НЕГАТИВНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ШТОРМОВЫХ НАГОНОВ И «ВЕКОВОГО» РОСТА УРОВНЯ В НЕВСКОЙ ГУБЕ

Малинин В. Н., Гордеева С. М., Митина Ю. В., Павловский А. А.

THE NEGATIVE CONSEQUENCES OF STORM SURGES AND THE “AGE-OLD” LEVEL RISE IN THE NEVA BAY

Malinin V. N., Gordeeva S. M., Mitina Yu. V., Pavlovsky A. A.

Аннотация

Обсуждаются негативные следствия от возможных изменений уровня в Невской губе к концу столетия за счет векового роста уровня и экстремальных штормовых нагонов для территории Санкт-Петербурга. К ним относятся затопление, подтопление, размыв берегов и заболачивание прибрежных районов. Показано, что наиболее реалистичным прогнозом уровня в г. Кронштадте к концу столетия является его рост до 34–59 см БС, а согласно «пессимистическому» прогнозу существует вероятность его повышения до 80–90 см БС. В этом случае будут затопляться значительные площади Адмиралтейского, Василеостровского, Кировского и Петроградского районов города. Приводятся результаты оценки границ зоны затопления территории города для уровней воды однопроцентной обеспеченности.

При экстремальном штормовом нагоне возможный подъем уровня севернее ст. Горской может составить 600 см БС. Особенно сильно эффект затопления от штормовых нагонов проявляется вблизи г. Сестрорецка. Уже при высоте нагонной волны 4 м суммарная площадь возможного затопления Курортного района превышает 1260 га, причем все пляжи будут полностью потеряны.

Ключевые слова: морской уровень, Невская губа, штормовой нагон, прогноз, затопление и подтопление побережья.

Abstract

Negative consequences of possible level variations in the Neva Bay by the end of the century due to the age-old level rise and extreme storm surges for St. Petersburg are discussed. These include flooding, submergence, erosion of shores and bogging of coastal areas. It is shown that the most realistic forecast of the level in Kronstadt by the end of the century is its rise up to 34–59 cm BS (the Baltic system of heights), and according to the “pessimistic” forecast there is a possibility of its rise to 80–90 cm BS. In this case, significant areas of the Admiralty, Vasileostrovsky, Kirovsky and Petrogradsky city districts will be flooded. The results of assessing the flood zone boundaries of the city’s territory for one-percent water levels are given.

In case of extreme storm surges, the possible level rise north of Gorskaya may amount to 600 cm BS. Especially the effect of flooding caused by storm surges is pronounced near Sestroretsk. At an altitude of the 4-m surge wave the total area of possible flooding of Kurortny district exceeds 1260 hectares, all the beaches being completely lost.

Keywords: sea level, Neva Bay, storm surges, forecast, underflooding and flooding of coasts.

Введение

Как известно, Невская губа представляет собой восточную часть Финского залива от устья Невы до о. Котлина. На ее низинных берегах расположен крупнейший мегаполис Северной Европы — Санкт-Петербург. Наиболее полно колебания морского уровня в Невской губе отражают данные наблюдений на ст. Лисий Нос, расположенной практически в пределах Санкт-Петербурга и на Кронштадтском футштоке, который относится к пятерке старейших уровнемерных постов мира. Если для г. Кронштадта непрерывные данные по уровню доступны с 1835 г., то для ст. Лисий Нос — с 1923 г. В связи со строительством Комплекса защитных сооружений от навод-

нений (КЗС) стало ясно, что гидрологический режим в Невской губе претерпел изменения, вследствие чего происходят определенные искажения в колебаниях морского уровня. Это потребовало создания нового реперного гидрологического поста, который был построен на южном побережье залива в 40 км от о. Котлина (Шепелево), защищенным от влияния КЗС и антропогенного влияния мегаполиса Санкт-Петербурга. Наблюдения показали, что отличия в значениях морского уровня отмечаются лишь в синоптическом масштабе. Уже средние месячные значения уровня практически тождественны. Дополнительное сравнение средних годовых данных по уровню в г. Кронштадте и на ст. Лисий Нос,

расположенной вблизи устья р. Невы за период 1976–2011 гг., показало, что тренд в уровне на ст. Лисий Нос несколько меньше, чем в г. Кронштадте (на 0,4 мм/год), а корреляция составляет $r = 0,98$. Это означает, что Кронштадтский футшток полностью характеризует долговременные изменения уровня в Невской губе.

Наиболее опасными для Санкт-Петербурга представляются «вековой» рост уровня, обусловленный главным образом перманентным подъемом уровня Мирового океана, и штормовые нагоны, которые неминуемо отразятся на экологической ситуации территории города, имеющего высокое природное и историко-культурное значение и обладающего значительной рекреационной ценностью, особенно в Курортном и Ломоносовском районах.

С точки зрения градостроительного развития города, перспективного планирования различных отраслей экономики региона и оценки экологической ситуации прибрежных урбанизированных территорий необходим прогноз возможных изменений уровня в Невской губе не только на ближайшие десятилетия, но и до конца текущего столетия [6]. Именно этой цели посвящена данная работа.

Основными задачами являются:

- оценка возможных изменений уровня Невской губы до конца столетия на основе уточненного метода сверхдолгосрочного прогноза морского уровня;
- оценка экстремальных колебаний уровня, обусловленных штормовыми нагонами;
- выявление негативных экологических последствий для прибрежных территорий Невской губы в результате возможных изменений морского уровня.

Прогноз возможных изменений морского уровня в Невской губе до конца столетия

В монографии [1] показано, что основной причиной формирования векового тренда в уровне Финского залива является рост уровня Мирового океана (УМО), а его межгодовые остаточные колебания зависят преимущественно от интенсивности североатлантического колебания (САК). В результате приходим к следующей двухпараметрической модели:

$$H_{\text{кр}} = \Psi(\text{УМО}, \text{САК}), \quad (1)$$

где $H_{\text{кр}}$ — среднегодовой уровень в г. Кронштадте. Данная модель послужила основой для прогноза уровня на конец столетия в [1, 5]. В настоящей работе выполнено уточнение указанной прогностической схемы. В качестве исходных данных были взяты временные ряды $H_{\text{кр}}$, УМО и САК за период 1925–2007 гг., причем с целью исключения случайных ошибок и короткопериодных климатических колебаний предварительно было выполнено 11-летнее скользящее осреднение. Далее методом наименьших квадратов было рассчитано линейное стандартизированное уравнение регрессии для $H_{\text{кр}}$, которое имеет вид:

$$Z_h = 0,41Z_{\text{САК}} + 0,99Z_{\text{УМО}}, \quad (2)$$

где Z_h — стандартизированная переменная морского уровня в Кронштадте. Коэффициент детерминации данной модели $R^2 = 0,83$, а ее средняя квадратическая ошибка $s_{y(x)} = 1,7$ см. Это означает, что 83 % дисперсии межгодовой изменчивости Z_h описывается в рамках данной модели. Ошибки проявляются в основном для промежутков времени с аномальным характером колебаний уровня. Оценим непосредственный вклад переменных в правой части (2) в дисперсию $H_{\text{кр}}$:

$$R^2 = b_1 r_{h,\text{САК}} + b_2 r_{h,\text{УМО}} = 0,41 \times 0,15 + 0,99 \times 0,78 = 0,06 + 0,77 = 0,83.$$

Отсюда видно, что 77 % дисперсии годовых значений $H_{\text{кр}}$ описывается изменениями УМО и только 6 % — САК. Итак, для климатического прогноза уровня в г. Кронштадте надо иметь прогностические оценки УМО и САК. Прогноз УМО возможен двумя способами. Первый основан на результатах его предвычисления с помощью комплекса гидродинамических моделей общей циркуляции атмосферы и океана, результаты которых приводятся в обобщенных докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Второй способ заключается в применении статистической зависимости УМО от аномалий глобальной температуры воздуха ΔT_a (рис. 1).

Рассчитанное уравнение регрессии для скользящих 11-летних среднегодовых рядов УМО и ΔT_a , заимствованной из архива HadCRUT4 [17], имеет вид:

$$H_{\text{УМО}} = 223 + 122,27 \Delta T_a. \quad (3)$$

Коэффициент детерминации зависимости равен $R^2 = 0,98$, т. е. ей свойственна очень высокая точность. Аномалии температуры воздуха рас-

считываются до конца столетия для различных сценариев климата. Подобным способом выполнен прогноз УМО до конца столетия на основе данных 4-го и 5-го отчета МГЭИК в работе [4].

Что касается климатического прогнозирования САК, то для этой цели использовались значения разности давления между Лиссабоном и Стиккисхоульмюр в зимний период (декабрь – март), имеющие длительную продолжительность и непрерывную поддержку [14]. Установлено, что «вековой» тренд в САК отсутствует. Поскольку межгодовая изменчивость САК весьма значительна, были приняты следующие варианты изменений САК до конца столетия:

- 1) нейтральный, при котором САК будет иметь среднее многолетнее значение;
- 2) положительный, характеризующий фазу усиления САК;
- 3) отрицательный, характеризующий фазу ослабления САК.

В качестве фазового параметра усиления (ослабления) САК принята величина $\pm\sigma$ — среднее квадратическое отклонение временного ряда САК.

Если принять стационарность внешних условий, т. е. неизменность климатического режима в современный период, то приближенной оценкой уровня в г. Кронштадте на конец столетия может служить величина его линейного тренда. Наиболее распространенной точкой зрения является то, что в настоящее время климатической системе свойственно глобальное потепление, причиной которого являются выбросы в атмосферу углекислого газа [15]. Однако эта позиция имеет не только сторонников, но и противников, и подробно обсуждается, например, в монографии [4]. Современные климатические прогнозы на конец столетия базируются главным образом на климатических сценариях, в основе которых лежат предположения о вариантах развития человечества и в соответствии с этим задаются различные варианты выбросов в атмосферу углекислого газа. Далее с помощью чрезвычайно сложных моделей общей циркуляции атмосферы и океана рассчитываются возможные изменения температуры воздуха и других климатических параметров. После этого выполняется усреднение параметров по комплексу (ансамблю) моделей, которые и принимаются за их окончательные оценки.

Такой подход считается научным сообществом наиболее достоверным. Однако его окончательную достоверность можно будет оценить только в конце XXI столетия.

Примем за начальную дату интенсивного потепления 1976 г. [15]. Величина тренда в уровне Кронштадта за период 1976–2012 гг. составила $Tr = 0,20$ мм/год. Если исходить из тренда, то оценка уровня в г. Кронштадте на 2090 г. может достигнуть 28 см БС (рис. 2). Отметим, что УМО, а следовательно, и уровень в г. Кронштадте будут повышаться в течение многих десятилетий даже в том случае, если потепление сменится интенсивным похолоданием. Итак, *минимально возможный рост морского уровня в Кронштадте на конец столетия по сравнению с его началом будет составлять 20 см.*

Оценим возможные изменения морского уровня на конец текущего столетия для 4-х климатических сценариев, представленных в 5-м отчете МГЭИК, три из которых означают дальнейшую интенсификацию потепления [15]. В табл. 1 представлены прогностические оценки $H_{кр}$ на конец XXI в. (2081–2100 гг.) по сравнению с концом XX в. (1986–2005 гг.), рассчитанные для этих сценариев и трех вариантов прогноза САК. Из табл. 1 видно, что при положительной фазе САК рост морского уровня выше, чем при отрицательной фазе САК. Однако это превышение составляет 5 см, т. е. САК оказывает малое влияние на уровень в г. Кронштадте. В связи с этим

Рис. 1. Зависимость 11-летних скользящих средних УМО от аномалий 11-летних скользящих средних глобальной приповерхностной температуры воздуха по данным HadCRUT4 за период 1960–2010 гг.

можно ориентироваться на нейтральный вариант прогноза САК.

По самому неблагоприятному сценарию (RCP8.5) морской уровень может достигнуть к концу столетия высоты примерно 74 см, а по самому благоприятному сценарию (RCP2.6) минимальный морской уровень в Кронштадте не превысит 28 см, что фактически совпадает с нижней оценкой уровня по тренду (рис. 2). Отсюда видно, что размах оценок составляет 48 см. По аналогичной схеме были рассчитаны промежуточные прогностические значения уровня на 2040–2050 и 2075–2085 гг. С уменьшением заблаговременности прогноза размах прогностических оценок быстро уменьшается: для периода 2075–2085 гг. он равен 36 см, а для периода 2040–2050 гг. — 12 см.

Возникает вопрос, как выбрать наиболее вероятный диапазон прогностических оценок морского уровня? Если нет предпочтений относительно выбора климатических сценариев и считать их равнозначными, можно воспользоваться результатами квантильного анализа морского уровня (табл. 2). В табл. 2 квартиль $X_{0.50}$ соответствует медиане, разность между квартилями $X_{0.75} - X_{0.25} = Q$ представляет собой интерквартильное расстояние, которое можно рассматривать как аналог среднего квадратического отклонения. Именно разность $X_{0.75} - X_{0.25}$, на наш взгляд, оптимальным образом характеризует возможный диапазон разброса прогностических оценок

уровня. Поэтому наиболее вероятные отметки уровня для периода 2041–2050 гг. — 19–27 см БС, для периода 2076–2085 гг. — 30–52,2 см БС, для периода 2081–2100 гг. — 33,7–59,0 см БС. Медианная оценка уровня на конец столетия составляет 48 см БС.

Второй способ прогноза морского уровня основан непосредственно на статистической зависимости УМО от аномалий глобальной температуры воздуха ΔTa в виде (3), прогностические значения которой заимствованы из 5-го отчета МГЭИК [15]. Результаты квантильного анализа показали, что размах колебаний уровня на конец столетия составляет $55,2 - 9,7 = 45,5$ см, что почти совпадает с аналогичным размахом уровня, приведенным в табл. 2, но сами значения уровня занижены для любого интервала времени. Занижение прогноза уровня связано с тем, что формула (3) характеризует современные климатические условия, а морской уровень, предвычисленный по моделям общей циркуляции атмосферы и океана [15], получает ускорение, обусловленное переходом к новым климатическим условиям, которые, по мнению МГЭИК, будут вызваны значительным повышением концентрации CO_2 в атмосфере. Это ускорение на конец столетия (2081–2100 гг.) составляет примерно 20 см. Итак, наиболее вероятно, что при условии ускорения роста УМО в XXI столетии уровень в Кронштадте к концу столетия может повыситься

Рис. 2. Межгодовой ход морского уровня в Кронштадте, его линейный тренд и результаты квантильного анализа прогностических значений уровня, предвычисленных по моделям общей циркуляции атмосферы и океана, для периодов 2041–2050, 2076–2085 и 2081–2100 гг.

Таблица 1

Прогностические оценки возможных изменений морского уровня в г. Кронштадте на конец XXI в. (2081–2100 гг.) по сравнению с концом XX в. (1986–2005 гг.), рассчитанные по комплексу моделей общей циркуляции атмосферы и океана для климатических сценариев [15]

Сценарий выбросов СДСВ	Уровень Мирового океана [15], м		Статистическая модель (2), см		
	Среднее	Интервал	$CAK = \bar{\xi} + \sigma = 0,196$	$CAK = \bar{\xi} - \sigma = -0,096$	$CAK = \bar{\xi} = 0,05$
		—	Среднее (интервал)	Среднее (интервал)	Среднее (интервал)
Сценарий RCP2.6	0,40	0,26–0,55	42(31–55)	37 (25–49)	40 (28–52)
Сценарий RCP4.5	0,47	0,32–0,63	48 (36–61)	43 (30–56)	45 (33–59)
Сценарий RCP6.0	0,48	0,33–0,63	49 (36–61)	44 (31–56)	46 (34–59)
Сценарий RCP8.5	0,63	0,45–0,82	61 (46–77)	56 (41–72)	59 (44–74)

Таблица 2

**Характеристики квантильного анализа
прогностических значений уровня в г. Кронштадте
за различные интервалы времени**

Квартиль, см	Временной интервал, годы		
	2041–2050	2076–2085	2081–2100
$X_{\min}$	18,0	26,0	28,0
$X_{0,25}$	19,0	30,0	33,7
$X_{0,50}$	24,0	41,5	48,0
$X_{0,75}$	27,0	50,2	59,0
$X_{\max}$	30,0	62,0	74,0
Уровень по тренду, м	0,17	0,24	0,26

до 34–59 см БС, а при сохранении современных темпов роста — до 20–35 см БС.

Отметим, что существуют прогностические оценки более значительного повышения уровня моря Финского залива к концу XXI века, которые также следует учитывать. Так, по данным второго оценочного доклада о климатических изменениях для бассейна Балтийского моря [18], составленного междисциплинарным коллективом авторов, специализирующихся на исследованиях в данном регионе, в конце XXI в. уровень Финского залива может повыситься от 30–40 до 80–90 см по сравнению с концом XX в. Указанные оценки согласуются с результатами ранее выполненных исследований по прогнозу повышения уровня Балтийского моря [16].

Штормовые нагоны

Географическое расположение Финского залива (вытянутость по широте, сужение и уменьшение глубин по направлению к востоку) приводят к тому, что здесь отмечаются максимальные

штормовые нагоны в Балтийском море [2]. Поскольку в залив впадает крупная река Нева, то в ее устье, где находится Санкт-Петербург, отмечаются наводнения. Самое крупное зарегистрированное наводнение случилось 7 (19) ноября 1824 г., когда уровень в устье р. Невы поднялся до отметки 421 см. Погибло 208 человек, было повреждено до половины всех строений. Однако данное наводнение нельзя считать максимально возможным. Согласно летописям, в 1061–1066 гг., когда правил киевский князь Изяслав Ярославович, «вода прилива покрывала всю нынешнюю окрестность города на 20–25 футов...» [12]. Если это соответствует действительности, то подъем уровня должен был составить 6,1–7,6 м.

К сожалению, достоверность данной информации проверить невозможно. Однако можно рассчитать экстремально возможный подъем уровня для современных гидрометеорологических условий. Такой расчет выполнен в работе [3] для катастрофического наводнения в устье Невы на основе гидродинамической модели при условиях, когда КЗС остается открытым и когда он закрывается на период наводнения. Было установлено, что при открытом КЗС подъем уровня в Санкт-Петербурге может достичь максимального значения, равного 590 см, на ст. Горской — 577 см, в Сестрорецке — 576 см, в Зеленогорске — 549 см (рис. 3). При закрытых створах КЗС высота нагонной волны достигнет около ст. Горской — 604 см, г. Сестрорецка — 598 см, г. Зеленогорска — 571 см, т. е. превышение над подъемом воды при открытых створах КЗС в указанных населенных пунктах составляет соответственно 27, 21 и 22 см, что связано с конфигу-

рацией береговой черты. В результате этого наводнения общая площадь затопления территории Курортного района достигнет 18 км² [7]. Вероятность такого наводнения очень мала — 1/10 000, т. е. один раз в 10 000 лет. Но это не значит, что оно обязательно случится через 10 000 лет, оно может произойти и через несколько лет. Вспомним, что два максимальных наводнения случились в 1824 и 1924 гг. Может быть, следующее экстремальное наводнение произойдет в 2024 году? Кроме того, указанные оценки экстремального подъема уровня к концу столетия будут еще выше на величину его векового роста.

Другой важный фактор, связанный со штормовыми нагонами, — это повышение их повторяемости и сезонный сдвиг. Как следует из анализа невыходов, если в начале XVIII в. число наводнений составляло 6 случаев за 10 лет, то в последние десятилетия оно повысилось до 16 случаев за 10 лет, т. е. почти в три раза. При этом максимум повторяемости наводнений в последнее тридцатилетие сместился с осени на зиму. Абсолютный максимум наводнений отмечается в январе, когда их сумма составила 19, что многократно превышает их оценки за предшествующие десятилетия. Январские наводнения

являются наиболее опасными для побережья Курортного района при отсутствии ледового покрова на акватории залива. При этом полностью перестали отмечаться наводнения в летний период [1].

Негативные следствия изменений морского уровня в Невской губе

Представленные выше оценки возможных изменений морского уровня в результате его «векового» роста и при штормовых нагонах со всей очевидностью показывают чрезвычайную важность учета указанных гидрометеорологических явлений при планировании развития урбанизированных территорий. Принципиально важно, что КЗС надежно защищает акваторию Невской губы от штормовых нагонов, но не защищает от «векового» роста уровня. Районы, расположенные за дамбой (прежде всего, Курортный район) подвержены рискам от обоих видов изменений уровня. Но если длительность штормовых нагонов составляет часы, то вековой рост уровня будет идти постоянно, причем возможно его ускорение. В результате следствия от указанных видов изменений уровня будут различаться, но в любом случае больше всего будут страдать территории, находящиеся за КЗС.

Рис. 3. Распределение максимальных значений морского уровня (см) вдоль побережья восточной части Финского залива при экстремальном катастрофическом наводнении. Числитель — КЗС открыт, знаменатель — КЗС закрыт. Над числителем указана разность уровней [3]

К негативным следствиям изменений уровня относится затопление, подтопление, размыв берегов и заболачивание прибрежных районов, определение которых включено в график подготовки нового Генерального плана города с разработкой концепции совместного градостроительного развития Санкт-Петербурга и территории Ленинградской области (агломерации) [8]. Согласно графику определения границ зон затопления, подтопления, утвержденному Росводресурсами (www.favt.ru), к водным объектам, оказывающим негативное воздействие на территорию Санкт-Петербурга, относятся: Финский залив, Невская губа, р. Нева, оз. Сестрорецкий разлив, оз. Лахтинский разлив, грунтовые воды. Кроме перечисленных водных объектов, при определении негативного воздействия вод на территорию Санкт-Петербурга также учитывались притоки р. Невы, рукава невской дельты, устьевые участки рек и ручьев, впадающих в Финский залив, Лахтинский и Сестрорецкий разливы, уровень которых будет расти в связи с повышением морского уровня.

В соответствии с требованиями действующего законодательства РФ, границы зоны затопления определены для уровней воды однопроцентной обеспеченности [11]. В качестве базовых исходных данных брались параметры границ зон затопления при нагонных наводнениях, полученные по результатам расчетов морской гидродинамической модели Финского залива и Невской губы [3], использованной, в том числе, при обосновании строительства КЗС и цифровая модель рельефа территории Санкт-Петербурга. При определении зон затопления использованы следующие картографические материалы: актуализированная топографическая съемка масштаба 1:10 000 в векторном формате; электронная цифровая модель рельефа, классифицированная по классу «земля»/«не земля» с точностью, обеспечивающей создание ортофотопланов масштаба 1:2000 на территории Санкт-Петербурга. Работа была выполнена в Балтийской системе высот в системе координат СК-64 и подробно описана в статье [8].

Сведения о количестве объектов капитального строительства, попадающих в границы зон затопления, представлены в табл. 3. Согласно полученным результатам, общая площадь затопляемой территории Санкт-Петербурга состав-

ляет около 4766 га или около 3 % от общей площади Санкт-Петербурга. Общая площадь зоны подтопления, не выходящей за границы зоны затопления — 343,5 га. Общее количество зданий, попадающих в зоны затопления, составляет 1626, из которых 445 являются жилыми. Основное количество жилых зданий (около 80 %), подверженных негативному воздействию вод, обусловлено нагонными наводнениями с Финского залива. Еще 9 % жилых зданий попадают в зону затопления от Лахтинского разлива.

На рис. 4 представлена схема возможного затопления территории города к концу столетия для экстремального повышения («пессимистического» сценария) морского уровня на 80–90 см в Невской губе. По укрупненным оценкам, полученным при условии сохранения существующей технологии работы КЗС С.-Петербурга от наводнений и системы предупреждения угрозы наводнений, а также основных параметров рельефа местности, площадь зоны затопления территории Санкт-Петербурга при максимальном уровне воды однопроцентной обеспеченности при нагонных наводнениях в конце XXI в. может вырасти в 2,8 раза (на 70 км²) по сравнению с существующими данными. При этом будут затопляться значительные площади Адмиралтейского, Василеостровского, Кировского, Петроградского и Приморского районов города.

Как уже указывалось выше, для территории Курортного района, расположенной за дамбой, угрожают не только вековой рост морского уровня, но и штормовые нагоны. Особенно сильно эффект затопления проявляется вблизи Сестрорецка. При повышении уровня на 1 м площадь затопления территории муниципального округа г. Сестрорецка более чем на порядок превышает площади затопления других муниципальных округов (табл. 4). При нагонной волне высотой 4 м максимальная площадь затопления в г. Сестрорецке (730 га) более чем в семь раз превышает площадь затопления в г. Зеленогорске (103 га). Суммарная площадь возможного затопления при данной высоте нагонной волны превышает 1260 га [9]. Особенно пострадает рекреационный потенциал Курортного района. Уже при подъеме уровня на 1 м около 37 % всех пляжей района будет затоплено (63 га), а при нагонной волне высотой 4 м все пляжи будут потеряны полностью.

Таблица 3

Краткие сведения о количестве зданий и сооружений, попадающих в настоящее время в зону затопления для уровней однопроцентной обеспеченности: побережье Невской губы — 1,90 м БС, г. Кронштадт (со стороны Невской губы) — 1,48 м БС, Кронштадт (со стороны Финского залива) — 3,25 м БС, побережье Курортного района: от Горского (3,25 м БС) до Смолячково (3,12 м БС)

Зона затопления	Площадь, га	Количество зданий, сооружений, всего	Жилые здания	Нежилые здания, сооружения
Невская Губа	2595,5	1090	354	736
р. Нева	425,3	468	30	438
Сестрорецкий разлив	447,4	25	19	6
Лахтинский разлив	1297,5	43	42	1

На рис. 5 представлена граница распространения горизонта высоких вод на территории Курортного района при наводнении 4 м выше БС. Нетрудно видеть, что зона затопления является весьма обширной и охватывает почти всю территорию до железной дороги Сестрорецкого направления. Очевидно, что проектирование инженерной защиты вновь образуемых территорий должно происходить с учетом имеющихся в настоящий момент знаний о тенденциях современных изменений климата и их последствий. При вертикальной планировке вновь образуемых территорий в акватории Финского залива следует учитывать совместный эффект возможного экстремального векового

повышения среднего уровня моря и штормовых нагонов редкой повторяемости.

Следует также отметить, что побережье Курортного района сильно подвержено процессу абразии. В настоящее время средняя скорость отступления береговой линии составляет 0,25–0,5 м/год; максимальная — до 2 м/год. При развитии глобального потепления данная проблема будет только обостряться. К концу века при реализации неблагоприятного сценария изменения климата на некоторых участках берег может отступить до 200 м. Наиболее сильные размывы берегов происходят при сочетании трех факторов: подъема уровня воды, штормовых ветрах западного и юго-западного направлений и отсутствии ледового покрова в зимний период [13]. В этом случае скорость отступления абразионного уступа в дюнах может достигать 5 м за один шторм. Рекордное отступление авантюны на расстояние до 10 м отмечалось осенью–зимой 2011 г. в пос. Комарово. Важнейшими мерами по адаптации рекреационных пляжей к негативным последствиям климатических изменений являются перепланировка приморских территорий и осуществление эффективных берегозащитных мероприятий на основе комплексного системного подхода, изложенного в Генеральной схеме берегозащиты Курортного района Санкт-Петербурга.

Заключение

Для территории Санкт-Петербурга наиболее опасными являются «вековой» рост уровня в Невской губе, обусловленный в основном подъемом уровня Мирового океана и штормовые нагоны. К негативным следствиям изменений уровня относится затопление, подтопление, размыв берегов и заболачивание прибрежных

Рис. 4. Схема возможной зоны затопления территории Санкт-Петербурга для экстремального повышения («пессимистического» сценария) морского уровня на 80–90 см в Невской губе на конец XXI в.

Таблица 4

Площади затопления территории муниципальных округов Курортного района при различных подъемах морского уровня, га [9]

Муниципальный округ	Уровень затопления, м			
	1	2	3	4
г. Сестрорецк	167,3	385,7	559,7	730,7
пос. Солнечное	5,5	12,8	42,6	99,5
пос. Репино	4,1	15,1	33,2	80,0
пос. Комарово	5,5	10,6	22,6	71,0
г. Зеленогорск	11,0	23,9	50,8	103,2
пос. Ушково	3,2	6,1	12,0	18,9
пос. Серово	11,7	14,8	17,7	34,7
пос. Молодежное	15,6	23,2	39,5	72,0
пос. Смолячково	6,2	10,0	16,3	51,0
Всего	230,2	502,3	794,5	1261,1

районов. Показано, что наиболее реалистичным прогнозом уровня в Кронштадте к концу столетия является его рост до 34–59 см БС. Однако согласно «пессимистическим» прогнозам существует вероятность его повышения на 80–90 см БС. В этом случае будут затопляться существенные площади Адмиралтейского, Василеостровского, Кировского, Петроградского и Приморского районов города, причем КЗС не сможет защитить территорию города от векового роста уровня. Главной задачей КЗС является защита акватории Невской губы от штормовых нагонов, в то время как районы, расположенные за дамбой (прежде всего, Курортный район) подвержены рискам от обоих видов изменений уровня. Установлено, что при экстремальном штормовом нагоне возможный подъем уровня для современных гидрометеорологических условий севернее Горской может составить 600 см БС. В результате такого наводнения общая площадь затопления территории Курортного района достигнет 18 кв. км.

Выполнены расчеты границ зоны затопления для уровней воды однопроцентной обеспеченности, согласно которым общая площадь затопляемой территории СПб составляет около 4766 га, общая площадь зоны подтопления — 343,5 га, а общее количество зданий, попадающих в зоны затопления, составляет 1626 из которых 445 являются жилыми. Особенно сильно эффект затопления от штормовых нагонов проявляется вблизи г. Сестрорецка. При нагонной волне высотой 4 м максимальная площадь затопления в г. Сестрорецке (730 га) более чем в семь раз превышает

Рис. 5. Схема затопления Курортного района Санкт-Петербурга при повышении морского уровня на 4 м [9]

площадь затопления в г. Зеленогорске (103 га). Суммарная площадь возможного затопления при данной высоте нагонной волны превышает 1260 га. Особенно пострадает рекреационный потенциал Курортного района. Уже при подъеме уровня на 1 м около 37 % всех пляжей района будет затоплено (63 га), а при нагонной волне высотой 4 м все пляжи будут потеряны полностью. В связи с этим в Генеральной схеме берегозащиты Курортного района Санкт-Петербурга предусмотрена перепланировка приморских территорий и осуществление эффективных берегозащитных мероприятий на основе комплексного системного подхода.

Литература

1. Гордеева, С. М., Малинин, В. Н. (2014). *Изменчивость морского уровня Финского залива*. СПб.: РГГМУ, 178 с.
2. Захарчук, Е. А., Сухачев, В. Н., Тихонова, Н. А. (2017). *Механизмы опасных подъемов уровня моря в Финском заливе*. СПб.: Петербург-XXI век, 152 с.
3. Клеванный, К. А., Аверкиев, А. С. (2011). Влияние работы комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений на подъем уровня воды в восточной части Финского залива. *Общество. Среда. Развитие*, № 1, сс. 204–209.
4. Малинин, В. Н. (2012). *Уровень океана: настоящее и будущее*. СПб.: РГГМУ, 260 с.
5. Малинин, В. Н., Гордеева, С. М., Митина, Ю. В. (2016). Изменчивость невских наводнений и морского уровня в современных климатических условиях. *Водные ресурсы*, № 5, сс. 544–557.
6. Малинин, В. Н., Менжулин, Г. В., Павловский, А. А. (2016). Градостроительное планирование Санкт-Петербурга

в условиях современных изменений климата. *Ученые записки РГГМУ*, вып. 43, сс. 140–147.

7. Малинин, В. Н., Митина, Ю. В., Шевчук, О. И. (2013). К оценке затопления побережья Курортного района Санкт-Петербурга при прохождении экстремальных наводненческих циклонов. *Ученые записки РГГМУ*, вып. 29, сс. 138–145.

8. Павловский, А. А. (2016). Об определении зон затопления на территории Санкт-Петербурга. *Ученые записки РГГМУ*, вып. 43, сс. 39–50.

9. Павловский, А. А., Малинина (Митина), Ю. В. (2010). Повышение уровня Финского залива в XXI веке: сценарии и последствия. К вопросу о затоплении береговой зоны в пределах Курортного района Санкт-Петербурга. *Общество. Среда. Развитие*, № 4, сс. 219–226.

10. Павловский, А. А., Митина, Ю. В. (2012). Возможные последствия повышения уровня Финского залива в XXI столетии для прибрежных территорий Санкт-Петербурга. *Общество. Среда. Развитие*, № 1, сс. 221–227.

11. Правительство Российской Федерации (2014). *Правила определения границ зон затопления, подтопления*. (Утверждены постановлением от 18.04.2014 № 360).

12. Пыляев, М. И. (2007). *Старый Петербург*. СПб.: СТД, 512 с.

13. Рябчук, Д. В., Сергеев, А. Ю., Ковалева, О. А. (2016). Проблемы абразии берегов восточной части Финского залива: состояние, прогноз, рекомендации по берегозащите. *Ученые записки РГГМУ*, вып. 44, сс. 187–203.

14. Hurrell, J., Kushnir, Y., Ottersen, G. (2003). *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*, *Geophysical Monograph Series*, American Geophysical Union, vol. 134, pp. 1–36.

15. Boschung J. (ed.) (2013). *IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1535 p.

16. Meier, H., Broman, B., Kjellström, E. (2004). Simulated sea level in past and future climates of the Baltic Sea. *Climate Research*, vol. 27, pp. 59–75.

17. Morice, C., Kennedy, J., Rayner, N. (2012). Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 dataset. *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, pp. 58–80.

18. The BACC II Autor Team (2015). *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Cham: Springer International Publishing, 501 c.

Reference

1. Gordeeva, S. M., Malinin, V. N. (2014). *Izmenchivost' morskogo urovnya Finskogo zaliva [Sea level variability of the Gulf of Finland]*. Saint-Petersburg: RSHU publ., 178 p. (in Russian).
2. Zaharchuk, E. A., Sukhachev, V. N., Tihonova, N. A. (2017). *Mehanizmy opasnykh pod'emov urovnya vjhyia v Finskom zalive [Mechanisms of dangerous sea level rises in the Gulf of Finland]* St. Petersburg: Petersburg-XXI century, 152 p. (in Russian).
3. Klevannyi, K. A., Averkiev, A. S. (2011). Vliyaniye raboty kompleksa zashchitnykh sooruzheniy Sankt-Peterburga ot navodneniy na pod'yem urovnya vody v vostochnoy chasti

Finskogo zaliva [Operational effect of Saint Petersburg Flood Prevention Facility Complex on the sea level rise in the eastern part of the Gulf of Finland]. *Society. Environment. Development*, № 1, pp. 204–209. (in Russian).

4. Malinin, V. N. (2012). *Uroven' okeana: nastoyashcheye i budushcheye [Sea level: the present and the future]*. St. Petersburg: RSHU publ., 260 p. (in Russian).

5. Malinin, V. N., Gordeeva, S. M., Mitina, Iu. V. (2016). *Izmenchivost' nevskikh navodneniy i morskogo urovnya v sovremennykh klimaticheskikh usloviyakh [Variability of the Neva floods and sea level in modern climatic conditions]*. *Water resources*, № 5, pp. 544–557. (in Russian).

6. Malinin, V. N., Menzhulin, G. V., Pavlovsky, A. A. (2016). *Gradostroitel'noye planirovaniye Sankt-Peterburga v usloviyakh sovremennykh izmeneniy klimata [Urban planning of St. Petersburg in the context of modern climate change]*. *Proceedings of RSHU*, vol. 43, pp. 140–147. (in Russian).

7. Malinin, V. N., Mitina, Iu. V., Shevchuk, O. I. (2013). K otsenke zatopleniya poberezh'ya Kurortnogo rayona Sankt-Peterburga pri prokhozhdenii ekstremal'nykh navodnencheskikh tsiklonov [To the assessment of flooding of the coast of St. Petersburg Kurortny district during the passage of extreme flooding cyclones]. *Proceedings of RSHU*, vol. 29, pp. 138–145. (in Russian).

8. Pavlovsky, A. A. (2016). Ob opredeleniyi zon zatopleniya na territorii Sankt-Peterburga [On the defining the flood zones within the territory of St. Petersburg]. *Proceedings of RSHU*, vol. 43, pp. 39–50. (in Russian).

9. Pavlovsky, A. A., Malinina, Iu. V. (2010). Povysheniye urovnya Finskogo zaliva v XXI veke: stsennariy i posledstviya. K voprosu o zatoplenii beregovoy zony v predelakh Kurortnogo rayona Sankt-Peterburga [Sea level rise of the Gulf of Finland in the 21st century: scenarios and consequences. On the issue of flooding of the coastal zone within the Kurortny district of St. Petersburg]. *Society. Environment. Development*, № 4, pp. 219–226. (in Russian).

10. Pavlovsky, A. A., Mitina, Iu. V. (2012). Vozmozhnyye posledstviya povysheniya urovnya Finskogo zaliva v XXI stoletii dlya pribrezhnykh territoriy Sankt-Peterburga [Possible consequences of the sea level rise of the Gulf of Finland in the 21st century for the coastal zones of St. Petersburg]. *Society. Environment. Development*, № 1, pp. 221–227. (in Russian).

11. *Pravitel'stvo Rossijskoj Federacii (2014). Pravila opredeleniya granic zon zatopleniya, podtopleniya [Rules for determining the boundaries of flooded areas, flooding] (Utvverzheny postanovleniem ot 18.04.2014 №360)*.

12. Pylyayev, M. I. (2007). *Stariy Peterburg [The old Petersburg]*. Saint-Petersburg: STD, 512 p. (in Russian).

13. Ryabchuk, D. V., Sergeyev, A. Iu., Kovaleva, O. A. (2016). Problemy abrazii берегов восточной части Финского залива: sostoyaniye, prognoz, rekomendatsii po beregozashchite [Problems of shore abrasion of the eastern part of the Gulf of Finland: state, forecast, recommendations on shore protection]. *Proceedings of RSHU*, vol. 44, pp. 187–203. (in Russian).

14. Hurrell, J., Kushnir, Y., Ottersen, G. (2003). *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*, *Geophysical Monograph Series*, American Geophysical Union, vol. 134, pp. 1–36.

15. Boschung J. (ed.) (2013). *IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group*

I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1535 p.

16. Meier, H., Broman, B., Kjellström, E. (2004). Simulated sea level in past and future climates of the Baltic Sea. *Climate Research*, vol. 27, pp. 59–75.

17. Morice, C., Kennedy, J., Rayner, N. (2012). Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 dataset. *Journal of Geophysical Research*, vol. 117, pp. 58–80.

18. The BACC II Autor Team (2015). *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Cham: Springer International Publishing, 501 p.

Авторы

Малинин Валерий Николаевич, д-р географ. наук, профессор

Российский государственный гидрометеорологический университет

E-mail: malinin@rshu.ru

Гордеева Светлана Михайловна, канд. географ. наук, доцент

Российский государственный гидрометеорологический университет

E-mail: gordeeva@rshu.ru

Митина Юлия Валерьевна, канд. географ. наук
Российский государственный гидрометеорологический университет

E-mail: juliet3000@mail.ru

Павловский Артём Александрович, канд. физ-мат. наук
Научно-исследовательский и проектный центр Генерального плана Санкт-Петербурга

E-mail: pa1@yandex.ru

Authors

Malinin Valerij Nikolaevich, Dr. of Geography, professor
Russian State Hydrometeorological University

E-mail: malinin@rshu.ru

Gordeeva Svetlana Mihajlovna, Ph. D. in Geography, docent

Russian State Hydrometeorological University

E-mail: gordeeva@rshu.ru

Mitina Yuliya Valerievna, Ph. D. in Geography
Russian State Hydrometeorological University

E-mail: juliet3000@mail.ru

Pavlovskij Artyom Aleksandrovich, Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences

Scientific, Research And Project Center Of Saint-Petersburg's Master Plan

E-mail: pa1@yandex.ru