



СОДЕРЖАНИЕ

Статьи

<i>Каган Б.А., Тимофеев А.А.</i> Моделирование поверхностного и внутреннего K_1 (деклинационных) приливов в Белом море	4
<i>Владиминова Э.М., Иванов В.Г., Иванов Д.В., Литвин А.Д., Скопин Н.А.</i> Исследование течений в верхнем слое Черного моря в диапазоне мезомасштабов	19
<i>Тюгин Д.Ю., Куркина О.Е., Куркин А.А.</i> Программный комплекс для численного моделирования внутренних гравитационных волн в мировом океане	32
<i>Семёнов Е.В., Мортиков Е.В.</i> Методы обработки глубоководных термохалинных измерений	45
<i>Зимин А.В., Солощук П.В., Исаев А.В.</i> Особенности течений в восточной части Финского залива по результатам инструментальных измерений в июле 2010 года	58
<i>Диденкулова И., Вишка М., Куренной Д.</i> Изменчивость берегового профиля под совместным воздействием судовых и ветровых волн	66
<i>Сухоруков А.Л.</i> Применение метода статистических испытаний в задаче о подъеме груза с большой глубины в условиях нерегулярного волнения моря	79
Конференции	100
Хроника	102
Правила представления материалов в редакцию.....	103

CONTENTS

Articles

- Kagan B.A., Timofeev A.A.* Modelling of the K_1 Surface and Internal Tides in the White Sea 4

On the basis of the use of hydrodynamic equations to incompressible liquid, reduced to non-dimensional form within the framework of similarity law, probabilistic structure of the field is constructed and researched as the basis of the decision of the problem of the non-dimensional parameter estimation of the flow, created by moving outside source, as well as for estimation of the source proper parameters and parameters of the statistical field propagation channel. The analytical form of the likelihood ratio is found and algorithms of the unknown information parameter estimation as the object of the statistical inverse problem solving are formed..

Key words: surface & internal tides, K_1 harmonic, modelling, White Sea.

- Vladimirova E.M., Ivanov V.G., Ivanov D.V., Litvin A.D., Skopin N.A.* The Investigation of Mesoscale Flows within the Black Sea Upper Layer 19

The results of velocity and temperature nature investigations in the Black sea upper layer during August 2005 are presented. The information about dynamics and structure of these fields was obtained. The existence of internal waves and localized regions of equal temperature and velocity is shown. The energetic and geometric structure characteristics of different nature in a season thermocline region were estimated.

Key words: seasonal thermocline, mezzo-scale structure, internal waves, temperature fluctuations, eddies.

- Tyugin D., Kurkina O., Kurkin A.* Software Package for Modeling of Internal Gravity Waves in the World Ocean 32

In this paper software package for numerical modeling of transformation and propagation of internal gravity waves (IGW) in the World Ocean is presented. Short overview of implemented numerical models is given. They are: extended nonlinear evolutionary equation of Korteweg-de-Vries type with combined nonlinearity with variable coefficients (Gardner equation) and ray model reproducing the effect of refraction in an IGW package. The developed software package is unique and topical for this class of geophysical applications. Description of user interface and main working modes of the software are presented.

Key words: numerical modeling, data processing and visualization, wave refraction.

- Semenov E.V., Mortikov E.V.* Methods for Processing of Deep-Water Thermohaline Measurements 45

We describe a method for approximate reconstruction of main hydrophysic fields using deep-water thermohaline measurements. Methods for solving both non-stationary and stationary, known as “diagnostic” problems, are presented. Proposed approaches are based on full non-linear system of equations of geophysical thermo-hydrodynamics. A series of results of computations performed from the mid 80-s and up to nowadays are reported.

Key words: data assimilation, variational problems, ocean thermo-hydrodynamics.

Zimin A.V., Soloshchuk P.V., Isaev A.V. Features of Currents in the Eastern Part of the Gulf of Finland Based on the Results of Instrumental Measurements in July 2010 58

The paper presents the results of current velocity measurements which were carried out below the thermocline in the eastern part of the Gulf of Finland in the second half of July 2010. It was found that the structure of water circulation in the region is generally cyclonic in nature. Comparison of calculated geostrophic velocities with instrumental measurements showed a qualitative agreement only for the direction of currents. The measured modules of current velocity exceeded its values calculated by the dynamic method by two to eight times.

Key words: water circulation, instrumental measurements of current velocity, dynamic method for calculation of current velocity, the eastern part of the Gulf of Finland.

Didenkulova I., Viška M., Kurennoy D. Change of the Coast Profile under the Joint Effect of Ship and Wind Waves 66

Coast dynamics resulting from the interplay of long vessel wakes and short background wind waves is studied experimentally in tideless conditions of Gulf of Finland. An attempt of qualitative study of impact of each wave system on a coast is made. Special attention is paid to two parameters: the change of sillage volume and the change of the coast profile shape, which is defined as an exponent in the power approximation of the coast. The analysis of these parameters and their variability for ship and wind waves demonstrate peculiarities of the ship wave and wind wave effect on the coast.

Key words: beach profile change, statistical moments, probability distributions, wind waves, ship waves, the Baltic Sea.

Sukhorukov A.L. Application of Method of Statistic Testing in the Task of Load Lifting from Deep Depth in Conditions of Random Sea State 79

Nowadays, with account of depletion of hydrocarbon raw materials onshore there is a tendency to develop deep oil and gas fields. In course of development of the fields, significant amount of various lowering-and-hoisting operations are fulfilled. The task of determination of the forces in load lifting from deep depth in the conditions of random sea state is solved on the basis of statistic testing method (Monte Carlo method). Mathematical model took into account non-linearities caused by jerking and non-linearities of forces of the load hydrodynamic resistance. Comparison of the results with relevant solutions of linear tasks has been made.

Key words: load lifting, sea state, line, wave process, offshore operation, jerking.

УДК 551.46

© И. Диденкулова^{1,2}, М. Вишка², Д. Куренной³, 2011

¹Институт прикладной физики РАН, г.Н.Новгород

²Институт кибернетики при Таллинском технологическом университете, Таллин, Эстония

³Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург

d.kurennoy@gmail.com

ИЗМЕНЧИВОСТЬ БЕРЕГОВОГО ПРОФИЛЯ ПОД СОВМЕСТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ СУДОВЫХ И ВЕТРОВЫХ ВОЛН

Изучается изменчивость берегов, вызванная совместным воздействием двух различных систем волн (судовых и ветровых), разнесенных по спектру, в условиях бесприливного Финского залива. Делается попытка качественно изучить воздействие на берег каждой из систем. Особое внимание уделяется двум параметрам – притоку (оттоку) наносов и изменению формы профиля, который определяется как показатель степени при аппроксимации берега степенной функцией. На основе распределений этих параметров и их изменчивости в случае как судовых, так и ветровых волн делаются выводы об особенностях воздействия тех и других волн на берег.

Ключевые слова: ветровые волны, судовые волны, береговой профиль, изменчивость, форма берега, функции распределения, Балтийское море.

Известно, что берег и прибрежная зона очень чувствительны к ряду факторов, как, например, изменение волнового климата, повышение уровня моря, вызванное глобальным потеплением, изменение силы и направления ветра, воздействие прибрежных течений, изменение структуры донных отложений. Все они могут привести к размыву берегов и их потере, а также вызвать изменение формы прибрежного профиля. Так, изменение волнового климата может перевести пляж из аккумулятивного состояния к абразионному и наоборот [1]. Более того, как известно, при некоторых донных профилях допускается аномальное усиление волн в прибрежной зоне [2, 3]. Формирование такого профиля в процессе перестройки берега может только усугубить ситуацию. Ситуация еще более усложняется, когда в бассейне сосуществуют две или несколько независимых систем волн, как это бывает в случае, когда помимо ветрового волнения к берегу подходит морская зыбь, или, например, в местах с интенсивным движением водного транспорта. Данная работа посвящена именно этой проблеме и направлена на изучение динамической изменчивости берега на примере пляжа Пикакари, находящегося на п-ове Пальясаар в Балтийском море, Таллин, Эстония (рис. 1, 2).

При этом мы интересуемся в первую очередь короткосрочными изменениями пляжа, на примере которых можно попытаться понять вклад каждой из волновых систем. Наши предыдущие исследования [4, 5] показали, что короткосрочные изменения пляжа могут быть весьма существенны, в то время как в долгосрочной перспективе пляж может считаться устойчивым. Обозначенные исследования проводились также в Таллинском заливе на о. Аэгна (рис. 1). Пляж располагался вблизи волнолома и изначально был аккумулятивным, но с введением быстроходных паромов в 2000 г. перешел в статус равновесного относительного существования обеих волновых систем. Разница между волновыми системами заключалась и в их подходе к берегу. Корабельные волны подходили

к берегу практически перпендикулярно, в то время как ветровые волны – почти всегда под углом (с запада и юго-запада). Все это привело к тому, что равновесность пляжа напрямую зависела от равносильного вклада корабельных и ветровых волн. Как только ветровой фон слабел (корабельный трафик оставался постоянным изо дня в день), а с ним ослабевал и приток наносов, то пляж начинал стремительно терять наносы [5]. Исследование показало, что изучение краткосрочных флуктуаций состояния пляжа может быть не менее важным, чем и в случае долгосрочных трендов, особенно если речь идет о зоне курортного отдыха, как это было в случае пляжа на о. Аэгна.



Рис. 1. Карта Балтийского моря и Финского залива (местоположение пляжа Пикакари в Балтийском море отмечено звездочкой).



Рис. 2. Пляж Пикакари на п-ове Пальясаар, Таллин, Эстония (слева); приближение корабельных волн к берегу (справа).

Но поскольку исследуемый пляж представлял довольно специфический случай – ветровые и корабельные волны приходили с разных направлений – и пляж изначально был неравновесным с аккумуляцией наносов, то возник вопрос, какой будет реакция равновесного пляжа на существование двух волновых систем и насколько заметными окажутся флуктуации формы пляжа, что и послужило идеей для данной работы.

Две системы волн в Таллинском заливе. Так как данную зону вполне можно считать бесприливной, то все изменения берега проявляются только вследствие волновой активности. Характерной особенностью Таллинского залива и, в частности, пляжа Пикакари является постоянное наличие двух различных независимых систем волн. Это в первую очередь постоянный фон ветровых волн, который в полузакрытом Таллинском заливе (экранирующие острова закрывают Таллинский залив от преобладающих ветров) отличается достаточно низким уровнем. В частности, вероятность появления волн со значительной высотой 0.5–0.75 м – 10 %, а с высотой 1.0–1.5 м – только 1 % [4].

Так, среднегодовая значительная высота волн в различных точках вдоль пляжа Пирита составляет от 0.29 до 0.32 м [6]. В летний период значительная высота волн достигает 0.5 м только во время сильных штормов, а большую часть времени не превышает 0.2 м. Наиболее типичный период ветровых волн лежит в диапазоне 1–3 с и достигает 4–6 с во время сильных штормов [7].

Вторую систему волн представляют судовые волны и, в частности, волны от быстродвижущихся паромов. Они являются куда более энергетичными по сравнению с типичным фоном ветровых волн и сильно выделяются как амплитудой, так и периодом. В частности, высота этих волн может достигать 1.7 м, а период самых высоких волн доходит до 15 с [4], что в 5 раз превышает характерный период ветровых волн. Следствием этого является то, что воздействие, оказываемое на берег каждой отдельной системой волн (ветровых и корабельных), различно. Однако, что немаловажно, общесуточная энергия ветровых и судовых волн во время эксперимента была сопоставима, и данное исследование имело целью показать противостояние двух волновых систем, энергетический вклад которых равноценен, и изучить изменение берега под их влиянием.

Так как интенсивность движения судов в Финском заливе, в частности в Таллинской бухте, весьма высока в дневные часы и сказывается на резонансных колебаниях бухты, то вклад корабельных волн в течение дня можно считать непрерывным, а в ночное время минимальным, поэтому две обозначенные системы волн могут быть относительно разделены по временному признаку. В течение дня обе волновые системы вносят свой вклад в формирование прибрежного донного профиля, причем вклад корабельных волн более значителен ввиду их большей интенсивности [5], в то время как в ночное время суток на берег воздействуют в основном ветровые волны. Благодаря такому разделению двух типов волн во времени мы можем увидеть особенности воздействия на берег каждой системы волн в отдельности.

Динамическая изменчивость пляжа Пикакари. Пляж Пикакари, где проводилось исследование, представляет собой равновесный песчаный пляж с характерным размером песчинок от 0.1 до 0.15 мм.

Динамическая изменчивость пляжа Пикакари изучалась экспериментально путем проведения регулярных измерений поперечного профиля берега в прибрежной зоне. Длина измеряемого профиля в среднем составляла 30 м, включая около 15 м сухого берега. Съёмка профилей проводилась ежедневно несколько раз в течение 18 дней (с 12 июня по 1 июля 2009 г.). Измерения проводились с помощью нивелира и линейки. Погрешность нивелира составляет ± 1 см, и уклон линейки может дать дополнительную ошибку (в сумме не более ± 1.5 см). Для того чтобы отследить воздействие корабельных волн на берег, съёмка профиля производилась непосредственно до и после прохождения каждого волнового пакета. Всего было сделано 138 измерений. Изменчивость прибрежного профиля пляжа Пикакари за этот период представлена на рис. 3. Отметка 15 м в среднем соответствовала положению уреза. Из рис. 3 видно, что за весь период измерений профиль пляжа существенно менялся, разброс по вертикальной оси составил 0.6 м; следовательно, ошибка измерений не влияет на главные результаты работы. При этом

надо отметить, что в ближней зоне ошибка минимальна, и в дальней – максимальна. Однако, как видно из рис. 3, в дальней зоне (на расстоянии 25–35 м от точки отсчета) есть хорошее совпадение между измеренными профилями, что придает надежность измерениям. К тому же процесс наката волн на берег дополнительно снимался на видео и изменение количества песка (принос/унос) в приурезовой зоне как под действием судовых, так и под действием ветровых волн хорошо просматривался в соответствующих видеозаписях. Имеющиеся видео и фотоматериалы также находятся в хорошем соответствии с проведенными измерениями и говорят в их пользу.

Сама форма профиля также представляет интерес. Так, почти на всех профилях на участке от 20 до 35–40 м имеется зона постоянной глубины – своего рода «полочка». Такая форма донного профиля может быть вызвана обрушением высокоэнергичных корабельных волн. В экспериментальных исследованиях воздействия обрушенных волн на транспорт наносов отмечалась похожая форма донного профиля со слабым изменением глубины в зоне обрушения [8, 9]. В нашем случае формирование бора происходило вблизи отметки 35 м, где и начинается образовываться «полочка» (рис. 3).

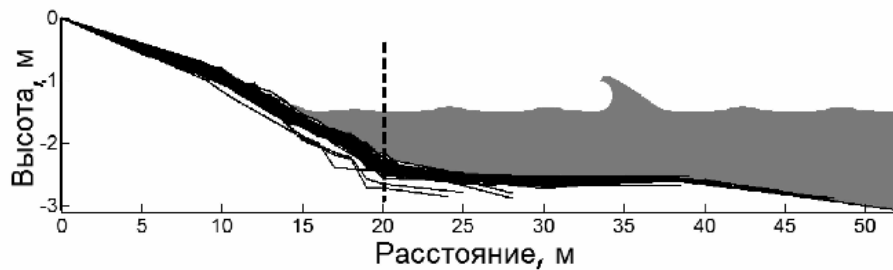


Рис. 3. Динамика пляжа Пикакари в июне–июле 2009 г.

Дополнительная информация о динамике пляжа также может быть получена из изменений топографии пляжа в различных точках (рис. 4). Расстояние 15 м приблизительно соответствует положению уреза, 20-метровая отметка – началу области постоянной глубины (рис. 3), а расстояние 35–37 м – линии обрушения корабельных волн. Примечательно, что форма профиля, практически неизменна на уровне 37 м, что демонстрирует отсутствие каких-либо изменений дна за зоной обрушения волн. Тем не менее в приурезовой области изменения более значительны, что является естественным для данного процесса.

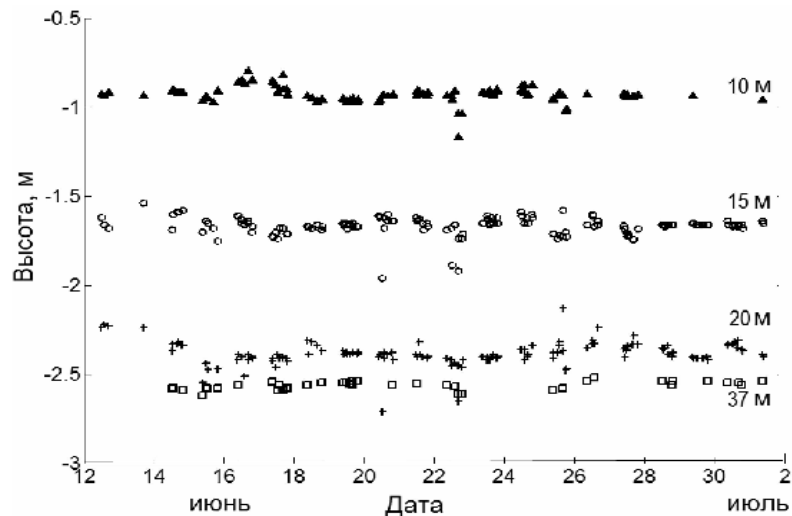


Рис. 4. Изменение топографии пляжа Пикакари в различных точках 10, 15, 20 и 37 м.

Изменение объема донных отложений пляжа Пикакари по сравнению с начальным положением в июне–июле 2009 г. отображено на рис. 5. Изменение объема определялось вдоль различных участков: от 0 до 15 м, что приблизительно соответствует объему «сухого» берега, от нуля до 20 и 37 м. Как уже было отмечено выше, расстояние 35–37 м соответствует линии обрушения корабельных волн, т.е. верхний график на рис. 5 отвечает за изменение полного объема донных отложений прибрежной зоны вплоть до линии обрушения. Видно, что все изменения являются достаточно плавными, за исключением нескольких выбросов 22 июня.

Тем не менее изменение объема донных отложений не дает информации о форме пляжа. Песок может перераспределяться внутри одного и того же объема, сохраняя его постоянным, но изменяя форму пляжа. В то же время форма профиля имеет большое значение, так как по нему можно предсказывать его стационарность и изменчивость [1, 10]. Форма берегового профиля также влияет на характер наката волн на берег, в частности вдоль определенных донных геометрий [2, 3] волны могут испытывать аномальное усиление. Поэтому в качестве дополнительного параметра мы изучаем форму пляжа, которую определяем с помощью аппроксимации донного профиля $h(x)$ степенной функцией:

$$h = ax^b, \quad (1)$$

поскольку довольно часто форма пляжа вблизи берега аппроксимируется степенными зависимостями [11, 12]. Наиболее известным из степенных профилей является так называемый равновесный профиль Дина для ветровых волн с $b = 2/3$ [13]. Тем не менее другие аппроксимации берегового профиля также возможны. В частности, для голландских берегов наиболее оптимальной оказалась аппроксимация с $b = 0.78$ [14], а для побережья Израиля с $b = 0.73–1.1$ [15]. Степенные аппроксимации донных и береговых профилей также активно используются в теоретических расчетах [15, 16]. Более того, другие, например экспоненциальные или логарифмические аппроксимации берега [11, 17], также могут быть описаны степенной функцией (1) в приурезовой области. Такой тип аппроксимации особенно удобен в тех местах, где профили не имеют ярко выраженных берм и баров.

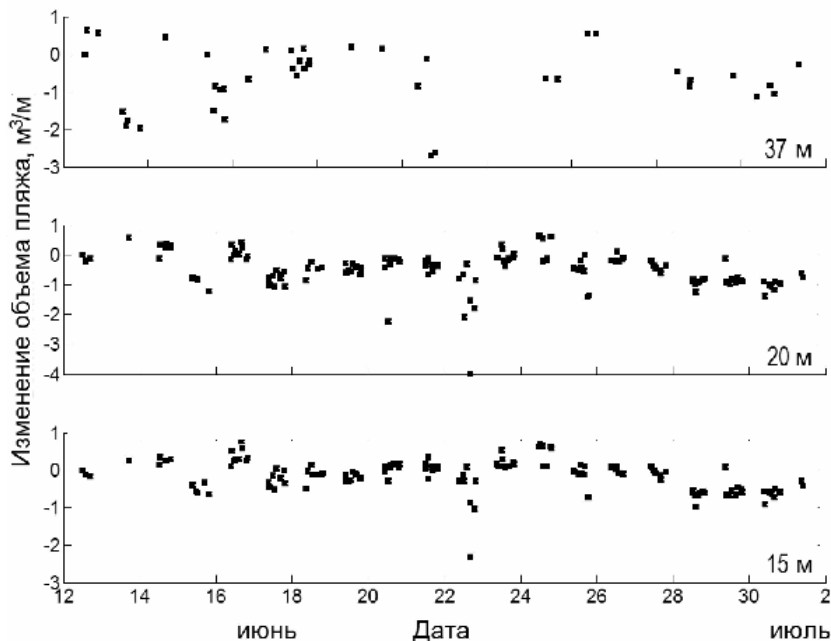


Рис. 5. Изменение объема донных отложений пляжа Пикакари по сравнению с начальным положением (объем считался вдоль различных участков от 0 до 15, 20 и 37 м).

По параметру b можно оценивать степень выпуклости и вогнутости пляжа. Когда $b = 1$, мы имеем дело с плоским откосом, при $b > 1$ – пляж выпуклый, при $b < 1$ – вогнутый. Коэффициент a в (1) является размерным и не имеет очевидного физического смысла, поэтому в данном анализе он не используется.

В нашем случае степенная форма прибрежного профиля явно просматривается на участке от 0 до 20 м (рис. 3), где береговой склон меняется монотонно, поэтому аппроксимацию донного профиля степенной функцией (1) мы тоже проводим только на этом участке (штриховая линия на рис. 3), который представляет собой наиболее сильно меняющуюся приурезовую зону, включающую приблизительно 15 м сухого пляжа и 5 м подводного донного профиля, достигающего до 1 м глубины. При аппроксимации профилей степенной функцией на этом участке (аппроксимация проводилась по 10 и более точкам измерений) коэффициент корреляции (R -квадрат) для всех используемых в анализе профилей был не менее 0.9.

Распределение параметра b для пляжа Пикакари в июне–июле 2009 г. представлено на рис. 6. Доверительный интервал для определения параметра b составляет 0.1. Видно, что в течение всего периода измерений пляж оставался выпуклым, а параметр b изменялся от 1.17 до 1.53 со средним значением 1.30. Распределение имеет ярко выраженную асимметричную форму, что отражается на статистических моментах: асимметрия – 0.49, эксцесс – 0.89.

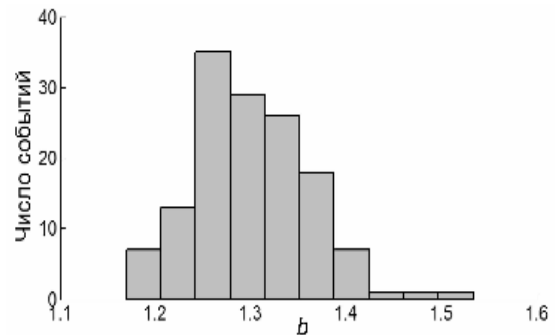


Рис. 6. Распределение параметра b для пляжа Пикакари в июне–июле 2009 г.

Изменение коэффициента формы прибрежного профиля во времени представлено на рис. 7. Здесь можно видеть как общую динамику пляжа за период измерений, так и краткосрочные эффекты – изменение формы пляжа в течение одного дня. Логично предположить, что общая динамика пляжа определяется в основном влиянием переменного фона ветровых волн, в то время как вертикальная структура внутри каждого дня формируется за счет интенсивных корабельных волн, число которых в день можно считать постоянным. Дальнейший анализ основан на этом предположении и посвящен более детальному изучению влияния каждой из волновых систем.

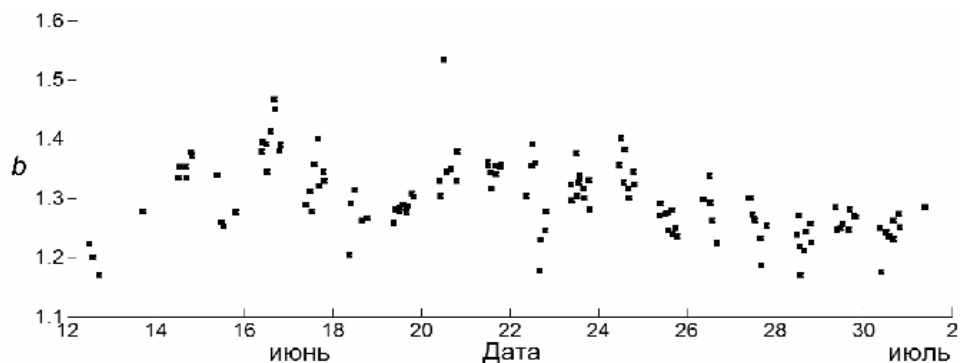


Рис. 7. Эволюция параметра b для пляжа Пикакари в июне–июле 2009 г.

Воздействие ветровых волн. Для оценки вклада ветровых волн мы предполагаем, что прибрежный донный профиль, формируемый в течение ночи, образуется исключительно за счет ветрового волнения. Поэтому здесь мы рассматриваем только те донные

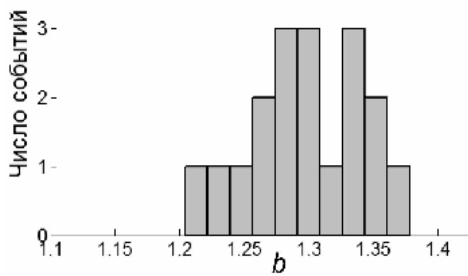


Рис. 8. Распределение параметра b для профилей, сформированных за ночь.

профили, которые были измерены первыми до начала движения судов. За весь период проведения измерений таких профилей было 18, распределение параметра b для них представлено на рис. 8. Видно, что для этих профилей параметр b меняется в более узком интервале – от 1.20 до 1.38, но с тем же средним значением 1.30, которое соответствует общему распределению (рис. 6). В то же время форма распределения меняется, так что третий и четвертый статистические моменты становятся отрицательными: асимметрия -0.25 и эксцесс -0.51 .

Для анализа влияния скорости и направления ветра на изменение формы берегового профиля

использовались ветровые данные, полученные на измерительном посту Калбодагруд (Kalbådagrund) – маяке, расположенном в центральной части Финского залива ($59^{\circ}58'$ с.ш., $25^{\circ}37'$ в.д.) на расстоянии 29 км от финского и 37 км от эстонского побережья (см. рис. 1). Эти измерения считаются наиболее точными в данной акватории. В [18] также показано, что простые методы восстановления волнового поля по одноточечному измерению ветра в открытом море в 99.5 % случаев дают хорошее описание волнового поля в Таллинском заливе. Это особенность данного района, заключающаяся в том, что волновое поле очень быстро реагирует на любые изменения ветра, поэтому попытка связать параметры изменения пляжа со скоростью и направлением ветра на измерительном посту Калбодагруд является целесообразной.

Зависимость параметра b от скорости и направления ветра представлена на рис. 9. Из рисунка видно, что нельзя говорить о какой-либо выделенной зависимости для скорости ветра. Связь с направлением ветра (рис. 9) большей частью является результатом геометрического расположения Таллинской бухты. В частности, известно, что наиболее значительные волны приходят в бухту с севера, запада и северо-запада, в то время как волны, вызванные южными, юго-восточными и юго-западными ветрами, эффективно экранируются геометрией бухты. Это также хорошо отражено на рис. 9.

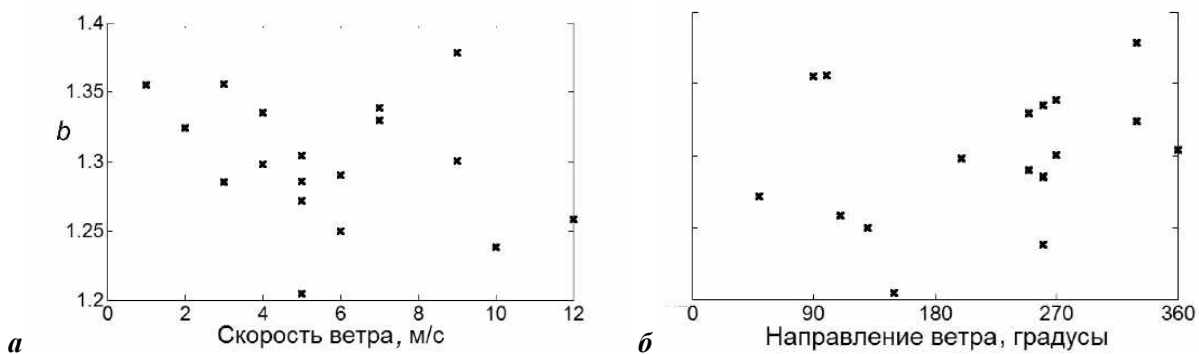


Рис. 9. Зависимость параметра b от скорости (a) и направления (b) ветра.

Дополнительно был проведен анализ влияния амплитуды и периода ветровых волн на форму берегового профиля (рис. 10). Период и амплитуда волн вычислялись в интервале с 7 до 8 часов утра по записи колебаний водной поверхности, измеренной с помощью акустического профилографа, установленного на расстоянии 100 м от уреза воды на глубине 2.7 м [4, 19–21]. Глядя на рис. 10, можно увидеть существование двух различных групп как для высот волн, так и для их периодов. Логично предположить, что очень короткие волны, а также волны очень малой амплитуды не могут оказать существ-

венного влияния на берег; в этом случае форма берегового профиля остается такой же, какой она была сформирована вечером предыдущего дня за счет корабельных и, может быть, ветровых волн. В случае же присутствия более интенсивных волн форма берегового профиля должна меняться. Из рис. 10 видно, что при малых амплитудах и периодах отсутствует какая-либо зависимость с формой пляжа, а при увеличении периода можно наблюдать определенный рост b , но из-за малого количества точек с достоверностью об этом росте говорить нельзя.

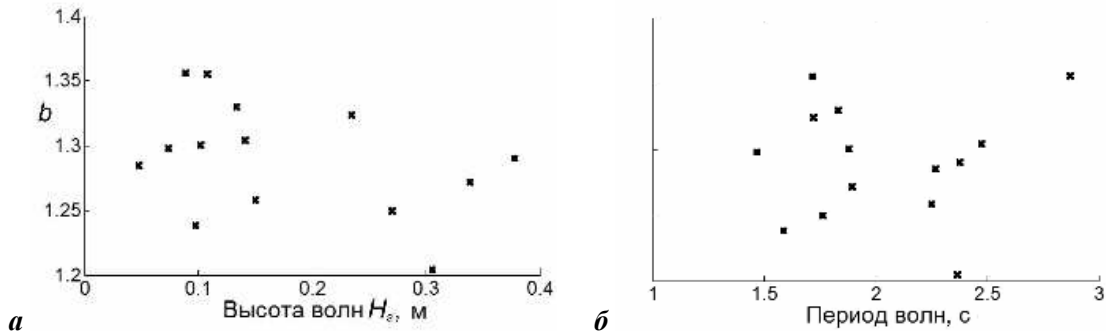


Рис. 10. Зависимость параметра b от высоты (а) и периода (б) ветровых волн.

Тем не менее определенная зависимость видна, если рассмотреть изменение параметра b (Δb) за ночь в зависимости от высоты ветровых волн H_s (рис. 11). В этом случае Δb уменьшается с увеличением высоты волн H_s . Эта зависимость может быть описана следующей функцией (сплошная линия на рис. 11):

$$\Delta b = 0.07 - 0.42H_s, \quad (2)$$

где H_s определяется в метрах.

Интересная взаимосвязь наблюдается между изменениями берегового объема ΔV и изменениями параметра b , произошедшими за ночь под действием ветровых волн (рис. 12). Видно, что приток наносов ведет к увеличению выпуклости пляжа, в то время как абразия берега (потеря песка) приводит к ее уменьшению. Это говорит о том, что в результате воздействия ветровых волн объем песка меняется в основном в срединной приурезовой области.

Основываясь на зависимости (2) и рис. 11, 12, также можно говорить о тенденции пляжа терять объем в поле ветровых волн с увеличением их высоты.

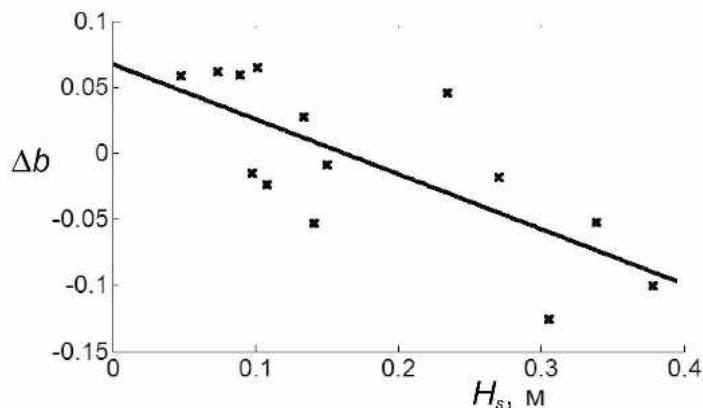


Рис. 11. Изменение параметра b за ночь в зависимости от высоты ветровых волн.

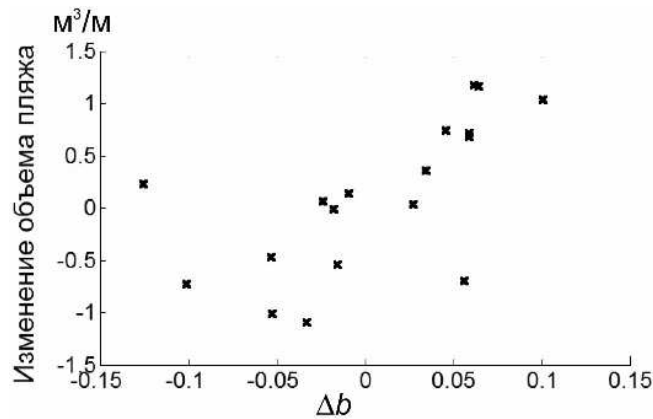


Рис. 12. Изменение берегового объема и параметра b , произошедшие за ночь под действием ветровых волн.

Воздействие корабельных волн. Как уже отмечалось выше, наиболее интенсивные волны в Таллинском заливе вызваны паромными судами, курсирующими между Таллином и Хельсинки [4, 16, 20, 21]. Общее число таких паромов может достигать 70 в день. Однако в наших исследованиях мы концентрируемся только на определенном их типе (быстроходные паромы), которые отличаются значительным размером (от 100 до 200 м) и высокой скоростью (до 30 уз). Поскольку в Таллине не установлено ограничение на скорость судов в прибрежной зоне, то эти паромы еще внутри самой бухты на глубине 20 м разгоняются до своей рабочей скорости. Число Фруда в этом случае близко к критическому, что и ведет к образованию исключительно высоких и длинных волн. Число таких паромов в 2008 г. равнялось 22–25 в день, а в 2009 г. ежедневное число паромов, приходящих в Таллин, составляло семь. При этом мы разделяли три типа судов: Star, Superstar и Viking XPRS. Характеристики самих паромов и параметры их волн даны в работах [4, 20].

Волновой пакет, регистрируемый после прохождения одного из таких паромов, как правило, имел групповую структуру, и число групп доходило до четырех. Максимальные волны (с высотой около 1 м) содержались в первой группе, и, как правило, их было не больше 10, потом следовали несколько десятков волн с высотой около 0.5 м, принадлежащие второй и третьей группам, далее следовала четвертая группа волн, высота которых могла достигать до 0.3 м, но их период был значительно меньше. Поскольку ежегодная вероятность возникновения ветровых волн (включая осенний и зимний периоды штормов, не говоря уже о достаточно спокойном летнем климате) высотой 0.5–0.75 м составляет не более 10 %, то все волны корабельного пакета значительно превышают общий ветровой фон. Общая длительность всего пакета, как правило, составляла около 20 мин. Измерения профиля дна и берега делались непосредственно до и сразу после прохождения каждого судового волнового пакета. Характерные записи берегового профиля показаны на рис. 13 для парома Star, проходившего в 19 ч 30 мин 23 июня 2009 г., и для парома Superstar, проходившего в 12 ч 30 мин 24 июня 2009 г.

В качестве характерного параметра, описывающего воздействие корабельных волн на берег, использовалось изменение берегового объема на участке от 0 до 20 м, а также изменение параметра b (Δb) в результате прохождения каждого пакета корабельных волн. Распределение этих параметров, построенное по 32 измерениям, показано на рис. 14 и 15.

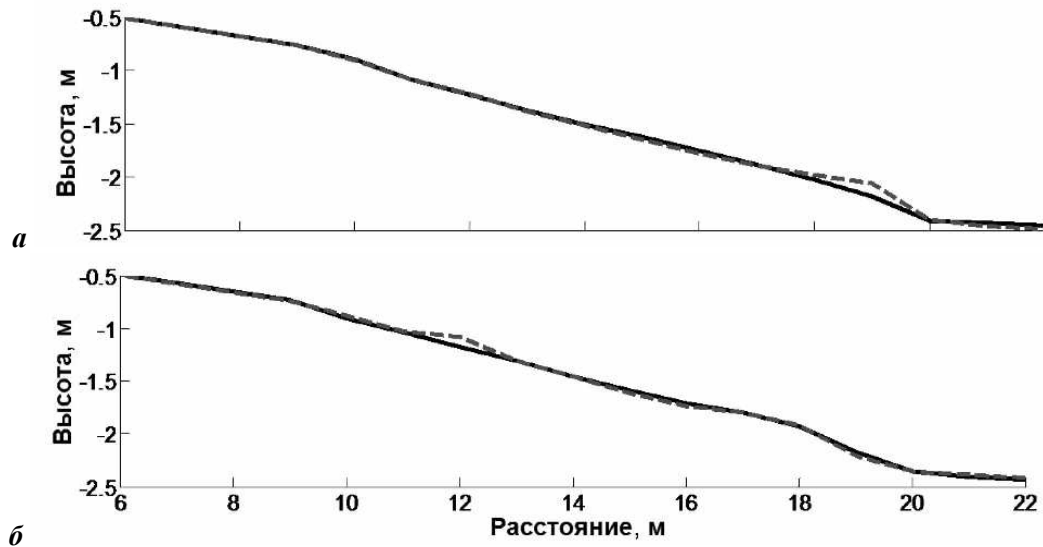


Рис. 13. Изменение берегового профиля, произошедшие под воздействием одного волнового пакета судовых волн.

Сплошная линия – донный профиль до прохождения парома, штриховая – после. *a* – прохождение парома Star в 19 ч 30 мин 23 июня 2009 г.; *б* – прохождение парома Superstar в 12 ч 30 мин 24 июня 2009 г.

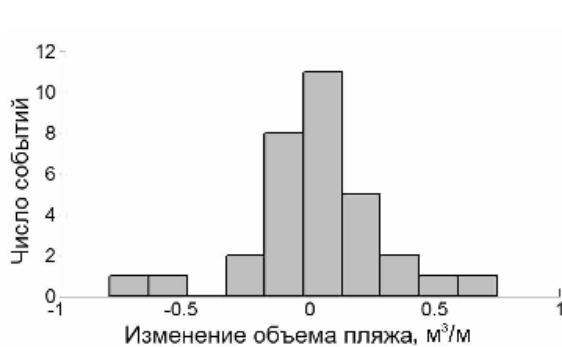


Рис. 14. Распределение изменений объемов пляжа в результате прохождения одного пакета корабельных волн.

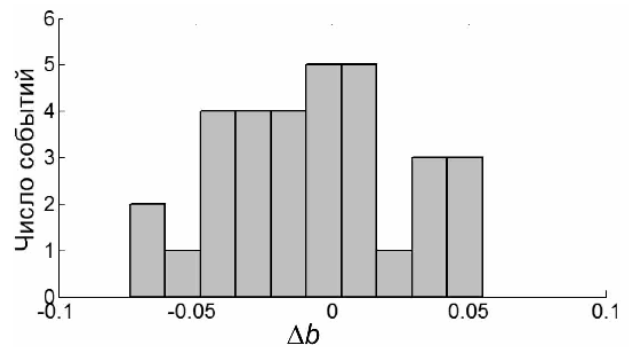


Рис. 15. Распределение Δb в результате прохождения одного пакета корабельных волн.

Видно, что распределения сильно различаются по форме и значениям, но главное – оба распределения допускают как положительные, так и отрицательные значения. Таким образом, нельзя говорить о неперемной аккумуляции материала или о разрыве берега. Так, изменение объема (рис. 14) меняется в обе стороны от -0.8 до 0.75 $\text{м}^3/\text{м}$ со средним значением 0.04 и среднеквадратическим отклонением 0.27 . Асимметрия распределения отрицательна (-0.40), а эксцесс положителен (2.65). Большая часть изменений объемов незначительна и сконцентрирована вблизи нуля, хотя есть и отдельные выбросы как в положительную, так и в отрицательную сторону.

Распределение Δb (рис. 15), напротив, более широкое, с перекосом в отрицательную сторону. Значения меняются от -0.07 до 0.06 со средним -0.01 . Распределение почти симметричное: асимметрия отрицательна и очень мала (-0.01), эксцесс также отрицателен (-0.57).

Чтобы понять воздействие корабельных волн на берег, обе указанные характеристики (изменения параметра b и берегового объема) изучались в зависимости от энергии каждого волнового пакета (рис. 16). Поскольку в случае корабельных волн волновой пакет имеет достаточно сложную структуру и сразу не очевидно, на каком его этапе происходит

перераспределение наносов, то для описания пакета корабельных волн более целесообразно использовать интегральный параметр, чем амплитудный. В [20] показано также, что энергия волнового пакета является его оптимальной характеристикой. Энергия волнового пакета E вычислялась из колебаний водной поверхности $\eta(t)$ по формуле

$$E = \rho g \int_{T_0}^{T_0+T_w} \eta^2(t) dt, \quad (3)$$

где T_0 и T_w соответствуют времени начала и конца волнового пакета, ρ – плотность воды, g – ускорение свободного падения, t – время.

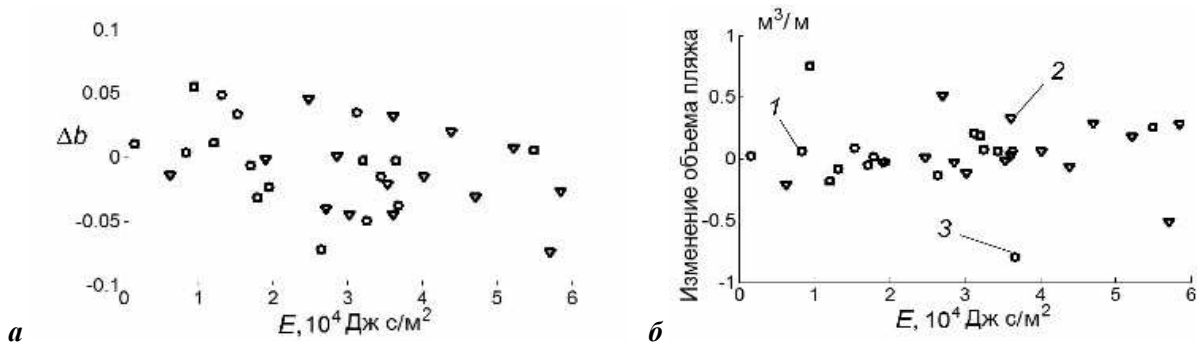


Рис. 16. Параметр Δb (а) и изменение объема пляжа (б) в результате прохождения одного пакета корабельных волн в зависимости от энергии этого пакета.

Разными значками отмечены волны от различных паромов: 1 – Star, 2 – Superstar, 3 – Viking.

Обе характеристики демонстрируют определенную тенденцию. В частности, Δb , в целом уменьшается при увеличении энергии волнового пакета, в то время как изменение объема пляжа несколько увеличивается с ростом E . Однако наличие трех значительных выбросов в обе стороны не позволяет говорить о корреляции изменений объема пляжа и энергии волнового пакета. Тем не менее из рис. 16 можно сделать вывод, что под действием корабельных волн параметры Δb и ΔV меняются независимым образом. Это можно также увидеть и на рис. 17, из которого видно, что при почти неизменном объеме параметр b меняется значительно в обе стороны, приводя к увеличению и уменьшению выпуклости. Следовательно, в случае корабельных волн можно говорить о перестройке пляжа и перераспределении песка.

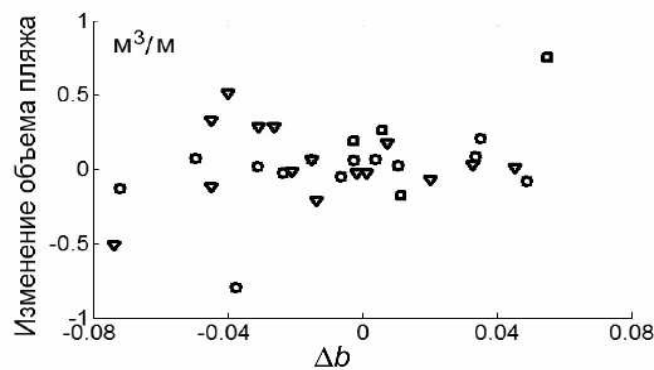


Рис. 17. Изменение берегового объема и параметра b в результате прохождения одного пакета корабельных волн.

Условные обозначения те же, что на рис. 16.

Таким образом, в работе изучается совместное воздействие на берег двух различных систем волн: ветровых и корабельных в условиях бесприливного Финского залива. Интенсивное движение водного транспорта приводит к тому, что в бухте непрерывно сосуществуют две волновые системы, поэтому разделить влияние каждой из них невозможно. Отличия проявляются ночью, когда судовая активность минимальна. В этот промежуток времени можно говорить о воздействии только ветровых волн. В то же время, корабельные волны являются более интенсивными по сравнению с ветровыми и отличаются как по периоду, так и по амплитуде. Поэтому по прошествии одного корабельного цуга, который, как правило, длится около 20 мин, мы полагаем, что изменения, которые произошли с пляжем за этот промежуток времени, вызваны только корабельными волнами.

На основе этих предположений проведен анализ экспериментальных данных, которые включают в себя набор регулярных измерений поперечного берегового профиля. Профили снимались несколько раз в день, в том числе непосредственно до и после прохождения каждого судна. Стоит отметить, что анализировались волны только от быстродвижущихся паромов, влияние на берег которых наиболее значительно [4, 5]. Наряду с притоком/оттоком наносов также изучалась форма берегового профиля, которая оценивалась с помощью его аппроксимации степенной функцией. Характерным параметром в этом случае служил показатель степени b .

В результате показано, что под воздействием и корабельных, и ветровых волн возможен как приток, так и отток наносов. Однако в случае ветровых волн поток наносов обычно ведет к увеличению выпуклости пляжа, в то время как абразия берега приводит к уменьшению выпуклости. Иными словами, под воздействием ветровых волн объем песка меняется, но главным образом только в приустьевой области. Кроме того, была продемонстрирована тенденция пляжа утрачивать песок в поле ветровых волн с увеличением их высоты.

Необходимо подчеркнуть, что в случае корабельных волн оба параметра (приток наносов и параметр формы берега) меняются независимо, и, более того, при почти неизменном транспорте наносов параметр формы берега существенно меняется в обе стороны, приводя как к увеличению, так и к уменьшению выпуклостей. Иными словами, можно заключить, что корабельные волны в случае равновесного пляжа приводят к значительной его перестройке и перераспределению песка внутри широкого участка береговой и прибрежной зоны, не создавая при этом транспортировки наносов с глубины и на глубину.

Такой же вывод можно сделать по характерным масштабам изменений, вызванных теми и другими волнами. Так, изменение формы берега в результате 20-минутного прохождения одного пакета корабельных волн имеет тот же порядок, что и изменение формы берега под действием ветровых волн в течение почти 12 ч. В то же время перемещение наносов, вызванное одним 20-минутным пакетом корабельных волн, значительно ниже вызванного 12-часовым воздействием ветровых волн.

В заключение отметим, что главной трудностью данной работы является одновременное сосуществование двух систем волн, которые мы не можем по-настоящему разделить только на уровне общих тенденций и оценок. На наш взгляд, удивительно, что наличие двух равносильных по энергии систем волн не изменяет равновесного состояния пляжа, хотя воздействие этих систем на пляж различное. Интерес также представляет и равновесная форма профиля $h \sim x^{1.3}$, которая отличается от классической теории Дина: $h \sim x^{2/3}$. Мы также допускаем, что наблюдаемая устойчивая форма прибрежного профиля может быть результатом взаимодействия этих двух волновых систем.

Работа поддержана грантами: РФФИ (11-05-00216), Президента Российской Федерации (6734.2010.5), целевым финансированием Министерства образования и науки Эстонии (грант SF0140007s11), Научным фондом Эстонии (грант № 8870).

Литература

1. Косьян Р.Д., Пыхов Н.В. Гидрогенные перемещения осадков в береговой зоне моря. М.: Наука, 1991. 280 с.
2. Диденкулова И.И., Заубо Н., Пелиновский Е.Н. Отражение длинных волн от «безотражательного» донного профиля // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2008. № 4. С.102–108.
3. Didenkulova I., Pelinovsky E. Traveling water waves along a quartic bottom profile // Proc. of the Estonian Academy of Sciences. 2010. V.59, N 2. P.166–171.
4. Parnell K.E., Delpeche N., Didenkulova I., Dolphin T., Erm A., Kask A., Kelpšaitė L., Kurennoy D., Quak E., Räämet A., Soomere T., Terentjeva A., Torsvik T., Zaitseva-Pärmaste I. Far-field vessel wakes in Tallinn Bay // Estonian Journal of Engineering. 2008. V.14, N 4. P.273–302.
5. Soomere T., Parnell K.E., Didenkulova I. Implications of fast ferry wakes for semi-sheltered beaches: a case study at Aegna Island, Baltic Sea // J. of Coastal Research. 2009. V.56. P.128–132.
6. Soomere T., Kask A., Kask J., Neran R. Transport and distribution of bottom sediments at Piritä Beach // Estonian Journal of Earth Sciences. 2007. V.56, N 4. P.233–254.
7. Soomere T. Wind wave statistics in Tallinn Bay // Boreal Env. Res. 2005. V.10. P.103–118.
8. Wang P., Ebersole B.A., Smith E.R. Beach-profile evolution under spilling and plunging breakers // J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2003. V.129. P.41–46.
9. Roberts T.M., Wang P., Kraus N.C. Limits of wave runup and corresponding beach-profile change from large-scale laboratory data // J. of Coastal Research, 2010. V.26. P.184–198.
10. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, 2001. 272 с.
11. Romańczyk W., Boczar-Karakiewicz B., Bona J.L. Extended equilibrium beach profiles // Coastal Engineering, 2005. V.52, N 9. P.727–744.
12. Are F., Reimnitz E. The A and m Coefficients in the Bruun/Dean Equilibrium Profile Equation Seen from the Arctic // J. of Coastal Research, 2008. V.24, N 2B. P.243–249.
13. Dean R.G., Dalrymple R.A. Coastal processes with engineering applications. Cambridge University Press. 2002. 475 p.
14. Steetzel H.J. Cross-shore transport during storm surges, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands Publ. N 476. 1993.
15. Kit E., Pelinovsky E. Dynamical models for cross-shore transport and equilibrium bottom profiles // J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1998. V.124, N 3. P.138–146.
16. Kobayashi N. Analytical solution for dune erosion by storms // J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1987. V.113, N 4. P.401–418.
17. Dai Z.-J., Du J.-Z., Li C.-C., Chen Z.-S. The configuration of equilibrium beach profile in South China // Geomorphology. 2007. V.86, N 3–4. P.441–454.
18. Soomere T. Wind wave statistics in Tallinn Bay // Boreal Environment Research. 2005. V.10. P.103–118.
19. Didenkulova I., Parnell K.E., Soomere T., Pelinovsky E., Kurennoy D. Shoaling and runup of long waves induced by high-speed ferries in Tallinn Bay // J. of Coastal Research. 2009. V.56. P.491–495.
20. Kurennoy D., Soomere T., Parnell K.E. Variability in the properties of wakes generated by high-speed ferries // J. of Coastal Research. 2009. V.56. P.519–523.
21. Torsvik T., Didenkulova I., Soomere T., Parnell K.E. Variability in spatial patterns of long nonlinear waves from fast ferries in Tallinn Bay // Nonlinear Processes in Geophysics. 2009. V.16, N 2. P.351–363.

Статья поступила в редакцию 22.03.2011 г.

