

УДК 551.41

## Морские гидрологические прогнозы и оперативная океанология в Гидрометцентре России

**И.О. Думанская, А.А. Зеленко, С.А. Мысленков, Е.С. Нестеров,  
С.К. Попов, Ю.Д. Реснянский, Б.С. Струков**

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр  
Российской Федерации, г. Москва, Россия*

Представлена информация о развитии в Гидрометцентре России работ в рамках сравнительно нового раздела физической океанологии, связанного с получением диагностических и прогностических оценок состояния океанов и морей в оперативном режиме. Круг решаемых к настоящему времени задач оценки текущего и ожидаемого состояния морской среды и, соответственно, состав получаемой в результате их решения информации определяется уровнем взаимного развития главных составляющих оперативной океанологии: наблюдательной системы, гидродинамических моделей и соответствующих вычислительных технологий, обеспечивающих получение интересующих потребителей оценок основных гидрофизических полей. Рассматривается история развития морских прогнозов и представлены разработки Гидрометцентра России последнего десятилетия, обеспечивающие регулярный выпуск оперативной информационной продукции: система усвоения океанографических данных, технология прогнозирования течений и уровня в морях России, комплексная система прогнозирования параметров ветрового волнения в Мировом океане и морях России с детализацией прогнозов в прибрежной зоне на сроки до 3–5 суток, методика прогноза опасного волнения в Северной Атлантике с увеличенной заблаговременностью до 10–15 суток, ледовые прогнозы для неарктических морей России. Обозначены перспективы дальнейшего развития морских прогнозов.

*Ключевые слова:* морские прогнозы, оперативная океанология, наблюдательные системы, гидродинамические модели, усвоение данных, ветровые волны, течения, уровень моря, морские льды.

## Marine hydrological forecasts and operational oceanology in the Hydrometeorological Center of Russia

**I.O. Dumanskaya, A.A. Zelenko, S.A. Myslenkov, E.S. Nesterov,  
S.K. Popov, Yu.D. Resnyansky, B.S. Strukov**

*Hydrometeorological Research Center of Russian  
Federation, Moscow, Russia*

Information on the development of works in the framework of a relatively new section of physical oceanology associated with obtaining diagnostic and prognostic estimates of the state of the oceans and seas at the Hydrometcentre of Russia in operational mode is presented. The range of the current tasks to be solved for the assessment of the current and expected state of the marine environment and, hence, the composition of the information obtained as a result of their solution is defined by the level of mutual

development of the main components of operational oceanology: the observational system, hydrodynamic models and, the computing technologies providing the obtaining of estimates of the main hydrophysical fields interesting to consumers. The history of development of marine forecasts and the achievements of the Hydrometcentre of Russia in the last decade providing a regular production of operational information products are considered: the oceanographic data assimilation system; the technology for forecasting currents and water levels in the seas of Russia; the integrated system for the forecasting of wind wave parameters in the World Ocean and the seas of Russia, with the detailed forecasts in the coastal zone for up to 3-5 days; the method for forecasting dangerous waves in the North Atlantic with an increased lead time up to 10-15 days; ice forecasts for the non-Arctic seas of Russia. The prospects of further development of marine forecasts are outlined.

*Keywords:* marine forecasts, operational oceanology, observational systems, hydrodynamic models, data assimilation, wind waves, currents, sea level, sea ice

## Введение

Основной задачей оперативного гидрометеорологического обеспечения морской деятельности является подготовка и своевременное доведение до конечных потребителей диагностической и прогностической информации об основных параметрах состояния океана и морей, включая штормовые предупреждения об угрозе возникновения опасных явлений. Необходимые условия для решения этой задачи подразумевают наличие развитой наблюдательной сети, создание наукоемких технологий диагноза и прогноза основных характеристик погоды и морской среды, а также использование современных средств распространения данных наблюдений и прогностической продукции.

Оперативная гидрометеорологическая информация необходима для функционирования практически всех отраслей морской деятельности, среди которых морские перевозки, рыболовный промысел, разведка и добыча углеводородов на шельфе, эксплуатация гидротехнических сооружений, комплексов аквакультуры и рекреации. Пользователям такой информации требуются, в первую очередь, параметры состояния приводного слоя атмосферы (атмосферное давление, скорость ветра, температура и влажность воздуха) и характеристики поверхности океана (температура воды, элементы ветрового волнения, вариации среднего уровня моря, ледовые условия). Наряду с этими сведениями во многих случаях необходима информация о трехмерных полях основных гидрофизических характеристик не только у поверхности, но и в толще Мирового океана.

Всю информацию о состоянии морей и океанов условно можно разделить на режимную и оперативную. Под режимной (среднепогодной или климатической) чаще всего понимается информация, осредненная за ряд лет (как правило за 30 лет). Оперативная информация включает текущие наблюдения и результаты диагностических и прогностических расчетов, которые также могут быть усреднены за меньшие промежутки времени (сутки, неделя, месяц, сезон, год).

В данной статье основное внимание будет уделено оперативной информации, выпуск которой входит в круг основных задач Гидрометцентра России. Рассматривается эволюция основных методов и технологий оценки и прогнозирования состояния морской среды и в особенности их развитие, которое произошло за последнее десятилетие, предшествующее юбилейному для института 2020-му году.

## 1. Развитие морских прогнозов

Начало работ по оперативному обеспечению морской деятельности в Гидрометцентре России приходится на конец 1930-х годов. С тех пор произошла существенная эволюция применяемых подходов, методов, технологий и состава выпускаемой морской прогностической продукции.

Начальный этап, со свойственной ему слабо развитой наблюдательной сетью и применением синоптического подхода к прогнозированию погодных условий, в методическом отношении характеризовался построением эмпирических связей между отдельными параметрами состояния атмосферы и прогнозируемыми морскими величинами, такими как температура воды, уровень моря и характеристики ледового покрова [7]. В последующих работах, развивающих этот подход, стали применяться физико-статистические методы, основанные на корреляционном, регрессионном и спектральном анализе, разложении гидрометеорологических полей по естественным ортогональным функциям, полиномам Чебышева и т. п. [5, 44].

Бурное развитие численных прогнозов погоды в 1980-е годы привело к повышению точности прогнозирования метеорологических полей на 3–5 суток, обеспечивая тем самым поступление регулярной прогностической информации об атмосферных воздействиях на поверхности океанов и морей. Это открыло возможности для применения гидродинамических моделей при прогнозировании параметров морской среды. Поначалу привлекались упрощенные модели – двумерные баротропные модели для расчетов циркуляции и вариаций уровня в морях и модели второго поколения для описания ветрового волнения. Вслед за этим стали развиваться и использоваться модели, основанные на полных уравнениях для описания общей циркуляции океана и волновые модели третьего поколения [3]. Этот же этап характеризуется привлечением спутниковой информации, которая становится главным источником глобальных данных для анализа ледовых условий и полей температуры поверхности в океанах и морях. Основные особенности и итоги развития средств получения оперативной морской информации в этот период рассмотрены в [1, 2, 4].

Следующий этап, длящийся и в настоящее время, начался в 2000-е годы в связи со становлением нового направления в исследованиях и описании океана – “оперативной океанологии”, предметом которой является получение диагностических и прогностических оценок состояния морской среды в режиме, близком к реальному времени. Работы в этом

направлении, интенсивно развиваемые на международном и национальном уровнях, во многом совпадают с основной задачей оперативного гидрометеорологического обеспечения морской деятельности. Поэтому важно отметить, что первые два десятилетия XXI века стали периодом бурного развития оперативной океанологии. В нескольких странах образованы специализированные национальные центры, инициированы и выполняются международные проекты [52, 53], направленные на скоординированное решение наиболее важных и крупных задач оперативной океанологии, проводятся масштабные международные конференции. Отмечается резкий рост публикаций, относящихся к оперативной океанологии. Активизация работ, связанных с оперативной океанологией, происходит и в научных учреждениях Российской Федерации, включая Гидрометцентр России.

Оперативное гидрометеорологическое обеспечение морской деятельности подразумевает наличие эффективных средств распространения больших объемов разнородной информации для своевременного ее доведения до конечных потребителей. В этом отношении важным этапом стало создание Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане (ЕСИМО), введенной в эксплуатацию в 2013 году [24]. При разработке этой системы выполнялся специальный проект, направленный на создание оперативной подсистемы, или оперативного модуля ЕСИМО, действующего на базе Гидрометцентра России [14]. Модуль предназначен для предоставления пользователям ЕСИМО оперативной гидрометеорологической информации об обстановке в Мировом океане и морях в наиболее полном и удобном для потребителей информации виде. Состав, объемы и темп ее поступления предопределяется текущим состоянием наблюдательной системы, уровнем развития диагностических и прогностических моделей и действующими информационными системами на национальном и международном уровнях.

## 2. Современное состояние

В становлении оперативной океанологии, а следовательно, и новых методов гидрометеорологического обеспечения морской деятельности, решающую роль сыграло беспрецедентное развитие наблюдений в океане [17]. Но наблюдательная система хотя и является основой оперативных приложений, сама по себе недостаточна для решения стоящих перед оперативной океанологией задач. По аналогии с метеорологическими приложениями основным инструментом оперативного анализа и прогноза океанологических полей служат численные модели, основанные на решении задачи с начальными условиями для уравнений термогидродинамики океана. В соответствии с этими общими тенденциями преобладающим трендом в разработке средств оперативного гидрометеорологического обеспечения морской деятельности в последние годы было развитие численных методов и технологий, хотя при этом не потеряли актуальности

и физико-статистические методы прогнозирования, особенно для долгосрочных морских прогнозов [28]. В данном разделе рассматриваются главные из этих разработок, выполненные в Гидрометцентре России в 2010-е годы.

## 2.1. Система усвоения океанографических данных

Сведения о текущем состоянии трехмерных гидрофизических полей океана требуются для гидрометеорологического обеспечения судоходства, океанического рыболовства, добычи минеральных ресурсов, деятельности военно-морского флота (включая подводную компоненту), информационного обслуживания органов управления и организаций, связанных с морской деятельностью. Без надежных оценок текущего состояния (по-другому, оперативных диагностических оценок) невозможен и качественный прогноз гидрофизических полей, равно как и метеорологический прогноз, базирующийся на современных математических моделях атмосферы и океана. Высокое качество диагноза и прогноза океанографических полей является также залогом эффективного решения экологических задач, таких как расчет дальнего переноса примесей в океане, оценка последствий аварийных выбросов в морскую среду, проектные оценки воздействий на окружающую среду.

Основой для получения диагностических оценок являются данные оперативных наблюдений в океане и морях, распространяемые по международным и национальным каналам связи [17]. Происходившее в последние годы расширение состава данных наблюдений осуществлялось в первую очередь за счет введения в действие новых средств дистанционного зондирования со спутников и проведения массовых измерений с дрейфующих и заякоренных буев.

Наиболее информативный источник контактных данных о трехмерной структуре вод океана – профилирующие буи Арго [51, 68]. К ноябрю 2007 года число постоянно действующих буев Арго достигло запланированных 3000, а ныне приближается к 4000 (<http://www.argo.ucsd.edu/>). Сеть таких буев обеспечивает получение ежегодно около 100000 вертикальных профилей температуры и солёности воды в верхнем 2-километровом слое по всей акватории Мирового океана, включая некоторые внутренние моря (Средиземное, Черное, Японское). В стадии подготовки – проект «глубоководного Арго» (англ. Deep Argo), обсуждаемый на страницах журналов [58] и на специализированных семинарах [65]. В рамках этого проекта планируется распространение вертикальных зондирований ныряющими буями до глубин около 6 км, что позволит проследивать изменчивость термохалинной структуры и динамики не только верхнего слоя океана, но и его абиссали.

Несмотря на быстрое развитие разнообразных инструментальных средств наблюдений в океане, получаемых с их помощью данных все еще недостаточно для формирования относящейся к конкретным периодам

времени информации об основных параметрах состояния водной среды и по всем частям морской акватории. В связи с неполнотой прямых измерений наиболее информативные оценки состояния получаются с помощью методов усвоения данных, представляющие собой совмещение данных наблюдений с результатами расчетов по гидродинамическим моделям.

Внедрение систем усвоения данных в практику оперативной деятельности ведущих метеорологических центров привело к заметному улучшению анализов и прогнозов метеорологических полей. Развитие систем усвоения океанографических данных (СУОД) во многом следует таковому для атмосферы с некоторым отставанием, вызванным как меньшим количеством наблюдательной информации в толще океана (дистанционные спутниковые средства позволяют измерять лишь поверхностные характеристики: ТПО, уровень океана, некоторые параметры ветрового волнения), так и меньшей адекватностью океанских моделей (вследствие меньших пространственных масштабов синоптической изменчивости в океане и, соответственно, более высоких требований к пространственному разрешению моделей и к плотности данных наблюдений).

Работы по созданию СУОД активизировались с конца прошлого века. Так, в 1997 году была сформулирована концепция проведения международного Эксперимента по Глобальному Усвоению Океанографических Данных (GODAE – Global Ocean Data Assimilation Experiment) [56]. В ходе выполнения проекта GODAE, а также в результате осуществления национальных программ в ряде ведущих зарубежных метеорологических и/или океанографических центров созданы действующие прототипы оперативных информационно-прогностических систем [61].

Первая национальная версия СУОД, действующая в оперативном режиме, функционировала в Гидрометцентре России в период 2006–2014 гг. [19]. Усвоение данных в этой системе осуществлялось по последовательной циклической схеме «анализ–прогноз–анализ» в одноэлементном ее варианте, в котором последовательно усваивается информация по температуре и ее солености без непосредственного учета их связей между собой и с другими элементами. Такая связь устанавливается лишь опосредовано через взаимозависимость различных переменных в расчетной модели.

В качестве данных наблюдений использовались измерения вертикальных распределений температуры и солености воды в разных, меняющихся от случая к случаю географических точках Мирового океана термобатиметрами (ХВТ), профилирующими буями Арго, а также установленными в тропической зоне стационарными массивами закормленных буйев TAO, TRITON, PIRATA, RAMA.

Прогноз, результатом которого является так называемое поле первого приближения (ППП), в каждом цикле давался на основе расчетов по модели общей циркуляции океана [16, 20], имеющей горизонтальное разрешение  $\sim 2 \times 2^\circ$  ( $\sim 200 \times 200$  км). Вертикальная структура аппроксимирована

двумя уровнями со сгущением в поверхностных слоях и с выделением верхнего перемешанного слоя с подвижной нижней границей, в общем случае не совпадающей с фиксированными границами 32 расчетных слоев циркуляционной модели [42].

Анализ данных проводился по двумерной вариационной схеме. В соответствии с этой схемой, в качестве искомого решения принимается поле анализа, доставляющего минимум функционала, «штрафующего» отклонения искомого решения от наблюдений и от поля первого приближения с весами, зависящими от пространственных ковариаций поля ошибок первого приближения и ошибок наблюдений. Получаемые в результате инкременты анализа температуры и солёности воды, добавляемые на шаге анализа к полям первого приближения, представлены на регулярной 1-градусной сетке на 21 уровнях от 10 до 1400 м.

Для определения пространственных ковариаций ошибок первого приближения (ошибок расчета по модели общей циркуляции океана на шаге прогноза) – ключевого элемента вариационного усвоения, использовалось обобщение на пространственный случай модели авторегрессии – скользящего среднего (ПАРСС) [50, 70], являющейся развитием предложенной в [71] трехмерной стохастической модели. Ошибки наблюдений полагались некоррелированными, так что матрица ошибок наблюдений имела диагональный вид.

В следующей версии СУОД [15, 20] горизонтальное разрешение модели было повышено до  $1 \times 1^\circ$  вблизи экватора с уменьшением шага по широте пропорционально ее косинусу к северу и югу от экватора. Так что в линейных единицах шаги горизонтальной сетки менялись от примерно 100 км у экватора до 20–30 км у северной и южной границ области. Двумерная вариационная схема анализа 2D-Vар в этой версии заменена более общей трехмерной вариационной схемой 3D-Vар и учтена изменчивость ППП в пределах окна усвоения в соответствии с методом FGAT (First Guess at Appropriate Time) [55, 62]. Получаемые в результате 3D-Vар анализа инкременты добавлялись к ППП дробными частями по методике IAU (Incremental Analysis Updates) [54], позволяющей подавить скачкообразные изменения модельных переменных на границах окна усвоения и предотвратить связанные с этим возможные проявления неустойчивостей.

Параметры модели ковариаций ПАРСС определены путем аппроксимации эмпирических ковариаций, рассчитанных по двумерной версии анализа по данным расчетов за 2006–2008 гг. с использованием методики из [43]. Как и в прежней версии, анализ по 3D-Vар схеме проводился отдельно для температуры воды и ее солёности на 21 уровнях 1-градусной сетки.

В результате внесенных изменений получен положительный эффект по сравнению с предшествующей версией СУОД, прослеживающийся как по детализации воспроизведения гидрофизических полей, так и по статистическим оценкам степени близости расчетных полей к независимым (не используемым в процедуре усвоения данных) наблюдениям [20].

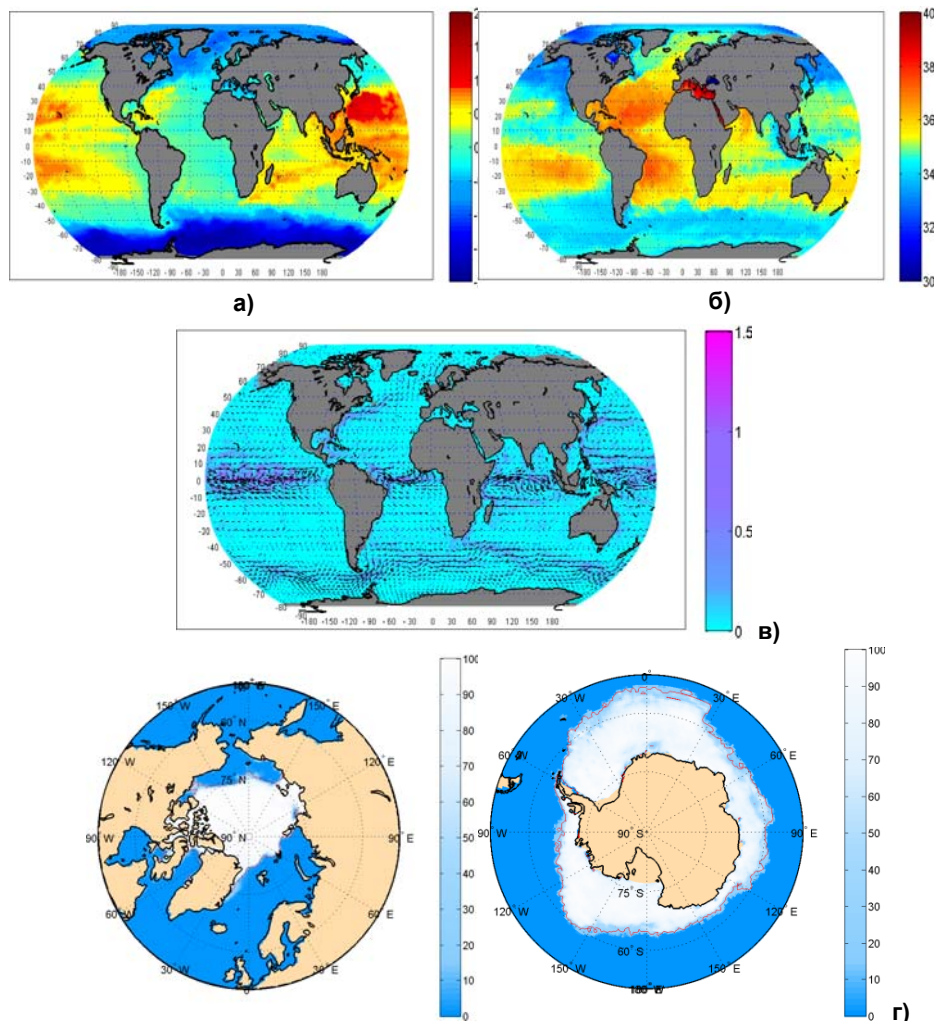
Результаты ретроспективного анализа за 2006–2015 гг., выполненного с этой версией СУОД, представлены в [15]. Полученная на основе такого анализа средняя циркуляция отражает известные крупномасштабные структуры: системы зональных экваториальных течений, интенсивные западные пограничные течения, Антарктическое циркумполярное течение, меридиональное обращение вод с приповерхностными ячейками в тропиках и в Южном океане, а также глубоководные ячейки с опусканием вод в высоких широтах и абиссальной рециркуляцией в придонных слоях.

Явственно прослеживалось повышение теплосодержания вод океана, связанное с наблюдающимся в настоящее время общим потеплением климата. Отмечались и другие согласующиеся с данными из независимых источников проявления крупномасштабной изменчивости гидрофизических полей, такие как имеющие дипольную структуру аномалии температуры воды в экваториальной зоне Тихого океана, связанные с Эль-Ниньо 2015 года.

В обеих упомянутых выше версиях СУОД используемая для расчета ППП океанская модель, в которой искомые поля представлены на регулярной географической сетке со схождением меридианов в приполюсной области, не позволяла воспроизводить динамические процессы в Арктическом бассейне, а применяемое в модели условие жесткой крышки не давало возможности явно рассчитывать изменения уровня океана – одной из важных переменных, для которой имеются пригодные для усвоения данные наблюдений. Поэтому в следующей версии СУОД для расчета ППП было принято решение использовать одну из наиболее развитых современных моделей общей циркуляции океана – модель NEMO [60] в конфигурации ORCA1, совмещенную с моделью морского льда LIM. Результаты численных экспериментов по настройке этой версии модели NEMO в ходе ее подготовки к усвоению данных представлены в [46]. Разработанные дополнительные блоки по усвоению характеристик морского льда в модели LIM3 с несколькими градациями толщин льда описаны в [48].

По результатам настроечных численных экспериментов сформирована оперативная версия СУОД. В этой версии усвоение осуществляется с односуточным временным окном, позволяющим поддерживать ежесуточный выпуск продукции. Выходная продукция системы, функционирующей в экспериментальном режиме с октября 2016 года, включает в себя совокупность следующих океанографических полей, осредненных за текущие сутки анализа в узлах сетки модели ORCA1: температуры воды, ее солености, горизонтальных компонентов скорости течения на 75 модельных уровнях, двумерные поля уровня моря, толщины верхнего перемешанного слоя и сплоченности ледяного покрова. Наряду с числовыми данными в формате NetCDF, принятом в модели NEMO, результаты усвоения даются и в графическом представлении (рис. 1).





**Рис. 1.** Пример продукции системы усвоения океанографических данных – некоторые из расчетных гидрофизических полей на 16.06.2019: отклонения уровня моря, м (а); соленость морской воды на глубине 100 м, епс (б); скорость течений на глубине 100 м, м/с (в); сплоченность морского льда, % (г).  
**Fig. 1.** Example of oceanographic data assimilation system production at 16.06.2019: sea level deviations, m (a); sea water salinity at a depth 100 m, psu (б); current velocity at a depth of 100 m, m/s (в); sea ice concentration, % (r).

Дальнейшее повышение качества продукции СУОД может быть достигнуто развитием по нескольким направлениям: повышением горизонтального разрешения прогностической модели, применением более сложных схем анализа, учитывающих неоднородность и анизотропию статистической структуры анализируемых полей, а также взаимосвязи между анализируемыми полями. На следующем этапе планируется,

в частности, усовершенствовать схему анализа, в которой будут учтены взаимосвязи между сбалансированными частями анализируемых полей.

Оперативная продукция системы усвоения океанографических данных предназначена, в первую очередь, для задания начальных условий в прогностических расчетах, включая прогноз гидрофизических полей, а также для долгосрочного метеорологического прогноза с помощью моделей земной системы – совместных моделей атмосферы, океана, морского льда и деятельного слоя суши.

## 2.2. Прогноз течений и уровня в морях России

В условиях недостаточно развитой наблюдательной сети в морях, особенно в части регулярных измерений различных параметров в подповерхностных слоях воды, важное значение для получения информации об эволюции гидрофизических полей приобретают циркуляционные модели, основанные на уравнениях гидротермодинамики.

В Гидрометцентре России разработана z-координатная трехмерная гидродинамическая модель со свободной поверхностью [34], позволяющая проводить расчеты с изменяемой массой моря, учитывающая сток рек и испарение с поверхности моря. В модели учитывается осушение и затопление прибрежных территорий при расчете приливов и штормовых нагонов. Предполагается задание не только батиметрии акватории, соответствующей невозмущенному положению уровня моря, но и топографии прибрежных участков суши – районов возможного затопления. Уровень моря определяется из решения системы трехмерных уравнений движения и неразрывности без выделения баротропной и бароклинной моды. Преимуществом модели является точное описание рельефа дна по сравнению с моделями, где рельеф дна задан с точностью до глубин расчетных горизонтов. Переменная толщина придонной ячейки зависит от точного значения глубины места и изменяется по пространству. Использование переменной толщины придонной ячейки позволяет более точно описывать рельеф дна и скорость движения поверхностных гравитационных волн, что приводит к повышению качества моделирования приливов и нагонов.

На основе этой модели разработаны и впервые в России внедрены в оперативную практику Гидрометцентра России технологии краткосрочного прогноза изменений уровня и течений для Каспийского, Баренцева, Белого, Балтийского и Азовского морей [35–36, 40].

Уровень развития вычислительной техники в настоящее время позволяет производить с использованием модели не только расчеты краткосрочных прогнозов, но и расчеты уровня моря и течений на длительные промежутки времени (десятки лет) с заданным на поверхности моря атмосферным форсингом. Полученные длинные ряды (десятки лет) расчетных значений уровня моря и скорости течений поступают в вероятностную модель с помощью которой рассчитываются характеристики

динамического режима редкой повторяемости, возможные 1 раз в  $N$  лет ( $N=1, 5, 10, 25, 50$  и  $100$  лет). Эти характеристики необходимы для гидрометеорологического обеспечения работ по разведке и добыче минеральных ресурсов на шельфах морей России.

В оперативной модели Каспийского моря (шаг по горизонтали  $1856$  м,  $376 \times 646$  точек на плоскости,  $20$  расчетных горизонтов, шаг по времени  $10$  с) используются еженедельные данные о ледовой обстановке – цифровые поля сплоченности льда, полученные по картам, составляемым в Гидрометцентре России. Влияние льда учитывается, во-первых, через касательное напряжение ветра, уменьшающееся пропорционально сплоченности льда так, что при сплоченности льда  $100\%$  напряжение трения ветра равно нулю; и, во-вторых, путем задания трения воды о лед по квадратичному закону (аналогично придонному трению).

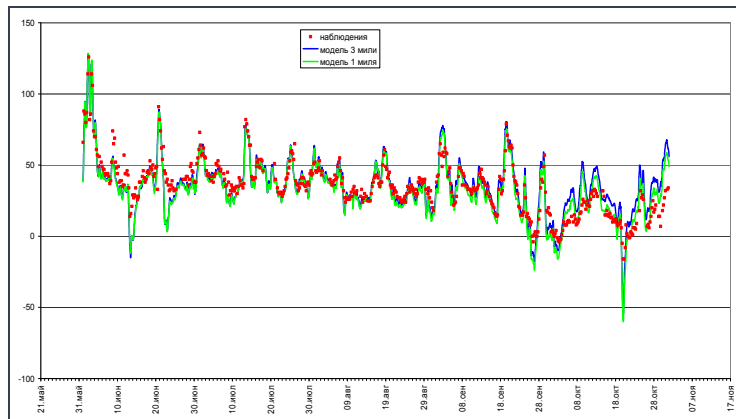
Входными данными являются поля прогноза на  $48$  ч давления и ветра модели COSMO-Ru07 с разрешением примерно  $7$  км по горизонтали. Прогностические поля уровня моря и скорости течений в оперативной практике Гидрометцентра России рассчитываются по морской модели дважды в сутки в  $0$  и  $12$  ч после окончания расчета атмосферной модели. Начальное модельное поле уровня для каждого морского прогноза на  $48$  ч не корректируется наблюдениями за уровнем моря и представляет собой полученное в предыдущем прогнозе расчетное поле уровня моря с заблаговременностью  $12$  ч. Выходными данными являются прогностические трехмерные поля скорости течений и уровня Каспийского моря на  $1$ -мильной сетке. Результаты прогноза на  $48$  ч записываются в базу данных Гидрометцентра России с шагом  $1$  ч по времени.

Верификация оперативной модели [38] проводилась путем сравнения диагностических и прогностических расчетов уровня моря с наблюдениями на станции о. Тюлений в Каспийском море. Были проведены непрерывные расчеты уровня моря по заданному на поверхности моря атмосферному воздействию (ветер и давление) в течение  $5$  месяцев на сетках с горизонтальным разрешением  $3$  мили и  $1$  мили. Начальное поле уровня Каспийского моря было задано постоянным по всей площади моря и равным  $-27,6$  м БС, начальные скорости течений равны нулю. Результаты сравнения расчетов уровня моря с наблюдениями представлены на рис. 2.

Расчеты нагонов в Северном Каспии в  $2014$  и  $2015$  гг. показали, что модель адекватно воспроизводит штормовые нагоны на станции о. Тюлений и качество расчетов уровня моря по модели возрастает при увеличении скорости ветра. Коэффициент корреляции при сравнении с наблюдениями на о. Тюлений при отсутствии нагонов (нагоны меньше  $30$  см) составляет  $0,85$  и возрастает до  $0,96$  при нагоне  $125$  см [33].

Модель Баренцева моря численно реализована на равномерной горизонтальной сетке с шагом  $5 \times 1856$  м,  $156 \times 201$  узлов на горизонтальной плоскости,  $20$  расчетных горизонтов, шаг по времени  $90$  с. На жидких границах задаются колебания уровня моря в виде суммы приливной и непериодической составляющих уровня моря. Приливная составляющая задавалась в виде суммы восьми гармоник прилива. Непериодическая составляющая

уровня моря – в виде суммы двух компонентов: нестационарного (синоптического), рассчитываемого по закону обратного барометра, и квазистационарного, формируемого системой плотностных течений, полученных по среднемесячным климатическим полям температуры и солёности.



**Рис. 2.** Изменения уровня моря (см) на станции о. Тюлений в июне – октябре 2014 г. по данным наблюдений и расчета на сетке с разрешением 3 мили и 1 мили.

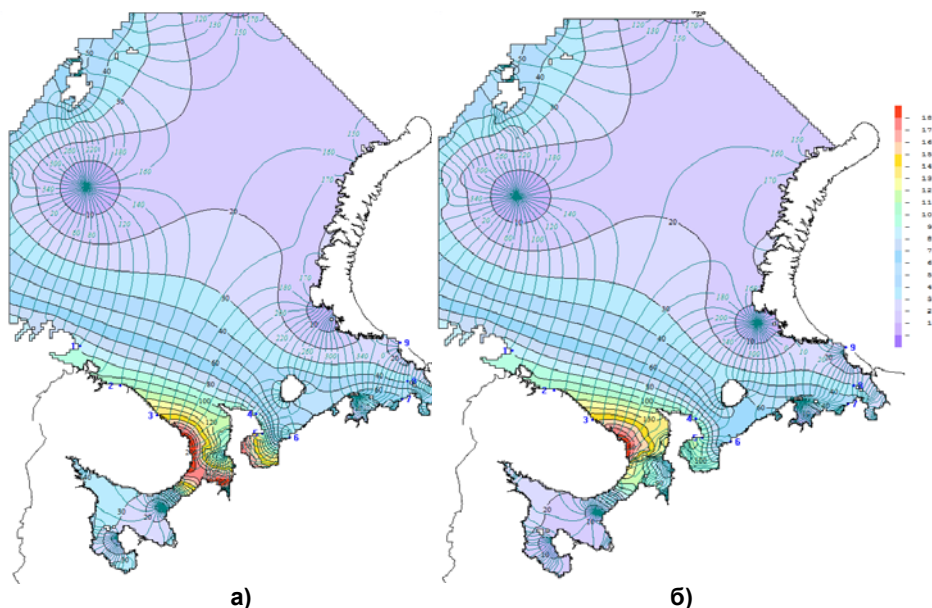
**Fig. 2.** Sea level changes (cm) at the station “Island Tyleny” in June–October 2014 (observations) and calculations on a grid with a resolution of 3 miles and 1 mile.

На рис. 3а приведена котидальная карта доминирующей гармонике – волны  $M_2$  для сентября. Амплитуда волны  $M_2$  увеличивается от архипелага Земля Франца-Иосифа до границы Белого и Баренцева морей. Максимальные ее значения отмечаются вдоль Кольского берега и на входе в Белое море, в Мезенском заливе и в Чешской губе. Амфидромии волны  $M_2$  находятся к северо-востоку от о. Медвежий и в Горле Белого моря, в районе м. Вепревский. Центр вырожденной амфидромии  $M_2$  в сентябре расположен в юго-западной части архипелага Новая Земля, в апреле (рис. 3б) центр амфидромии смещается на юго-запад, и вырожденная амфидромия сменяется на истинную.

Верификация модели проводилась путем сравнения результатов расчетов с данными гармонического анализа наблюдений на 60 береговых постах Баренцева и Белого морей. Сравнение расчетов и наблюдений было выполнено по расчетам гармоник  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$  для сентября – месяца наименьшей ледовитости Баренцева моря и по наблюдениям для безледного периода [40].

Оперативная модель Балтийского моря численно реализована на равномерной горизонтальной сетке с шагом  $2 \times 1856$  м,  $330 \times 375$  узлов на горизонтальной плоскости, 14 расчетных горизонтов, шаг по времени 40 с. Модификация оперативной модели Балтийского моря (BALT-P) используется в качестве вспомогательной модели для расчета прогнозов уровня

воды в системе предупреждения угрозы наводнений комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга [37]. Реализовано постепенное закрытие и открытие ворот дамбы, происходящее в течение заданного промежутка времени. Установлено, что использование ансамблевого прогноза с использованием двух морских моделей уровня и течений (BSM2010 и BALT-P) и двух источников атмосферных прогнозов (GFS, HIRLAM) позволяет в среднем на 25 % снизить ошибку прогноза уровня воды в Санкт-Петербурге.

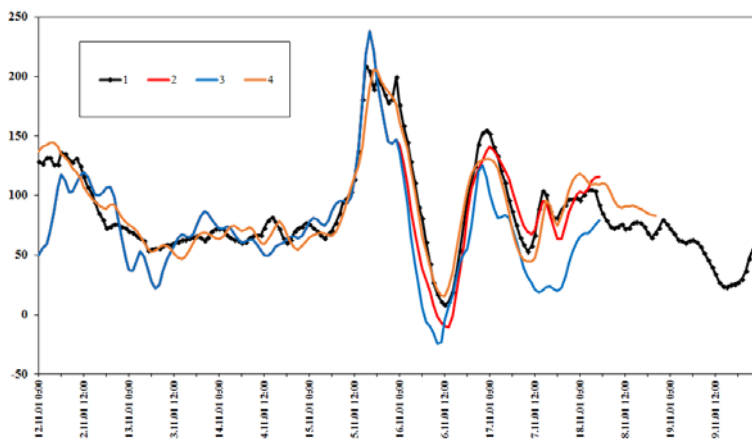


**Рис. 3.** Котидальные карты волны  $M_2$  для сентября (а) и апреля (б).  
**Fig. 3.** Cotidal  $M_2$  wave maps for September (a) and April (б).

Исследован механизм возникновения второго максимума наводнения в Санкт-Петербурге [35]. Впервые показано, что этот максимум вызывается возбуждением в результате штормового ветрового воздействия одноузловой сейши Балтийского моря, вершина которой находится в Финском заливе. В основном ветер препятствует росту собственного колебания, но в отдельных случаях воздействие ветра и давления приводит к усилению собственного колебания и возрастанию второго максимума уровня, как это произошло в наводнении 12–18 ноября 2001 г. в Санкт-Петербурге (рис. 4).

Оперативная модель Азовского моря численно реализована на равномерной горизонтальной сетке с шагом  $0,5 \times 1856$  м,  $400 \times 270$  узлов на горизонтальной плоскости, 12 расчетных горизонтов, шаг по времени 40 с. Оперативная модель Азовского моря с использованием атмосферного форсинга по модели COSMO-Ru07 предсказала время наступления

и величину максимума уровня моря (251 см по данным наблюдений и 249 см в прогнозе) в катастрофическом наводнении в Таганроге 24 сентября 2014 г. Верификация оперативной модели Азовского моря [39] с использованием данных наблюдений за уровнем моря на 9 береговых постах выполнена для девяти месяцев 2017 года. Показано, что модель хорошо воспроизводит воздействие ветра на изменения уровня моря.



**Рис. 4.** Изменения уровня моря (см) для пункта Горный институт: 1 – наблюдения; 2 – модель BALT\_P; 3 – модель BALT\_P с отключением ветра после первого пика; 4 – модель INMOM.

**Fig. 4.** Sea level changes (cm) for point Gorny Institute: 1 – observations; 2 – BALT\_P model; 3 – BALT\_P model with wind cut-off after the first peak; 4 – INMOM model.

### 2.3. Прогнозирование ветрового волнения

Разработка и поддержание систем оперативного прогноза ветрового волнения относятся к числу наиболее актуальных задач оперативной океанологии для развития информационного обеспечения морской деятельности. Общая задача состоит в том, чтобы пользователям предоставлялась оперативная прогностическая информация по основным параметрам ветрового волнения (с максимально возможной заблаговременностью и детализацией) для акваторий всех морей России и для океанических акваторий и регионов, обозначаемых в Морской доктрине Российской Федерации.

Численный прогноз характеристик ветрового волнения, по-видимому, является первым в хронологическом отношении приложением оперативной океанологии со свойственным ей общим подходом (прогностическая модель, оперативная информационная продукция, мониторинг качества прогнозов). Соответствующие прогностические системы начали появляться в 1980-е годы [23, 41]. С началом нынешнего века в прогностических приложениях утвердились спектральные модели, основанные

на численном решении сеточными методами уравнения баланса волновой энергии или волнового действия в спектральной форме [23, 67, 69, 72]. Входными данными для таких моделей в их прогностических приложениях служат результаты численного метеорологического прогноза. В рамках именно этого подхода в Гидрометцентре России произошло существенное развитие методов и технологических систем прогнозирования ветрового волнения.

### **2.3.1. Комплексная система прогноза параметров ветрового волнения в Мировом океане и морях России**

В большинстве случаев задачи прогнозирования волнения в океане и отдельных морях оказываются взаимосвязанными – на открытых границах моря требуется задание условий, получаемых из океанической модели. Аналогичная ситуация имеет место и для прогнозов в конфигурации “море – прибрежная зона“. Поэтому современный подход к описанию ветрового волнения, как, впрочем, и других океанологических процессов, подразумевает комплексное использование сопряженных моделей “океан – море – прибрежная зона” в рамках единой задачи. Комплексный подход подразумевает также сопряжение технологических линий морских прогнозов с передовыми метеорологическими системами, поставляющими сведения об атмосферных воздействиях на поверхности океанов и морей России.

Преодолению проблемных обстоятельств, связанных с множественностью географических объектов для прогнозирования волновых условий, может способствовать применение базовой (единой) модели ветрового волнения для технологических линий по всем морским объектам и “тиражирование” основных элементов этих линий.

При разработке комплексной системы были рассмотрены наиболее известные модели ветрового волнения, ориентированные на применения в прогностических системах, и проанализированы их возможности и специфические особенности с учетом сформулированных требований для базовой модели. В итоге в качестве базовой модели ветрового волнения для разработки технологических линий прогноза параметров волнения в морях России и других акваториях была выбрана модель WAVEWATCH III, версия 3.14+ (далее WW3).

Эта модель относится к третьему поколению волновых моделей. Расчет волновых характеристик осуществляется путем интегрирования уравнения баланса для спектральной плотности волнового действия  $N(k, \theta, \lambda, \phi, t)$ , являющейся функцией волнового числа  $k$ , направления распространения  $\theta$ , географических координат  $(\lambda, \phi)$  и времени  $t$ . Для общего случая, в котором учитывается зависимость поля волн от средних течений (связанные с течениями доплеровские эффекты), расчетное уравнение в сферической системе координат записывается следующим образом [69]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \dot{\phi} N \cos \theta + \frac{\partial}{\partial \lambda} \dot{\lambda} N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k} N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}_g N = \frac{S}{\sigma}; \quad (1)$$

$$\dot{\phi} = \frac{c_g \cos \theta + U_\phi}{R}; \quad \dot{\lambda} = \frac{c_g \sin \theta + U_\lambda}{R}; \quad \dot{k} = -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial s} - \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial s};$$

$$\dot{\theta}_g = \dot{\theta} - \frac{c_g \tan \phi \cos \theta}{R}; \quad \dot{\theta} = -\frac{1}{k} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial m} \right];$$

$$c_g = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = \frac{\sigma}{k} \left[ \frac{1}{2} + \frac{kd}{\sinh(2kd)} \right],$$

здесь  $c_g$  – групповая скорость волн, определяемая из дисперсионного соотношения в рамках линейной теории волн  $\sigma^2 = gk \tanh(kd)$ ;  $\mathbf{U} = (U_\lambda, U_\phi)$  – средняя по глубине на масштабе порядка длины волны скорость течений;  $R$  – радиус Земли;  $d$  – глубина;  $s$  – координата по направлению  $\theta$ ;  $m$  – перпендикулярная  $s$  координата;  $\mathbf{k}$  – вектор волнового числа;  $S$  – совокупный вклад источников и стоков энергии волн в различных спектральных диапазонах:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{db} + S_{tr} + S_{sc}. \quad (2)$$

В модели учитываются основные процессы развития волн под действием ветра: ветровая накачка – приток энергии от ветра ( $S_{in}$ ), перераспределение энергии по спектру вследствие нелинейных взаимодействий ( $S_{nl}$ ), процессы ослабления волн из-за донного трения ( $S_{bot}$ ), обрушения ( $S_{ds}$ ), рассеяния энергии на донных неоднородностях ( $S_{sc}$ ) и трехволновых взаимодействий на мелководье ( $S_{tr}$ ). Предусмотрен также учет влияния течений, приливов, островов подсеточного масштаба и ледового покрова.

Граничные условия на береговой линии для переноса  $N$  зависят от направления волн: при распространении волн к берегу принимается условие полного поглощения энергии (без отражения), если волны идут от берега, то на береговой линии задается отсутствие волнового действия  $N=0$ . В задаче расчета внутриспектральных процессов в пространстве  $(\theta, k)$  для  $\theta$  выполняется условие периодичности, а для  $k$  в низкочастотной части  $k < k_{min}$  волновое действие обнуляется ( $k_{min}$  – первое значение в дискретной области волновых чисел), а на границе больших волновых чисел (высоких частот) используется заданная параметрическая форма спектра.

Помимо расчетного ядра, система прогноза ветрового волнения включает в себя средства конфигурирования расчетных областей и подготовки входной информации. Расчетные области, аппроксимирующие конфигурацию берегов и батиметрию реальных морских бассейнов, в прогностической модели определяются как на регулярных широтно-долготных, так и на неструктурированных (триангуляционных) сетках. Основные характеристики реализованных расчетных конфигураций системы прогнозирования ветрового волнения представлены в табл. 1.



Дублирование источников метеорологического прогноза (табл. 1) предусмотрено для повышения надежности функционирования прогностической системы. При поступлении оперативных данных из нескольких метеорологических систем приоритет отдается продукции с более высокими характеристиками оправдываемости прогнозов полей ветра по данным регулярного мониторинга их качества.

**Таблица 1.** Морские бассейны и расчетные сетки, реализованные в комплексной системе прогнозирования волнения

**Table 1.** Marine basins and computational grids implemented in a comprehensive wave prediction system

Основной бассейн	Вложенные регионы	Сетка	Заблаговременность / дискретность, ч	Прогноз ветра
Мировой океан	Мировой океан	0,5×0,5° (~50 км)	120/3	ПЛАВ, GFS
	Баренцево море	0,2×0,1° (~10 км)	120/3	ПЛАВ, GFS
	Белое море	3,0×1,2' (~2 км)	120/3	ПЛАВ, GFS
Черное море	Черное море	6,0×6,0' (~10 км)	120/3	ПЛАВ, GFS
	Азовское море	1,2×1,2' (~2 км)	120/3, 48/1	ПЛАВ, GFS, COSMO-Ru
	<i>Керченский пр-в</i>	<i>0,3×0,3' (~0,5 км)</i>	<i>48/1</i>	<i>COSMO-Ru</i>
Каспийское море	Каспийское море	3,6×3,6' (~6 км)	120/3	ПЛАВ, GFS
	Северный Каспий	1,2×1,2' (~2 км)	120/3	ПЛАВ, GFS
Балтийское море	Балтийское море	4,8×2,4' (~4 км)	120/3	ПЛАВ, GFS
	Финский залив	2,4×1,2' (~2 км)	120/3, 48/1	ПЛАВ, GFS, COSMO-Ru
	<i>Невская губа</i>	<i>0,2×0,1' (~0,2 км)</i>	<i>48/1</i>	<i>COSMO-Ru</i>

*Примечание.* Курсивом выделены конфигурации, используемые в неоперативном режиме.

Регулярным расчетам прогнозов ветрового волнения в оперативном режиме предшествовал этап продолжительных (около года) испытаний системы для получения обеспеченных оценок качества прогностических полей параметров волнения по каждому из географических объектов. Точность прогнозов оценивалась путем сопоставления прогностических значений высоты значительных волн (SWH) с данными наблюдений двух типов: спутниковых (альтиметрических) измерений из базы данных RADS, поддерживаемой в Дельфтском институте исследований Земли из космоса [66], и данных волновых буев при их наличии в соответствующей акватории. Для количественной оценки качества прогнозов высоты волн использовались такие показатели как оправдываемость прогноза *Опр*, подсчитываемая в соответствии с [45], а также средние ошибки: *СО* – средние отклонения прогностических значений от наблюдаемых

(смещения), среднеквадратичные ошибки *СКО* и коэффициенты корреляции *Кор* между измеренными и прогностическими значениями.

В табл. 2 сведены такие характеристики для прогнозов ветрового волнения на 72 ч по основным географическим объектам, поддерживаемым в настоящее время комплексной системой прогнозирования волнения в Мировом океане и морях России. Полученные характеристики точности прогнозов высоты волн превосходили (на время проведения испытаний) показатели других национальных прогностических систем для Мирового океана и некоторых российских морей [18, 21, 49,] и в целом не уступали таковым для зарубежных систем, например в прогнозах по Мировому океану (рис. 5).

**Таблица 2.** Показатели качества ежедневных прогнозов высоты значительных волн на 72 ч для Мирового океана и российских морей по данным сопоставления со спутниковыми альтиметрическими наблюдениями

**Table 2.** Quality indicators daily significant wave height forecasts for 72 hours for the world ocean and Russian seas according to comparison with satellite altimetric observations

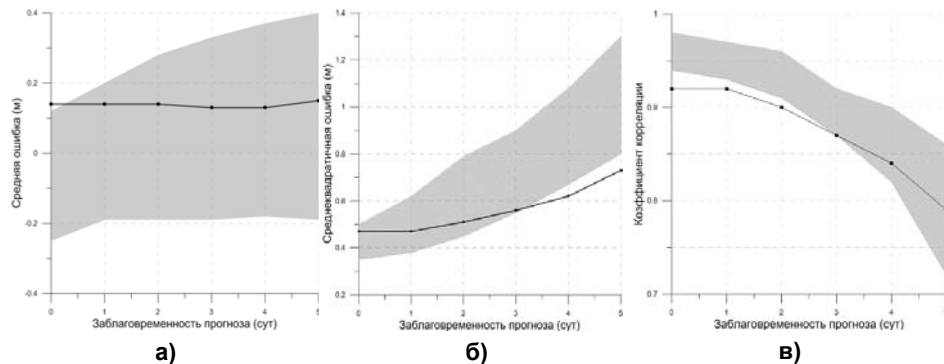
Акватория	Период сравнений	Число сравнений наблюдение – прогноз	СО, м	СКО, м	Кор	Опр, %
Мировой океан	01.10.2014-30.09.2015	48309	0,23	0,61	0,92	86,3
Азовское море	15.04.2011-30.11.2011	371	-0,14	0,36	0,70	90,0
Черное море	15.04.2011-30.11.2011	5637	-0,03	0,44	0,80	81,3
Каспийское море	15.04.2011-30.11.2011	4424	-0,07	0,38	0,83	86,1
Балтийское море	01.04.2012-31.03.2013	27156	-0,04	0,51	0,77	74,7
Финский залив	01.04.2012-31.03.2013	1411	-0,27	0,35	0,72	85,2

### 2.3.2. Детализация прогнозов ветрового волнения в прибрежных зонах

Для многих отраслей морской деятельности помимо прогноза параметров ветрового волнения в открытом море требуется прогностическая информация с высоким пространственно-временным разрешением для прибрежной зоны и небольших акваторий (бухт, гаваней, портов и др.).

Волновые процессы на глубокой воде и вблизи берегов существенно различаются [59]. Влияние дна на развитие и распространение волн приводит к появлению дополнительных механизмов (донное трение и рефракция, обрушение волн, дифракция и др.), определяющих эволюцию волнения и форму волнового спектра. Для адекватного описания этих процессов и необходимости более аккуратного задания батиметрии и береговой линии требуется существенное повышение пространственного разрешения моделей по сравнению с их конфигурациями для открытого

моря. Это достигается, как уже отмечалось выше, применением прямоугольных вложенных сеток (табл. 1) с “телескопизацией” требуемых регионов и с расчетом волновых характеристик на таких сопряженных сетках в рамках единой вычислительной задачи.

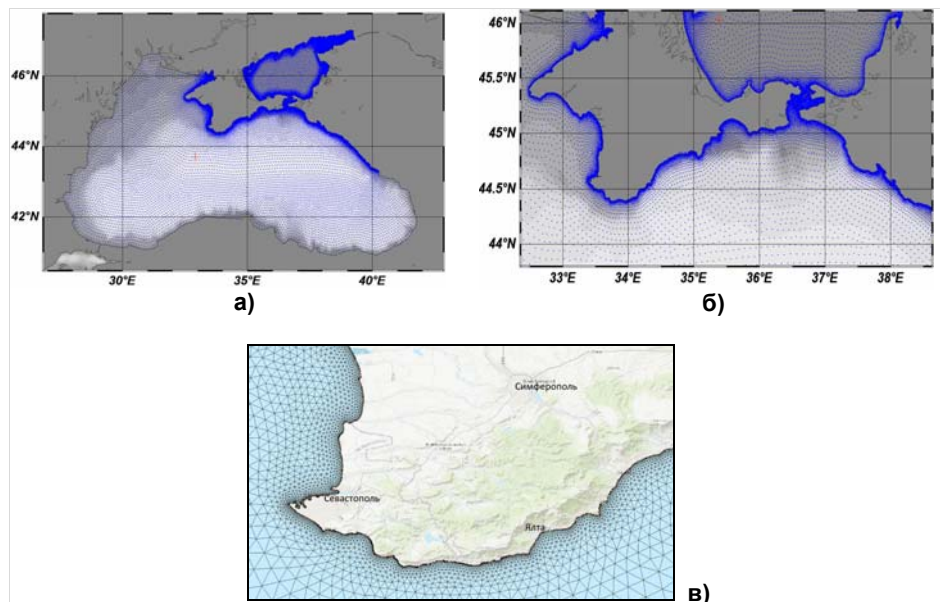


**Рис. 5.** Зависимость смещения (а), среднеквадратического отклонения (б) и коэффициента корреляции (в) от заблаговременности прогноза SWH для системы Гидрометцентра России (линии) и диапазон изменчивости указанных характеристик по данным [57] для 10 моделей зарубежных центров (заливка).  
**Fig. 5.** Dependence of displacement (а), standard deviation (б) and correlation coefficient (в) on the forecast SWH lead time for the system of Hydrometeorological center of Russia (lines) and the range of variability of these characteristics according to [57] for 10 models of foreign centers (fill).

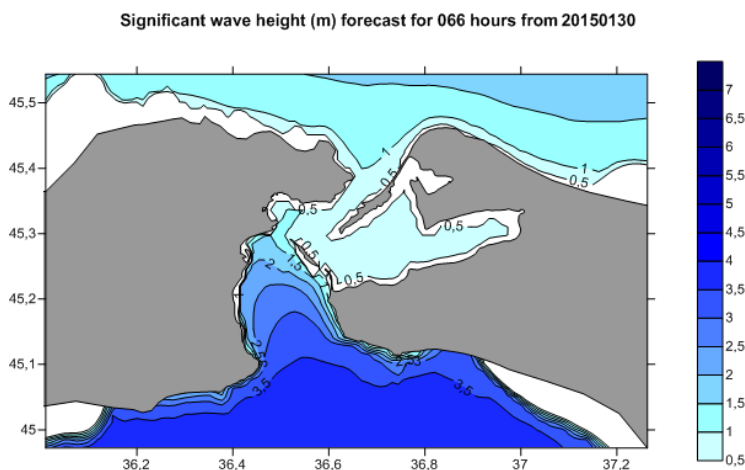
Альтернативный подход связан с применением нерегулярных, неортогональных сеток для тех же волновых моделей. В последние годы в Гидрометцентре России развивается система прогноза ветрового волнения с использованием неструктурных триангуляционных вычислительных сеток. Такая система реализована для Черного и Азовского морей с детализацией в прибрежной зоне [25, 27, 47, 63]. В основе этой системы – спектральная волновая модель SWAN [67]. В качестве форсинга используются прогностические поля ветра GFS с разрешением  $0,25^\circ$  и прогнозы COSMO-Ru с разрешением 7 км. Вычислительная сетка включает в себя Черное и Азовское моря с шагом по пространству 6–12 км в открытом море и прибрежную зону Российской Федерации с шагом 300–600 м (рис. 6). Общее количество узлов сетки 37430. Система обеспечивает прогнозирование на срок до 5 сут с шагом по времени 3 ч следующих характеристик ветрового волнения: высоты значительных волн (SWH), среднего направления распространения, средней длины, среднего периода. Пример прогностической продукции для района Керченского пролива приводится на рис. 7.

По результатам оценки качества прогнозов высоты волн коэффициент корреляции составляет 0,8–0,9 на первые сутки прогноза и уменьшается до 0,65–0,7 на третьи сутки. Для скорости ветра при форсинге

COSMO-Ru коэффициент корреляции составляет около 0,8 на первые сутки и уменьшается до 0,7 на вторые сутки.



**Рис. 6.** Расчетная сетка для Черного и Азовского морей (а) и ее фрагменты для районов Керченского пролива (б) и Южного берега Крыма (в).  
**Fig. 6.** Calculation grid for the Black and Azov seas (a) and its fragments for the Kerch strait (б) and the southern coast of Crimea (в).



**Рис. 7.** Пример прогноза высоты значительных волн в Керченском проливе на 66 ч от 30 января 2015 г.  
**Fig. 7.** An example of the significant waves height forecast in the Kerch strait for 66 hours from January 30, 2015.

Подобные неструктурные сетки успешно используются для диагностических расчетов в других морях России [26, 64]. В будущем для этих морей предполагается поэтапно распространить технологию прогноза параметров ветрового волнения с высоким разрешением в прибрежной зоне.

### **2.3.3. Долгосрочный прогноз опасного волнения в Северной Атлантике**

Для ряда потребителей оперативной морской информации, помимо общего прогноза волновых условий, требуются сведения о вероятности некоторых пороговых градаций высоты ожидаемых ветровых волн. Наиболее важен прогноз опасного ветрового волнения (ОВ). Согласно типовому перечню опасных природных явлений, к опасным явлениям относятся волны, высота которых в прибрежных районах составляет не менее 4 м, в открытом море – не менее 6 м, в открытом океане – не менее 8 м.

В настоящее время прогноз ветрового волнения на основе гидродинамических моделей дает надежные результаты с заблаговременностью до 3–5 сут. Для сроков с большей заблаговременностью качество прогноза волнения ухудшается, в особенности это проявляется в условиях возникновения ОВ, что создает угрозу для безопасности различных видов морской деятельности. Для планирования морских работ, требующих большого количества времени (буксировка морских объектов и т. д.) необходимы прогнозы, и в особенности прогнозы ОВ, с большей заблаговременностью.

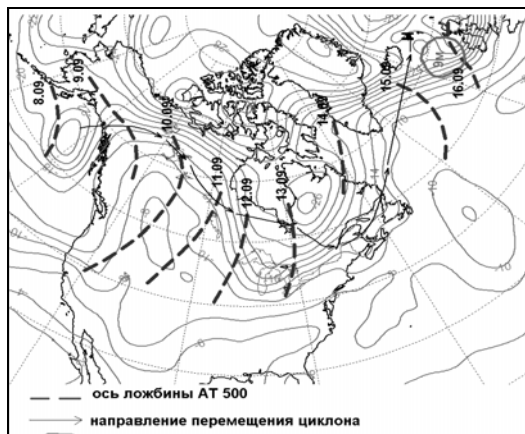
В Гидрометцентре России создана оперативная технология прогноза возникновения опасного волнения в Северной Атлантике с заблаговременностью до 10–15 сут [32]. Технология включает идентификацию атмосферных ложбин в средней тропосфере над западной частью Северной Америки, расчет скорости перемещения ложбин, расчет времени и района возникновения опасного волнения в Северной Атлантике (рис. 8).

Термодинамические характеристики воздушных масс в районах перемещения ложбин в большой степени определяют их воздействие на циклогенез на акватории Северной Атлантики. В технологии используется прогноз температуры в средней тропосфере на основе глобальной атмосферной модели ПЛАВ. Получены удовлетворительные оценки качества экспериментальных прогнозов опасного волнения в январе – апреле 2015 г. Из 31 случая возникновения очагов ОВ успешно было спрогнозировано возникновение 28 очагов.

## **2.4. Ледовые прогнозы для неарктических морей России**

Диагностическая и прогностическая информация о состоянии ледяного покрова важна для обеспечения морской деятельности, в том числе операций в российских неарктических и арктических морях. Для этого

в Гидрометцентре России осуществляется сбор, контроль, анализ и доведение до потребителей морской гидрометеорологической и ледовой информации. Составляется три вида ледовых прогнозов по неарктическим морям: недельный прогноз, месячный прогноз, долгосрочный ледовый прогноз на предстоящий ледовый сезон.



**Рис. 8.** Схема перемещения типичной ложбины от момента выхода на северо-восточную часть Тихого океана до возникновения очага опасного волнения в Северной Атлантике в сентябре 2010 г.

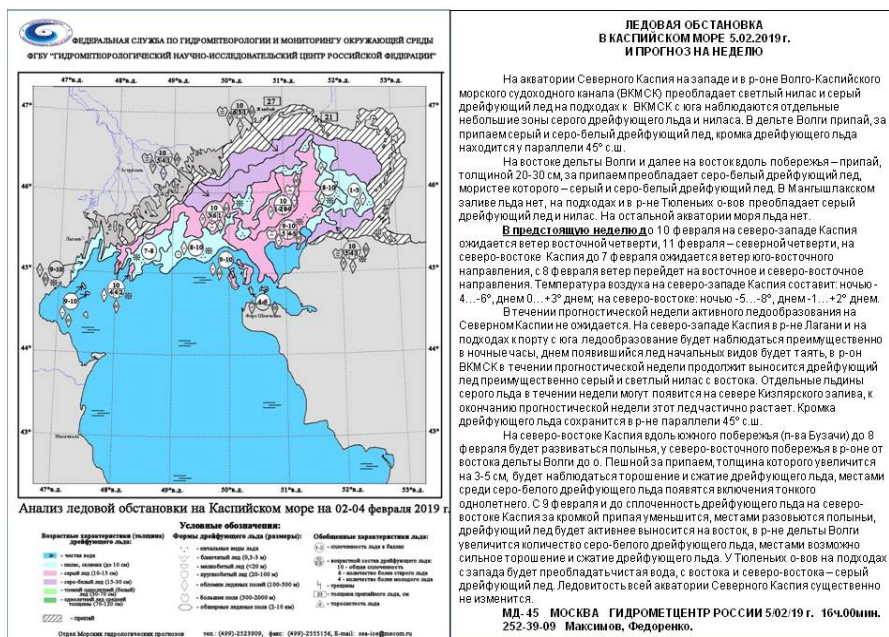
**Fig. 8.** The scheme of a typical trough movement from the moment of the arrive to the North-Eastern part of the Pacific ocean until the occurrence of dangerous waves in the North Atlantic in September 2010.

#### 2.4.1. Недельный ледовый прогноз

Подготовка этого вида прогноза включает:

- анализ снимков ИСЗ MODIS, Метеор и др. в видимом, инфракрасном, радиолокационном, микроволновом диапазонах;
- дешифрирование снимков ИСЗ путем выделения зон льда с однородными характеристиками, сопоставление особенностей текстур снимков в разных диапазонах;
- картирование ледовой обстановки и дополнение ледовых характеристик данными морских гидрометеорологических станций;
- изучение фактической метеорологической ситуации, а также метеорологических прогнозов модели атмосферы Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ЕЦСПП);
- составление ледового прогноза по любому неарктическому морю России на неделю.

Недельный прогноз с картой фактической ледовой обстановки востребован судоходными компаниями, администрациями морских портов, ФГУП «Росморпорт» и его филиалами. Пример такого рода продукции приведен на рис. 9.



**Рис. 9.** Анализ ледовых условий и их прогноз в Каспийском море в феврале 2019 г.

**Fig. 9.** Analysis of ice conditions and their forecast in the Caspian sea in February 2019.

## 2.4.2. Месячный ледовый прогноз.

Прогноз выполняется аналоговым методом. Для его осуществления по всем российским морям созданы таблицы среднемесячных значений температуры воздуха и приземного давления для гидрометеорологических станций с длительными и непрерывными рядами наблюдений. Эти таблицы служат основой для поиска годов-аналогов (выбирается не менее трех лет), близких по изменчивости метеорологических элементов данным текущего года. В архиве ледовых карт и таблиц выбираются и анализируются данные ледовых наблюдений, соответствующие предстоящему месяцу, после чего выполняется построение карт ожидаемой максимальной ледовитости и толщины льда. Определяемость месячного прогноза составляет 80–85 %.

Прогноз рассылается в морские УГМС, а также (по запросу) в организации Минтранса (ФГУП «Росморпорт», ФГБУ «Администрация Северного морского пути» и др.). В прогнозе на картах и в таблицах для всех неарктических морей показывается наибольшая ожидаемая ледовитость, а также максимальная толщина льда в основных морских портах России.

### 2.4.3. Долгосрочный ледовый прогноз на предстоящий ледовый сезон

Для планирования морских операций на российских морях в предстоящий ледовый период (а главное, для обоснования расстановки ледокольного флота) существует необходимость составления долгосрочных ледовых прогнозов. Заблаговременность прогноза Гидрометцентра России для неарктических морей, выполняемого в начале октября, составляет от 2 до 8 мес для разных элементов ледового режима. Оправдываемость долгосрочного прогноза составляет 70–75 % (при обеспеченности методов по зависимым рядам 80 % и более) [10, 11].

Прогнозируется ряд характеристик по портам неарктических морей: сумма градусодней мороза; дата первого появления льда; максимальная за ледовый сезон средняя месячная ледовитость моря; максимальная за ледовый сезон толщина припайного льда; дата очищения моря ото льда; продолжительность ледового периода. Прогноз ледовых характеристик в начале октября публикуется в бюллетене «Долгосрочный прогноз ледовых условий на неарктических морях на предстоящий ледовый сезон».

Технология долгосрочного прогноза представляет собой ансамблевый метод, включающий три составных блока для расчета ледовых параметров [12, 13]:

1. Расчет по уравнениям множественной корреляции на основе использования поля приземной температуры воздуха над евроатлантическим и азиатским секторами.

2. Расчет по уравнениям множественной корреляции на основе использования характеристик поля давления над евроатлантическим и азиатским секторами.

3. Разложение кривых хода межгодовой изменчивости ледовых параметров на гармонические составляющие с экстраполяцией их сумм на предстоящий ледовый сезон.

В рамках развития данной технологии разработаны методы прогноза ледовых условий на Баренцевом, Белом, Азовском, Каспийском морях, в Финском заливе, на дальневосточных морях [10, 11]. Решениями ЦМКП в 2011, 2014 и 2018 гг. эти методы включены в практику оперативной деятельности Гидрометцентра России со статусом основных методов.

Информационной основой методов прогноза являются материалы электронного архива метеорологической и ледовой информации. Архив включает следующие материалы:

- данные наблюдений за температурой воздуха и приземным давлением на морских гидрометеорологических станциях неарктических морей;

- данные наблюдений за температурой воздуха и приземным давлением в пунктах, расположенных в районах центров действия атмосферы: сибирского максимума (Иркутск), исландского минимума (Рейкьявик), азорского максимума (Понта-Делгада), алеутского минимума (о. Беринга);



– таблицы дат наступления ледовых фаз, продолжительности ледовых периодов, толщин припайного льда, ледовитости неарктических морей.

Пример расчета ледовитости по Татарскому проливу ансамблевым методом приведен на рис. 10. Эффективность расчета по зависимому ряду составляет 19,6 %. Суммарный коэффициент корреляции равен 0,76.

Еще один пример регулярной прогностической продукции – бюллетеня «Долгосрочный прогноз ледовых условий на неарктических морях на ледовый сезон» – приведен на рис. 11.

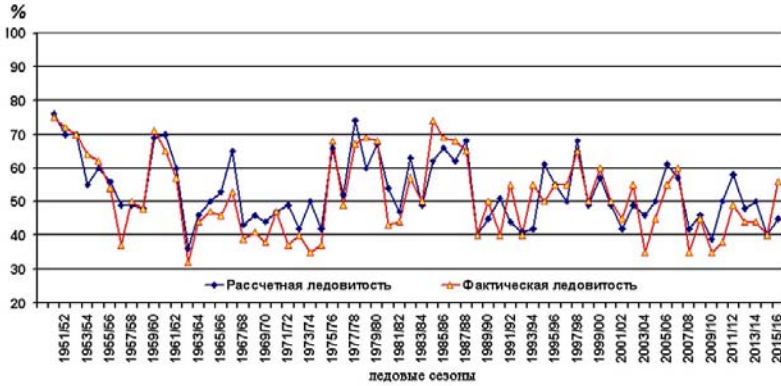


Рис. 10. Расчетная и наблюдаемая ледовитость в Татарском проливе.  
Fig. 10. Calculated and observed ice cover in the Tatar Strait.

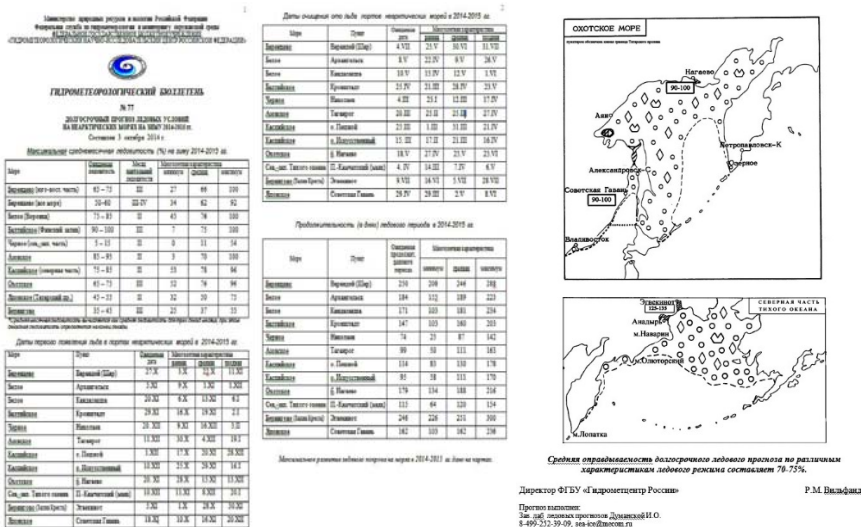


Рис. 11. Фрагмент бюллетеня «Долгосрочный прогноз ледовых условий на неарктических морях на ледовый сезон» 2014–2015 гг.  
Fig. 11. Fragment of the bulletin «Long-Term forecast of ice conditions on non-Arctic seas for the ice season» 2014-2015.

### 3. Научно-справочные и нормативно-методические издания

За период с 2009 по 2018 г. в Гидрометцентре России было подготовлено и издано 10 научно-справочных и нормативно-методических пособий и документов. В подготовке некоторых из них принимали участие институты Росгидромета: ФГБУ «АНИИ», ФГБУ «ГОИН», ФГБУ «ДВНИГМИ», ФГБУ «ГГО», ФГБУ «КаспМНИЦ».

В пособии [1] изложены цели, задачи и организация океанологического обслуживания в России. Описаны методы и технологии прогноза ветра, волнения, уровня, течений, температуры воды и ледовых условий на морях России и в океанах. Отдельная глава посвящена прогнозу опасных морских гидрометеорологических явлений (цунами, тягун, обледенение судов). Дано описание европейских морских прогностических систем.

Научно-справочное пособие [41] посвящено проблемам теории и практики прогноза волнения в морях и океанах. Представлены сведения об истории исследования и прогнозирования волнения, методах и средствах наблюдений за ветром и волнением, использовании информации о волнении в различных областях. Даются основные понятия теории волн, обсуждаются физические механизмы формирования волнения и результаты статистической обработки измерений волн. Описаны оперативные численные прогностические модели волнения и примеры их использования. Даются сведения о режиме ветра и волнения в различных районах Мирового океана.

Пособие [6] посвящено проблемам, связанным с изменчивостью уровня Каспийского моря (УКМ). Основное внимание уделено многолетним колебаниям УКМ и причинам, их вызывающих. Анализируется роль климатического, тектонического и антропогенного факторов. Описывается уравнение водного баланса Каспийского моря и вклад его компонент в изменения уровня. Излагаются методы долгосрочного и сверхдолгосрочного прогноза УКМ. Описаны условия возникновения сгонно-нагонных явлений и методы их прогнозирования.

В пособиях [8, 9] на основании обработки данных многолетнего архива ледовой информации приведены сведения об изменениях в ледовой обстановке морей европейской и азиатской частей России за период с 1970 по 2012 г. По некоторым характеристикам используются ряды наблюдения с 1901 г. Для каждого моря описаны факторы, определяющие состояние ледяного покрова. Большое внимание уделено влиянию ледовых процессов на судоходство и добычу углеводородов на шельфе морей России.

Монография [30] посвящена североатлантическому колебанию (САК), которое является одной из важнейших характеристик крупномасштабной циркуляции атмосферы в северном полушарии. Исследуется роль атмосферных синоптических процессов и параметров океана в формировании и эволюции той или иной фазы САК. Обсуждаются вопросы влияния САК на погоду и климат в регионе Северная Атлантика – Европа, а также на различные поля гидрофизических параметров в океане.

В пособии [29] обобщены сведения о наблюдениях экстремальных волн в океанах и морях, приводятся вероятностные характеристики экстремальных волн. Исследуется роль атмосферных синоптических процессов в формировании экстремального волнения в Северной Атлантике, описывается динамика зон опасного волнения. Приводятся примеры численного моделирования штормового волнения в океанах и морях.

В пособии [31] обобщены характеристики экстремальных циклонов в атлантико-европейском регионе, рассмотрены возможные механизмы их формирования и эволюции, методы оценки наносимого ими ущерба. Приводятся примеры численного моделирования и прогноза экстремальных циклонов. Обсуждаются способы оценки штормовой активности и ее изменчивости в настоящем и будущем климате. Даются характеристики экстремальных циклонов на морях европейской части России.

Нормативно-методическое издание [45] содержит описание терминологии, применяемой в морских гидрологических прогнозах и штормовых предупреждениях, порядка их составления и выпуска, методов оценки их успешности.

В описании кода [22] изложены правила представления данных морских береговых гидрометеорологических наблюдений в сводках, передаваемых по каналам связи с наблюдательных станций (постов) в центры обработки информации.

#### **4. Проблемы и перспективы развития морских прогнозов**

Круг решаемых к настоящему времени задач оперативной оценки текущего и ожидаемого состояния морской среды и, соответственно, состав получаемой конечной информации определяется уровнем взаимного развития составляющих главной триады оперативной океанологии “наблюдения, модели, продукция”. Именно на это были направлены в 2000-е и 2010-е годы крупные международные проекты, такие, в первую очередь, как Global Ocean Data Assimilation Experiment (GODAE) и GODAE OceanView (GOV) [52, 53]. В результате появились методы и технологии нового поколения для мониторинга и прогнозирования основных гидрофизических полей на океанских масштабах, которые опираются главным образом на существенное развитие наблюдательной системы [17].

На масштабах отдельных морей столь значительного развития наблюдательной системы не произошло, и это является сдерживающим фактором для аналогичных прогностических морских систем. В российских морях оперативные наблюдения океанологических характеристик ограничены главным образом информацией с береговых станций. Поступление регулярных данных по всей морской акватории обеспечивают только спутниковые наблюдательные системы, в первую очередь, – это измерения температуры поверхности воды, характеристики морского льда и данные спутниковой альтиметрии, которые дают информацию

о вариациях уровня моря и высоте ветровых волн. То есть оперативные наблюдения относятся в основном к морской поверхности, что осложняет проведение мониторинга гидрофизических полей в толще воды и, соответственно, численное прогнозирование эволюции этих полей. Поэтому особую актуальность приобретает разработка методов усвоения океанографических данных, “экстраполирующих” оперативную информацию, относящуюся к поверхности моря, в оценки трехмерных гидрофизических полей в море.

Рассмотренные выше разработки имеют большие перспективы для развития. Информационные системы могут быть существенно модифицированы в связи с введением в действие в Росгидромете нового высокопроизводительного (~1 петафлопс) вычислительного комплекса с массивно-параллельной архитектурой, который открывает возможность для реализации приложений оперативной океанологии нового поколения. Среди первоочередных задач – реализация моделей для явного описания так называемой погоды океана, т. е. есть синоптических образований (циклонов и антициклонов), имеющих характерные размеры порядка 10–100 км в океане 1–10 км в морях. Ввод в действие новых вычислительных ресурсов подразумевает задачу внедрения технологий прогноза эволюции основных гидрофизических полей океана на сроки порядка 10 суток на основе начальных данных, поставляемых системой усвоения оперативных наблюдений. Еще одно важное направление – разработка технологии детализированного мониторинга и прогнозирования гидрофизических полей в Арктическом бассейне на базе детализированной модели высокого разрешения, сопряженной с глобальной моделью Мирового океана.

С учетом достигнутого уровня методических и технологических разработок и доступных вычислительных ресурсов к основным направлениями разработок оперативной океанологии в Гидрометцентре России на ближайшие годы нужно отнести:

– численные прогнозы параметров ветрового волнения для Мирового океана и всех морей России в конфигурации “океан – море – прибрежная зона” с заблаговременностью 2–5 суток и разрешением  $0,25^\circ$  – 5 км – 500 м с объективными стандартными показателями точности, превышающими на несколько пунктов уровень, достигнутый в 2010-х годах;

– мониторинг ежедневных полей основных гидрофизических параметров Мирового океана с сеточным разрешением  $0,25^\circ$  и менее в отдельных районах, включая Арктический бассейн, на базе системы усвоения оперативных данных спутниковых и контактных наблюдений;

– численные прогнозы основных гидрофизических характеристик Мирового океана и морей России (температура и соленость морской воды, скорости течений, уровень моря, ледовые характеристики и др.) на сроки до 10 суток с сеточным разрешением  $0,25^\circ$  и детализацией в отдельных морях и районах.

Можно полагать, что реализация этих разработок позволит улучшить гидрометеорологическое обеспечение разных отраслей морской

деятельности за счет повышения оперативности, расширения состава информационной продукции и повышения точности прогнозов характеристик состояния морской среды.

#### Список литературы

1. Абузьяров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С. Оперативное океанографическое обслуживание. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2009. 287 с.
2. Абузьяров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С. Развитие технологий морских гидрологических прогнозов // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада лтд, 2010. С. 376-388.
3. Абузьяров З.К., Нестеров Е.С. Развитие методов и технологий морского метеорологического обслуживания // 70 лет Гидрометцентру России. СПб.: Гидрометеиздат, 1999. С. 216-231.
4. Абузьяров З.К., Нестеров Е.С. Морское метеорологическое обслуживание в системе Росгидромета: современное состояние и перспективы развития // Метеоспектр. 2014. № 2. С. 99-111.
5. Абузьяров З.К., Красюк В.С., Нестеров Е.С. Развитие методов морских гидрологических прогнозов // 60 лет Центру гидрометеорологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 82-99.
6. Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря. Моделирование и прогноз / под ред. Е.С. Нестерова. М.: Триада лтд, 2016. 378 с.
7. Глаголева М.Г., Каракаш А.И., Скриптунова Л.И. Развитие методов морских гидрологических прогнозов // 50 лет Центру гидрометеорологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1979. С. 152-164.
8. Думанская И.О. Ледовые условия морей европейской части России. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2014. 608 с.
9. Думанская И.О. Ледовые условия морей азиатской части России. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН. 2017. 639 с.
10. Думанская И.О. Метод долгосрочного прогноза ледовых условий в Баренцевом море, Финском заливе и в северной части Каспийского моря, основанный на использовании статистического моделирования // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. Информационный сборник № 42. 2015. С.111-128.
11. Думанская И.О. Метод долгосрочного прогноза ледовых условий в Татарском проливе, Охотском море и Беринговом морях, основанный на использовании статистического моделирования // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. Информационный сборник № 45. 2018. С.117-126.
12. Думанская И.О. О методике долгосрочного прогноза ледовых условий на европейских морях России // Метеорология и гидрология. 2011. № 11. С. 64-77.
13. Думанская И.О. Проблемы разработки методик долгосрочных ледовых прогнозов в условиях современных изменений климата // Метеоспектр. 2008. №4. С. 25-30.
14. Зеленько А.А. Оперативный модуль ЕСИМО – система гидрометобеспечения нового поколения // Труды VI Российской научно-технической конференции «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии» (НО-2007), 23–25 мая 2007 г., Санкт-Петербург. 2007. С. 473-479.
15. Зеленько А.А., Вильфанд Р.М., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Цырульников М.Д., Свиренко П.И. Система усвоения океанографических данных и ретроспективный анализ гидрофизических полей Мирового океана // Известия РАН. ФАО. 2016. Т. 52, № 4. С. 501-513. DOI: 10.7868/S0002351516040143.
16. Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д. Глубокая конвекция в модели общей циркуляции океана: изменчивость на суточном, сезонном и межгодовом масштабах // Океанология. 2007. Т. 47, № 2. С. 211-224.
17. Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д. Морские наблюдательные системы как составная часть оперативной океанологии (обзор) // Метеорология и гидрология. 2018. № 12. С. 5-30.
18. Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С. Результаты испытаний системы прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане // Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. Информационный сборник № 43. 2016. С. 133-147.
19. Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д., Цырульников М.Д., Струков Б.С., Свиренко П.И. Глобальная система усвоения океанографических данных: Пилотная версия // Труды VI Российской научно-технической конференции «Современное состояние и проблемы навигации и океанографии» (НО-2007), 23-25 мая 2007 г., Санкт-Петербург. 2007. С. 464-472.
20. Зеленько А.А., Реснянский Ю.Д., Цырульников М.Д., Струков Б.С., Свиренко П.И. Мониторинг крупномасштабной структуры гидрофизических полей океана // Современные проблемы динамики океана и атмосферы. М.: Триада лтд, 2010. С. 131-172.

21. Зеленко А.А., Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования ветрового волнения в Мировом океане и морях России // Труды ГОИН. 2014. Вып. 215. С. 90-101.
22. Код для оперативной передачи данных морских береговых гидрометеорологических наблюдений (KH-02 SEA). М., 2014. 44 с.
23. Лавренев И.В. Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. 499 с.
24. Михайлов Н.Н. Облик ЕСИМО: решения, характеристики и основные направления применения и развития // Труды конференции «Использование средств и ресурсов Единой государственной системы информации об обстановке в Мировом океане для информационного обеспечения морской деятельности в Российской Федерации» (ЕСИМО-2012), 25–27 сентября 2012 г. Обнинск: ВНИИГ-МИ-МЦД, 2012. С. 209-217.
25. Мысленков С.А., Архипкин В.С. Система регионального прогноза ветрового волнения в Цемеской бухте Черного моря // Труды ГОИН. 2014. Т. 215. С. 117-125.
26. Мысленков С.А., Архипкин В.С., Павлова А.В., Добролюбов С.А. Волновой климат Каспийского моря по данным моделирования // Метеорология и гидрология. 2018. № 10. С. 60-70.
27. Мысленков С.А., Столярова Е.В., Архипкин В.С. Система прогноза ветрового волнения в Черном море с детализацией в шельфовых зонах // Информационный сборник Гидрометцентра России. 2017. № 44. С. 126-135.
28. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3, часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. РД 52.27.759–2011. М.: Триада лтд, 2011. 201 с.
29. Нестеров Е.С. Экстремальные волны в океанах и морях. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2015. 64 с.
30. Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Триада лтд, 2013. 144 с.
31. Нестеров Е.С. Экстремальные циклоны в атлантико-европейском регионе. М.: Гидрометцентр России, 2018. 104 с.
32. Нестеров Е.С., Лукин А.А., Мысленков С.А., Красюк Т.В. Технология оперативного прогноза опасного волнения в Северной Атлантике с заблаговременностью до 10–15 суток // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 354. С. 36-48.
33. Нестеров Е.С., Попов С.К., Лобов А.Л. Статистика и моделирование штормовых нагонов в Северном Каспии // Метеорология и гидрология. 2018. № 10. С. 53-59.
34. Попов С.К. Моделирование климатической термохалинной циркуляции в Каспийском море // Метеорология и гидрология. 2004. № 5. С. 76-84.
35. Попов С.К., Гусев А.А., Фолмин В.В. Вторичный максимум уровня моря в наводнениях в Санкт-Петербурге и его воспроизведение в численных моделях // Метеорология и гидрология. 2018. № 12. С. 48-60.
36. Попов С.К., Зильберштейн О.И., Лобов А.Л., Чумаков М.М. Моделирование сезонного хода уровня Каспийского моря с применением параллельных вычислений // Метеорология и гидрология. 2009. № 12. С. 41-53.
37. Попов С.К., Лобов А.Л. Гидродинамическое моделирование наводнений в Санкт-Петербурге с учетом работающей дамбы // Метеорология и гидрология. 2017. № 4. С. 80-89.
38. Попов С.К., Лобов А.Л. Диагноз и прогноз уровня Каспийского моря по оперативной гидродинамической модели // Метеорология и гидрология. 2017. № 9. С. 90-99.
39. Попов С.К., Лобов А.Л. Краткосрочные прогнозы колебаний уровня Азовского моря в безледный период 2017 года // Труды Гидрометцентра России. Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3 (369). С. 104-118.
40. Попов С.К., Лобов А.Л., Елисов В.В., Батов В.И. Прилив в оперативной модели краткосрочного прогноза уровня моря и скорости течений в Белом и Баренцевом морях // Метеорология и гидрология. 2013. № 6. С. 68-82.
41. Режим, диагноз и прогноз ветрового волнения в океанах и морях / под ред. Е.С. Нестерова. М.; Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2013. 295 с.
42. Реснянский Ю.Д., Зеленко А.А. Параметризация верхнего перемешанного слоя в модели общей циркуляции океана // Известия АН СССР. ФАО. 1991. Т. 27, № 10. С. 1080-1088.
43. Реснянский Ю.Д., Цырульников М.Д., Струков Б.С., Зеленко А.А. Статистическая структура пространственной изменчивости термохалинных полей океана по данным профильных наблюдений системы Argo за 2005–2007 гг. // Океанология. 2010. Т. 50, № 2. С. 165-183.
44. Руководство по морским гидрологическим прогнозам / под ред. З.К. Абузярова. Л.: Гидрометеоиздат, 1994. 525 с.
45. РД 52.27.759–2011. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть III. Служба морских гидрологических прогнозов. 2011. 201 с.
46. Степанов В.Н., Реснянский Ю.Д., Струков Б.С., Зеленко А.А. Крупномасштабная циркуляция океана и характеристики ледового покрова по данным численных экспериментов с использованием модели NEMO // Метеорология и гидрология. 2019. № 1. С. 50-66.

47. Столярова Е.В., Мысленков С.А. Прогноз ветрового волнения высокого пространственного разрешения в Керченском проливе // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 354. С. 24-35.
48. Струков Б.С., Реснянский Ю.Д., Зеленко А.А. Релаксационный метод усвоения данных по сплоченности морского льда в модели NEMO-LIM3 с несколькими категориями ледяного покрова // Метеорология и гидрология, 2020 (в печати).
49. Струков Б.С., Зеленко А.А., Реснянский Ю.Д., Мартынов С.Л. Система прогнозирования характеристик ветрового волнения и результаты ее испытания для акваторий Азовского, Черного и Каспийского морей // Информационный сборник № 40. Новые технологии, модели и методы гидрометеорологических прогнозов и результаты их оперативных испытаний. 2013. С. 64-79.
50. Цырульников М.Д., Свиренко П.И., Горин В.Е., Горбунов М.Е., Климова Е.Г. Разработка схемы трехмерного вариационного усвоения данных в Гидрометцентре России // 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада лтд, 2010. С. 21-35.
51. Argo Science Team (Roemmich D., Boebel O., Freeland H., King B., LeTraon P.-Y., Molinari R., Owens W.B., Riser S., Send U., Takeuchi K., Wijffels S.). Argo: The global array of profiling floats // Observing the Oceans in the 21st Century. GODAE Project Office and Bureau of Meteorology, Melbourne, 1998. P. 248-258.
52. Bell M.J., Lefebvre M, le Traon P-Y, Smith N, Wilmer-Becker K. GODAE: The Global Ocean Data Assimilation Experiment // Oceanography. 2009. Vol. 22. P. 14-21.
53. Bell M.J., Schiller A., Le Traon P.-Y., Smith N.R., Dombrowsky E., Wilmer-Becker K. An introduction to GODAE OceanView // J. Operat. Ocean. 2015. Vol. 8, no. S1. P. s2-s11.
54. Bloom S.C., Takacs L.L., Da Silva A.M., Ledvina D. Data assimilation using incremental analysis updates // Mon. Wea. Rev. 1996. Vol. 124, no. 6. P. 1256-1271.
55. Fisher M., Andersson E. Developments in 4D-Var and Kalman filtering. ECMWF // Techn. Memo. 2001. No. 347. 36 p. <https://www.ecmwf.int/node/9409>
56. GODAE: The global ocean data assimilation experiment. Strategic Plan // GODAE Report No. 6. 2001. 51 p.
57. Intercomparison of operational wave forecasting systems against buoys, satellite: January 2015 to March 2015 // JCOMM. May 2015. <http://www.jcomm.info>
58. Johnson G.C., Lyman J.M., Purkey S.G. Informing Deep Argo Array Design Using Argo and Full-Depth Hydrographic Section Data // J. Atm. Ocean. Tech. 2015. Vol. 32. P. 2187-2198. DOI: 10.1175/JTECH-D-15-0139.1.
59. Holthuijsen L.E. Waves in oceanic and coastal waters. New York: Cambridge University Press, 2007. 387 p.
60. Madec G.: NEMO ocean engine. Note du Pôle de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), Paris, France, No 27 ISSN No 1288-1619, 2012. 386 pp. [http://www.nemo-ocean.eu/About-NEMO/Reference-manuals/NEMO\\_book\\_3.6\\_STABLE](http://www.nemo-ocean.eu/About-NEMO/Reference-manuals/NEMO_book_3.6_STABLE)).
61. Martin M.J., Balmaseda M., Bertino L. et al. Status and future of data assimilation in operational oceanography // J. Operational Oceanography. 2015. Vol. 8, no. S1. P. s28-s48. DOI 10.1080/1755876X.2015.1022055
62. Massart S., Pajot B., Piacentini A., Pannekoucke O. On the Merits of Using a 3D-FGAT Assimilation Scheme with an Outer Loop for Atmospheric Situations Governed by Transport // Mon. Wea. Rev. 2010. Vol. 138(12). P. 4509-4522.
63. Myslenkov S., Chernyshova A. Comparing wave heights simulated in the Black sea by the SWAN model with satellite data and direct wave measurements // Rus. J. Earth. Scien. 2016. Vol. 16, no. 5. P. 1-12.
64. Myslenkov S., Medvedeva A., Arkhipkin V., Markina M., Surkova G., Krylov A., Dobrolyubov S., Zilitinkevich S., Koltermann P. Long-term statistics of storms in the Baltic, Barents and White seas and their future climate projections // Geogr. Env. Sustainability. 2018. Vol. 11, no. 1. P. 93-112.
65. Report on the Deep Argo Implementation Workshop Hobart, May 5-7 th 2015. 37 p. <http://www.argo.ucsd.edu/DAIW1report.pdf>.
66. Scharroo R., Leuliette E.W., Lillibridge J.L., Byrne D., Naeije M.C., Mitchum G.T. RADS: Consistent multi-mission products // Proc. of the Symposium on 20 Years of Progress in Radar Altimetry. Venice, 20-28 September 2012. Eur. Space Agency Spec. Publ. ESA SP-710. 2013. P. 4-8.
67. SWAN team. SWAN user manual. 2010. <http://www.swan.tudelft.nl>
68. The Argo Science Team (Roemmich D., Boebel O., Freeland H., King B., LeTraon P.-Y., Molinari R., Owens W.B., Riser S., Send U., Takeuchi K., Wijffels S.). On The Design and Implementation of Argo. A Global Array of Profiling Floats. 32 p. <http://www-argo.ucsd.edu/argo-design.pdf>
69. Tolman H.L. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14 // NOAA/NCEP. MMAB Technical Note 276. 2009. 194 p.
70. Tsyruльников М., Свиренко П. А new flexible and parsimonious 3-D physical-space covariance model for variational assimilation // Proc. of 2nd THORPEX Int. Sci. Symp., 4-9 Dec. 2006, Landshut, Germany, WMO/TD No. 1355 WWRP/THORPEX No. 7, WMO, 2006. P. 142-143.

71. Tsyrlunikov M.D. Stochastic modelling of model errors: a simulation study // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 2005. Vol. 131, no. 613. P. 3345-3371.

72. WAMDI group: Hasselmann S., Hasselmann K., Bauer E., Janssen P.A.E.M., Komen G.J., Bertotti L., Lionello P., Guillaume A., Cardone V.C., Greenwood J.A., Reistad M., Zambresky L., Ewing J.A. The WAM model – a third generation ocean wave prediction model // J. Phys. Oceanogr. 1988. Vol. 18. P. 1775-1810.

### References

1. Abuzarov Z.K., Dumanskaya I.O., Nesterov E.S. Operativnoe okeanograficheskoe obsluzhivanie. Moscow, Obninsk, IG-SOCIN, 2009, 287 p. [in Russ.].

2. Abuzarov Z.K., Dumanskaya I.O., Nesterov E.S. Razvitie tekhnologii morskikh gidrologicheskikh prognozov. 80 let Gidromettsentru Rossii. Moscow, Triada LTD publ., 2010, pp. 376-388 [in Russ.].

3. Abuzarov Z.K., Nesterov E.S. Razvitie metodov i tekhnologii morskogo meteorologicheskogo obsluzhivaniya. 70 let Gidromettsentru Rossii. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 2010, pp. 376-388 [in Russ.].

4. Abuzarov Z.K., Nesterov E.S. Morskoe meteorologicheskoe obsluzhivanie v sisteme Rosgidrometa: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya. *Meteospekt*, 2014, no. 2, pp. 99-111 [in Russ.].

5. Abuzarov Z.K., Krasnyuk V.S., Nesterov E.S. Razvitie metodov morskikh gidrologicheskikh prognozov. 60 let Centru gidrometeorologicheskikh prognozov. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1989, pp. 82-99 [in Russ.].

6. *Vodnyi balans i kolebaniya urovnya Kaspiiskogo morya. Modelirovanie i prognoz* [Water balance and level fluctuations of the Caspian Sea. Modeling and prediction]. Moscow, Triada LTD publ., 2016, 378 p. [in Russ.].

7. Glagoleva M.G., Karakash A.I., Skriptunova L.I. Razvitie metodov morskikh gidrologicheskikh prognozov. 50 let Centru gidrometeorologicheskikh prognozov. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1979, pp. 152-164 [in Russ.].

8. Dumanskaya I.O. Ledovye usloviya morei evropeiskoi chasti Rossii [Ice conditions of the seas of the European part of Russia]. Moscow, Obninsk, IG-SOCIN, 2014, 608 p. [in Russ.].

9. Dumanskaya I.O. Ledovye usloviya morei aziatskoi chasti Rossii. Moscow, Obninsk, IG-SOCIN, 2017, 640 p. [in Russ.].

10. Dumanskaya I.O. Metod dolgosrochnogo prognoza ledovykh uslovii v Barencevom more, Finskom zalive i v severnoi chasti Kaspiiskogo morya, osnovannyi na ispol'zovanii statisticheskogo modelirovaniya. *Rezultaty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. Informatsionnyi sbornik*, 2015, vol. 42, pp. 111-128 [in Russ.].

11. Dumanskaya I.O. Metod dolgosrochnogo prognoza ledovykh uslovii v Tatarskom prolive, Ohotskom more i Beringovom moryah, osnovannyi na ispol'zovanii statisticheskogo modelirovaniya *Rezultaty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. Informatsionnyi sbornik*, 2018, vol. 45, pp. 117-126 [in Russ.].

12. Dumanskaya I.O. On the method of long-range forecasting of ice conditions in the European seas of Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, vol. 36, no. 11, pp. 747-757 DOI: 10.3103/S1068373911110069.

13. Dumanskaya I.O. Problemy razrabotki metodik dolgosrochnykh ledovykh prognozov v usloviyakh sovremennykh izmenenii klimata. *Meteospekt*, 2008, no. 4, pp. 25-30 [in Russ.].

14. Zelen'ko A.A. Operativnyi modul' ESIMO – sistema gidrometobespecheniya novogo pokoleniya. Trudy VI Rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Sovremennoe sostoyanie i problemy navigatsii i okeanografii» (NO-2007), 23–25 maya 2007 g., Sankt-Peterburg. Saint Petersburg, 2007, pp. 473-479 [in Russ.].

15. Zelenko A.A., Vil'fand R.M., Resnyanskii Y.D., Strukov B.S., Tsyrlunikov M.D., Svireenko P.I. An ocean data assimilation system and reanalysis of the world ocean hydrophysical fields. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.*, 2016, vol. 52, no. 4, pp. 443-454. DOI: 10.7868/S0002351516040143.

16. Zelenko A.A., Resnyansky Yu.D. Deep convection in the ocean general circulation model: Variability on the diurnal, seasonal, and interannual time scales. *Oceanology*, 2007, vol. 47, no 2, pp. 191-204. DOI: 10.1134/S0001437007020063.

17. Zelenko A.A., Resnyansky Yu.D. Marine Observational Systems as an Integral Part of Operational Oceanology: A Review. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2011, vol. 43, no. 12, pp. 797-814. DOI: 10.3103/S10683739118120014.

18. Zelen'ko A.A., Resnyanskii Yu.D., Strukov B.S. Rezultaty ispytaniya sistemy prognozirovaniya vetrovogo volneniya v Mirovom okeane. *Rezultaty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. Informatsionnyi sbornik*, 2016, vol. 43, pp. 133-147 [in Russ.].

19. Zelen'ko A.A., Resnyanskii Yu.D., Tsyrlunikov M.D., Strukov B.S., Svireenko P.I. Global'naya sistema usvoeniya okeanograficheskikh dannykh: Pilotnaya versiya. Trudy VI Rossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi



konferencii «Sovremennoe sostoyanie i problemy navigacii i okeanografii» (NO-2007), 23–25 maya 2007 g., Sankt-Peterburg. Saint Petersburg, 2007, pp. 464–472 [in Russ.].

20. Zelenko A.A., Resnyansky Yu.D., Tsyrlunikov M.D., Strukov B.S., Svirengo P.I. Monitoring of large-scale structure of hydrophysical fields in the ocean. *Sovremennye problemy dinamiki okeana i atmosfery* [Modern problems of ocean and atmosphere dynamics], Moscow, Triada LTD publ., 2010, pp. 131–172 [in Russ.].

21. Zelen'ko A.A., Strukov B.S., Resnyanskii YU.D., Martynov S.L. Sistema prognozirovaniya vetrovogo volneniya v Mirovom okeane i moryah Rossii. *Trudy GOIN* [Proceedings of N.N. Zubov State Oceanographic Institute], 2014, vol. 215, pp. 90–101 [in Russ.].

22. Kod dlya operativnoi peredachi dannyh morskikh beregovykh gidrometeorologicheskikh nablyudenii (KN-02 SEA). Moscow, 2014, 44 p. [in Russ.].

23. Lavrenov I.V. Matematicheskoe modelirovanie vetrovogo volneniya v prostranstvenno-neodnorodnom okeane. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 1998, 499 p. [in Russ.].

24. Mihailov N.N. Oblik ESIMO: resheniya, harakteristiki i osnovnye napravleniya primeneniya i razvitiya // Trudy konferencii «Ispol'zovanie sredstv i resursov Edinoi gosudarstvennoi sistemy informacii ob obstanovke v Mirovom okeane dlya informacionnogo obespecheniya morskoj deyatel'nosti v Rossiiskoi Federacii» (ESIMO-2012), 25–27 sentyabrya 2012 g. Obninsk: VNIIGMI-MCD, 2012, pp. 209–217 [in Russ.].

25. Myslenkov S.A., Arhipkin V.S. Sistema regional'nogo prognoza vetrovogo volneniya v Cemeskoi buhte Chernogo moray. *Trudy GOIN* [Proceedings of N.N. Zubov State Oceanographic Institute], 2014, vol. 215, pp. 117–125 [in Russ.].

26. Myslenkov S.A., Arhipkin V.S., Pavlova A.V., Dobrolyubov S.A. Wave Climate in the Caspian Sea Based on Wave Hindcast. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, no. 10, pp. 670–678. DOI: 10.3103/S1068373918100060.

27. Myslenkov S.A., Stolyarova E.V., Arhipkin V.S. Sistema prognoza vetrovogo volneniya v Chernom more s detalizaciei v shelf'ovykh zonah. Informacionnyi sbornik Gidrometcentra Rossii. 2017, vol. 44, pp. 126–135 [in Russ.].

28. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3, chast' III. Sluzhba morskikh gidrologicheskikh prognozov. RD 52.27.759–2011. Moscow, Triada LTD publ., 2011, 201 p. [in Russ.].

29. Nesterov E.S. Ekstremal'nye volny v okeanah i moryah. Moscow, Obninsk, IG-SOCIN, 2015, 64 p. [in Russ.].

30. Nesterov E.S. Severoatlanticheskoe kolebanie: atmosfera i okean. Moscow, Triada LTD publ., 2013, 144 p. [in Russ.].

31. Nesterov E.S. Ekstremal'nye ciklony v atlantiko-evropeiskom regione. Moscow, Hydrometcentre of Russia, 2018, 104 p. [in Russ.].

32. Nesterov E.S., Lukin A.A., Myslenkov S.A., Krasnyuk T.V. Operational technology of the dangerous waves forecast in the North Atlantic with a lead time of 10–15 days. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2015, vol. 354, pp. 36–48 [in Russ.].

33. Nesterov E.S., Popov S.K., Lobov A.L. Statistical Characteristics and Modeling of Storm Surges in the North Caspian Sea. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, no. 10, pp. 664–669. DOI: 10.3103/S1068373918100059.

34. Popov S.K. Modeling the Climatic Thermohaline Circulation in the Caspian Sea. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2004, no. 5, pp. 49–56.

35. Popov S.K., Gusev A.V., Fomin V.V. The Secondary Sea Level Maximum during Floods in Saint Petersburg and Its Simulation with Numerical Models. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, vol. 43, no. 12, pp. 827–836. DOI: 10.3103/S1068373918120038.

36. Popov S. K., Zil'bershtein O.I., Lobov A.L., Chumakov M.M. Simulation of seasonal variations of the Caspian Sea level using parallel computations. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2009, vol. 34, no. 12, pp. 801–809. DOI: 10.3103/S106837390912005X.

37. Popov S.K., Lobov A.L. Hydrodynamic modeling of floods in Saint Petersburg considering the operating dam. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 4, pp. 267–274. DOI: 10.3103/S1068373917040070.

38. Popov S.K., Lobov A.L. Diagnosis and forecast of the Caspian Sea level with the operational hydrodynamic model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2017, vol. 42, no. 9, pp. 607–614. DOI: 10.3103/S1068373917090084.

39. Popov S.K., Lobov A.L. Short-term forecasts of the Azov Sea level variations during the iceless period in 2017. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy* [Hydrometeorological Research and Forecasting], 2018, vol. 369, no. 3, pp. 104–118 [in Russ.].

40. Popov S.K., Lobov A.L., Elisov V.V., Batov V.I. A tide in the operational model for short-range forecast of current velocity and sea level in the Barents and White seas. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2013, vol. 38, no. 6, pp. 414–425. DOI: 10.3103/S106837391306006X.

41. Rezhim, diaгноz i prognoz vetrovogo volneniya v okeanah i moryah/ pod red. E.S. Nesterova. Moscow, Obninsk, IG-SOCIN, 2013, 295 p.

42. *Resnyanskii Yu.D., Zelen'ko A.A.* Parametrizaciya verhnego peremeshannogo sloya v modeli obshchei cirkulyacii okeana. *Izvestiya AN SSSR. FAO [Izvestiya of the Academy of Sciences of the USSR. Atmospheric and Oceanic Physics]*, 1991, vol. 27, no. 10, pp. 1080-1088 [in Russ.].
43. *Resnyanskii Y.D., Tsyru'lnikov M.D., Strukov B.S., Zelenko A.A.* Statistical structure of spatial variability of the ocean thermohaline fields from argo profiling data, 2005-2007. *Oceanology*, 2010, vol. 50, no. 2, pp. 149-165. DOI: 10.1134/S0001437010020013.
44. Rukovodstvo po morskim gidrologicheskim prognozam / pod red. Z.K. Abuzyarova. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1994. 525 p. [in Russ.].
45. RD 52.27.759-2011. Nastavlenie po sluzhbe prognozov. Razdel 3. CHast' III. Sluzhba morskikh gidrologicheskikh prognozov. 2011, 201 p. [in Russ.].
46. *Stepanov V. N., Resnyanskii Y.D., Strukov B. S., Zelenko A. A.* Large-scale Ocean Circulation and Sea Ice Characteristics Derived from Numerical Experiments with the NEMO Model. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2019, vol. 44, no. 1, pp. 33-44 DOI: 10.3103/S1068373919010047.
47. *Stoliarova E.V., Myslenkov S.A.* High resolution wave forecast system in Kerch strait. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 354, pp. 24-35 [in Russ.].
48. *Strukov B. S., Resnyanskii Y.D., Zelenko A. A.* Relaksacionnyi metod usvoeniya dannyh po splochnosti morskogo l'da v modeli NEMO-LIM3 s neskol'kimi kategoriyami ledyanogo pokrova. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020 (in print).
49. *Strukov B.S., Zelen'ko A.A., Resnyanskii Yu.D., Martynov S.L.* Sistema prognozirovaniya harakteristik vetrovogo volneniya i rezul'taty ee ispytaniya dlya akvatorii Azovskogo, Chernogo i Kaspiiskogo morei. Novye tekhnologii, modeli i metody gidrometeorologicheskikh prognozov i rezul'taty ih operativnykh ispytaniy. Informacionnyi sbornik. 2013, vol. 40, pp. 64-79 [in Russ.].
50. *Cyru'lnikov M.D., Svirenko P.I., Gorin V.E., Gorbunov M.E., Klimova E.G.* Razrabotka skhemy trekhmernogo variacionnogo usvoeniya dannyh v Gidrometcentre Rossii. *80 let Gidrometcentru Rossii*, Moscow, Triada LTD publ., 2010, pp. 21-35 [in Russ.].
51. *Argo Science Team (Roemmich D., Boebel O., Freeland H., King B., LeTraon P.-Y., Molinari R., Owens W.B., Riser S., Send S., Takeuchi K., Wijffels S.)*. Argo: The global array of profiling floats // Observing the Oceans in the 21st Century. GODAE Project Office and Bureau of Meteorology, Melbourne, 1998, pp. 248-258.
52. *Bell M.J., Lefebvre M, le Traon P-Y, Smith N, Wilmer-Becker K.* GODAE: The Global Ocean Data Assimilation Experiment. *Oceanography*, 2009, vol. 22, pp. 14-21.
53. *Bell M.J., Schiller A., Le Traon P.-Y., Smith N.R., Dombrowsky E., Wilmer-Becker K.* An introduction to GODAE OceanView. *J. Operat. Ocean.*, 2015, vol. 8, no. S1, pp. s2-s11.
54. *Bloom S.C., Takacs L.L., Da Silva A.M., Ledvina D.* Data assimilation using incremental analysis updates. *Mon. Wea. Rev.*, 1996, vol. 124, no. 6, pp. 1256-1271.
55. *Fisher M., Andersson E.* Developments in 4D-Var and Kalman filtering. ECMWF. *Techn. Memo.*, 2001, no. 347, 36 p. Available at: <https://www.ecmwf.int/node/9409>.
56. GODAE: The global ocean data assimilation experiment. Strategic Plan. GODAE Report No. 6. 2001, 51 p.
57. Intercomparison of operational wave forecasting systems against buoys, satellite: January 2015 to March 2015. JCOMM. May 2015. Available at: <http://www.jcomm.info>.
58. *Johnson G.C., Lyman J.M., Purkey S.G.* Informing Deep Argo Array Design Using Argo and Full-Depth Hydrographic Section Data. *J. Atm. Ocean. Tech.*, 2015, vol. 32, pp. 2187-2198. DOI: 10.1175/JTECH-D-15-0139.1.
59. *Holthuijsen L.E.* Waves in oceanic and coastal waters. New York: Cambridge University Press, 2007, 387 p.
60. *Madec G.*: NEMO ocean engine. Note du Pôle de modélisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), Paris, France, No 27 ISSN No 1288-1619, 2012, 386 pp. Available at: [http://www.nemo-ocean.eu/About-NEMO/Reference-manuals/NEMO\\_book\\_3.6\\_STABLE](http://www.nemo-ocean.eu/About-NEMO/Reference-manuals/NEMO_book_3.6_STABLE).
61. *Martin M.J., Balmaseda M., Bertino L. et al.* Status and future of data assimilation in operational oceanography. *J. Operational Oceanography*, 2015, vol. 8, no. S1, pp. s28-s48. DOI 10.1080/1755876X.2015.1022055.
62. *Massart S., Pajot B., Piacentini A., Pannekoucke O.* On the Merits of Using a 3D-FGAT Assimilation Scheme with an Outer Loop for Atmospheric Situations Governed by Transport. *Mon. Wea. Rev.*, 2010, vol. 138, no. 12, pp. 4509-4522.
63. *Myslenkov S., Chernyshova A.* Comparing wave heights simulated in the Black sea by the SWAN model with satellite data and direct wave measurements. *Rus. J. Earth. Sci.*, 2016, vol. 16, no. 5, pp. 1-12.
64. *Myslenkov S., Medvedeva A., Arkhipkin V., Markina M., Surkova G., Krylov A., Dobrolyubov S., Zilitinkevich S., Koltermann P.* Long-term statistics of storms in the Baltic, Barents and White seas and their future climate projections. *Geogr. Env. Sustainability*, 2018, vol. 11, no. 1, pp. 93-112.
65. *Report on the Deep Argo Implementation Workshop Hobart, May 5-7 th 2015.* 37 p. Available at: <http://www.argo.ucsd.edu/DAIW1report.pdf>.

66. Scharroo R., Leuliette E.W., Lillibridge J.L., Byrne D., Naeije M.C., Mitchum G.T. RADS: Consistent multi-mission products. Proc. of the Symposium on 20 Years of Progress in Radar Altimetry. Venice, 20-28 September 2012. Eur. Space Agency Spec. Publ. ESA SP-710. 2013, pp. 4-8.
67. SWAN team. SWAN user manual. 2010. Available at: <http://www.swan.tudelft.nl>
68. The Argo Science Team (Roemmich D., Boebel O., Freeland H., King B., LeTraon P.-Y., Molinari R., Owens W.B., Riser S., Send U., Takeuchi K., Wijffels S.). On The Design and Implementation of Argo. A Global Array of Profiling Floats. 32 p. Available at: <http://www-argo.ucsd.edu/argo-design.pdf>
69. Tolman H.L. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA/NCEP. MMAB Technical Note 276, 2009, 194 p.
70. Tsyrlunikov M., Svirengo P. A new flexible and parsimonious 3-D physical-space covariance model for variational assimilation // Proc. of 2nd THORPEX Int. Sci. Symp., 4-9 Dec. 2006, Landshut, Germany, WMO/TD No. 1355 WWRP/THORPEX No. 7, WMO, 2006, pp. 142-143.
71. Tsyrlunikov M.D. Stochastic modelling of model errors: a simulation study. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 2005, Vol. 131, no. 613, pp. 3345-3371.
72. WAMDI group: Hasselmann S., Hasselmann K., Bauer E., Janssen P.A.E.M., Komen G.J., Bertotti L., Lionello P., Guillaume A., Cardone V.C., Greenwood J.A., Reistad M., Zambresky L., Ewing J.A. The WAM model – a third generation ocean wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.*, 1988, vol. 18, pp. 1775-1810.

Поступила в редакцию 04.10.2019 г.

Received by the editor 04.10.2019.