



Издается с 2008 г.

Тематический выпуск

СОДЕРЖАНИЕ

Волны-убийцы в океане (<i>Предисловие</i>)	4
Статьи	
<i>Анализ наблюдаемых данных</i>	
<i>Бухановский А.В., Лопатухин Л.И.</i> Экстремальные и необычные ветровые волны: измерения, расчет, прогноз	5
<i>Григорьева В.Г., Гулев С.К.</i> Аномальные ветровые волны в Мировом океане по данным попутных судовых наблюдений	18
<i>Доценко С.Ф., Иванов В.А., Побережный Ю.А.</i> Волны-убийцы в северо-западной части Черного моря: анализ волнографических данных, связь с метеорологическими условиями в зимний период 2000–2001 гг.	27
<i>Зайцев А.И., Малащенко А.Е., Пелиновский Е.Н.</i> Аномально большие волны вблизи южного побережья о.Сахалин	35
<i>Соомере Т., Куркина О.</i> Статистика экстремального волнения в юго-западной части Балтийского моря	43
<i>Численное моделирование больших волн</i>	
<i>Талипова Т.Г.</i> Механизмы образования внутренних «волн-убийц»	58
Научные сообщения	
<i>Булгаков К.Ю., Молчанов М.С.</i> Испытание схемы турбулентного перемешивания, основанной на теории подобия, в модели Балтийского моря	71
<i>Родионов М.А.</i> Моделирование лидарных изображений внутренних волн по результатам измерений гидрооптических и гидрофизических параметров в северных морях	80
Из истории науки	
<i>Карпеев Э.П.</i> М.В. Ломоносов и флот (к 300-летию со дня рождения).....	88
Конференции	
Хроника	
Тематический указатель 2011 г.	102
Авторский указатель за 2011 г.	104
Правила представления материалов в редакцию.....	105

CONTENTS

Articles

The Analysis of the Observable Data

- Boukhanovsky A.V., Lopatoukhin L.I.* Extreme and Freak Wind Waves: Measurements, Calculation, Forecast 5

Wind waves are considered. Differences between extreme and freak waves are discussed. It is specified, that not any big wave (surge) is unusual. Such wave should have a set of certain properties and therefore can be considered as a multidimensional random variable. Generalization of the field measurements data has allowed to estimate a freak wave appearance probability. Abrupt change of wave spectral structure is one of the approaches to forecast the freak wave appearance.

Key words: extreme and freak wind waves, probability, hindcasting and forecasting, climatic wave spectra.

- Grigorieva V., Gulev S.* Estimation and Classification of the Extreme Wind Waves on the Basis of Visual Data 18

For the first time the extreme waves in the ocean are studied using the most complete database of visual wave observations, assimilated in the ICOADS (International Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set) archive. A new methodology for the data quality control and criteria for the classification of extreme wind waves and swell was established. All visual observations reporting the wind wave height of 15 meters or more likely indicate either actual severe storms (about 20% of the total number of cases), or observational artifacts. A very small number of reported extreme swells can be potentially attributed to the freak waves.

Key words: global wind waves, visual observations, extreme waves.

- Dotsenko S.F., Ivanov V.A., Poberezhny Yu.A.* Freak Waves in North-Western Part of the Black Sea: Analysis of Records, their Relation with Meteorological Conditions in Winter 2000–2001 27

Analysis of the wind wave measurements in the north-western Black Sea from December 2000 to January 2001 allowed to select 67 cases of freak waves in a form of single waves and as a member of wave packets of non-freak waves. The waves have an appreciable asymmetry: their front slopes are generally steeper than the back slopes, and the previous and the following freak wave wave troughs vary in depth and width. Involvement of meteorological data has allowed to analyze the feasible relations between the formation of abnormal waves and wind flow. Two characteristic types of situations are found. In the first, the birth of freak waves is accompanied by substantial changes in the wind speed direction, in the second situation its formation is preceded by the wind of almost constant direction.

Key words: surface gravity waves, wind waves, freak waves, data of field measurements, relation to meteorological conditions, the Black Sea.

- Zaitsev A., Malashenko A., Pelinovsky E.* Abnormal Big Waves Near the Southern Coast of Sakhalin Island 35

Results of the analysis of long time series of sea level for June – September, 2009 near the Aniva cape (Sakhalin), recorded by pressure bottom station placed on depth of 12 m are given. There are 394 abnormal big waves, waves satisfying to freak wave amplitude criterion (the wave height exceeds the significant height more then twice) recorded. The amplification during six events exceeds 2.5 times. The cumulative frequency of the abnormal wave appearance is described by the Poisson distribution as follows from the theory of extreme statistics. Freak waves occurred on the average twice a day which is in good comparison with the Raleigh prediction for narrow-band Gaussian wave field.

Key words: wind waves, freak waves, field measurements data, the Okhotsk Sea, Sakhalin.

<i>Soomere T., Kurkina O. Statistics of Extreme Wave Conditions in the South-Western Baltic Sea</i>	43
---	----

The properties of extreme wave storms in the Darss Sill area, SW Baltic Sea, are analysed based on waverider data for 1991–2010 and long-term numerical simulations. The long-term significant wave height is $H_S \sim 0.7$ m and the most frequent wave periods 2–4 s. The largest measured H_S is 4.46 m. The typical measured and modelled wave periods differ by up to 2 s. The annual maximum H_S has notched behaviour, with an increase for 1958–1990 and since 1993, and a drastic decrease in 1991–1992. The measured annual average and maximum H_S have changed insignificantly in 1991–2010 but the threshold for the top 1% of waves has considerably decreased.

Key words: wind waves, freak waves, mathematical modeling, probability distribution function.

Numerical Modeling of the Big Waves

<i>Talipova T.G. Mechanisms of the Internal Rogue Wave Formation</i>	58
--	----

A review of the physical mechanisms of internal freak wave formation in the oceans is presented. The theoretical models are based on the modified Gardner equation obtained within the asymptotic theory. The following mechanisms are analyzed: nonlinear dispersive focusing, modulation instability of nonlinear internal waves, and wave transformation at the so-called turning points.

Key words: intensive nonlinear internal waves, dispersive focusing, modulation instability, turning points, ocean shelves.

Scientific Messages

<i>Bulgakov K.Yu., Molchanov M.S. Testing of the Turbulent Mixing Scheme Based on Similarity Theory in the Baltic Sea Model</i>	71
---	----

Ocean turbulent mixing scheme based on similarity theory is considered. This scheme's been modified for including in 3-D ocean circulation model. Experiments have been made with the Baltic Sea model in which above mentioned scheme and scheme based on kinetic turbulent energy equation were used. It's shown that simulation of temperature and salinity vertical distribution were improved.

Key words: turbulent mixing, convective mixing, ocean circulation model.

<i>Rodionov M.A. Simulation of Lidar Images of Internal Waves Based on the Data of Measured Hydrooptical and Hydrophysical Parameters in the Northern Seas</i>	80
--	----

The lidar images of internal waves (the lidar echo signal as a function of lidar horizontal coordinates, the depth from which the signal arrives, and the parameters of internal waves) were simulate on the basis of field measurements of depth distributions of the hydrophysical and hydrooptical properties in the White, Barents and Kara Seas. It was shown that images of internal waves, depending on the depth distribution of hydrophysical and hydrooptical parameters and their combination, have rather complex and diverse structure.

Key words: lidar, internal waves, hydrooptics, hydrophysical parameters.

Волны-убийцы в океане

Тематика исследований волн-убийц в океане (Freak or Rogue Waves) сейчас весьма популярна в фундаментальных и инженерных науках, связанных с изучением морей и океанов. По ней проводятся регулярные симпозиумы (число секций по аномальным волнам на различных конференциях достигает не менее пяти ежегодно), публикуются труды конференций, специальные выпуски журналов, обзорные статьи; недавно вышла книга (Kharif C., Pelinovsky E., Slunyaev A. *Rogue Waves in the Ocean*. Springer, 2009). В то же время русскоязычная литература по данной тематике представлена только статьями в журналах совершенно разной направленности, за исключением небольшой книги (Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. *Волны-убийцы: факты, теории и моделирование*. Н.Новгород, 2004). В результате читателю трудно представить себе состояние изученности данной проблемы. Именно поэтому назрела необходимость в публикации на русском языке специального тома, отражающего современное состояние проблемы аномально больших волн в океане, за которыми закрепились короткие и емкие слова – «волны-убийцы». В этой связи представляется целесообразным издание специального номера журнала «Фундаментальная и прикладная гидрофизика», посвященного современному состоянию проблемы описания волн-убийц.

Е.Н. Пелиновский, А.В. Слюняев

Научные сообщения

УДК 551.465.41

© К.Ю. Булгаков¹, М.С. Молчанов², 2011

¹Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им.П.П. Ширшова РАН

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург
bulgakov.kirill@gmail.ru

ИСПЫТАНИЕ СХЕМЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ, ОСНОВАННОЙ НА ТЕОРИИ ПОДОБИЯ, В МОДЕЛИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Рассмотрена схема турбулентного перемешивания в океане, основанная на теории подобия. Приведена ее модификация для использования в трехмерных моделях циркуляции океана. Проведены климатические расчеты с моделью Балтийского моря, в которой применялась как вышеупомянутая схема, так и схема, построенная на уравнении кинетической энергии турбулентности. Показано, что применение схемы, основанной на теории подобия, позволило в целом улучшить воспроизведение вертикального распределения температуры и солёности.

Ключевые слова: турбулентное перемешивание, конвективное перемешивание, модель циркуляции океана.

За последние два десятилетия было достигнуто значительное улучшение качества воспроизведения циркуляции океана с помощью математических моделей. В большей степени это было обусловлено развитием вычислительной техники и активным применением параллельных вычислений, что позволило использовать высокое разрешение, сопоставимое с масштабами большинства процессов, определяющих гидрологический режим. Тем не менее далеко не все проблемы могут быть решены с увеличением разрешения. Одна из этих проблем – воспроизведение вертикального турбулентного обмена в океане, для описания которого в настоящее время не существует единого подхода (подобного теории подобия Монина–Обухова для атмосферного приземного слоя). Если в приповерхностном квазиоднородном слое океана градиенты плотности малы, вследствие чего там наблюдается развитая турбулентность, что позволяет применять стандартные методы ее описания, то в термоклине турбулентность в классическом смысле практически отсутствует. В сильностратифицированной среде турбулентность, генерируемая сдвигом скорости и обрушением волн, быстро подавляется. Перемешивание осуществляется в перемежающемся режиме, возникающем в результате локальной динамической неустойчивости. Между тем даже в этом случае турбулентное перемешивание остается значительно интенсивнее молекулярной диффузии. Поэтому диффузия тепла и соли через термоклин оказывает решающее влияние на эволюцию верхнего слоя океана. Механизмы турбулентного обмена в термоклине изучены недостаточно. Однако основные процессы, влияющие на перемешивание в стратифицированной среде, более или менее известны (см. [1–5]): разрушение внутренних волн; локальная динамическая неустойчивость, связанная со сдвигом скорости; двойная диффузия.

Полное математическое описание этих процессов пока не дано. Помимо этого, их характерные масштабы (1 см : 1 м) не только несопоставимы с горизонтальным разрешением современных моделей (1–10 км), но и меньше вертикального (1–10 м). Поэтому описание турбулентности, за редким исключением, основано на так называемой параметризации. Термин «параметризация» можно определить как математический метод описания мелкомасштабных (подсеточных) процессов в терминах крупномасштабных переменных.

Обзор многих применяемых в настоящее время схем вертикального перемешивания дан в работе [6], где показано, что каждая из схем имеет свои недостатки, так что выбор оптимального алгоритма для океанской модели остается делом вкуса. В указанной работе также предложена модификация метода, основанного на теории подобия, что и в работе [7].

Непоследним обстоятельством, влияющим на выбор конкретной модели, являются ее экономичность, удобство и хорошая согласованность с используемой крупномасштабной моделью.

Схема, основанная на теории подобия. Основная идея теории подобия для верхнего слоя океана была сформулирована при оценке временных масштабов инерционности поля плотности и динамических полей (таких, как энергии турбулентности, импульса). Было показано, что динамическое приспособление верхнего слоя океана к поверхностному возбуждению происходит по крайней мере на 2–3 порядка быстрее, чем приспособление поля плотности. Поэтому характеристики динамических полей, осредненные за несколько часов, могут быть описаны в терминах внешнего динамического воздействия, тогда как благодаря большой плотности и теплоемкости воды внешний поток массы не может быть определяющим, а вертикальный поток плотности постоянным по глубине. Отказ от этого предположения не приводит к противоречию с теорией подобия, но заставляет вводить интегральный параметр стратификации, основанный на вертикальном профиле плотности, а не на внешнем потоке массы. При этом оказывается, что динамическое состояние на любой глубине в верхнем слое океана является функцией поверхностного возбуждения и интегральных характеристик стратификации во всем вышележащем слое. Эта простая концепция, предложенная в [7], была дополнена в работе [6] рядом уточнений, повышающих согласование с данными наблюдений.

Коэффициент турбулентности в [6] представляется как сумма двух составляющих – $k = k_w + k_u$, где k_w определяет перемешивание, генерируемое сдвигом скорости течения и зависящее также от стратификации, вводимой интегральным параметром St :

$$k_w = \left(\kappa (z + z_0)^2 \right) \frac{\partial V}{\partial z} (1 + \alpha St)^{-\beta},$$

$$\begin{cases} St = \frac{g}{\rho_0 v_*^2} \int_{z(\min(\rho))}^H (\rho(z) - \min(\rho)) dz, & z \geq z(\min(\rho)) \\ St = 0, & z < z(\min(\rho)) \end{cases}; \quad (1)$$

ρ – потенциальная плотность; κ – постоянная Кармана; α , β , v_* – константы. Параметр β принимает различные значения (β_s , β_u) для устойчивой и неустойчивой стратификации (соответственно). В формуле (1) z_0 – параметр шероховатости, который в данном случае имеет смысл глубины перемешивания, создаваемого разрушающимися волнами.

Сравнение с экспериментальными данными показало, что схема наиболее чувствительна к параметрам α и β , а параметр v_* может быть фиксирован (в дальнейшем при-

мом его равным 0.01). Чтобы рассчитать k_u (перемешивание за счет конвекции), находим минимальную глубину, на которой выполняется следующее условие

$$\frac{1}{z} \int_z^0 \rho(z) dz \geq \rho(z). \quad (2)$$

Эта глубина считается глубиной неустойчивого слоя z_{mix} , а интеграл

$$\rho_M = \frac{1}{z_{\text{mix}}} \int_0^{z_{\text{mix}}} \rho(z) dz \quad (3)$$

дает плотность неустойчивого слоя. Вводится функция неустойчивости, рассчитываемая следующим образом:

$$\begin{cases} Ut = \frac{g}{\rho_0} \int_0^z (\rho(z) - \rho_M) dz, & z \leq z_{\text{mix}}; \\ Ut = 0, & z > z_{\text{mix}} \end{cases} \quad (4)$$

далее k_u находится с помощью функции Ut :

$$k_u = \gamma z_{\text{mix}} \sqrt{Ut}, \quad (5)$$

где γ – постоянная.

Коэффициент диффузии импульса (k_m) рассчитывается с помощью аппроксимации числа Прандтля – $Pr = k_m / k$:

$$\lg Pr = \begin{cases} -0.67 + 0.138P, & P < 0.6 \\ 0.364P + 0.165P^2 - 0.082P^3 - 0.077P^4, & 0.6 \leq P \leq 0.8 \\ 0.079 + 0.301P^2, & P > 0.8 \end{cases} \quad (6)$$

$$P = \begin{cases} \lg(1 + St), & St \geq 0 \\ P = -\lg(1 + Ut), & Ut > 0 \end{cases}$$

Данная схема была применена для расчета локальной эволюции верхнего слоя океана по данным автоматических станций. Результаты этих экспериментов ([6, 7]) показали, что вышеприведенный алгоритм воссоздает процессы турбулентного перемешивания в пограничном слое океана по крайней мере не хуже, чем обычно применяемые современные параметризации. Преимуществом данного подхода, так же как и теории Мони́на–Обухова, являются отказ от каких-либо спекуляций о природе турбулентности и переход на установление необходимых закономерностей на основе экспериментальных данных.

В некоторых регионах Мирового океана возможен сильный горизонтальный перенос массы на отдельных глубинах, вследствие чего неустойчивость возникает не на поверхности, а внутри столба воды. Поэтому перед включением в трехмерную модель в схему было необходимо включить этот эффект. В результате был изменен способ расчета k_u . В новом варианте предполагается возможность существования в столбе воды нескольких неустойчивых слоев. Их поиск осуществляется следующим образом: от поверхности воды (верхняя граница возможного неустойчивого слоя zb) находится минимальная глубина, удовлетворяющая условию, аналогичному (2):

$$\frac{1}{z} \int_{zb}^z \rho(z) dz \geq \rho(z). \quad (7)$$

Точка, в которой (7) выполняется, считается нижней границей неустойчивого слоя; для него находятся средняя плотность, функция неустойчивости и k_u :

$$\rho_M = \frac{1}{z - zb} \int_{zb}^{z_{\text{mix}}} \rho(z) dz, \quad (8)$$

$$Ut = \frac{g}{\rho_0} \int_{zb}^z (\rho(z) - \rho_M) dz, \quad (9)$$

$$k_u = \gamma(z - zb) \sqrt{Ut}. \quad (10)$$

Найденная z принимается также верхней границей следующего неустойчивого слоя (т.е. zb), и вся процедура поиска нижней границы, ρ_M , Ut , k_u , уже для нового слоя продолжается дальше.

В случае N -устойчивых уровней получается, что, согласно алгоритму (7)–(10), (формально!) будет существовать N неустойчивых слоев, причем плотность ρ_M каждого из них равна непосредственно самой плотности уровня. Тогда на каждом уровне $Ut = 0$ и $k_u = 0$. Границы неустойчивых слоев совпадают с границами уровней.

Можно показать, что (7)–(10) являются обобщением (2)–(5). В случае если поток массы поступает только через верхнюю границу (т.е. неустойчивость образуется на поверхности), оба варианта дадут одинаковые результаты.

Эксперименты с моделью Балтийского моря. С целью дальнейшего испытания схема была внедрена в совместную модель циркуляции водных масс и льда в Балтийском море [8–10]. В основе ее гидрологического блока лежит полная система нелинейных уравнений гидродинамики океана в сферических координатах в приближениях гидростатики и Буссинеска. Основные прогностические переменные: трехмерный вектор скорости, потенциальная температура, соленость, отклонения уровня моря от невозмущенной поверхности. Блок циркуляции льда основан на нелинейных уравнениях модели вязко-пластичной реологии Хиблера [11–13], описывающих динамику и термодинамику снежно-ледяного покрова. Прогностические переменные: горизонтальный вектор скорости морского льда, его толщина и концентрация.

Уравнения модели аппроксимировались на B -сетке с горизонтальным шагом 5 миль. По вертикали использовалась z -система координат с 35-ю уровнями по вертикали. В слое от 0 до 15 м $dz = 3$ м, от 15 до 100 м $dz = 5$ м, далее $dz = 10$ м.

Была проведена серия из двух экспериментов. В первом (в дальнейшем тп-эксперимент) использовалась вышеописанная схема, которая была настроена следующим образом: $\alpha = 1.1$, $\beta_s = 1.1$, $\beta_u = 2.7$, $\gamma = 50$. Во втором (bl -эксперимент) применялся изначальный вариант модели, где расчет k осуществлялся алгоритмом на основе уравнения кинетической энергии турбулентности (b):

$$\frac{\partial b}{\partial t} = k_m \left(\left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right) - \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial b}{\partial z} + \frac{kg}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z} - \varepsilon, \quad (11)$$

$$\varepsilon = C_2 b^{3/2} l_e^{-1}, \quad k = C_1 l \sqrt{b}, \quad k_m = C_3 l \sqrt{b}, \quad (12)$$

где l , l_e – масштабы турбулентности, для определения которых применялся модифицированный параболический профиль:

$$l = \kappa \left(1 - C_4 \frac{z(H-z)}{H^2} \right) \frac{z(H-z)}{H}, \quad (13)$$

где $l_\varepsilon = l$, H – глубина.

Коэффициент C_1 рассчитывался с помощью следующей функции устойчивости:

$$C_1 = \frac{C_5}{(1 - C_6 \cdot Ri)}, \quad (14)$$

где Ri – число Ричардсона. Остальные подгоночные коэффициенты имели следующие значения: $C_1 = 1$, $C_2 = 0.09$, $C_3 = 1$, $C_4 = 4$, $C_5 = 2$, $C_6 = 3$.

Оба эксперимента проводились в течение 30 лет, с 1970 по 2000 г. В качестве атмосферного воздействия использовались поля, полученные метеорологической моделью HIRLAM [14]. Начальные и граничные условия были взяты из базы данных BED Стокгольмского университета [15]. Результаты расчетов сравнивались с данными, полученными за вышеуказанный период на 16 станциях, где измерялись профили температуры и солености [16]. Область интегрирования и расположение станций с их номерами показаны на рис. 1, их названия и координаты приведены в табл. 1.

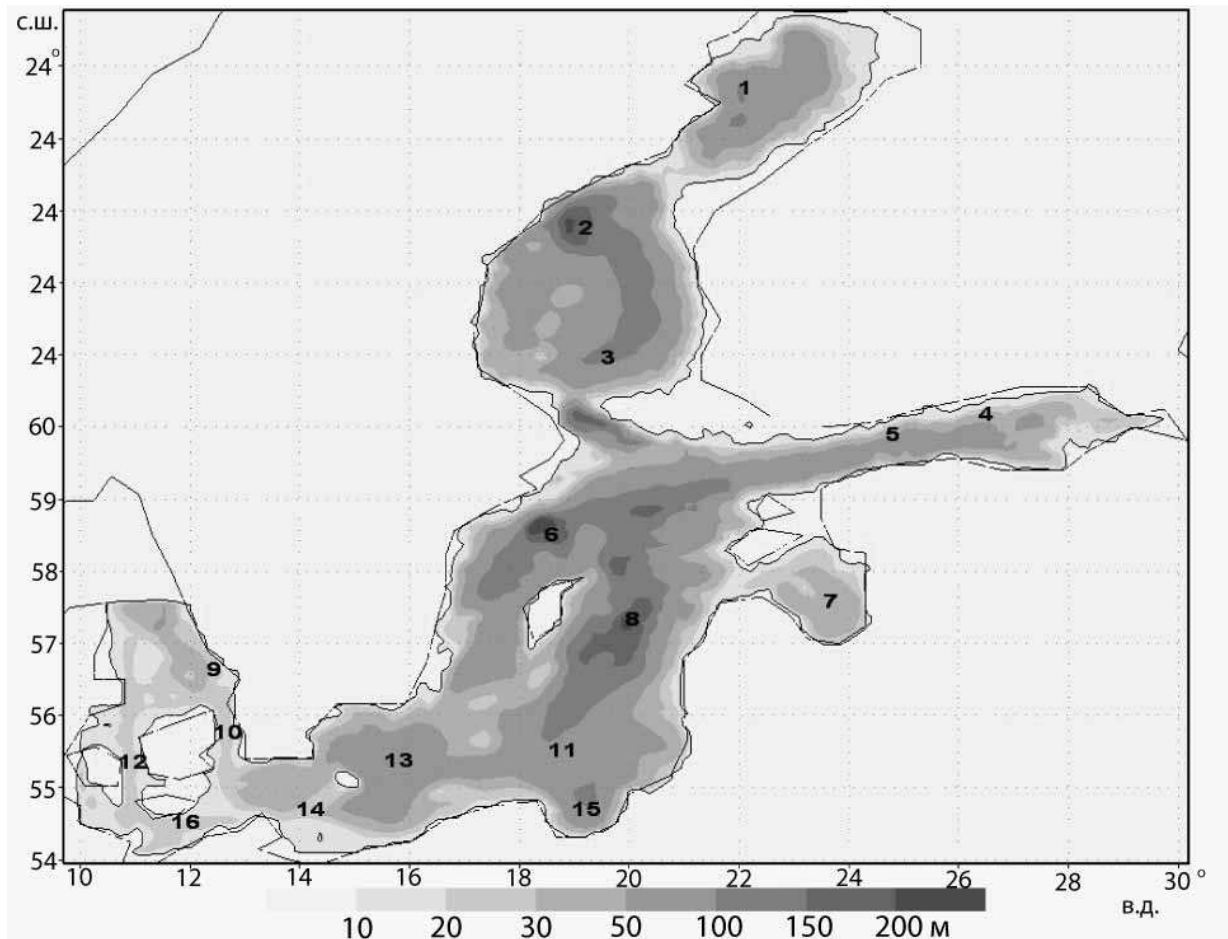


Рис. 1. Рельеф дна области интегрирования и месторасположение станций.

Названия и координаты станций

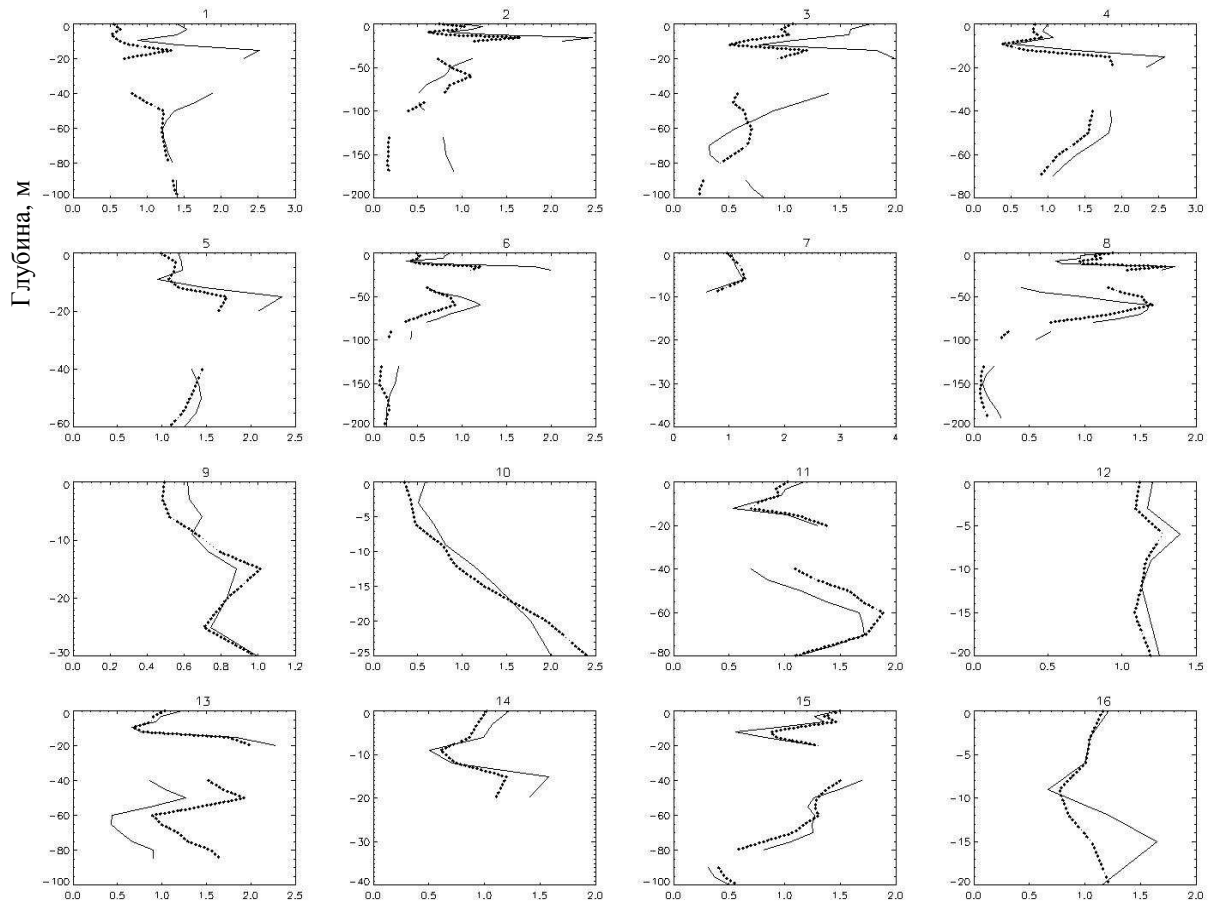
Номер станции	Название станции	Широта	Долгота	Номер станции	Название станции	Широта	Долгота
1	Bothnian Bay	64.44	22.04	9	Anholt E	56.20	12.07
2	Bothnian Sea US3	62.45	19.12	10	Landskrona W	55.52	12.45
3	Bothnian Sea US3	61.03	19.34	11	Se Gotland basin	55.33	18.24
4	Gulf of Finland F1	60.08	26.20	12	Great Belt	55.31	10.52
5	Gulf of Finland LL7	59.51	24.04	13	Bornholm deep BY5	55.15	15.59
6	Landsort Deep BY31	58.35	18.14	14	Arkona BY2	55.00	14.05
7	Gulf of Riga	57.35	23.35	15	Gdansk Deep	54.50	19.19
8	Gotland deep BY15	57.20	20.03	16	Fehmarn Belt	54.34	11.20

Из рассчитанных моделью полей был получен климатический сезонный ход переменных в точках с координатами станций на соответствующих данным наблюдений глубинах, такое же осреднение по времени было проведено с измерениями.

На рис. 2 представлены профили среднеквадратической ошибки сезонного хода температуры. Анализируя результаты, можно отметить следующее: в двух точках (ст.4, 12) ошибка тп-эксперимента по всем глубинам меньше или равна ошибке *bl*-эксперимента; станций, на которых бы наблюдалась обратная ситуация, нет. В шести случаях (ст.1–3, 6, 10, 14) тп-эксперимент показал значительно лучший результат, чем *bl*-эксперимент несмотря на то что ошибка последнего на некоторых глубинах меньше. Значительное увеличение ошибки при использовании схемы на основе теории подобия произошло для точек 11 и 13. При этом стоит отметить, что на поверхности тп-эксперимент в обоих случаях показывает меньшее расхождение с данными наблюдений, чем *bl*-эксперимент. Максимальная ошибка у тп-эксперимента составила 2.4 градуса (ст.10, глубина 25 м), у *bl*-эксперимента – 2.6 градуса (ст.4, глубина 15 м).

Все это, а также данные в табл. 2 позволяют говорить о том, что тп-эксперимент в целом лучше воспроизвел температурный режим Балтийского моря, чем *bl*-эксперимент. Кроме этого, необходимо добавить, что тп-эксперимент практически на всех станциях показал уменьшение ошибки в воссоздании температуры поверхности. Данная характеристика является определяющей при расчете потоков тепла и влаги в атмосферу, а ее качественное воспроизведение имеет особую важность при возможных экспериментах с совместной моделью атмосферы и океана.

Анализируя графики на рис. 3, сложно сделать однозначный вывод, какой из экспериментов показал лучшее согласование с данными наблюдений по солености. Максимальные ошибки обоих экспериментов примерно равны (ст.10, глубина 15 м). Поэтому оценим качество воспроизведения солености по суммарной среднеквадратической ошибке, приведенной в табл. 3.



Ошибка, градусы

Рис. 2. Среднеквадратическая ошибка воспроизведения климатического сезонного хода температуры.

Сплошная линия – *bl*-эксперимент, пунктирная – *tp*-эксперимент.

Таблица 2

Суммарная по всем глубинам среднеквадратическая ошибка воспроизведения температуры, градусы

Номер станции	<i>bl</i> -эксперимент	<i>tp</i> -эксперимент	Номер станции	<i>bl</i> -эксперимент	<i>tp</i> -эксперимент
1	1.5	1.0	9	0.8	0.7
2	1.0	0.7	10	1.1	1.1
3	1.0	0.7	11	1.1	1.3
4	1.5	1.2	12	1.2	1.2
5	1.4	1.3	13	1.0	1.3
6	0.7	0.5	14	1.2	1.0
7	1.5	1.3	15	1.1	1.1
8	0.8	0.8	16	1.1	1.0

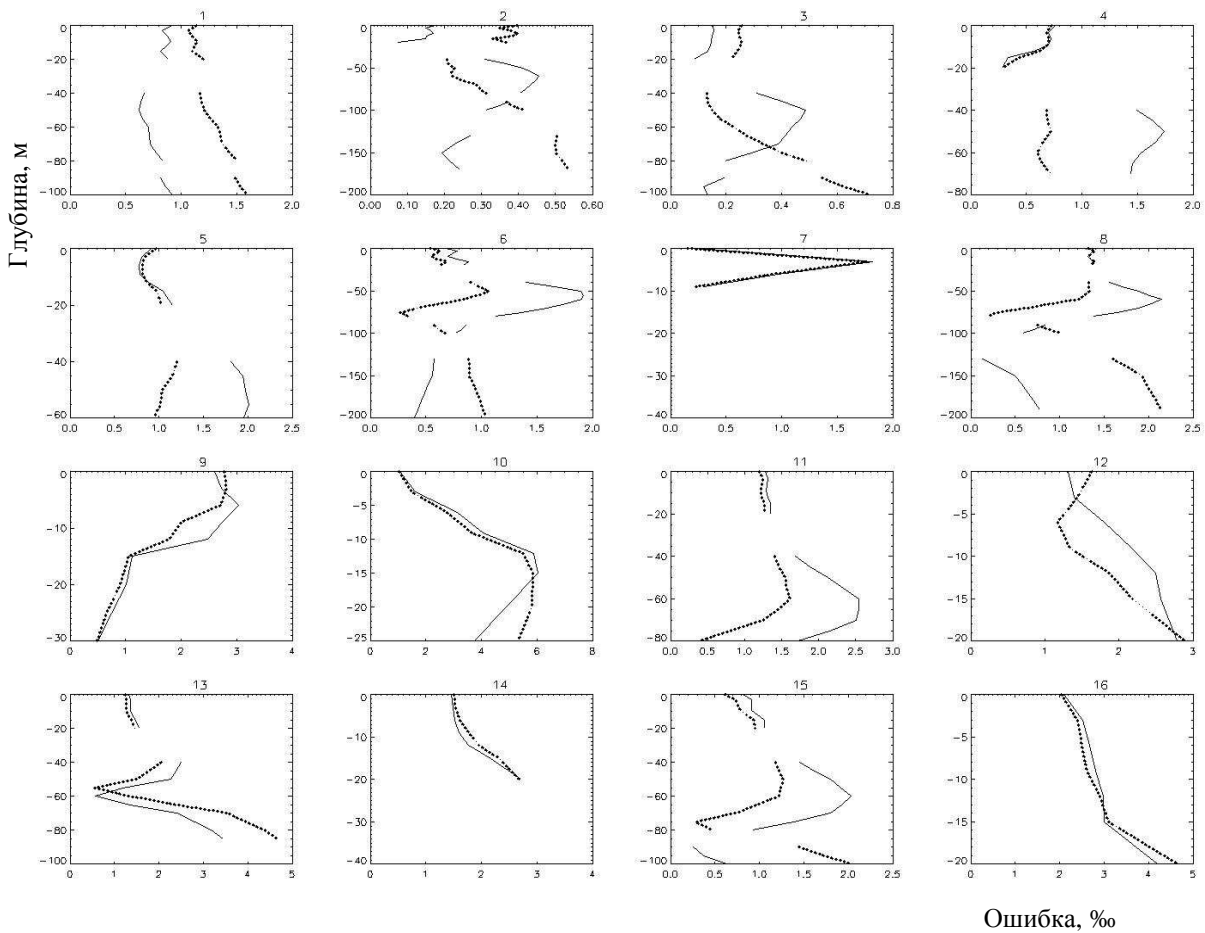


Рис. 3. Среднеквадратическая ошибка воспроизведения климатического сезонного хода солености.

Сплошная линия – *bl*-эксперимент, пунктирная – *тп*-эксперимент.

Таблица 3

Суммарная по всем глубинам среднеквадратическая ошибка воспроизведения солености, ‰

Номер станции	<i>bl</i> -эксперимент	<i>тп</i> -эксперимент	Номер станции	<i>bl</i> -эксперимент	<i>тп</i> -эксперимент
1	0.8	1.3	9	1.9	1.7
2	0.3	0.4	10	3.8	3.9
3	0.2	0.3	11	1.8	1.3
4	1.1	0.6	12	2.1	1.8
5	1.4	1.0	13	1.9	2.1
6	1.0	0.7	14	1.9	1.9
7	0.7	0.5	15	1.2	1.0
8	1.2	1.3	16	2.9	2.9

Как видно из табл. 3, в восьми случаях ошибка *тп*-эксперимента меньше ошибки *bl*-эксперимента, в шести случаях больше, и в двух случаях они равны. Можно сказать, что в целом, *тп*-эксперимент воспроизвел поля солености ближе к данным наблюдений, чем *bl*-эксперимент. Улучшение расчета данной характеристики незначительно, что связано с особенностями циркуляции в Балтийском море. Основными процессами, определяю-

щими эволюцию полей солёности, являются сток рек и адвекция из Северного моря. Поэтому замена алгоритма расчета турбулентного перемешивания не могла привести к существенному уменьшению ошибки.

Результаты эксперимента, представленные в работе, показали, что схема, основанная на теории подобия, способна качественно воспроизводить турбулентные процессы в моделях циркуляции океана. При использовании этой параметризации удалось улучшить расчет гидрологического режима Балтийского моря. При этом стоит отметить некоторую специфику данного водоема, которая связана с его малой глубиной, из-за чего поверхностный и придонный пограничные слои могут объединяться. Такой режим достаточно сложен для воспроизведения, и можно сказать, что предложенная схема воссоздала его лучше, чем широко распространенная *bl*-схема.

Алгоритмы турбулентного перемешивания крайне чувствительны к настройкам, которые выражаются в оптимальном подборе коэффициентов. Предложенная параметризация имеет сравнительно небольшое число подгоночных параметров, что делает ее достаточно удобной в использовании. В расчетах по этой схеме применяются основные гидрологические характеристики и не требуется введения дополнительных переменных, что необходимо при переходе, например на *be*-схему, которая помимо (11) использует прогностическое уравнение для скорости диссипации ϵ .

Все это позволяет рекомендовать данный метод при решении различных задач по океанским моделям.

Литература

1. Zilitinkevich S.S., Mironov D.V. Theoretical model of thermocline in a freshwater basin // J. Phys. Oceanogr. 1992. V.22. P.988–996.
2. Large, W.G., McWilliams J.C., Doney S.C. Oceanic vertical mixing: a review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization // Rev. of Geophys. 1994. V.32. P.363–403.
3. Garrett C. Processes in the surface layer of the ocean // Dyn. Atmos. Ocean. 1996. V.23. P.19–34.
4. Gregg, M.C. Diapycnal mixing in the thermocline: a review // J. Geophys. Res. 1987. V.92, P.5249–5286.
5. Каган Б.А., Софьина Е.В., Тимофеев А.А. Об индуцируемом внутренними приливными волнами диапикническом перемешивании в Северном Ледовитом океане // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т.46, № 2. С.246–254.
6. Булгаков К.Ю. Расчеты эволюции теории океана, основанные на теории подобия // Изв. РАН. Океанология. (в печати).
7. Chalikov D. Similarity theory and parameterization of mixing in the upper ocean // Environmental Fluid Mechanics. 2004. V.4. P.385–414.
8. Неелов И.А. Математическая модель синоптических вихрей в океане // Океанология, 1982. Т.22, № 6. С.875–885.
9. Neelov I.A., Eremina T.R., Isaev A.V., Ryabchenko V.A., Savchuk O.P., Vankevich R.E. A simulation of the Gulf of Finland ecosystem with 3-D model // Proc. Estonian Acad. Sci. Biol. Ecol. 2004. № 52, 3. P.346–359.
10. Myrberg K., Ryabchenko V., Isaev A. et al. Validation of three-dimensional hydrodynamic models of the Gulf of Finland // Boreal Env. Res. 2010. V.15. N 5. P.453–479.
11. Hibler III W.D. A dynamic thermodynamic sea ice model // J. Phys. Oceanogr. 1979. V.9. P.815–846.
12. Hibler III W.D., Bryan K. A diagnostic ice-ocean model // J. Phys. Oceanogr. 1987. V.17. P.987–1015.
13. Holland D.M., Myask L.A., Manak D.K. Sensitivity study of a dynamic thermodynamic sea ice model // J. Geophys. Research. 1993. V.98. P.2561–2586.
14. HIRLAM scientific documentation. System 5.2. 2002.
15. URL:<http://www.nest.su.se/bed/> (дата обращения: 17.06.2011).
16. Gustafson B.G., Rodriguz-Medina M. Validation data set compiled from Baltic Environmental Database (Ver.2, January 2011) // Technical Report. 2011. N 2.

Статья поступила в редакцию 03.11.2011 г.



ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ 2011 г.

	ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ГИДРОФИЗИКИ	<i>№ журнала</i>	<i>С.</i>
1.	Нелокальная гидродинамика и ее приложения. <i>Родионов А.А., Хантулева Т.А.</i>	3	22
ДИНАМИКА И ГИДРОДИНАМИКА МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ			
2.	Оценивание неизвестных статистических параметров гидродинамических потоков несжимаемой жидкости, создаваемых движущимся сторонним источником. <i>Клячкин В.И.</i>	1	4
3.	Об одном методе расчета гидродинамических характеристик крыла при нестационарном движении. <i>Романенко Е.В., Пушков С.Г.</i>	1	69
4.	Теоретическое и экспериментальное обоснование повышения мореходности быстроходных катеров на основе принципа нейтрализации волновых нагрузок. <i>Разумеев Ю.В., Юссеф М.Ю.</i>	1	81
5.	Применение метода статистических испытаний в задаче о подъеме груза с большой глубины в условиях нерегулярного волнения моря. <i>Сухоруков А.Л.</i>	2	79
ГИДРООПТИКА			
6.	Моделирование лидарных изображений внутренних волн по результатам измерений гидрооптических и гидрофизических параметров в северных морях. <i>Родионов М.А.</i>	4	80
ГИДРОАКУСТИКА			
7.	Цифровое формирование характеристики направленности гидроакустической антенны гидролокатора подводного робота во временной области. <i>Белов Б.П., Семенов Н.Н., Миронов И.В.</i>	1	32
8.	Апертурный синтез гидроакустических антенн – основа мобильных гидроакустических систем наблюдения. <i>Дашевский О.Ю., Нежевенко Е.С., Чулков В.Л.</i>	3	65
9.	Перспективы применения методов нелинейной акустики в технологиях гидроакустического поиска. <i>Тарасов С.П., Воронин В.А.</i>	3	78
10.	Проблемы и предварительные результаты испытания систем активного гашения низкочастотных сигналов в водной и воздушной среде. <i>Белозубцев Е.С., Кирюхин А.В., Кузнецов Г.Н., Михайлов С.Г., Пудовкин А.А., Смагин Д.А., Федоров В.А.</i>	3	79
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗАДАЧАХ ГИДРОФИЗИКИ			
11.	Компьютерные технологии корабельной гидромеханики: состояние и перспективы. <i>Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В., Якушенко Е.И.</i>	3	8
12.	Концепция и ключевые технологии подводного наблюдения в условиях сетцентрических войн. <i>Коваленко В.В., Корчак В.Ю., Чулков В.Л.</i>	3	49
13.	Некоторые результаты реализации подводных сетевых технологий в СибГУТИ. <i>Арсентьев В.Г., Криволапов Г.И.</i>	3	129
ОБЩАЯ ДИНАМИКА ОКЕАНА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОКЕАНА И АТМОСФЕРЫ			
14.	Моделирование поверхностного и внутреннего K_1 (деклинационных) приливов в Белом море. <i>Каган Б.А., Тимофеев А.А.</i>	2	4
15.	Исследование течений в верхнем слое Черного моря в диапазоне мезомасштабов. <i>Владимирова Э.М., Иванов В.Г., Иванов Д.В., Литвин А.Д., Скопин Н.А.</i>	2	19
16.	Методы обработки глубоководных термохалинных измерений. <i>Семёнов Е.В., Мортиков Е.В.</i>	2	45
17.	Особенности течений в восточной части Финского залива по результатам инструментальных измерений в июле 2010 г. <i>Зимин А.В., Солощук П.В., Исаев А.В.</i>	2	58
18.	Испытание схемы турбулентного перемешивания, основанной на теории подобия, в модели Балтийского моря. <i>Булгаков К.Ю., Молчанов М.С.</i>	4	71

	ВЕТРОВЫЕ, ДЛИННЫЕ НЕПРИЛИВНЫЕ И ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ	<i>№ журнала</i>	<i>С.</i>
19.	Программный комплекс для численного моделирования внутренних гравитационных волн в мировом океане. <i>Тюгин Д.Ю., Куркина О.Е., Куркин А.А.</i>	2	32
20.	Экстремальные и необычные ветровые волны: измерения, расчет, прогноз. <i>Бухановский А.В., Лопатухин Л.И.</i>	4	5
21.	Аномальные ветровые волны в Мировом океане по данным попутных судовых наблюдений. <i>Григорьева В.Г., Гулев С.К.</i>	4	18
22.	Волны-убийцы в северо-западной части черного моря: анализ волнографических данных, связь с метеорологическими условиями в зимний период 2000–2001 гг. <i>Доценко С.Ф., Иванов В.А., Побережный Ю.А.</i>	4	27
23.	Аномально большие волны вблизи южного побережья о.Сахалин. <i>Зайцев А.И., Малащенко А.Е., Пелиновский Е.Н.</i>	4	35
24.	Статистика экстремального волнения в юго-западной части Балтийского моря. <i>Соомере Т., Куркина О.</i>	4	43
25.	Механизмы образования внутренних «волн-убийц». <i>Талитова Т.Г.</i>	4	58
	ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОРСКИХ ВОЛН С БЕРЕГОМ И СООРУЖЕНИЯМИ		
26.	Изменчивость берегового профиля под совместным воздействием судовых и ветровых волн. <i>Диденкулова И., Вишка М., Куренной Д.</i>	2	66
	ПОДВОДНЫЕ АППАРАТЫ И МОРСКАЯ ТЕХНИКА		
27.	Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики. <i>Боженев Ю.А.</i>	1	47
28.	Мобильные подводные роботы в решении задач ВМФ: современные технологии и перспективы. <i>Кузьмицкий М.А., Гизитдинова М.Р.</i>	3	37
	МОРСКАЯ БИОМЕХАНИКА		
29.	Исследование акустического биосенсора дельфина и возможности построения его технического аналога. <i>Иванов М.П., Степанов Б.Г.</i>	3	108
30.	История, современное состояние и перспективы служебного использования китообразных в составе биотехнических систем двойного назначения. <i>Стародубцев Ю.Д., Надолишняя А.П.</i>	3	123
	Из истории науки		
31.	200 лет со дня рождения Вильяма Фруда. <i>Готман А.Ш.</i>	1	88
32.	М.В. Ломоносов и флот. <i>Карпеев Э.П.</i>	4	88
	Поздравления		
33.	Геннадия Степановича Малышкина с 75-летием	1	97
34.	Евгения Георгиевича Морозова	3	138
35.	Бориса Ароновича Барбанеля с 75-летием	3	139
	Хроника		
36.	65 лет Институту океанологии им.П.П. Ширшова РАН	1	99
37.	45 лет Санкт-Петербургскому филиалу Института океанологии им.П.П. Ширшова РАН	1	101
38.	60 лет Секции прикладных проблем при Президиуме РАН	3	4
39.	15 лет Научному совету по проблемам фундаментальной и прикладной гидрофизики Санкт-Петербургского научного центра РАН	4	100

Авторский указатель за 2011 гг.

Арсентьев В.Г. – № 3

Белов Б.П. – № 1

Белогубцев Е.С. – № 3

Боженев Ю.А. – № 1

Булгаков К.Ю. – № 4

Бухановский А.В. – № 4

Вишка М. – № 2

Владимирова Э.М. – № 2

Воронин В.А. – № 3

Гизитдинова М.Р. – № 3

Готман А.Ш. – № 1

Григорьева В.Г. – № 4

Гулев С.К. – № 4

Гурьев Ю.В. – № 3

Дашевский О.Ю. – № 3

Диденкулова И. – № 2

Доценко С.Ф. – № 4

Зайцев А.И. – № 4

Зимин А.В. – № 2

Иванов В.А. – № 4

Иванов В.Г. – № 2

Иванов Д.В. – № 2

Иванов М.П. – № 3

Исаев А.В. – № 2

Каган Б.А. – № 1

Карпеев Э.П. – № 4

Кирюхин А.В. – № 3

Клячкин В.И. – № 1

Коваленко В.В. – № 3

Корчак В.Ю. – № 3

Криволапов Г.И. – № 3

Кузнецов Г.Н. – № 3

Кузьмицкий М.А. – № 3

Куренной Д. – № 2

Куркин А.А. – № 2

Куркина О.Е. – № 2, 4

Литвин А.Д. – № 2

Лопатухин Л.И. – № 4

Малашенко А.Е. – № 4

Мионов И.В. – № 1

Михайлов С.Г. – № 3

Молчанов М.С. – № 4

Мортиков Е.В. – № 2

Надолишняя А.П. – № 3

Нежевенко Е.С. – № 3

Пелиновский Е.Н. – № 4

Побережный Ю.А. – № 4

Пудовкин А.А. – № 3

Пушков С.Г. – № 1

Разумеенко Ю.В. – № 1

Родионов А.А. – № 3

Родионов М.А. – № 4

Романенко Е.В. – № 1

Семёнов Е.В. – № 2

Семёнов Н.Н. – № 1

Скопин Н.А. – № 2

Смагин Д.А. – № 3

Солощук П.В. – № 2

Соомере Т. – № 4

Стародубцев Ю.Д. – № 3

Степанов Б.Г. – № 3

Сухоруков А.Л. – № 2

Талипова Т.Г. – № 4

Тарасов С.П. – № 3

Тимофеев А.А. – № 2

Ткаченко И.В. – № 3

Тюгин Д.Ю. – № 2

Федоров В.А. – № 3

Хантулева Т.А. – № 3

Чулков В.Л. – № 3

Юссеф М.Ю. – № 1

Якушенко Е.И. – № 3