. № 19. P. 364–375.
17. 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. № 50. P. 287–362.
18. Suursaar U., Jaagus J., Kullas T. Past and future changes in sea level near the Estonian coast in relation to changes in wind climate // Boreal Environmental Research. 2006. № 11. P. 123–142.
19. The BACC Author Team. Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin Serie: Regional Climate studies / Eds. Bolle H.-J. et al. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg: 2008. 473 p.
20. Weisse R., von Storch H., Feser F. Northeast Atlantic and North Sea storminess as simulated by a regional climate model 1958–2001 and comparison with observations // J. of Climate. 2005. № 18. P. 465–479.

Prediction of Coastal Recession in the Eastern Gulf of Finland for the Next Century

I. O. Leont'yev, D. V. Ryabchuk, A. Yu. Sergeev, O. A. Kovaleva

Evolution of a significant part of coasts in the region considered here is determined by the extreme storm surges eroding the upper part of dunes and exciting recession of the coast. In order to predict the recession a special method is suggested using numerical modelling of the storm-induced morphological changes in a coastal profile (based on the model CROSS-P). Influence of the sea-level changes is estimated using the Bruun rule. Three types of the future behavior of coast are selected depending on slope of the active part of the profile. If the most reasonable scenarios of storm activity and sea-level rise will be realized then the relatively steep coasts in a region from Komarovo to Solnechnoye will retreat by 30–40 meters. Recession of the less steep coasts (sites Ushkovo, Kotlin-south and Petrodvorets) is expected within 10–20 meters, whereas the extremely gentle coasts (in vicinity of Sestroretsk and near the north end of protection dike) will retreat by 50–100 m.