



## СОДЕРЖАНИЕ

### Статьи

<i>Пелиновский Е.Н., Талипова Т.Г.</i> Безотражательное распространение волн в сильно неоднородных средах .....	4
<i>Чаликов Д.В.</i> Трансформация гармонических волн на глубокой воде .....	14
<i>Волков К.Н., Емельянов В.Н., Курова И.В.</i> Моделирование крупных вихрей в задачах гидрофизики и гидроакустики .....	22
<i>Карлин Л.Н., Рябченко В.А., Ванкевич Р.Е., Еремина Т.Р., Исаев А.В., Неелов И.А.</i> Испытание оперативной океанографической системы при прогнозе гидродинамических характеристик в Финском заливе Балтийского моря .....	39
<i>Никифоров С.Л., Попов В.А., Попов О.Е., Селезнев И.А.</i> Концепция создания единой базы геоакустических данных морского дна и технологии геоакустического моделирования .....	49
<i>Долин Л.С.</i> Лидарный метод измерения частотно-контрастной характеристики водных слоев .....	62
<i>Дашевский О.Ю., Нежевенко Е.С.</i> Методы апертурного синтеза гидроакустических антенн в пассивном режиме и их испытание на тестовых и реальных сигналах .....	72

### Конференции

XXII семинар «Струйные, отрывные и нестационарные течения» ( <i>Матвеев С.К., Усков В.Н.</i> )	86
--	----

### Из истории науки

Г.И. Марчук о физике атмосферы и океана .....	87
---	----

<b>Поздравляем!</b> .....	91
---------------------------	----

<b>Хроника</b> .....	94
----------------------	----

Правила представления материалов в редакцию.....	97
--	----

# CONTENTS

## Articles

<i>Pelinovsky E.N., Talipova T.G.</i> Non-reflective Wave Propagation in Strongly Inhomogeneous Media .....	4
---	---

It is well known that wave dispersion in inhomogeneous media leads to energy flux weakening on large distances. The more interesting cases are when inhomogeneity does not prevent wave propagation. This problem is studied here for internal waves in the ocean. Firstly, the penetration of internal waves into a deep ocean, stratified with density and current, is discussed, and it is shown that there is sufficient number of stratification profiles allowing non-reflected wave propagation into the ocean bulk. Further the internal wave propagation in two-layer stratified ocean of variable depth is investigated. The set of bottom profiles where the wave energy is not scattered, is also found.

**Key words:** non-reflected wave propagation, internal waves, non-reflected stratification and bottom profile.

<i>Chalikov D.V.</i> Harmonic Wave Deep Water Transformation .....	14
--	----

Precise numerical model of potential; surface waves is used to investigate the wave field evolution, initially assigned as a train of harmonic waves. It is shown that harmonic wave of any amplitude quickly generates the new modes, which undergo the complicated evolution. These modes can be referred neither to bound waves nor to free waves.

**Key words:** harmonic waves, instability, numerical modelling, Stokes waves.

<i>Volkov K., Emelyanov V., Kurova I.</i> Large-eddy Simulation in Hydrophysical and Hydroacoustic Problems .....	22
---	----

Applications of large-eddy simulation (LES) technique to the solution of problems of hydrophysics and hydroacoustics are considered. Solutions of some model problems (free mixing layer, free sub-sonic non-isothermal turbulent jet flowing out of circular nozzle into submerged space, and aero-optical effects in turbulent flows) are presented. The results obtained are compared to the data calculated with the numerical solution of the Reynolds-averaged Navier–Stokes equations and equations of the  $k$ – $\epsilon$  turbulence model, as well as to the available experimental data. The conclusions related to the perspectives of use of this technique in the problems of hydrophysics and hydroacoustics are made.

**Key words:** turbulence, large-eddy simulation, computational fluid dynamics, jet, mixing layer.

<i>Karlin L.N., Ryabchenko V.A., Vankevich R.E., Eremina T.R., Isaev A.V., Neelov I.A.</i> Testing an Operational Oceanographic System Testing by Means of Forecasting of Hydrodynamical Characteristics in the Gulf of Finland of the Baltic Sea .....	39
--	----

An operational system for forecasting of hydrodynamic characteristics in the Gulf of Finland GULFOOS (the Gulf of Finland Operational Oceanographic System) has been developed. The system is based on the hydrodynamic module of St. Petersburg Baltic Eutrophication Model. The system has been working in the operation mode from May 2009 using data from short-term weather forecasts for the North-West Region of Russia and forecasts of boundary conditions at the entrance in the Gulf of Finland. 48-hour model forecasts were compared to observed vertical temperature and salinity profiles and water level in Kronshtadt. The comparison showed that the model system simulates the observations quite well.

**Key words:** operational oceanography, hydrodynamic forecast, the Gulf of Finland.

<i>Nikiforov S.L., Popov V.A., Popov O.E., Seleznev I.A.</i> The Concept of Common Sea-Bottom Geoacoustic Database Creation and Geoacoustic Modeling Techniques .....	49
---	----

The authors consider some problems of supporting Russia sea activity in the important water areas of the World ocean, which cause creation of geoacoustic databases and the geoacoustic models of a sea-bottom required for all carriers of sonar means of underwater conditions imaging for operative forecasting of surveillance conditions in the navigation area and supporting efficient operation of adaptive hydroacoustic information processing algorithms. The concept of common water areas sea-bottom database creation and sea bottom geoacoustic modeling techniques are offered. Data about structure of a perspective integrated sonar system of sea-bottom monitoring and problems solved with its help are cited.

**Key words:** geoacoustic model, database, sonar means, acoustic characteristics, offshore area.

<i>Dolin L.S.</i> Lidar Methods for Measurement of Modulation Transfer Function of Water Layers .....	62
--	----

We develop algorithms for retrieval of the water layer modulation transfer function (MTF) from the radiance of backscattered laser pulse. A lidar diagram is developed for remote measuring of the MTF. The water optical properties are then retrieved from measured MTF. We also propose a laser imaging system for sea bottom observation which corrects image distortion caused by light scattering in the water.

**Key words:** lidar, imaging, water, modulation transfer function, image correction.

<i>Dashevskii O.Yu., Nejevenko E.S.</i> Passive Aperture Synthesis Techniques for Towed Arrays and Their Probation with Test and Real Signals .....	72
--	----

The paper contains a brief review of aperture synthesis techniques for towed arrays operating in passive mode. A technique is suggested that is able to process wideband signals, also from multiple sources (as opposed to known techniques). The results of experimental studies of aperture synthesis are presented, obtained both from computer-generated signals (SynApp program has been developed for this purpose), and from signals of a real underwater towed array.

**Key words:** hydroacoustics, aperture synthesis, beamforming, modeling.

УДК 551.465

© Л.Н. Карлин<sup>1</sup>, В.А. Рябченко<sup>2</sup>, Р.Е. Ванкевич<sup>3</sup>, Т.Р. Еремина<sup>1</sup>, А.В. Исаев<sup>1</sup>, И.А. Неелов<sup>4</sup><sup>1</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург<sup>2</sup>Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН<sup>3</sup>Санкт-Петербургский Центр экологической безопасности РАН<sup>4</sup>Арктический и антарктический НИИ, Санкт-Петербург

vladimir\_gyabchenko@vr5841.spb.edu

## ИСПЫТАНИЕ ОПЕРАТИВНОЙ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ПРОГНОЗЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ФИНСКОМ ЗАЛИВЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Разработана оперативная система прогноза гидродинамических характеристик Финского залива GULFOOS (the Gulf of Finland Operational Oceanographic System), основанная на гидродинамическом модуле Санкт-Петербургской модели эвтрофикации Балтийского моря. Система работает в оперативном режиме с мая 2009 г. по данным краткосрочных прогнозов погоды в Северо-Западном регионе России и граничных условий на входе в Финский залив. Сравнение результатов 48-часовых модельных прогнозов с наблюдаемыми вертикальными профилями температуры и солености и результатами измерений уровня воды в Кронштадте свидетельствует об удовлетворительном качестве воспроизведения моделью натуральных данных.

Ключевые слова: оперативная океанография, гидродинамический прогноз, Финский залив.

Создание оперативной системы прогноза возможно только на основе развития оперативной океанографии, отличительная черта которой - обеспечение заинтересованных пользователей высококачественной информацией, полученной путем комбинации оперативных данных дистанционных и контактных измерений с результатами расчетов по трехмерным гидродинамическим моделям. В принципе, эти модели позволяют восстановить значения гидродинамических характеристик в море по информации об его состоянии на открытых боковых границах и состоянии атмосферы и тем самым на основе краткосрочных прогнозов погоды дать краткосрочные прогнозы изменений состояния морской среды. Однако примеров работающих оперативных океанографических систем в России пока немного. Так, в Санкт-Петербургском Гидрометцентре для прогноза невиских наводнений с декабря 1999 г. используется программный комплекс CARDINAL (Coastal AREa Dynamics INvestigation ALgorithm) [1]. Прогностические расчеты уровня воды и скоростей поверхностных течений с заблаговременностью 48 часов осуществляются по данным метеопрогноза по региональной атмосферной модели HIRLAM (High Resolution Local Area Model) [2]. Другой пример действующей оперативной системы - технология краткосрочного прогноза уровня моря и течений в Каспийском море, включенная в Автоматизированную систему оперативной обработки информации Гидрометцентра России в июне 2001 г. [3, 4]. Расчет по гидродинамической модели моря производится сразу после того, как в базе данных Гидрометцентра России появляется прогноз по региональной метеорологической модели атмосферы.

Определенным ограничением упомянутых систем является неполный учет термохалинной составляющей течений и вследствие этого их ориентация на прогноз уровня и течений в верхнем слое моря. Так, для прогноза невиских наводнений используется баро-

тропный (двухмерный) вариант системы CARDINAL, а при прогнозе нагонов в Каспийском море задается наблюдаемое распределение плотности морской воды.

Предлагаемая технология океанографического прогноза свободна от указанного ограничения: температура и соленость воды являются прогностическими переменными, которые рассчитываются при решении полных трехмерных уравнений гидротермодинамики моря. Первые шаги по разработке этой технологии были предприняты в [5], где были отработаны процедуры взаимодействия атмосферных моделей с трехмерными моделями водоемов Северо-Западного региона России (Невской губы и восточной части Финского залива, Ладожского озера).

Успешность океанографического прогноза для небольших ограниченных районов моря определяется как совершенством используемой гидродинамической модели, так и качеством прогноза атмосферных характеристик, начальных условий и граничных условий на жидкой части границы. Последний фактор – задание прогностических условий на жидкой части границы – ключевая проблема океанографического прогноза, успешное решение которой в значительной мере определяет качество конечного результата. Действительно, собственно гидродинамическая модель может совершенствоваться, обеспечивая повышение качества расчета гидродинамических полей. Граничные условия на поверхности моря задаются на основе той или иной оперативной атмосферной модели, прогнозы по которой существенно используют поступающую в реальном времени информацию об атмосферных характеристиках. Начальные условия в исследуемом бассейне, которые берутся, как правило, из результатов предыдущего прогноза, могут быть «подправлены» данными наблюдений с использованием современных методов ассимиляции. Качество же условий на жидкой границе полностью определяется другой (внешней) оперативной океанографической моделью, которая, в отличие от атмосферных моделей, использует ограниченное число данных наблюдений, и ухудшается в результате неизбежной интерполяции с сетки внешней модели на сетку, используемую основной прогностической моделью. Таким образом, помимо улучшения собственной модели, единственный для разработчика путь совершенствования океанографического прогноза исследуемого района моря – ассимиляция в оперативном режиме данных наблюдений, включая спутниковую информацию, и увеличение пространственного разрешения.

В настоящей статье внимание концентрируется на том этапе разработки оперативной системы прогноза гидрофизических характеристик Финского залива, когда возможности совершенствования собственно модели еще не исчерпаны. По аналогии с известной системой BOOS (the Baltic Operational Oceanographic System) разрабатываемая система названа GULFOOS (the Gulf of Finland Operational Oceanographic System).

### Описание системы

Схема оперативной системы прогноза приведена на рис. 1. Она включает следующие пять модулей:

- гидродинамический модуль Санкт-Петербургской модели эвтрофикации Балтийского моря SPBEM (Saint Petersburg Baltic Eutrophication Model) [6, 7], который применительно к Финскому заливу называется GOFM (the Gulf Of Finland Model);
- входной информации (метеорологических данных, граничных условий на входе в залив и речного стока);
- инициализации модели;
- выходных данных;
- ассимиляции спутниковых данных о температуре поверхности моря (ТПМ).



Рис. 1. Оперативная океанографическая прогностическая система для Финского залива GULFOOS. Пунктиром обозначена планируемая, но пока не реализованная часть системы, предназначенная для ассимиляции ТПМ.

*Гидродинамический модуль* представляет собой трехмерную гидродинамическую модель циркуляции воды и морского льда. Модель циркуляции воды основана на полных уравнениях гидротермодинамики океана в приближениях Буссинеска и гидростатики, включающих уравнение состояния морской воды Миллера и Кремлинга [6]. Вертикальная турбулентность описывается на основе оригинальной  $b-l$  схемы замыкания ( $b$  – кинетическая энергия турбулентных пульсаций,  $l$  – их пространственный масштаб). Основные прогнозируемые переменные модели – скорость течений, температура, соленость и плотность воды, изменения уровня моря. Модель морского льда описывает динамику и термодинамику снежно-ледяного покрова и позволяет прогнозировать изменения скорости дрейфа льда, его толщины и площади. Модель интегрируется на сферической сетке для всего Финского залива с шагом по горизонтали 1 морская миля и вертикальным разрешением 1 м.

Модель SPBEM прошла тестирование при решении ряда задач, связанных с изучением отклика динамики и экосистем Балтийского моря на изменение внешних воздействий. Выполненные по модели расчеты изменчивости гидродинамических и биогеохимических характеристик в Финском заливе в 1995–2000 гг. показали, что модель воспроизводит характерные особенности сезонной изменчивости залива, особенно в его верхних слоях [7]. Модель SPBEM участвовала в международном проекте Eutrophication-MAPS [8]. Сравнение шести современных гидродинамико-биогеохимических моделей Балтийского моря, выполненное в этом проекте, показало, что SPBEM отвечает современному уровню развития моделирования Балтийского моря. В частности, было показано, что гидродинамические модули всех шести моделей, включая SPBEM, воспроизводят современное физическое состояние Финского залива с достаточно высокой точностью. Так, средние по ансамблю из шести моделей значения среднеквадратичной ошибки воспроизведения температуры летом 1996 г. в Финском заливе для различных периодов

времени не превосходили 2 °С. Сопоставление по солености показало, что значения среднеквадратичной ошибки по отдельным моделям изменялись в пределах от 0.2 до 0.4 ‰ и от 0.6 до 0.9 ‰ в западной и восточной частях залива, соответственно. Среднеквадратичная ошибка воспроизведения солености для отдельных моделей изменялась в пределах от 0.2 до 0.4 ‰ и от 0.6 до 0.9 ‰ в западной и восточной частях залива, соответственно. Большие значения ошибок в восточной части залива связаны, по-видимому, с сильным горизонтальным градиентом солености, вызванным речным стоком Невы.

*В модулях входной информации* (метеорологических данных, граничных условий на входе в залив и речного стока) задаются необходимые граничные условия. При прогнозе гидродинамики Финского залива в качестве граничных условий используются:

- прогноз состояния атмосферы (приземное давление, скорость ветра, облачность, температура и относительная влажность воздуха в приводном слое), производимый по модели HIRLAM;

- прогноз гидрологических характеристик (уровень моря, температура и соленость воды) на входе в Финский залив, выполняемый по оперативной модели Балтийского моря HIROMB (High Resolution Operational Model for the Baltic Sea) [9];

- климатические, средние месячные расходы крупных рек, впадающих в Финский залив (Нева, Луга, Нарва, Кумиоки) [10]. В используемой версии модели GOFM предполагается, что разность осадки минус испарение равна нулю.

Используемая версия атмосферной модели HIRLAM имеет пространственное разрешение 11 км и дает прогноз состояния атмосферы на 48 часов. Расчетная область трехмерной модели HIROMB, разработанной в SMHI (Шведский институт метеорологии и гидрологии) включает в себя Северное и Балтийское моря. Горизонтальное разрешение модели в Балтийском море, включая проливы Скагеррак и Каттегат, составляет 1 морскую милю. Модель имеет 24 слоя по вертикали с разрешением 4 м и дает прогноз скорости течений, уровня моря, температуры и солености воды, скорости дрейфа льда, его толщины и сплоченности на 48 ч вперед.

Прогнозы гидрологических характеристик в Финском заливе осуществляются на основе гидродинамического модуля (модель GOFM) с использованием модулей входной информации. Оперативная океанографическая система реализована на вычислительном сервере Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ), построенном на двух 4-ядерных процессорах Intel Xeon. РГГМУ получает результаты ежесуточных прогнозов на 48 ч по моделям HIRLAM и HIROMB в режиме реального времени с марта 2009 г. Частота записей прогностических полей для обеих моделей составляет 1 ч. При инициализации оперативного счета по модели GOFM (прогнозы на 48 ч) на первом шаге по времени (10 марта 2009 г.) в качестве начальных условий использовались результаты расчетов по модели HIROMB. Для последующих прогнозов в качестве начальных условий берутся прогностические поля через 24 ч после начала предыдущего прогноза. Расчеты по модели GOFM полностью автоматизированы: после приема граничные условия на входе в Финский залив и на границе с атмосферой формируются и интерполируются на расчетную сетку GOFM, передаются в расчетный модуль для выполнения прогноза, результаты которого архивируются. Оперативная система предусматривает в принципе процедуру ассимиляции как спутниковых, так и контактных данных. В случае налаженной процедуры приема и обработки спутниковых данных о ТПМ (см.рис. 1) они будут использоваться для коррекции начальных условий. В близком будущем планируется пуск в эксплуатацию нескольких автоматических комплексов измерений вертикальных распределений температуры и солености на акватории российского сектора Финского залива и организация приема этих данных в режиме реального времени, что позволит расширить процедуру коррекции начальных условий, включив в нее ассимиляцию указанных данных контактных измерений. Для assi-

миляции профилей температуры и солёности предполагается использовать методы, основанные на вариационных алгоритмах.

### Результаты прогностических расчетов

В настоящее время полноценная оценка точности прогнозов возможна для уровня моря, мониторинг которого в Финском заливе осуществляется на ряде российских и зарубежных гидрометеостанций (Кронштадт, Горный институт, Хельсинки и др.). Определенные выводы могут быть сделаны также для температуры и солёности воды, для которых имеются результаты измерения вертикальных профилей этих характеристик на станциях, выполненных во время морских экспедиций, а также с попутных судов и паромов [11]. Спутниковая информация о ТПМ в прогностических системах может использоваться как для ассимиляции, так и для верификации модели. Отметим, что оценка качества модели требует статистически значимых оценок различных мер отличий модельных и наблюдаемых полей в течение всего годового цикла. Такая работа уже начата, однако накопленной информации за непродолжительный период эксплуатации модельного комплекса (1 год и 4 месяца) пока еще недостаточно для получения статистически значимых результатов.

Ниже приводятся первые, наиболее характерные результаты сравнения модельных прогнозов с данными наблюдений в отдельные промежутки времени. Результаты расчетов вертикальных профилей температуры и солёности воды по модели GOFM сравниваются также с аналогичными расчетами по модели HIROMB.

Обе модели основаны на полных трехмерных уравнениях гидротермодинамики океана, записанных в приближениях Буссинеска и гидростатики. Основные различия между ними состоят в следующем: 1) разное вертикальное разрешение (4 м в HIROMB и 1 м в GOFM); 2) разные параметризации вертикальной турбулентности ( $k - \omega$  модель в HIROMB и  $k - l$  модель в GOFM); 3) различные разностные схемы (третьего порядка точности) для адвективного переноса импульса, тепла и соли; 4) различное описание вертикальной конвекции (схема конвективного приспособления в HIROMB и моделирование неустойчивой стратификации путем увеличения коэффициента вертикальной турбулентности до  $1 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$  в GOFM); 5) различные формулы для расчета потоков тепла (коротковолновой и длинноволновой радиации, потоков явного и скрытого тепла) на поверхности моря; б) явная разностная схема для решения уравнения для уровня моря в HIROMB и неявная схема – в GOFM. Более детальные различия между моделями рассмотрены в работе [8].

**Уровень моря в восточной части Финского залива.** На рис. 2 показаны примеры расчета уровня в пункте Кронштадт (на каждом фрагменте дана совокупность первых 24 часов пяти последовательных 48-часовых прогнозов). Как видно, в целом модель правильно воспроизводит изменения уровня. Вместе с тем, ошибки расчета высот максимальных подъемов воды и времени наступления пиков в ряде случаев оказываются существенными. Для первого из рассматриваемых периодов (2–6 сентября 2009 г.) модельные пики запаздывают по сравнению с наблюдаемыми на 2 ч, модель завышает высоту пика 4 сентября на 8 см и занижает высоту пика 6 сентября на 23 см. Для второго периода (9–13 октября 2009 г.) модельный пик 10 октября запаздывает на 1 ч, а время наступления модельного пика 13 октября практически совпадает с наблюдаемым. Воспроизведение высот пиков в этот период также оказывается лучше: разница в высотах равна 3 см для пика 10 октября и 9 см для пика 13 октября.



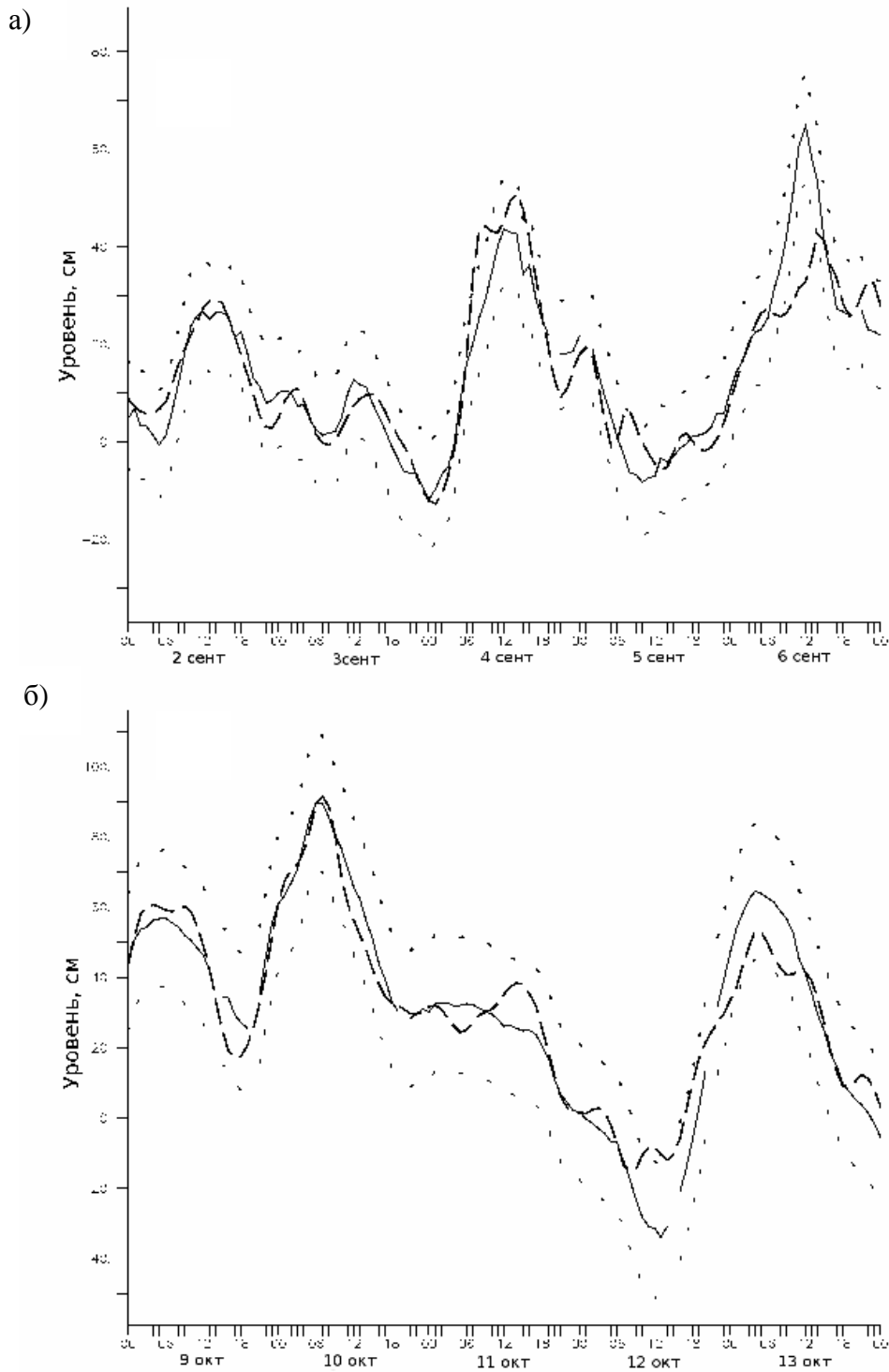


Рис. 2. Прогноз уровня моря в Кронштадте по модели GOFM (пунктирные кривые) для периодов: 00 часов СГВ 02 сентября 2009 г. – 24 часа СГВ 06 сентября 2009 г. (а) и 00 часов СГВ 09 октября 2009 г. – 24 часа СГВ 13 октября 2009 г. (б). Сплошные кривые – данные наблюдений, точечные кривые – данные  $\pm 0.67\sigma$ , где  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение.

**Температура и соленость.** Были проанализированы результаты прогноза по моделям GOFM и HIROMB вертикальных профилей температуры и солености в восточной части Финского залива в те периоды годового цикла, для которых имеются данные наблюдений. Практически единственным источником регулярных данных в этой части залива являются экспедиции РГГМУ [12]. Результаты прогнозов сравниваются с данны-

ми экспедиции РГГМУ в июле 2009 г. для двух характерных станций, расположенных в глубоководном и относительно мелководном районах восточной части Финского залива (рис. 3), а также с уникальными данными для весеннего периода, полученными в апреле 2010 г. (рис. 4). Модельные профили, показанные на рисунках, соответствуют точке сетки, ближайшей к рассматриваемой станции, и моменту начала измерений на станции.

Как видно, обе модели в целом удовлетворительно воспроизводят вертикальное распределение температуры в летний период (рис. 3а, 3в). В мелководной части залива толщина термоклина, рассчитанного по модели HIROMB, оказалась заметно больше ее наблюдаемого значения, главным образом, за счет большего заглубления (на 5–6 м) его нижней границы (рис. 3а). Это, по-видимому, вызвано переоценкой интенсивности вертикального турбулентного обмена и недостаточным вертикальным разрешением модели.

Та же причина привела к практическому отсутствию верхнего перемешанного слоя для солености на мелководной станции в модели HIROMB (рис. 3б): здесь соленость почти равномерно увеличивается с глубиной. Модельная соленость на поверхности моря оказалась завышенной по сравнению с наблюдаемой на 1 ‰, в придонном слое она занижена на 0.3–0.4 ‰. В то же время, модель GOFM воспроизводит наблюдаемый верхний перемешанный слой (ВПС), нижняя граница которого располагается в модели на глубине 11 м, а по данным наблюдений – на глубине 9 м. Хотя GOFM завышает соленость в ВПС (на 0.7 ‰), ниже ВПС рассчитанная и наблюдаемая кривые практически совпадают. На глубоководной станции (рис. 3г) обе модели ведут себя практически одинаково: соленость переоценивается ими в ВПС (на 0.75 и 1 ‰ соответственно GOFM и HIROMB) и недооценивается в придонном слое (на 0.3–0.5 ‰).

Характерная особенность термической стратификации в Финском заливе в весенний период – наличие подповерхностного минимума температуры на глубине 15–30 м (см.рис. 4). Эта особенность воспроизводится обеими моделями на двух рассматриваемых станциях, причем на первой из станций (рис. 4а) ближе к наблюдаемому профилю оказался модельный профиль HIROMB, а на второй станции (рис. 4в) более успешным был прогноз GOFM.

Наблюдаемые профили солености на рассматриваемых станциях лучше воспроизводятся GOFM, особенно в ВПС. Действительно, на первой станции (рис. 4б) прогноз GOFM совпадает с данными наблюдений, прогноз HIROMB завышает соленость на 0.8 ‰. На второй станции (рис. 4г) HIROMB завышает соленость в ВПС на 1.5 ‰, тогда как GOFM – только на 0.7 ‰.

\*\*\*

Приведенные первые результаты сравнения модельных прогнозов уровня с данными наблюдений на гидрометеостанции Кронштадт свидетельствуют о том, что GOFM в целом правильно воспроизводит изменения уровня в восточной части Финского залива. Полноценную оценку качества модели еще предстоит сделать. Модельные результаты необходимо статистически сравнить с данными измерения уровня на разных станциях в Финском заливе и в различных ситуациях, включая катастрофические штормовые нагоны. С начала эксплуатации оперативной системы GULFOOS (май 2009 г.) подобных ситуаций не наблюдалось. Только после проведения статистически обеспеченного сравнения наблюдаемых и модельных изменений уровня, а также других гидрофизических характеристик и подтверждения высокого качества и надежности работы модели, она может быть использована для практических прогнозов гидрологической ситуации в Финском заливе.

Обе модели, GOFM и HIROMB, в целом удовлетворительно воспроизводят вертикальное распределение температуры в восточной части Финского залива в летний период, когда в заливе существует ВПС и хорошо выраженный термоклин, и в весенний

период, характеризующийся наличием подповерхностного максимума температуры. Отметим, что качество воспроизведения температуры воды и уровня моря может быть улучшено за счет включения в GOFM блока ассимиляции данных спутниковых измерений ТПМ и измерений уровня на части гидрометеорологических станций. При этом данные оставшихся станций должны использоваться для сравнения.

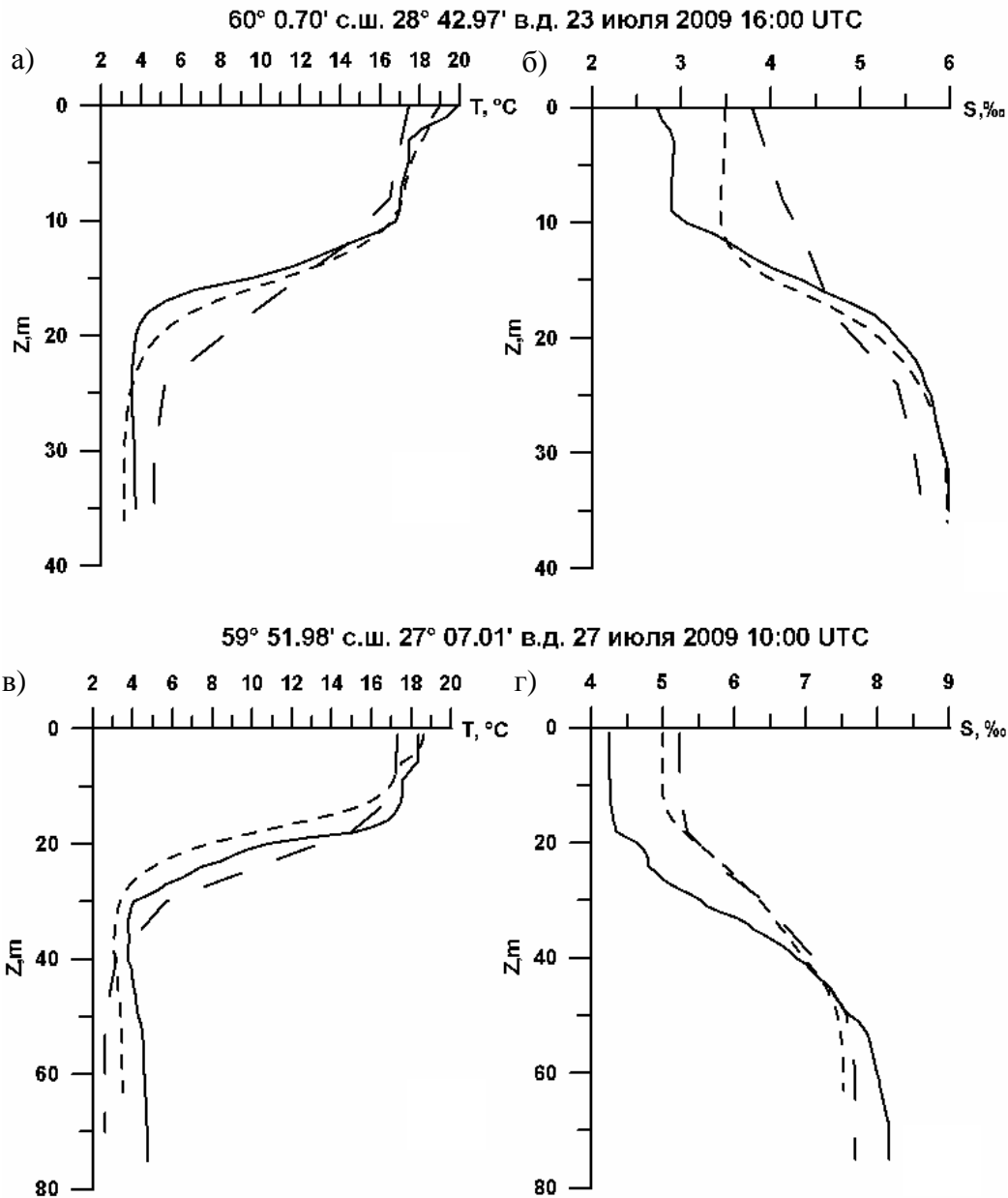


Рис. 3. Вертикальное распределение температуры  $T$  и солёности  $S$  на мелководной (а, б) и глубоководной (в, г) станциях в восточной части Финского залива, выполненных соответственно 23 и 27 июля 2009 г. Сплошные кривые – данные экспедиционных исследований РГГМУ, частый и редкий пунктир – результаты прогностических расчетов соответственно по моделям GOFM и HIROMB в ближайшей к станции точке модельной сетки на момент начала выполнения измерений.

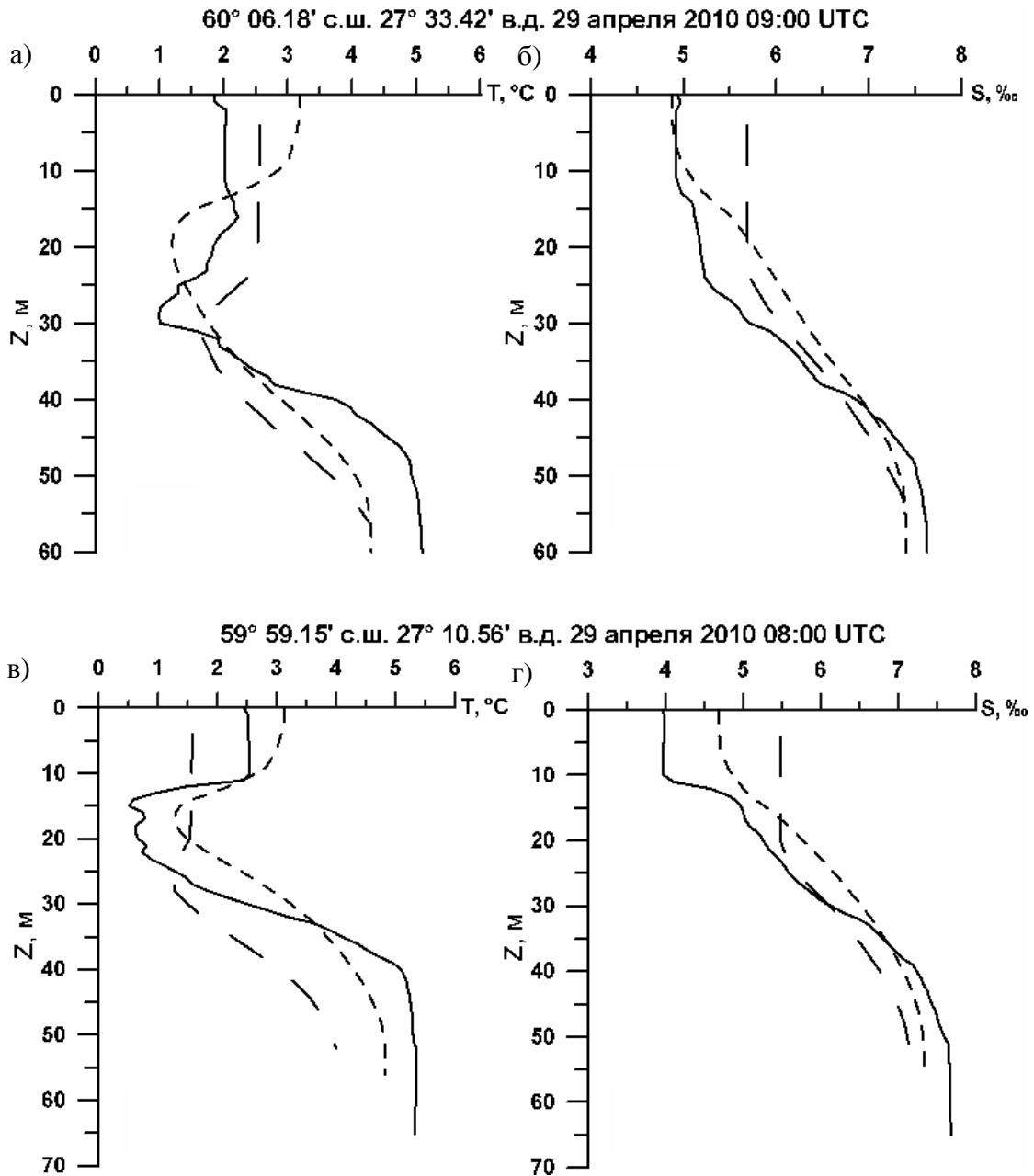


Рис. 4. Вертикальное распределение температуры  $T$  и солёности  $S$  на двух станциях в восточной части Финского залива, выполненных 29 апреля 2010 г.: (а, б) – станция с координатами ( $60^{\circ} 06.18'$  с.ш.,  $27^{\circ} 33.42'$  в.д.); (в, г) – станция с координатами ( $59^{\circ} 59.15'$  с.ш.,  $27^{\circ} 10.56'$  в.д.). Остальные обозначения те же, что и на рис. 3.

Как было показано, при воспроизведении вертикального распределения солёности более успешной оказалась GOFM. Вместе с тем обе модели систематически завышают значения солёности в ВПС.

Это расхождение результатов расчетов с натурными данными связано, скорее всего, с заданием в обеих моделях климатических средних месячных, а не текущих значений расходов реки Нева.

Разработка процедуры использования срочных данных о расходе Невы и других рек, впадающих в Финский залив, в системе GULFOOS, наряду с подключением блока ассимиляции данных спутниковых измерений ТПМ, – первоочередные задачи

по усовершенствованию системы, решение которых будет способствовать улучшению качества прогноза.

Авторы выражают благодарность Санкт-Петербургскому ЦГМС-Р за предоставление данных измерений по уровню моря на гидрометеостанции Кронштадт, а также шведскому институту метеорологии и гидрологии (SMHI) за предоставление прогностических оперативных данных по моделям HIRLAM и HIROMB.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

## Литература

1. Klevanny K.A., Matveyev G.V., Voltzinger N.E. An integrated modelling system for coastal area dynamics // Intern. J. for numerical meth. in fluids. 1994. V.9. P.181–206.
2. HIRLAM (High Resolution Limited Area Modelling project). <http://hirlam.org>.
3. Зильберштейн О.И., Попов С.К., Чумаков М.М., Сафронов Г.Ф. Метод расчета характеристик уровня моря в Северном Каспии // Водные ресурсы. 2001. Т.28. № 6. С.692–700.
4. Вербицкая О.А., Зильберштейн О.И., Попов С.К., Лобов А.Л. Метод краткосрочного гидродинамического прогноза штормовых нагонов в северной части Каспийского моря и результаты его испытаний // Гидрометцентр. Информационный сборник. 2002. № 29. С. 76–89.
5. Рябченко В.А., Либерман Ю.М., Руховец Л.А., Астраханцев Г.П., Белевич М.Ю., Дворников А.Ю., Игнатов Р.Ю., Клеванный К.А., Мостаманди С.В., Рубинштейн К.Г., Целев В.Ю. Прогноз погоды и состояния водных объектов Северо-Западного региона России на базе комплекса гидродинамических моделей. Санкт-Петербург: Нестор-История, 2008. 60 с.
6. Millero F., Kremling I. The densities of the Baltic Sea deep waters // Deep Sea Res. 1976. V.23. P.611–622.
7. 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.. 2003. V.52. No3, P. 346–359.
8. Myrberg K., Ryabchenko V., Isaev A., Vankevich R., Andrejev O., Bendtsen J., Erichsen A., Funkquist L., Inkala A., Neelov I., Rasmus K., Rodriguez Medina M., Raudsepp U., Passenko J., Söderkvist J., Sokolov A., Kuosa H., Anderson T.R., Lehmann A. and Skogen M.D.. Validation of three-dimensional hydrodynamic models of the Gulf of Finland // Boreal Environment Research. 2010. V.15. ISSN 1239-6095 (print). ISSN 1797-2469 (online).
9. Funkquist L. HIROMB, an operational eddy-resolving model for the Baltic Sea // Bulletin of the Maritime Institute in Gdansk. 2001. V.28. No2. P.7–16.
10. Bergström S., Carlsson B. River run-off to the Baltic Sea: 1950- -1990 // Ambio. 1994. V.23. P.280–287.
11. Lips I., Lips U., Vivi Fleming V., Kaitala S., Jaanus A. Use of ferrybox measurements for the Baltic Sea environment assessment // Environmental Research, Engineering and Management. 2007. V. 41. No3, P.3–8.
12. Матишов Г.Г., Карлин Л.Н., Денисов В.В., Дженюк С.Л., Ерёмина Т.Р. Целевые ориентиры исследований океанологических и экосистемных процессов в северо-западных морях России. Комплексные исследования процессов, характеристик и ресурсов российских морей Северо-Европейского бассейна (проект подпрограммы «Исследование природы Мирового океана» федеральной целевой программы «Мировой океан»). Вып.2. Апатиты: КНЦ РАН, 2007. С.8–19.

Статья поступила в редакцию 07.06.2010 г.

