

УДК 551.46(06)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ШТОРМОВЫХ СИТУАЦИЙ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ
ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА¹

А. Н. Соколов, Б. В. Чубаренко, Д. И. Дикий

SIMULATION OF STORM SITUATIONS IN THE SOUTH-EASTERN PART OF
THE GULF OF FINLAND

A. N. Sokolov, B. V. Chubarenko, D. I. Dikiy

Юго-восточная часть Финского залива, непосредственно примыкающая к комплексу защитных сооружений (КЗС) Санкт-Петербурга от наводнений, в последнее время вызывает серьезный интерес. В частности, в районе от пос. Лебяжье до пос. Б. Ижора штормы создают потенциальную опасность как для отдельных жилых построек, так и для транспортной инфраструктуры Ломоносовского района Ленинградской области. Целесообразно было бы иметь инструмент, позволяющий с достаточной точностью рассчитать уровни штормового нагона, поля волнения и течений в рассматриваемой области. В качестве такого инструмента в данной работе предложена трехмерная модель, включающая гидродинамический и спектрально-волновой модули.

Поскольку распределение скорости и направления ветра над Балтийским морем может быть самым различным, а в модели оно считается постоянным в пределах всей расчетной области, используются три варианта расчетных областей. Первая – только Финский залив, вторая – Финский залив и центральная часть Балтики, третья – расчетная область – Балтийское море целиком. Данный подход позволяет оценить влияние протяженности областей, для которых скорость и направление ветра могут считаться практически постоянными, на уровни штормового нагона, поля волнения и течений.

Модель была тщательно откалибрована по данным натурных измерений, что позволило получить инструмент, с удовлетворительной точностью описывающий штормовые ситуации в восточной части Финского залива. Модельные расчеты показали, что вероятны ситуации, при которых подъем уровня моря и параметры волнения могут иметь катастрофические последствия для прилегающей прибрежной территории.

численное моделирование, Финский залив, штормовой нагон, волнение, течения

The south-eastern part of the Gulf of Finland which is located in the vicinity of the complex of protective structures (GLC) of St. Petersburg from flooding has been of great interest recently. In the area between Lebyazhe and B.Izhora villages, in particular, storms create a potential danger both for individual residential buildings and for

¹ Работа выполнена при поддержке темы ГР 01201376670, темы И-12-74 и активной помощи сотрудников ВСЕГЕИ во главе с Дарьей Рябчук.

transport infrastructure of the Lomonosov district of the Leningrad region. It would be useful to have a tool that can accurately calculate the levels of storm surge, waves and currents in the considered area. As such a tool the three-dimensional model including hydrodynamic and spectral-wave modules is offered in this paper.

Since the distribution of wind speed and direction over the Baltic Sea can vary significantly, whereas in the model it is assumed to be constant within the entire computational domain, three options of computational domains are used. The first domain is the Gulf of Finland only, the second– the Gulf of Finland with the central part of the Baltic Sea, the third– the whole Baltic. This approach lets us estimate the impact of the areas extent for which the wind speed and direction can be regarded as practically constant at the level of storm surge, waves and currents.

The model was carefully calibrated against the field measurements that enabled obtaining the tool with a satisfactory accuracy describing storm situations in the eastern part of the Gulf of Finland. Simulations show possible situations that could be catastrophic for the coastal area.

numerical simulation, the Gulf of Finland, storm surge, waves, currents

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы берегоразрушения на южном берегу юго-восточной части Финского залива, непосредственно примыкающем к комплексу защитных сооружений (КЗС) Санкт-Петербурга от наводнений, в последнее время вызывают серьезный интерес. Так, в конце декабря 2011 г. на 57-м километре региональной трассы А-121 "Петербург – Первое мая" шторм разрушил участок побережья протяженностью порядка трехсот метров [1]. Была полностью размывта береговая полоса, а затем и обочина дороги. Волны били непосредственно в полотно асфальтового покрытия, которое отремонтировали только летом 2012 г.

Цель данной работы - проанализировать с помощью численного моделирования гидродинамические условия (уровни штормового нагона, поля волнения и течений) во время штормовых ситуаций на ключевом участке от пос. Лебяжье до пос. Б. Ижора с акцентом на задачи берегозащиты. Соответственно, было необходимо: 1) подготовить инструмент, позволяющий с достаточной точностью рассчитать уровни штормового нагона, поля волнения и течений; 2) провести численные эксперименты по моделированию штормовых ситуаций в восточной части Финского залива, которые дали бы возможность оценить степень влияния различных факторов на гидродинамические условия.

МЕТОД

Математическое моделирование проводили с помощью программного комплекса Coupled Model FM DHI Software [2]. Расчет вели в трехмерной постановке (пять слоев по глубине, сигма-координаты) по методу конечных объемов на нерегулярной сетке треугольных конечных элементов (рис. 1).

Ввиду географического положения Финского залива ветры западного и юго-западного направлений достаточной продолжительности могут обеспечивать активный нагон вод в этот залив. Разумеется, наиболее сильный нагон реализуется только в том случае, если ветер над всей акваторией имеет практически одинаковое направление. Чтобы учесть влияние пространственной локализации одно-

родного по скорости и направлению ветра, рассматривались три варианта расчетной области:

- a) только Финский залив (в остальной части моря ветра как бы нет, рис. 1a);
- b) Финский залив и центральная часть Балтики, рис. 1b);
- c) Балтийское море целиком (по всей акватории Балтики скорость и направление ветра одинаковы, рис. 1c).

В месте, определенном для детального исследования (побережье Финского залива от пос. Лебяжье до пос. Б. Ижора), расчетная сетка сгущалась, и характерные размеры сторон ячеек составляли порядка 100 м (рис. 1d). Для участков же открытого моря они были равны 5-7 км, что позволило достичь сравнительно небольшого времени численного расчета в сочетании с необходимой детализацией.

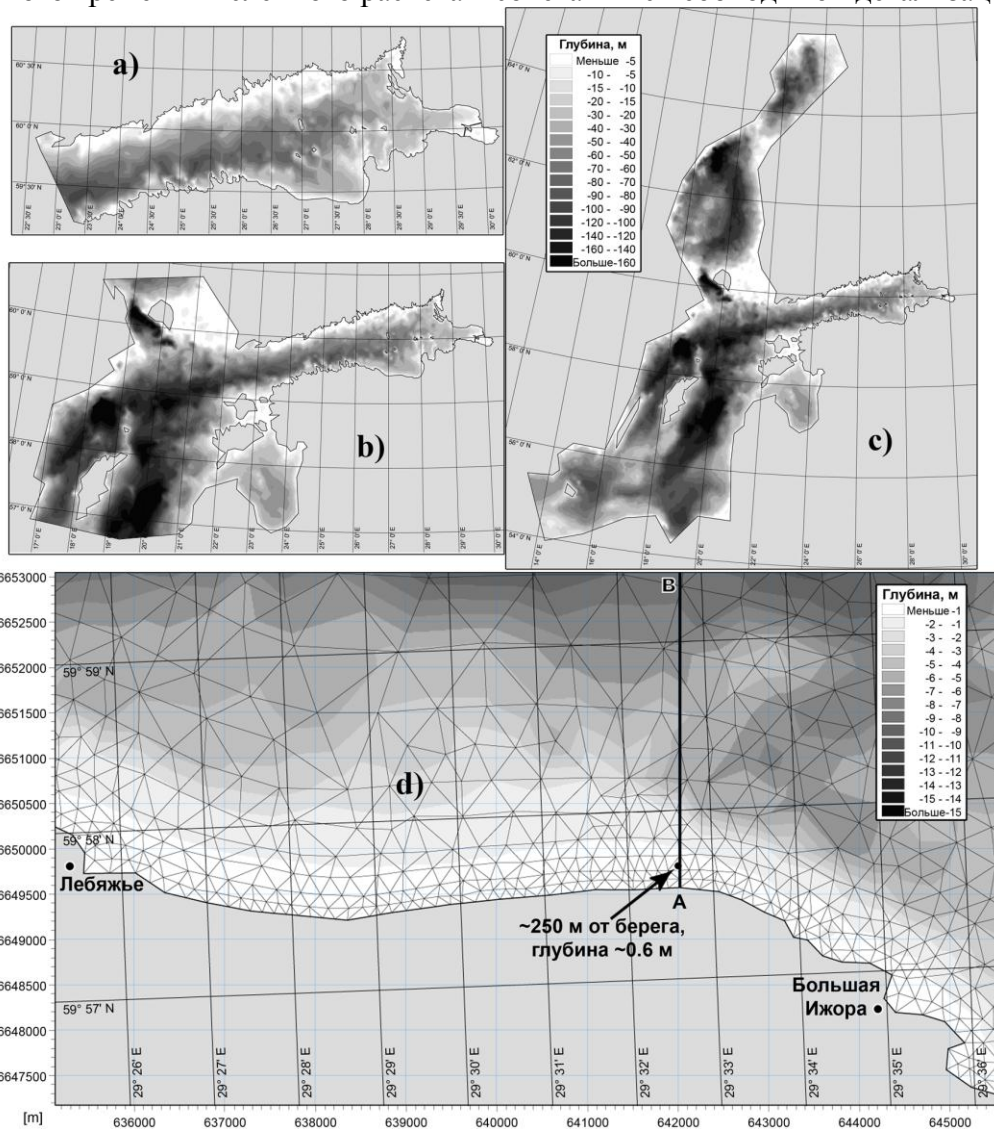


Рис. 1. Варианты расчетных областей: а) только Финский залив; б) Финский залив и Центральная Балтика; в) Балтийское море целиком. д) детальный фрагмент ключевого участка с указанием точки и профиля вывода результатов
 Fig.1. Computational domains: a) The Gulf of Finland only; b) The Gulf of Finland and the central part of the Baltic Sea; c) The whole Baltic. d) A key area in details

Расчетная сетка строилась с учетом информации о глубинах Балтийского моря [3]. Открытых границ расчетные области не имели, т. е. рассматривались как замкнутые водоемы. Протяженность расчетных областей составляла для Финского залива (рис. 1а) около 400 км с запада на восток и 200 - с севера на юг; для Балтийского моря (рис. 1с) – порядка 1000 км с запада на восток и 1300 - с севера на юг.

Поскольку моделировались гидродинамических условий именно в периоды штормовых ситуаций, влияние р. Невы не учитывалось. Дело в том, что во время штормов со скоростью ветра 20 м/с и более створки КЗС закрываются, и Невская губа, куда впадает Нева, отделяется от остальной части Финского залива водонепроницаемыми перегородками. Интересующий же участок побережья находится с мористой стороны плотины КЗС.

Калибровка модели. Вертикальная турбулентная вязкость

Рассмотренный в настоящей статье подход был успешно применен для моделирования волнения и течений в Южной Балтике [4, 5]. Однако в указанных источниках постановка задачи была двумерная, и рассчитывались осредненные по глубине скорости течений. В настоящей работе задача рассматривается в трехмерной постановке, и на зависимость скорости от глубины существенное влияние оказывает вертикальная турбулентная вязкость.

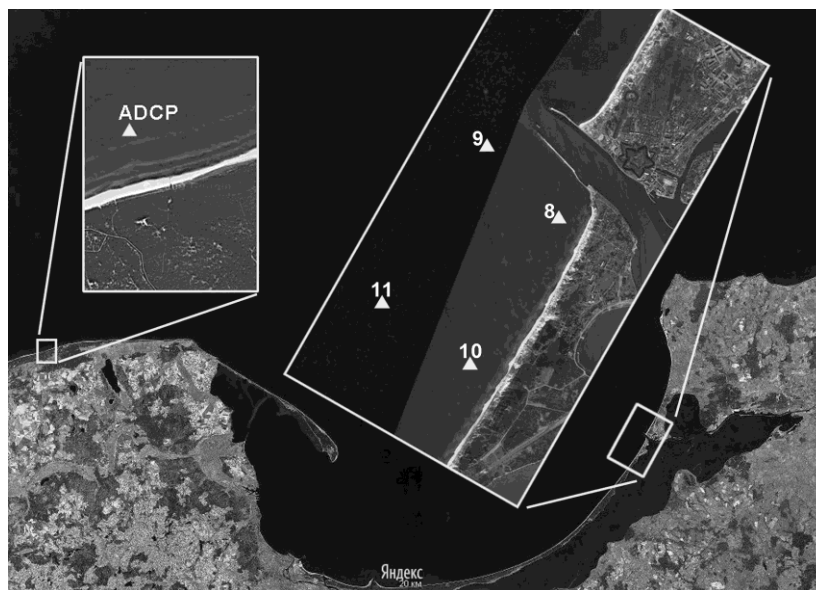


Рис. 2. Фрагмент Юго-восточной Балтики. На врезках – расположение станций измерения скоростей придонных течений

Fig. 2. A part of the south-eastern Baltic. Location of stations for measurement of bottom currents speed are shown in the inserts

Базой для выбора оптимального способа расчета вертикальной турбулентной вязкости послужили данные натуральных измерений [6, 7]. Точки расположения измерительных приборов показаны на рис. 2. Измерения придонных течений [6] выполнялись автономными регистраторами БПВ-2, установленными на горизонте

0.9 м от дна, наиболее достоверной характеристикой являлась скорость течения, усредненная за интервалы в несколько десятков минут. Измерения [7] выполнялись прибором ADCP, фиксировались скорость и направление течения на горизонте 0,4 м от дна.

Расчет вертикальной турбулентной вязкости выполнялся по схемам:

- 1) логарифмический закон [8];
- 2) к-ε модель [9];
- 3) постоянная вертикальная турбулентная вязкость (0.002 и 0.003 м²/с).

Сравнение результатов модельных расчетов с натурными данными для станции 8 за пятидневный период представлено на рис. 3. Глубина моря в месте установки прибора составляла 5,5 м. Расчет проводился для точки, идентичной его положению. Поскольку результаты, полученные с использованием логарифмического закона и к-ε модели, практически совпадают, они отображаются одной кривой.

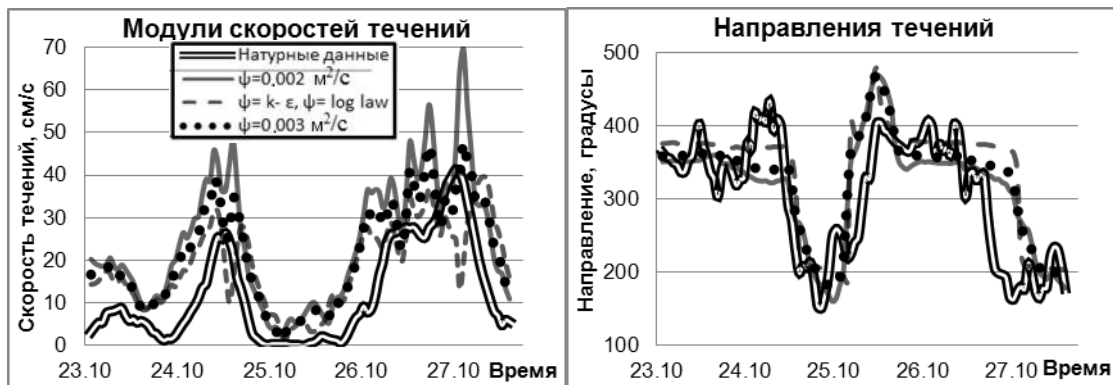


Рис. 3. Зависимости модулей скоростей течений (слева) и направлений (справа) от времени при разных способах расчета вертикальной турбулентной вязкости в сравнении с натурными данными для станции 8

Fig. 3. Dependences of current velocities modules (on the left) and directions (on the right) from time at different ways of calculation of vertical turbulent viscosity in comparison with the field measurement for station 8

Коэффициент корреляции между измеренными на станции 8 и расчетными величинами скоростей составил 0,68 для логарифмического закона и 0,86 для постоянного значения вертикальной турбулентной вязкости. Чтобы понять, насколько корректна экстраполяция полученных результатов на другие участки прибрежной зоны, были проведены расчеты с постоянным значением вертикальной турбулентной вязкости 0,003 м²/с и с использованием логарифмического закона для станций 9 и 11, а также полевой станции Института гидроинженерии Польской академии наук в Любятово [7] (ADCP на рис. 2). Глубина моря в районе расположения станций 9 и 11 составляла порядка 12 м, а станции Любятово - 4,5. Оказалось, что для мористых станций (9 и 11) лучшие результаты дает использование логарифмического закона, а для прибрежной станции в Любятово результаты использования постоянного значения и логарифмического закона практически совпадают. На основе проведенного анализа, в дальнейшем, при рассмотрении всей прибрежной зоны, предпочтение было отдано расчету с заданием вертикальной турбулентной вязкости по логарифмическому закону.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Как показали предварительные расчеты, западный-юго-западный ветер (направление 247.5 град) вызывает наибольший подъем уровня и оказывает максимальное ветроволновое воздействие на рассматриваемый участок южного берега Финского залива от пос. Лебяжье до пос. Б. Ижора. Моделирование проводилось при штилевых начальных условиях и ступенчатом усилении ветра (одинаковая скорость и направление ветра над всей расчетной областью).

Уровни штормовых нагонов

Для всех расчетных областей зависимость уровня штормового нагона в контрольной точке (рис. 1d) от времени действия ветра носит характер затухающих колебаний (рис. 4). Время выхода модельного решения на стационарный уровень зависит от размеров расчетной области (реально области, где ветер может считаться одинаковым по скорости и направлению) и составляет от 50 до 100 и более часов. Временной интервал, в пределах которого ветер над Балтийским морем может считаться квазипостоянным, существенно меньше, а значит, в реальности уровень в данном районе Балтийского моря постоянно динамически подстраивается под меняющееся поле ветра.

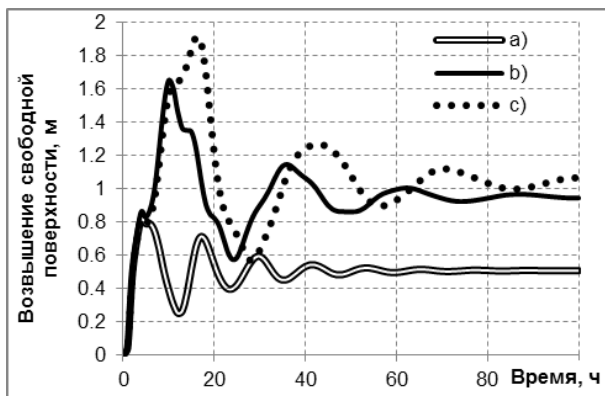


Рис. 4. Зависимости уровня штормового нагона от времени. Расчетные области: Финский залив – а), центральная часть Балтики – б), вся Балтика – в). Ветер 20 м/с
 Fig. 4. Storm surge level against time. Computational domains: The Gulf of Finland – а), The central part of the Baltic – б), The whole Baltic – в). Wind speed is 20 m/s

Величины первого пика подъема уровня и время его наступления увеличиваются в зависимости от скорости ветра и размера расчетной области (таблица).

Таблица. Высота и время максимально возможного подъема уровня для западного-юго-западного ветра (направление 247.5 град) со скоростью 20 и 25 м/с и различных вариантов расчетных областей

Table 1. Height and time of the highest possible level rise for the W-SW wind (direction of 247.5 degrees) at 20 and 25 m/s and different computational domains

Расчетная область Скорость ветра, м/с	Финский залив		Залив + Центральная Балтика		Всё Балтийское море	
	Hmax, м	T, ч	Hmax, м	T, ч	Hmax, м	T, ч
20	0.8	4	1.6	10	2.0	16.5
25	1.5	4	2.7	10.5	3.5	16.5

Следует отметить, что максимальная рассчитанная величина штормового нагона составила 3.5 (!) м. Условия: западный-юго-западный ветер со скоростью 25 м/с, дующий над всей акваторией Балтийского моря в течение 16 и более часов. Очевидно, что при подобном уровне штормового нагона значительная часть прибрежной территории будет затоплена, а последствия как для транспортной инфраструктуры, так и для жилых построек, могут быть катастрофическими.

Волновое воздействие

Для учета волнового воздействия рассчитывались значительные высоты волн вдоль профиля АВ при максимальной для каждой ситуации высоте штормового нагона (таблица). Результаты представлены на рис. 5.

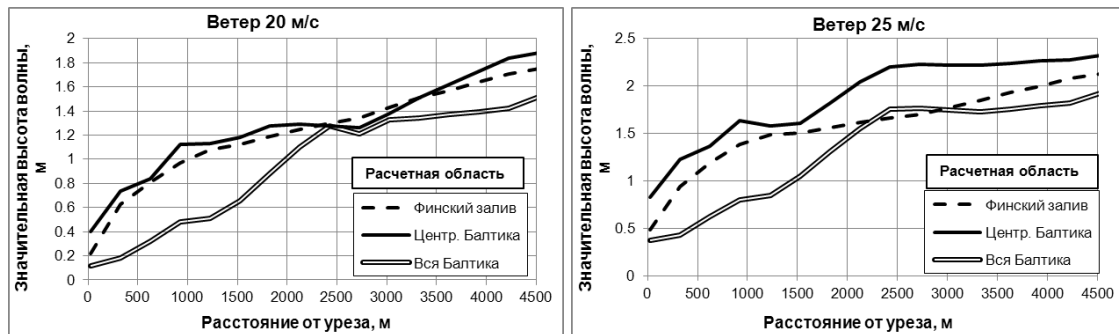


Рис. 5. Зависимости значительной высоты волны от расстояния от уреза вдоль профиля АВ в моменты наивысшего подъема уровня моря

Fig. 5. Significant wave height against the distance from the shore along AB profile when the storm surge level is the highest

Можно заметить следующие характерные особенности.

1. В отличие от побережья Калининградской области, где линия первого обрушения волн очень четко выражена [4], в рассматриваемом случае зона, где происходит обрушение волн при подходе к берегу, весьма размыта. По всей вероятности, такая ситуация объясняется крайне незначительными уклонами дна в рассматриваемой части Финского залива. Так, уклон дна вдоль профиля АВ составляет порядка 0.002, в то время как в районе побережья Самбийского полуострова (Балтийск-Зеленоградск, Калининградская область) - 0.005-0.008, т.е. в три-четыре раза больше.

2. Величина расчетной области не очень сильно сказывается на характере зависимости высоты волны от расстояния от берега. Данный факт, по-видимому, также связан с крайне малыми уклонами дна и, вероятно с тем, что и на значительном расстоянии от берега Финский залив на рассматриваемом участке имеет крайне незначительную глубину. Представляется, что даже длинные волны с большой длиной разбега, приходящие из Балтийского моря, на мелководье Финского залива претерпевают многочисленные обрушения и становятся короткими. В связи с данным обстоятельством интенсивность волнового воздействия на берег не очень сильно зависит от того, над какой частью акватории Балтийского моря ветер можно считать практически одинаковым по скорости и направлению.

Течения

Скорости придонных течений в контрольной точке, в моменты наибольшего подъема уровня, составили 35-40 см/с при ветре 20 м/с и 50-55 см/с при ветре 25 м/с, что соответствует и даже ниже абсолютных величин скоростей течений для Калининградского побережья [4]. Следовательно, течения не являются критическим фактором для размывающего воздействия Финского залива на побережье.

Типичные картины полей поверхностных и придонных течений показаны на рис. 6. Выбран момент наибольшего подъема уровня. Расчетная область – Финский залив с Центральной Балтикой. Видно, что поля поверхностных и придонных течений заметно отличаются. Если на поверхности, как и следовало ожидать, течения практически сонаправлены ветру, то в придонной области их характер более сложный и направления в основном противоположны ветру. То есть имеет место компенсационный отток. Модельная картина течений вполне соответствует физической логике.

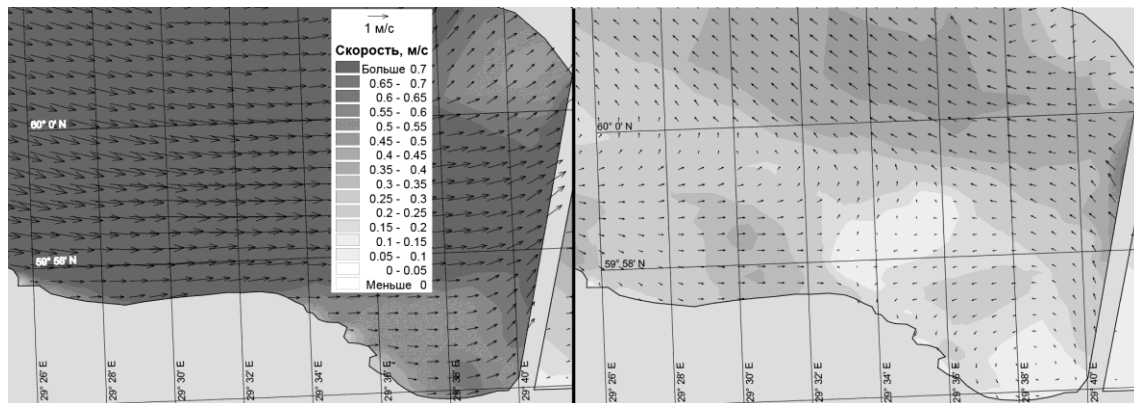


Рис. 6. Поверхностные (слева) и придонные (справа) течения во время наибольшего подъема уровня. Расчетная область – Финский залив и Центральная Балтика

Fig. 6. Surface (on the left) and bottom (on the right) currents when the storm surge level is the highest. Computational domain – the Gulf of Finland and the central Baltic

ВЫВОДЫ

1. Получен инструмент, позволяющий с удовлетворительной точностью моделировать штормовые ситуации в восточной части Финского залива и рассчитать уровни штормового нагона, поля волнения и течений.

2. Оказалось, что при ветре 25 м/с и более, имеющем над большей частью Балтики западное направление, уровень штормового нагона в районах, примыкающих к внешнему створу КЗС, достигает значений трех и более метров, что может иметь катастрофические последствия для прилегающей прибрежной территории.

3. Волнение на ключевом участке в незначительной степени зависит от размеров акватории, в которой скорость и направление ветра можно считать практически одинаковыми. Разрушительное же действие волн объясняется тем, что коренной берег с расположенной на нем транспортной инфраструктурой не имеет естественной защиты в виде пляжа и взаимодействует непосредственно с водами Финского залива.

4. Скорости течений на рассматриваемом участке не превышают типичных значений скоростей течений для прибрежных областей, например, Юго-восточной Балтики, и, следовательно, не являются критическим фактором для размывающего воздействия Финского залива на побережье.

5. Основные критические моменты с точки зрения опасности для эрозии берега: возможные очень высокие уровни штормовых нагонов и отсутствие пляжей как естественных волногасителей. Рекомендуется искусственное укрепление берега и создание волнозащитных сооружений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ермошина, О. В Ломоносовском районе шторм разрушил региональную трассу. – 2011. – 1с. <http://www.lenoblinform.ru/news/v-lomonosovskom-rayone-shtorm-razrushil-regionalnu.html>

2. MIKE 21/3 COUPLED MODEL FM. User Guide. DHI Software. 2005. 44 p.

3. Seifert T., Kayser B. A high resolution spherical grid topography of the Baltic Sea. // Meereswiss. Ber, 1995, № 9, pp 72-88.

4. Соколов, А. Н. Анализ возможного влияния климатических изменений на параметры ветрового волнения в прибрежной зоне юго-восточной Балтики / А. Н. Соколов, Б. В. Чубаренко // Известия КГТУ. – 2014. – № 34. – С. 43-51.

5. Andrei Sokolov, Boris Chubarenko. Wind Influence on the Formation of Nearshore Currents in the Southern Baltic: Numerical Modelling Results. // Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics. Vol. 59 (2012), No. 1–2, pp. 37–48.

6. Бабаков, А. Н. Придонные течения вблизи входных молов порта Балтийск по данным натурных полигонных измерений / А. Н. Бабаков // Динамика прибрежной зоны бесприливных морей / Балтийск, Школа-семинар, 30.06-05.07.08 г. - Калининград: Терра Балтика, 2008. - С. 31–35.

7. Pruszek, S., Szmytkiewicz, P., Ostrowski, R., Skaja M., Szmytkiewicz, M. (2008) Shallow-water wave energy dissipation in a multi-bar coastal zone, *Oceanologia*, 50 (1), 43-58.

8. Munk, W., Anderson, E. Notes on the theory of the thermocline. // Journal of Marine Research, 1948, №7, pp 276-295.

9. Rodi, W. Turbulence models and their applications in hydraulics, IAHR, Delft, the Netherlands. 1984.

REFERENCES

1. Oksana Ermoshina. V Lomonosovskom rayone shtorm razrushil regional'nyuyu trassu [Storm destroyed a regional road in the Lomonosov district]. Lenoblinform, 2011, 1 p. Available at: <http://www.lenoblinform.ru/news/v-lomonosovskom-rayone-shtorm-razrushil-regionalnu.html>

2. MIKE 21/3 COUPLED MODEL FM. User Guide. DHI Software. 2005. 44 p.

3. Seifert T., Kayser B. A high resolution spherical grid topography of the Baltic Sea. Meereswiss. Ber, 1995, no. 9, pp. 72-88.

4. Sokolov A.N., Chubarenko B.V. Analiz vozmoznogo vliyaniya klimaticheskikh izmeneniy na parametry vetrovogo volneniya v pribrezhnoy zone Yugo-

Vostochnoy Baltiki [Sensitivity analysis for wave regime in wave-deformation zone in the South-Eastern Baltic in view of possible climate changes]. *Izvestiya KGTU*, 2014, no. 34, pp. 43-51.

5. Andrei Sokolov, Boris Chubarenko. Wind Influence on the Formation of Nearshore Currents in the Southern Baltic: Numerical Modelling Results. Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics. Vol. 59 (2012), no. 1–2, pp. 37–48.

6. Babakov A.N. *Pridonnye techeniya vblizi vkhodnykh molov porta Baltiysk po dannym naturnykh poligonnykh izmereniy* [Bottom currents near the Baltiysk harbor protective moles. Field data]. *Dinamika pribrezhnoy zony besprilivnykh morey* [Coastal zone dynamics in non-tidal seas]. Baltiysk, Shkola-seminar [Workshop school], 30.06 – 05.07.08 g. Kaliningrad. Terra Baltika, 2008, pp. 31–35.

7. Pruzsak S., Szmytkiewicz P., Ostrowski R., Skaja M., Szmytkiewicz M. (2008) Shallow-water wave energy dissipation in a multi-bar coastal zone, *Oceanologia*, 50 (1), 43-58.

8. Munk W., Anderson E. Notes on the theory of the thermocline. *Journal of Marine Research*, 1948, no. 7, pp. 276-295.

9. Rodi W. Turbulence models and their applications in hydraulics, IAHR, Delft, the Netherlands. 1984.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Соколов Андрей Николаевич – Атлантическое отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН; старший научный сотрудник; БФУ им. Канта; доцент, кандидат технических наук; E-mail: tengritag@gmail.com

Sokolov Andrei Nikolaevich – Atlantic Branch of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences; Senior Researcher; Immanuel Kant Baltic Federal University, Associate Professor, PhD; E-mail: tengritag@gmail.com

Дикий Дмитрий Игоревич – Атлантическое отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН; старший лаборант; E-mail: dimandikiy@mail.ru

Dikiy Dmitrii Igorevich – Atlantic Branch of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Senior Assistant; E-mail: dimandikiy@mail.ru

Чубаренко Борис Валентинович – Атлантическое отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН; заместитель директора по науке, заведующий лабораторией прибрежных систем, кандидат физ.-мат. наук; E-mail: chuboris@mail.ru

Chubarenko Boris Valentinovich – Atlantic Branch of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences; Deputy Director of Science, Head of the Laboratory of Coastal Systems, PhD; E-mail: chuboris@mail.ru

