



Тематический выпуск

СОДЕРЖАНИЕ

К читателям (<i>обращение главного редактора</i>).....	4
Статьи	
<i>Дивинский Б.В., Косьян Р.Д., Куклев С.Б.</i> Параметры ветрового волнения на защищенных акваториях	5
<i>Кантарджи И.Г.</i> Воздействия на водную среду при строительстве морских портов и сооружений на шельфе	17
<i>Пелиновский Е.Н., Шургалина Е.Г.</i> Аномальное усиление волны вблизи вертикальной преграды	29
<i>Камынин Е.Ю., Максимов В.В., Нуднер И.С., Семёнов К.К., Хакимзянов Г.С.</i> Исследование взаимодействия уединенной волны с частично погруженным сооружением	39
<i>Диденкулова И.И., Сергеева А.В., Пелиновский Е.Н., Гурбатов С.Н.</i> Статистические оценки характеристик наката длинных волн на берег	55
<i>Хабахнашева Т.И., Коробкин А.А.</i> Импульсивное воздействие обрушающихся волн на упругие береговые сооружения	64
<i>Леонтьев И.О.</i> Динамика профиля песчаного берега на различных масштабах времени	78
<i>Соомере Т., Зайцева-Пярнасте И., Рямяет А., Куренной Д.</i> О пространственно-временной изменчивости полей волнения Финского залива	90
<i>Гагошидзе Ш.Н.</i> К оценке воздействия вдольбереговых волн на береговые откосы открытых морских и речных каналов	102
Рецензия на книгу	
Холодова С.Е., Перегудин С.И. Моделирование и анализ течений и волн в жидких и сыпучих средах	114
Конференции	
Информация о предстоящих (международных) конференциях по гидрофизике в 2011 г.	115
Поздравляем!	117
Хроника	120
Тематический указатель 2008–2010 гг.	122
Авторский указатель за 2008–2010 гг.	126
Правила представления материалов в редакцию.....	127

CONTENTS

Articles

- Divinsky B.V., Kosyan R.D., Kuklev S.B.* Parameters of Wind Waves on the Protected Water Areas 5

In the paper some aspects of mathematical modeling of wave and hydrodynamic regime at protected water areas are considered, examples of the dangerous hydrodynamic phenomena research (broken water, harbor seiche, resonant characteristics of harbor) are given. Recommendations of various wave and hydrodynamic models applicability for the decision of assigned tasks are given.

Key words: mathematical simulation, protected areas, wave climat, harbor seiche.

- Kantarzhi I.G.* Impacts onto the Water Environment of the Sea Ports and Continental Shelf Structures Construction 17

The experience of development and environmental expert review of the sea hydro technical projects has been generalized. Construction and operation of the sea ports, as well as continental shelf structures may cause the significant impact onto sea water environment. The modern method of coastal processes modeling and the modern construction technologies can help in assessment of the environmental effects and to minimize these effects. The separation of the global project into stages may be applied if the environmental impact assessment is possible, only.

Key words: sea ports, continental shelf structures, construction and operation, design, environmental impact, impact assessment, expert review.

- Pelinovsky E.N., Shurgalina E.G.* Abnormal Intensification of a Wave near a Vertical Barrier 29

One of the possible mechanisms of freak-waves emergence near a vertical barrier, based on the dispersive focusing of unidirectional wave packets is analyzed. This mechanism is associated with the frequency dispersion of water waves and manifested in the interference of many spectral components, moving with different group velocities. Formation of a single freak wave in a random wind wave field is considered in the frame of linear theory. The characteristic lifetime of an abnormal wave in the framework of this mechanism for typical conditions is approximately two minutes, thus such a rapid effect is difficult to predict and prepare for. A rogue wave quickly changes its shape from a high ridge to a deep depression.

Key words: water waves, wind waves, freak waves, dispersive focusing.

- Kamynin E.Yu., Maximov V.V., Nudner I.S., Semenov K.K., Khakimzyanov G.S.* Study of Interaction of the Solitary Wave with a Partially Submerged Stationary Construction 39

The results of laboratory experiments and numerical modeling of the interaction of a solitary wave and a fixed partially submerged body of rectangular shape, located on a flat slope are presented. Carried out research allowed to determine the magnitude run-up on the body and the wave pressure on it, depending on the oncoming wave amplitude, the body length and its immersion, the angle of the slope.

Key words: solitary wave; partially submerged structure; run-up; pressure; laboratory experiment; numerical simulation; results.

- Didenkulova I.I., Sergeeva A.V., Pelinovsky E.N., Gurbatov S.N.* Statistical Estimates of Characteristics of Long Wave Run-up on a Beach 55

The run-up of irregular long sea waves on a beach of a constant slope is studied in the framework of nonlinear shallow water theory. It is shown that the problem nonlinearity does not influence on statistical moments of the velocity of the moving shoreline, but affects statistical moments of the displacement. In particular, for weak-amplitude waves it is demonstrated that the wave run-up process has a longer duration as compared to the duration of the wave run-down process, even if the incident wave field represents Gaussian stationary

process with a zero mean. The probability of wave breaking during the process of wave run-up is calculated and conditions of the model validity are discussed.

Key words: long waves, run-up, statistical moments, probability distributions.

Khabakhpasheva T.I., Korobkin A.A. Impulsive Interaction of Breaking Waves with Flexible Coastal Structures 64

The problem of impact of a water wave with flat front onto an elastic vertical plate which models the surface of a coastal structure is studied. The liquid is assumed weakly-compressible; the liquid flow is described within acoustic approximation. The deflection of the plate and its vibrations caused by impact are described by a linear theory of thin isotropic plates without accounting for shear stresses. The hydrodynamic and structural parts of the problem are coupled by both dynamic and kinematic conditions imposed on the wetted part of the structure. The problem is solved by the normal mode method. By using integral transforms the problem is reduced to a system of differential and integral equations which are numerically solved. Phenomena caused by the structural damping and liquid compressibility are investigated. It is shown that the structural damping affects the global evolution of the plate behavior; however, maximum deflection and maximum bending stress can be determined without account for structural damping. New combined model of violent wave impact is proposed. Within this model only the early stage of impact is described with taking the liquid compressibility into account, the later stage is simulated by using the model of incompressible liquid.

Key words: breaking wave, elastic plate, wave impact, compressible liquid, structural damping, bending stresses, combined model.

Leont'yev I.O. Shoreface profile dynamics in different time scales 78

Dynamics of the sea coast is characterized by both the short-term changes and the long-term trends manifested in the time scales of decades, centuries and milleniums. When modeling the short-term storm-induced deformations the process-based models turn out to be most successful as those simulate the suite of primary mechanisms responsible for sediment transport and bed deformations. Presented model CROSS-P is applicable to calculate the storm-induced deformations on sandy coasts of the seas, large lakes and water stores. To analyse the long-term coastal evolution the model SPELT is suggested determining the position and form of the profile depending on changes in sea level and imbalance of sediment budget.

Key words: coastal profile modeling, erosion, accumulation, storm-induced deformations, erosion, coastal evolution, sediment budget.

Soomere T., Zaitseva-Pärnaste I., Räämet A., Kurennoy D. Spatio-temporal variations of wave fields in the Gulf of Finland 90

We analyse the main properties of wave fields in the Gulf of Finland and their spatial and long-term variations based on visual wave observations performed since 1954 at two locations on the southern coast of the gulf and high-resolution simulations of wave fields for the entire Baltic Sea for 1970-2007. Shown is that both long-term average and maximum wave heights in the gulf are about a half for those in the Baltic Proper. The average wave heights have insignificantly changed in the gulf since the 1970s whereas the extreme wave heights have considerably increased in the northern and in the northeastern sections of the gulf. A probable reason for the changes is the enhancement of south-western winds over the last 40 years.

Key words: wind waves, wave measurements, wave modelling, wave climate, Baltic Sea, Gulf of Finland.

Gagoshidze Sh.N. To the Estimation of the Action of Longitudinal Waves on the Bank Slopes of the Open Sea and River Channels 102

One of the most characteristic properties of longitudinal waves is the growth of their height near the bank line. This property is especially observed in short longitudinal, the mathematical description of which in terms of mathematical approximation was for the first time given by Stokes. In the present paper, Stokes' solution generalized to the case of a stationary longitudinal flow is used to estimate the static stability and deformation of the sea shore slope or of the deep sea and river channel slopes. The stability of shore slopes of a shallow sea or trapezoidal or triangular channels, which have cross-section dimension commensurable with the longitudinal wave length is estimated on the basis of an approximate solution of three-dimensional wave equations by the Galerkin-Kantorovich method. This solution, while preserving the three-dimensional structure of waves over the bank slope, leads to the results which can be easily used in engineering design.

Key words: longitudinal waves, flow, channel depth, bank deformation.

УДК 551.466.3:004.925.8(261.243)

© Т. Соомере¹, И. Зайцева-Пярнасте¹, А. Ряямет¹, Д. Куренной²¹Институт кибернетики при таллинском технологическом университете, Таллин, Эстония²Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург

D.Kurennoy@gmail.com

О ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПОЛЕЙ ВОЛНЕНИЯ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

Проведен анализ пространственных и долговременных изменений свойств ветровых волн в Финском заливе на основе визуальных наблюдений, проводившихся с 1954 г. на двух измерительных постах, расположенных на южном побережье залива, а также с использованием модельных расчетов ветровых полей высокого разрешения для всего Балтийского моря. С 1970 г. средние высоты волн изменились незначительно, в то время как экстремальные значения существенно возросли в северной и северо-восточной частях залива. Вероятной причиной этих изменений может служить увеличение повторяемости юго-западных ветров, наблюдаемое в последние 40 лет.

Ключевые слова: ветровые волны, измерение волн, волновой климат, Балтийское море.

Финский залив – второй по величине бассейн Балтийского моря, расположенный между Центральной Балтикой и дельтой реки Невы. Залив – это вытянутая акватория длиной ~ 400 км, шириной от 48 до 135 км со средней глубиной всего 37 м и экстремально изрезанной береговой линией (рис. 1). Динамика водных масс в заливе определяется, главным образом, водно-воздушным взаимодействием и имеет особенно сложный характер в районе архипелага в северной части залива, а также вблизи некоторых участков южного побережья, которые характеризуются обилием глубоко врезанных в сушу бухт. В целом, динамика водных масс в заливе имеет сходство с процессами, характерными для условий открытого океана [1, 2].

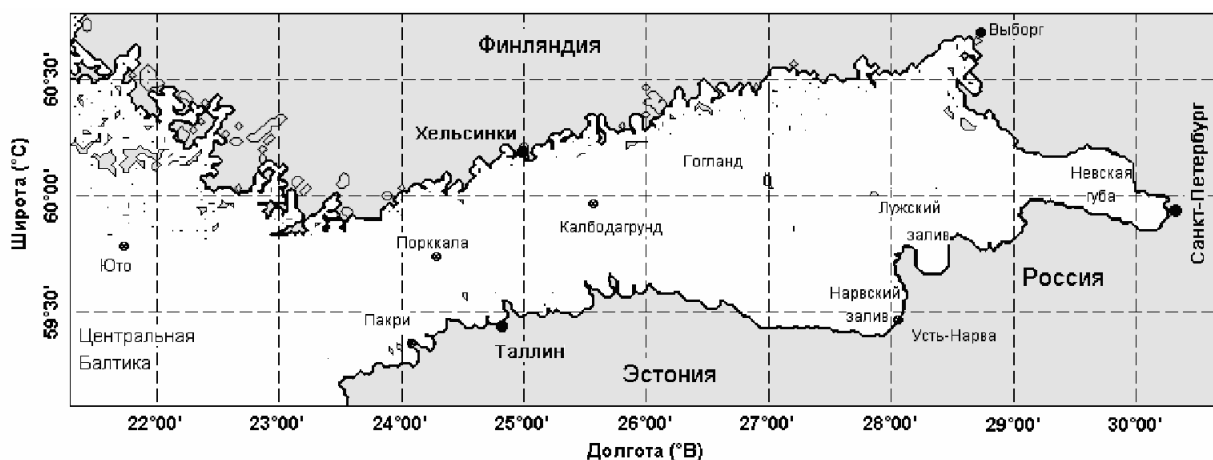


Рис. 1. Схема Финского залива и местоположение волномерных постов и станций визуального наблюдения.

Метеорологические условия над водной поверхностью Финского залива характеризуются исключительной анизотропией ветров [3], а также неоднородностью температуры воздуха, связанной со значительными перепадами ландшафта на архипелагах, островах и прилегающей к заливу суше. Несмотря на то, что только часть залива открыта преобладающим ветрам, в нем могут возникать достаточно высокие и длинные волны.

Обзор основных характеристик волнового режима в Финском заливе представлен в [2, 4]. Так как залив довольно широко открыт Центральной Балтике и доминирующие сильные ветры имеют юго-западное или западное направление, волновой режим в западной части залива, в основном, определяется волновыми условиями Центральной Балтики. При определенных штормах длинные и высокие волны, частично возникающие в открытом море, способны проникать достаточно далеко в Финский залив [5]. Недавние исследования выявили значительные изменения в среднегодовых волновых характеристиках в северной части Балтийского моря [6, 7]. Нехватка данных инструментальных измерений волн в заливе не позволила сделать вывод о подобности изменений волнового поля в заливе изменениям, произошедшим в открытом море [2]. Предварительное численное моделирование волн с использованием ветровых данных, взятых в одной точке, показало, что параметры волн в Таллинском заливе изменились существенно меньше, чем в Центральной Балтике [8]. Более того, анизотропия сильных ветров над Финским заливом, по-видимому, выражается в сложном характере пространственной изменчивости волновых параметров в различных частях акватории. Модельные значения волн для небольших областей, а также точечные измерения волновых характеристик не позволяют достоверно оценить состояние волнового поля для залива в целом. Поскольку доминирующие ветры имеют направление, частично пересекающее залив, изменчивость волновых параметров в большей степени проявляется при сравнении ситуаций в северной и южной областях залива.

Цель данной работы заключается в определении пространственной вариации типичных и экстремальных параметров волн в Финском заливе, а также их долгосрочной изменчивости во второй половине XX в. Анализ проводится на основе оцифрованных архивных данных наблюдений за волнением и долгосрочного цифрового моделирования волновых полей во всей Балтике. Большая часть анализа основывается на серии долгосрочных волновых наблюдений, проводившихся на южном побережье Финского залива: Пакри, расположенном на западной оконечности залива, и в юго-восточной части около Усть-Нарвы (Narva-Jõesuu). В большей степени эта работа направлена на выявление изменений волновых параметров в северной и южной частях залива. Так как визуальные судовые наблюдения за волнением (используемые при анализе волновых параметров и создании баз данных для морских атласов) сконцентрированы, в основном, вблизи фарватеров, расположенных в центральной части залива, в данной работе они не рассматривались.

Проблемы, связанные с качеством измерений и интерпретацией визуальных наблюдений, изложены в [7, 9]. Метод визуального наблюдения всегда содержит элемент субъективизма, параметры волн определяются только в прибрежной зоне и для ограниченного диапазона направлений распространения волн. Эти данные также имеют плохое пространственно-временное разрешение и большое количество пропусков в измерениях, что может дать искаженное представление об экстремальных волновых условиях и т.п. Однако основным преимуществом данного метода является большое временное покрытие для рассматриваемых наблюдательных постов. Например, начавшиеся в 50-х гг. регулярные наблюдения за волнами на нескольких станциях Финского залива до сих пор продолжаются в Усть-Нарве с использованием той же самой процедуры проведения наблюдений.

Сначала будет кратко описана существующая информация о параметрах волн в заливе. Сравнительное описание основных статистических характеристик волн, основанное как на визуальных наблюдениях, так и на результатах моделирования, показывает, как и предполагалось, что по сравнению с Центральной Балтикой значения средних и экстремальных волновых характеристик в заливе существенно меньше. Основным результатом работы является методическая оценка долгосрочных трендов для главных параметров волн в разных частях Финского залива.

Волновой режим в Финском заливе. В последние годы знания о типичных и экстремальных волновых условиях в Финском заливе заметно расширились. В основном это было достигнуто благодаря появлению современных спектральных моделей [10] и их применению в последнее десятилетие к условиям Финского залива с использованием высококачественных измеренных и смоделированных значений ветровых параметров [11, 12]. Другим важным дополнением явились инструментальные данные, полученные непосредственно в центральной части Финского залива [13]. В какой-то мере, эти достижения были отражены в виде переиздания волнового атласа [4], предыдущая редакция которого была опубликована около 40 лет назад.

Ветровые волны в Финском заливе обладают некоторыми интересными и специфическими свойствами. Например, смена направлений ветра в различных областях акватории часто приводит к бимодальной волновой структуре в заливе. Одной из важных особенностей волнового поля в Финском заливе является то, что средние направления распространения волн обычно сконцентрированы в узких секторах вдоль оси залива, хотя направления ветра распределены более равномерно [1, 14]. С этим связана относительно большая часть так называемых «наклонных» условий (*slanting fetch*) ветрового разгона, когда относительно длинные волны, распространяющиеся вдоль залива (как правило, на восток), систематически возбуждаются ветрами, дующими под углом к оси залива [14, 15], в то время как более короткие волны соответствуют направлению ветра.

В начале 90-х гг. регулярные измерения волн в Финском заливе проводились в течение 10 месяцев (1990–1994), охватывая разные сезоны, а с ноября 2001 г. – ежегодно в период открытой воды [13]. Статистика волн, измеренных на двух станциях (Хельсинки, 59°57.9' N, 25°14.1' E, 4.5 месяца в 1990–1992, и Порккала, 59°44.5' N, 24°18.5' E, 6.5 месяцев в 1994) показывает, что до 2001 г. наивысшая значительная высота волны H_s в этой области составляла 4 м (ноябрь, 1991). Основываясь на этих данных, наибольшая значительная высота волн в Финском заливе, появляющихся раз в 100 лет, оценивалась как 3.8 м при отдельных волнах высотой до 7.1 м [1, 13]. Подробный анализ экстремальных ветровых и волновых условий для восточной части Финского залива представлен в [16].

Вышеприведенные оценки основаны на двух непродолжительных сериях измерений и оказались сильно заниженными: 15 ноября 2001 г. на измерительной станции Хельсинки была зафиксирована $H_s = 5,2$ м [11]. Во время этого шторма волны с высотами, превышающими 4 м, также появлялись у южных берегов залива [11]. Необычно высокие и длинные волны с периодами до 12 с также встречались в центральной части Финского залива 9 января 2005 г. Значительная высота волн достигала 4.5 м у острова Найссаар и 4 м вблизи Хельсинки [5].

Так как существующие инструментальные измерения волн проводились в узкой части Финского залива, подверженной значительному воздействию волн, приходящих с Балтики, вышеупомянутые оценки не могут являться однозначной характеристикой волнового режима. В настоящее время хорошая оценка пространственных изменений волнового поля может быть получена с использованием математических волновых моделей и верификацией результатов на основе экспериментальных (измеренных)

данных. Финский залив является чрезвычайно сложным объектом с точки зрения волнового моделирования. Чтобы адекватно отразить геометрию Финского залива, шаг расчетной сетки при моделировании не должен превышать двух-трех морских миль [11, 14]. Для некоторых локальных задач требуется более высокое разрешение: около нескольких сотен метров [11, 17]. Основные свойства волновых полей, рассчитанных для Таллинского залива с использованием стандартной модели WAM с разрешением $\frac{1}{4}$ мили, достоверны для глубин не менее 5 м и расстояния до берега 200–300 м [11]. Причиной таких благоприятных условий, которые в общем случае не справедливы для открытого океана, является небольшой период преобладающих в Финском заливе волн.

В связи с тем, что длина ветрового разгона в Финском заливе относительно мала, изменения ветрового поля для большинства штормов существенно отражаются на состоянии водной поверхности. Во многих случаях волновое поле в заливе прямо зависит от изменяющихся параметров ветра. Это позволяет проводить локальную оценку волнового режима, используя одну станцию наблюдения за ветром, которая тем не менее позволяет адекватно оценивать волновое поле в 99.5 % случаев [18]. Как и ожидалось, модельные расчеты отражают значительную сезонную и пространственную изменчивость волновых параметров в рассматриваемой области, а также соответствующие изменения ветров [1], что не было однозначно подтверждено в предыдущих исследованиях.

Пространственные распределения волновых параметров Финского залива.

Проведенный анализ основывается на двух наборах данных визуальных наблюдений за параметрами волн, полученных на станции Пакри, находящейся в западной части Финского залива ($59^{\circ}23'37''\text{N}$, $24^{\circ}02'40''\text{E}$), и на станции Усть-Нарва, расположенной в восточной части в Нарвском заливе ($59^{\circ}28'06''\text{N}$, $28^{\circ}02'42''\text{E}$ (см. рис. 1). Регулярные наблюдения за волнами начались в 1954 г., проводились на станции Пакри до 1985 г., а в Усть-Нарве продолжают до настоящего времени. Наблюдательный пост в Пакри открыт волнам, образованным в северной части Центральной Балтики [9]. Станция находится на клифе высотой около 20 м над уровнем моря, глубины в прибрежной зоне довольно большие (>10 м), что позволяет относительно хорошо оценивать параметры волн на расстоянии от берега. Волны, измеряемые в Усть-Нарве, в большинстве своем образованы в Финском заливе. Наблюдательный пост расположен на высоте 12.8 м над уровнем моря, станция полностью открыта волнам, приходящим с северо-запада, а также частично открыта волнам, идущим с юго-запада на север. Процедура проведения наблюдений идентична для обеих станций [7].

Волновые поля за 1970–2007 гг. моделировались в институте Кибернетики при Таллинском технологическом университете с помощью спектральной волновой модели третьего поколения WAM [10] на регулярной прямоугольной расчетной сетке (разрешение 3×3 морские мили), покрывающей всё Балтийское море. Присутствие льда не учитывалось при моделировании. В модели использовалось 24 пространственных направления и временной шаг 3 мин. Применялся расширенный диапазон частот от 0.042 до 2 Гц (период волн 0.5–23.9 с; 42 интервала частот с приращением 1.1), гарантирующий правильное отражение роста высот волн при слабых ветрах после штилевых периодов [11].

Детальное описание выбора ветровых данных для долгосрочного моделирования волнового климата представлено в [19, 20]. Для этих расчетов значения параметров поверхностного ветра (10 м над поверхностью воды) были получены на основе базы данных о геострофическом ветре с пространственным разрешением $1 \times 1^{\circ}$, временным шагом 3 ч (6 ч до сентября 1977), предоставленной Шведским метеорологическим и гидрологическим институтом (SMHI). Для определения скорости ветра на стандартной высоте 10 м геострофическая скорость была умножена на 0.6, а направление повернуто на 15° налево [21]. Указанная схема не учитывает некоторых особенностей вертикальной

структуры ветров [21], однако, достаточно хорошо отражает общую статистику высот и периодов волн, сезонное поведение и кратковременную (1–3 года) межгодовую изменчивость высоты волн [19, 20]. Таким образом, представление волновых параметров можно считать удовлетворительным. Подробный анализ скорости и результатов моделирования представлен в [20].

Долгосрочная средняя значительная высота волн в Финском заливе довольно мала и равняется 0.6–0.65 м (рис. 2). Исключение составляют только центральная часть и пограничная область залива и Центральной Балтики, где средняя высота волн может достигать 0.7 м. Несмотря на то, что ветровое поле существенно анизотропно в данной области и сильнейшие ветры дуют с ЮЗ направления, область наивысших волн практически симметрична относительно оси залива.

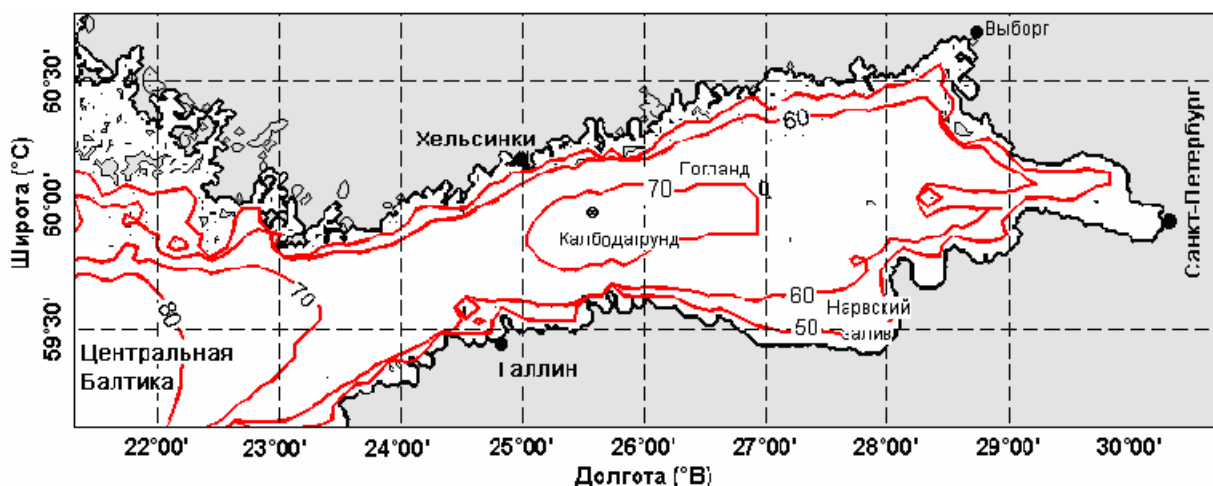


Рис. 2. Пространственное распределение долгосрочных моделированных средних значительных высот волн (см) в Финском заливе.

Долгосрочные моделированные значения средних высот волн для всего залива хорошо согласуются с результатами моделирования высокого разрешения для центральной части Финского залива [11] и с данными визуальных наблюдений на станции Пакри (0.563 м и 0.560 м, соответственно), тогда как в Усть-Нарве модельная высота волн (0.466 м) значительно превышает наблюдаемые значения (0.368 м). Совпадение модельных и визуальных данных на станции Пакри говорит о том, что моделированные высоты волн занижены на 20–30 % (это типичный коэффициент уменьшения высоты волн при их подходе в прибрежную зону с глубокой воды). Ближайшая модельная точка в районе Нарвы расположена на большей глубине (7 м) относительно станции визуальных наблюдений (3–4 м). Более того, высоты волн в Усть-Нарве относительно малы из-за присутствия льда.

На всей акватории Финского залива (от границы с морем до устья реки Невы) высота волн с 1%-ной вероятностью возникновения в течение года превышает 2.5 м, причем область появления наивысших волн опять же практически симметрична относительно оси залива, за исключением небольшого участка западнее Гогланда, где она смещена к северу; наибольшая высота волн достигает 3 м в относительно узкой центральной части залива (рис. 3).

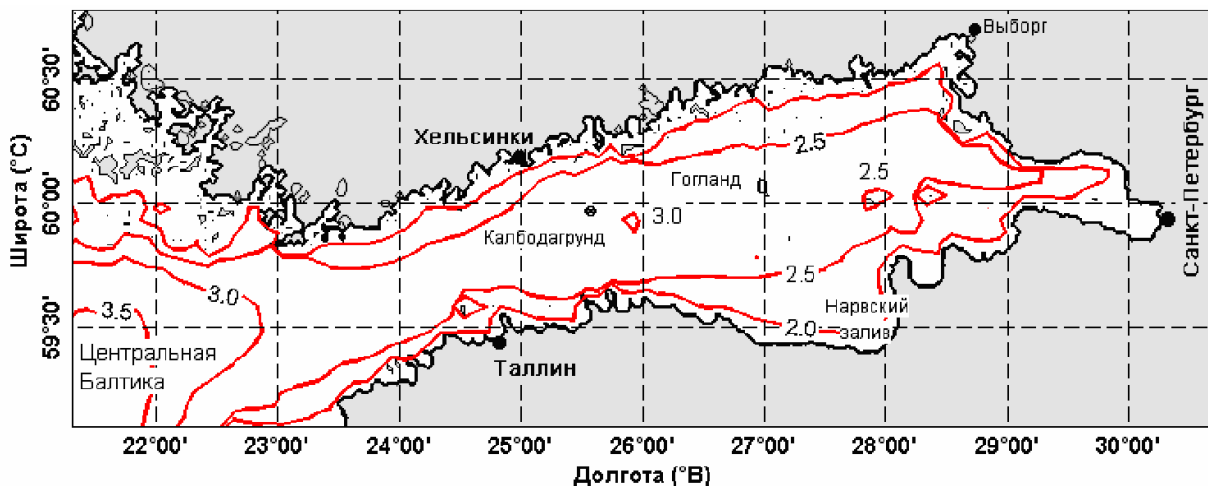


Рис. 3. Пространственное распределение порогового уровня волн с 1%-ной вероятностью возникновения в течение года (м) в Финском заливе.

Сезонные вариации. Известно, что характеристики ветров в Финском заливе имеют ярко выраженные сезонные вариации. Естественно предположить, что схожие изменения свойственны характеристикам ветров и в открытом море. Самые качественные данные о ветрах в открытой акватории Финского залива получают на измерительном посту Калбодагруд (Kalbådagrund) – маяке, расположенном в центральной части залива (59°58'N, 25°37'E) на расстоянии 29 км от финского и в 37 км от эстонского побережья (рис. 4). Это единственная точка измерений во всем заливе, в которой восточные и западные ветры практически не подвержены влиянию берега, хотя ветры с других направлений могут содержать небольшие вызванные материком искажения. Данные с этого измерительного поста имеются начиная с 1981 г.

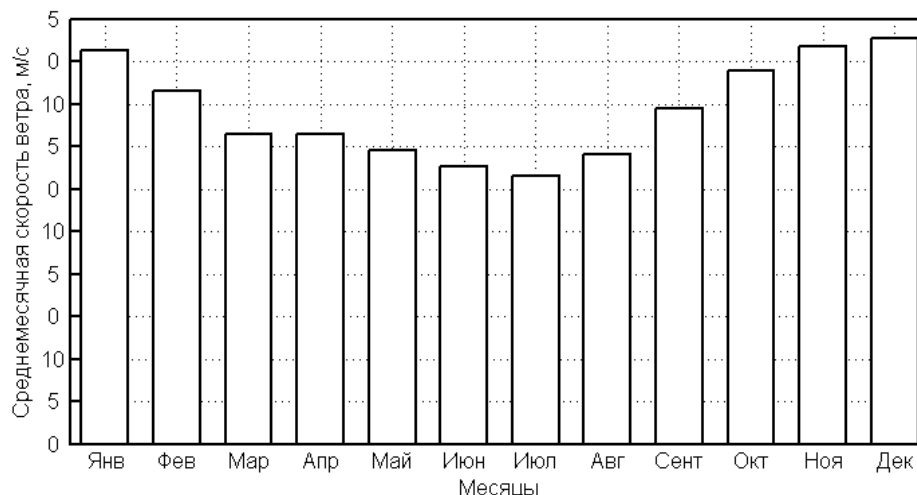


Рис. 4. Сезонные вариации среднемесячной скорости ветра на станции Калбодагруд в 1981–2008 гг. Скорость ветра измерялась на высоте 32 м и приблизительно на 15 % превышает скорость ветра на высоте 10 м.

Среднемесячная скорость ветра менялась приблизительно на 20 % по отношению к долговременному среднему значению (7.85 м/с). Самый ветренный месяц – декабрь,

скорость ветра превышала 9.54 м/с; скорость ветра также превышала 9 м/с в ноябре и январе (9.54 и 9.25 м/с, соответственно). Самый спокойный месяц – июль (6.30 м/с).

На южном побережье Финского залива как для измеренных, так и для моделированных волновых данных явно прослеживается сезонная вариация среднемесячных значений высоты волн (рис. 5). Самые высокие волны наблюдались в течение четырех месяцев: с октября по январь. Это же показали модельные расчеты, где максимум в декабре-январе был более четко выражен для обеих измерительных станций. Сезонные распределения высоты смоделированных волн и скорости ветра, в общем, хорошо согласуются. Несколько неожиданным явилось то, что сезонная вариация волновых полей лишь частично повторяет вариацию ветровых полей. Сезонный ход наблюдаемых высот волн менее регулярен: вторичный максимум появляется в июне на обеих станциях наблюдения, а самая спокойная обстановка отмечается в апреле и мае в Нарве и Пакри соответственно. Упомянутый вторичный максимум не наблюдается в волновых полях открытого Балтийского моря [7].

Важно отметить, что ни волновая модель, ни метеорологические данные не воспроизводят этого максимума, который, очевидно, вызван специфическими условиями Финского залива. Возможным объяснением этого может быть то, что ветровые поля в центральной и западной частях Финского залива иногда (чаще ранней весной) содержат достаточно сильные восточные ветры, дующие вдоль оси залива [3]. Такая ветровая система, значительно более слабая в западной части залива, специфична для Финского залива и не проявляет себя в других частях Балтийского моря.

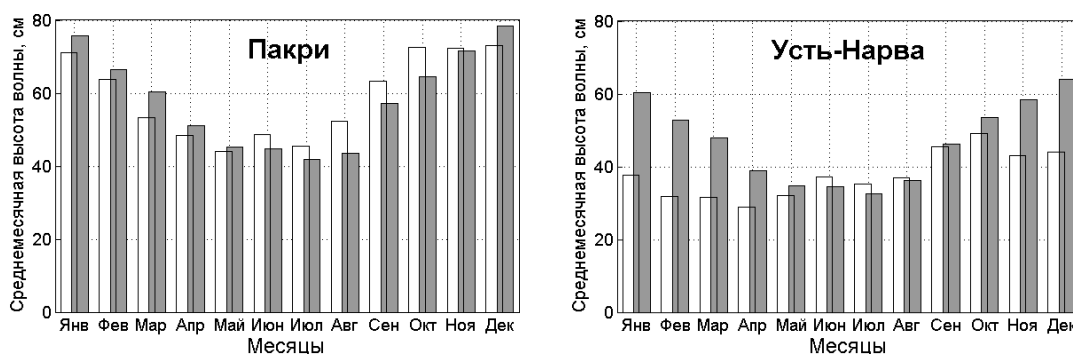


Рис. 5. Сезонная вариация средней высоты волн на станции Пакри (слева) и Усть-Нарва (справа). Белые полосы соответствуют измеренным, а серые – моделированным значениям.

Среднемесячная высота волн практически не меняется в Пакри с октября по январь, в то время как в Нарве наибольшие значения приходятся на сентябрь и октябрь. Это явление также не типично для Балтийского моря [20] и может быть объяснено ветровым климатом на южном побережье Финского залива или частым наличием льда в районе Нарвы поздней осенью. Значения среднемесячных высот волн в ноябре-январе меньше, чем в октябре [22].

Большая часть волновых условий в Финском заливе относится к полностью сформированным волновым полям со спектром Пирсона-Московица [19]. Высота волн в этих случаях приблизительно пропорциональна квадрату скорости ветра. Следовательно, сезонная вариация высоты волн должна быть больше сезонной вариации скорости ветра. Это в действительности наблюдается в западной части Финского залива. В Пакри высота волн в самые ветреные месяцы почти в два раза больше, чем в самый безветренный месяц. В Нарвском заливе сезонные вариации (см.рис. 5) демонстрируют менее ярко выраженный годовой цикл активности волн, где среднемесячная высота волн достигает 0.47 м в октябре, но в самые спокойные месяцы (апрель и май) составляет около 0.3 м.

Долговременные вариации. Существуют различные объяснения произошедших в недавнем прошлом изменений штормовой обстановки и ветрового режима в Финском заливе. Основные ветровые характеристики в этом регионе определяются крупномасштабной циркуляцией над всем Балтийским морем. Оценка, произведенная на основе данных о геострофических ветрах, показала, что штормы достигали наибольшей силы в большей части региона с 1881 по 1910 г., стихая приблизительно к 1965 г. После чего частота штормов возросла почти до уровней, наблюдаемых в первых десятилетиях XX в. [23, 24]. Проявление этих изменений в характеристиках ветровых волн не является очевидным во внутренних водах Финского залива, где агеострофическая составляющая поверхностного ветра бывает значительной, и структура направления ветров существенно отличается от структуры, присущей Балтийскому морю [3].

В противоположность постепенному возрастанию средней скорости ветра над большей частью Центральной Балтики [6, 25], годовая средняя скорость ветра в Калбодагунде медленно снижается (приблизительно 0.01 м/с/год, рис. 6). Следовательно, эти данные предполагают низкую вероятность значительных долговременных вариаций волновых характеристик в заливе.

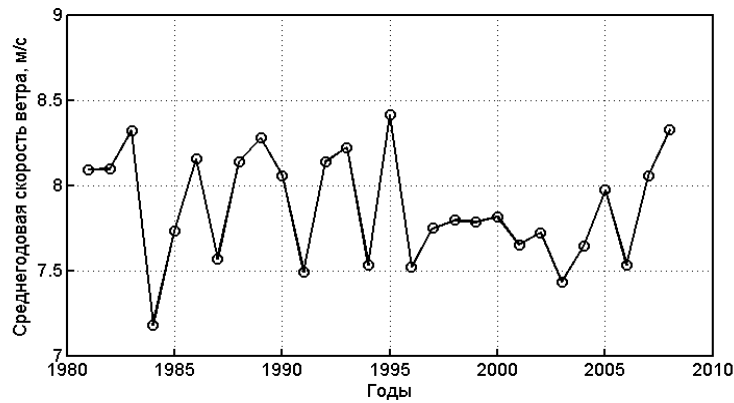


Рис. 6. Среднегодовая скорость ветра на станции Калбодагунд в 1981–2008 гг.

Временные ряды наблюдаемой среднегодовой высоты волн за 1957–1984 гг. в Пакри и Нарве показывают качественное совпадение периодов с относительно высокой и низкой волновой активностью (рис. 7). Коэффициент корреляции между двумя рядами наблюдения равен 0.44. Соответствующее значение p статистической значимости – 0.014 [26], что показывает статистически значимую зависимость почти на уровне 99%.

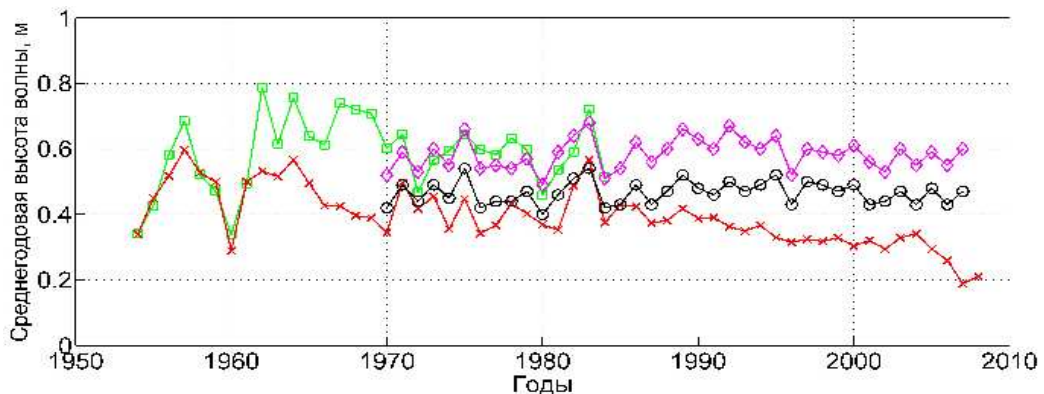


Рис. 7. Наблюдаемые и моделированные долговременные вариации годовых значительных высот волн в Пакри (квадраты: наблюдаемые / ромбы: моделированные) и Усть-Нарве (кресты / круги).

Модель хорошо отражает временные изменения среднегодовой высоты волн в 1970–1984 гг. для обеих станций наблюдения (см. рис. 7). Начиная с 1985 г., систематическое отличие между модельными и измеренными волновыми параметрами в Нарве наиболее вероятно объясняется игнорированием льда при моделировании. Краткосрочная межгодовая вариация волновой активности в двух различных точках залива также хорошо соответствует модельным данным. Следовательно, закономерно предполагать, что модель адекватно отражает характеристики волновых полей в заливе.

Важной особенностью является то, что краткосрочная межгодовая вариация волновой активности при временном цикле 1–3 года имела в это время такой же вид не только для всего южного побережья Финского залива, но фактически распространялась на северную часть Центральной Балтики [26]. Было показано [26], что эта цикличность в долговременной вариации высот волн резко заканчивается в конце 80-х гг. В отличие от периода до 1980 г., годы с относительно высокой интенсивностью волн в Балтийском море [7] соответствуют относительно спокойным годам в Нарвском заливе и наоборот. Более того, волновая активность в Балтийском море демонстрирует значительные вариации в 90-е гг. и в конце столетия [7], в то же время в Усть-Нарве наблюдается постепенное снижение среднегодовой высоты волн (0.4 % в год).

Представленные данные лишены раз подтверждают, что существующие свидетельства изменений общей волновой активности в различных частях Балтийского моря крайне противоречивы; они демонстрируют различные тенденции в отдельных частях моря [8, 18, 27]. Такие противоречивые выводы получены на основе высококачественных данных и полагается, что характер изменений волновых свойств в Балтийском море может иметь сложную внутреннюю структуру.

Для того чтобы установить пространственную структуру потенциальных трендов средних и экстремальных характеристик волн в Финском заливе, авторы подсчитали соответствующие зависимости нижеописанным методом. Для каждой точки, используемой при моделировании, среднегодовые значительные высоты волн были определены на основе анализа временных рядов почасовых модельных данных. Затем для полученных 38 оценок волновой активности была определена линия тренда. Оценка изменения высоты волн подсчитывалась как разница между значением в конце линии тренда (2007) и ее началом (1970). Аналогичная процедура была проведена для оценки экстремальных волн, определяемых как порог волн с 1%-ной вероятностью возникновения в течение года.

В отличие от Балтийского моря, где наблюдаются существенные изменения средних волновых характеристик начиная с 1970-х [19], модельные расчеты показали незначительные изменения внутри всего залива, включая граничную с морем область (рис. 8). Незначительное возрастание наблюдается только в северной и северо-восточной прибрежных частях залива. Эти изменения также являются статистически незначимыми [19].

Однако с 70-х гг. значения максимальных высот волн отражают явные изменения. В отличие от средней высоты волны пространственное распределение пороговых уровней для волн с 1%-ной вероятностью возникновения в течение года в Финском заливе (рис. 9) показывает очевидный отрицательный тренд у южного берега, особенно в самой узкой центральной части залива. За период 38 расчетных лет совокупное изменение в высоте волн составило около 0.4 м (-14 см в южной и +26 см в северо-восточной части), что соответствует приблизительно 20 % от ее типичного уровня. Таким образом, несмотря на то, что средние высоты волн практически не изменились, высоты волн при очень сильных штормах существенно изменились, причем с различными знаками для различных частей залива. Наблюдается существенное уменьшение (приблизительно на 10 %) рассматриваемых величин у южного берега залива в сочетании с приблизительно равным или даже большим возрастанием по северной оси залива, особенно в самой широкой его части между Нарвой и Коткой.

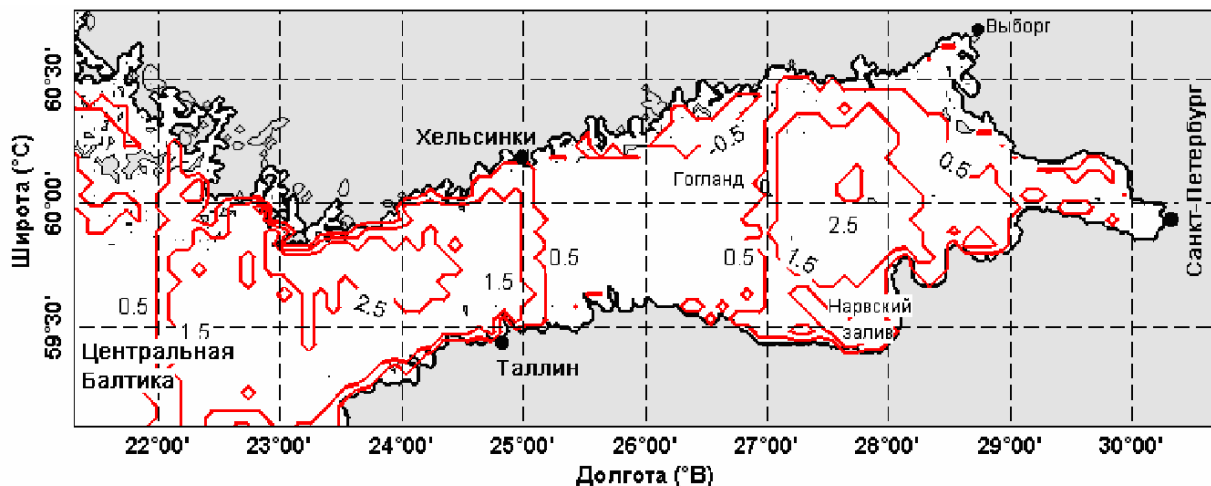


Рис. 8. Пространственное распределение долгосрочных изменений средних значений моделированных значительных высот волн (м) в Финском заливе.

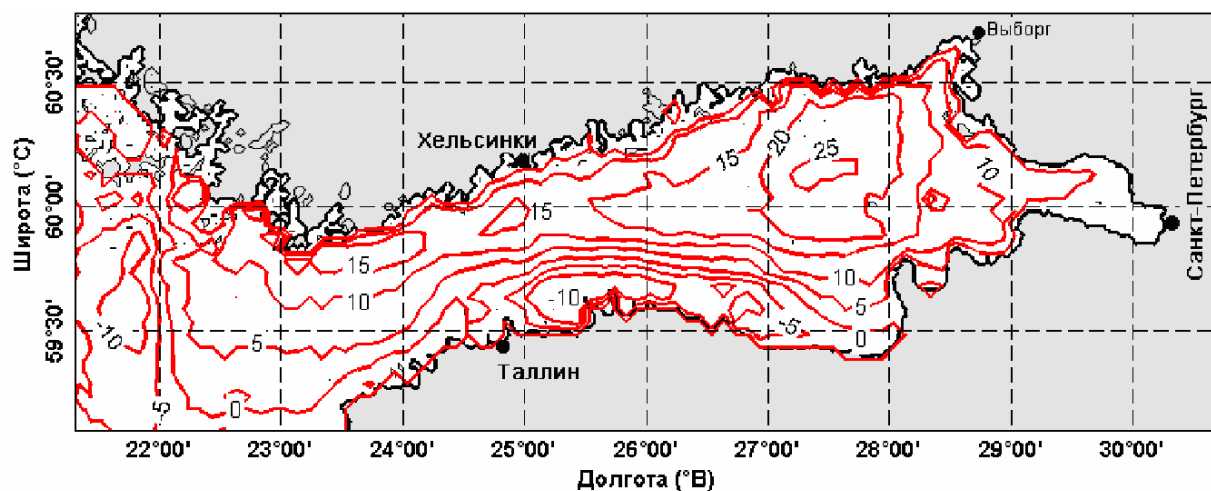


Рис. 9. Пространственное распределение долгосрочных изменений пороговых уровней (см) для волн с 1%-ной вероятностью возникновения в течение года в Финском заливе.

Пространственный характер изменений может быть связан со значительными изменениями направления ветра над Эстонией: частота появления юго-западных ветров существенно увеличилась за последние 40 лет [28]. Такие изменения в направлении ветра вызывают очевидное уменьшение высоты волн в южной части Финского залива, а также рост высоты волн вдоль его северного берега.

Приведенный анализ подтверждает известный факт, что волновой климат в Финском заливе более умеренный, чем в Балтийском море. Долгосрочные средние и экстремальные (пороговые высоты волн, возникающих с вероятностью 1 % или появляющихся 3–4 дня в году) значения высот волн приблизительно в два раза меньше, чем соответствующие значения в Центральной Балтике. Аналогично, сезонные вариации ветровых характеристик и волновых полей выражены менее явно. Однако характеристики долговременных изменений волновых параметров в Финском заливе могут сильно отличаться от их хода в Балтийском море. В период с 60-х по 80-е гг. общая волновая активность в за-

ливе и в Балтийском море имела схожую годовую вариацию, а дальнейшие изменения существенно отличаются [27].

Анализ моделированных и измеренных данных показывает, что средние значения высоты волн в заливе изменились несущественно с 70-х гг. Однако произошли существенные изменения в экстремальных высотах волн. Высота таких волн заметно возросла в северной и северо-восточной частях залива. Это увеличение сопровождается потенциальным изменением направления распространения волн, их сдвигом в западном и юго-западном направлениях [27], что может привести к значительному увеличению волновой нагрузки на северо-восточную часть залива, особенно вблизи Невской губы, где в последнее время отмечается увеличение числа зон, подверженных береговой абразии [29].

Возможным объяснением описанных изменений является постепенное изменение структуры направления доминирующих ветров в районах, примыкающих к Финскому заливу. Недавно проведенный анализ [28] показывает, что в течение последних 40 лет по всей Эстонии наблюдалось значительное возрастание повторяемости юго-западных ветров и снижение числа ветров южных и восточных направлений. Это изменение приводит к систематическому возрастанию длительности воздействия на северную часть бассейна и может являться причиной увеличения высот экстремальных волн в подветренной части Финского залива и их уменьшения в более мелких южных частях залива.

Авторы выражают глубокую признательность сотрудникам Института метеорологии и гидрологии Эстонии, предоставившим доступ к подлинникам записей наблюдений и давшим объяснения по проведению процедур наблюдений; сотрудникам Института метеорологии и гидрологии Швеции, в особенности доктору Барри Броману, за предоставление данных о геострофических ветрах в бассейне Балтийского моря; а также Институту метеорологии Финляндии за предоставление ветровых данных со станции Калбодагруд.

Работа была поддержана целевым финансированием Министерства образования и науки Эстонии (грант SF0140077s08), Научным фондом Эстонии (грант No.7413) и BONUS+ проект BalticWay.

Литература

1. Alenius P., Myrberg K., Nekrasov A. Physical oceanography of the Gulf of Finland: a review // *Boreal Env. Res.* 1998. V.3. P.97–125.
2. 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. V.50. P.287–362.
3. Soomere T., Keevallik S. Directional and extreme wind properties in the Gulf of Finland // *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.* 2003. V.9. P.73–90.
4. Лопатухин Л.И., Бухановский А.В., Иванов С.В., Чернышева Е.С. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей // Российский морской регистр судоходства. СПб. 2006. 450 с.
5. Soomere T., Behrens A., Tuomi L., Nielsen J.W. Wave conditions in the Baltic Proper and in the Gulf of Finland during windstorm Gudrun // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2008. V.8. P.37–46.
6. Broman B., Hammarklint T., Rannat K., Soomere T., Valdmann A. Trends and extremes of wave fields in the north-eastern part of the Baltic Proper // *Oceanologia.* 2006. V.48. P.165–184.
7. Soomere T., Zaitseva I. Estimates of wave climate in the northern Baltic Proper derived from visual wave observations at Vilsandi // *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.* 2007. V.13. P.48–64.
8. Kelpšaitė L., Parnell K.E., Soomere T. Energy pollution: the relative influence of wind-wave and vessel-wake energy in Tallinn Bay, the Baltic Sea // *J. Coastal Res. Special Issue 56* 2006. V.1. P.812–816.
9. Zaitseva-Pärnaste I., Suursaar Ü., Kullas T., Lapimaa S., Soomere T. Seasonal and long-term variations of wave conditions in the northern Baltic Sea // *J. Coastal Res. Special Issue 56* 2010. V.1. P.277–281.
10. Komen G.J., Cavaleri L., Donelan M., Hasselmann K., Hasselmann S. Janssen P.A.E.M. Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge Univ. Press, 1994. 339 p.
11. Soomere T. Wind wave statistics in Tallinn Bay // *Boreal Env. Res.* 2005. V.10. P.103–118.

12. *Tuomi L., Pettersson H., Kahma K.* Preliminary results from the WAM wave model forced by the mesoscale EUR-HIRLAM atmospheric model // MERI – Report series of the Finnish Institute of Marine Research 1999. No.40. P.19–23.
13. *Pettersson H.* Directional wave statistics from the Gulf of Finland 1990–1994 // MERI – Report Series of the Finnish Institute of Marine Research 2001. No.44. 37 p. (in Finnish).
14. *Pettersson H.* Wave growth in a narrow bay. PhD Thesis, Finnish Institute of Marine Research, Contributions. No.9. 2004.
15. *Pettersson H., Kahma K.K., Tuomi L.* Predicting wave directions in a narrow bay // J. Phys. Oceanogr. 2010. V.40. P.155–169.
16. *Лопатухин Л.И., Миронов М.Е., Померанец К.С., Трапезников Ю.А., Чернышева Е.С.* Оценки экстремального ветра и волнения в восточной части Финского залива. Известия ВНИИГ 245, 2006. С.145–155.
17. *Laanearu J., Koppel T., Soomere T., Davies P. A.* Joint influence of river stream, water level and wind waves on the height of sand bar in a river mouth // Nord. Hydrol. 2007. V.38. No.3. P.287–302.
18. *Suursaar Ü.* Waves, currents and sea level variations along the Letipea–Sillamäe coastal section of the southern Gulf of Finland // Oceanologia 2010. V.52. P.391–416.
19. *Räämet A.* Spatio-temporal variability of the Baltic Sea wave fields. PhD thesis. Tallinn University of Technology. 2010.
20. *Räämet A., Soomere T.* The wave climate and its seasonal variability in the northeastern Baltic Proper // Estonian J. Earth Sci. 2010. V.59. P.100–113.
21. *Bumke K., Hasse L.* An analysis scheme for determination of true surface winds at sea from ship synoptic wind and pressure observations // Bound. Lay. Meteor. 1989. V.47. P.295–308.
22. *Sooäär J., Jaagus J.* Long-term variability and changes in the sea ice regime in the Baltic Sea near the Estonian coast // Proc. Estonian Acad. Sci. Eng. 2007. V.13. P.189–200.
23. *Alexandersson H., Schmih T., Iden K., Tuomenvirta H.* Long-term variations of the storm climate over NW Europe // The Global Atmosphere and Ocean System 1998. V.6, P.97–120.
24. *Alexandersson, H., Tuomenvirta, H., Schmih, T., Iden, K.* Trends of storms in NW Europe derived from an updated pressure data set // Clim. Res. 2000 V.14. P.71–73.
25. *Pryor S.C., Barthelmie R.J.* Long-term trends in near-surface flow over the Baltic // Int. J. Climatol. 2003. V.23. P.271–289.
26. *Soomere T., Zaitseva-Pärnaste I., Räämet A.* Variations in wave conditions in Estonian coastal waters from weekly to decadal scales // Boreal Env. Res. V.16 (in press).
27. *Räämet A., Soomere T., Zaitseva-Pärnaste I.* Variations in extreme wave heights and wave directions in the north-eastern Baltic Sea // Proc. Estonian Acad. Sci. 2010. V.59. P.182–192.
28. *Kull A.* Relationship between interannual variation of wind direction and wind speed // Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensis 2005. No.97. P.62–73.
29. *Ryabchuk D., Kolesov A., Chubarenko B., Spiridonov M., Kurennoy D., Soomere T.* Coastal erosion processes in the eastern Gulf of Finland and their links with long-term geological and hydrometeorological factors // Boreal Env.Res. 2011. V.16 (in press).

Статья поступила в редакцию 10.09.2010 г.

