

ОПЕРАТИВНЫЕ ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА НЕАРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ РОССИИ

Е.С. Нестеров

Гидрометцентр России, nesterov@mecom.ru

Представлено краткое описание разработанных в Гидрометцентре России оперативных технологий прогноза основных характеристик, необходимых для гидрометеорологического обеспечения деятельности на неарктических морях России: волнения, течений, уровня, ледовых условий. Прогнозы ветрового волнения даются как для всей акватории морей, так и для отдельных прибрежных районов (проливов, бухт и т.д.). В прогнозах уровня особое внимание уделяется штормовым нагонам, а также прогнозу невских наводнений с учетом действующего комплекса защитных сооружений (дамбы). Анализируется современное состояние наблюдательной сети в Мировом океане. Указываются особенности гидрометеорологического обеспечения в меняющихся климатических условиях.

Ключевые слова: прогноз, оперативные технологии, неарктические моря, волнение, уровень моря, ледовые условия.

OPERATIONAL FORECASTING TECHNOLOGIES FOR HYDROMETEOROLOGICAL SUPPORT OF ACTIVITIES IN THE NON-ARCTIC SEAS OF RUSSIA

E.S. Nesterov

A brief description of the operational technologies developed in the Hydrometeorological Center of Russia for forecasting the main characteristics necessary for hydrometeorological support of activities in the non-Arctic seas of Russia (waves, currents, level, ice conditions) is given. Forecasts of wind waves are given for the entire water area of the seas, and for certain coastal areas (straits, bays, etc.). The forecasts of the level spare special attention to storm surges, as well as the forecast of the Neva floods, taking into account the existing complex of protective structures (dam). The current state of the observation network in the World ocean is analyzed. The features of hydrometeorological support in changing climatic conditions are specified.

Keywords: forecast, operational technologies, non-Arctic seas, waves, sea level, ice conditions.

Введение

Основной задачей оперативного гидрометеорологического обеспечения морской деятельности является подготовка и своевременное доведение до конечных потребителей прогнозов ветра, волнения, течений, уровня, температуры воды, ледовых условий и др., включая штормовые предупреждения об угрозе возникновения опасных явлений. Для решения этой задачи необходимо развитие наблюдательной сети, совершенствование технологий диагноза и прогноза основных

элементов погоды и состояния морей и океанов, а также развитие средств автоматизированного распространения данных наблюдений и прогностической продукции.

Для обеспечения безопасности мореплавания, жизнедеятельности населения и функционирования прибрежной индустрии наиболее важны прогнозы волнения, уровня, течений и ледовых условий. Основные задачи, проблемы и средства гидрометеорологического обеспечения морской деятельности достаточно подробно изложены в публикациях [1—3, 14, 15]. В настоящей работе дается краткий обзор методов и технологий диагноза и прогноза гидрометеорологических параметров, наиболее важных для обеспечения морской деятельности. В ФГБУ «Гидрометцентр России» разработаны оперативные методы и технологии диагноза и прогноза гидрометеорологических параметров на неарктических морях России (ветер, волнение, течения, уровень, ледовые характеристики).

Наблюдательная сеть

Современное состояние наблюдательной сети в Мировом океане подробно описано в [7]. Основная тенденция состоит в том, что данные наблюдений должны оперативно распространяться по различным каналам (радиосвязь, спутники, Интернет) в центры сбора информации с минимальной задержкой по времени. Объем данных контактных наблюдений (буи, платформы, суда) остается небольшим по сравнению со спутниковой информацией. В дальнейшем эти данные кодируются и передаются в Глобальную систему телесвязи (ГСТ), прямой доступ к которой имеют только центры национальных метеорологических служб.

Для прогноза волнения важна информация с береговых гидрометеорологических станций (ГМС), с волновых буев, морских платформ и спутниковая альтиметрия. На 2017 г. в Мировом океане насчитывалось около 300 волновых буев и 50 платформ, которые распределены крайне неравномерно [7]. Спутниковые альтиметры дают информацию о высоте волн на больших акваториях с точностью до 0,5 м.

Информация об уровне моря состоит из данных измерений уровня на ГМС и спутниковой альтиметрии. Данные наблюдений уровня на российских станциях передаются в национальном коде КН-02 SEA. Альтиметрическая информация передается в виде аномалий уровня, которые отражают динамические процессы в океанах и морях (абсолютную динамическую топографию, геострофические течения).

Информация о морском льде состоит из результатов наблюдений на ГМС и спутниковых данных. Данные наблюдений различных ледовых характеристик на российских станциях передаются в коде КН-02 SEA [10]. Спутниковая информация о ледовом покрове включает в себя такие характеристики, как сплоченность льда, положение кромки льда, векторы дрейфа льда. Из вышесказанного следует, что данные наблюдений на береговых ГМС важны для составления различных прогнозов. Однако расстояние между соседними российскими ГМС в некоторых регионах может быть довольно большим. По данным на 2010 г. среднее расстояние

между ГМС составляло 178 км, максимальное 800—1300 км (Охотское, Восточно-Сибирское моря), минимальное 36—51 км (Балтийское море) [11].

Прогноз волнения

В Гидрометцентре России разработана система прогноза на пять суток характеристик ветрового волнения на основе спектральной модели WaveWatch [8]. Прогнозы регулярно выпускаются для Мирового океана, Баренцева, Белого, Балтийского, Черного, Азовского и Каспийского морей. На рис. 1 представлен пример прогноза волнения в Черном и Азовском морях.

Шаг расчетной сетки составляет 50 км для Мирового океана и от 2 до 10 км для морей. Для прогноза требуется информация о скорости ветра, разности температуры воды и воздуха, сплоченности морского льда. Метеорологические характеристики для прогноза задаются на основе выходной продукции глобальных атмосферных моделей ПЛАН и GFS. В прогностические характеристики ветрового волнения входят высота значительных волн, средняя длина и средний период волн, направление распространения волн и др. Для оценки качества прогнозов используются данные спутниковых альтиметрических наблюдений и волновых буев.

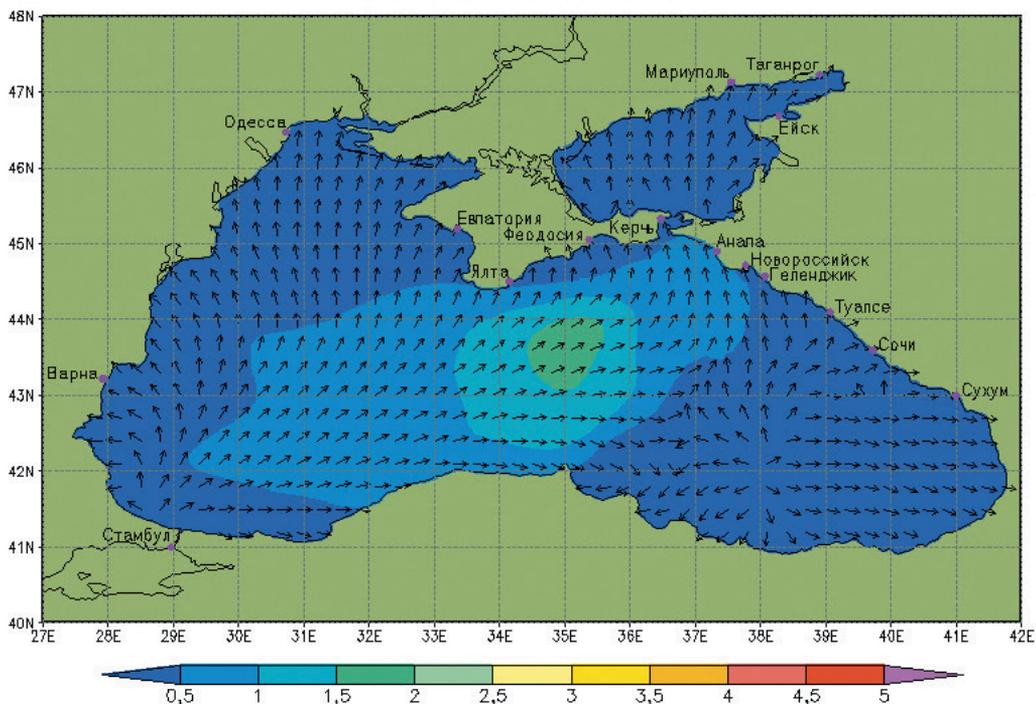


Рис. 1. Прогноз высоты (м) и направления распространения ветрового волнения в Черном и Азовском морях на 09 ч 12 апреля 2019 г.

Для потребителей также важен прогноз ветрового волнения с высоким разрешением для отдельных небольших акваторий (бухт, гаваней, портов и др.). В связи с этим в Гидрометцентре России и МГУ имени М.В. Ломоносова на основе волновой модели SWAN была разработана система регионального прогноза волнения для отдельных прибрежных акваторий Черного моря (Керченский пролив, Цемесская бухта и др.) [13]. Расчет производится на нерегулярной вычислительной сетке с переменным шагом до 20—100 м в прибрежных областях. В качестве атмосферного форсинга используются прогнозы ветра по модели GFS.

Прогноз уровня и течений

В оперативной практике прогнозов уровня и течений большое внимание уделяется штормовым нагонам, которые представляют опасность для прибрежных населенных пунктов. Особенно большие нагоны характерны для северо-западной части Каспийского моря, Финского залива, юго-восточной части Баренцева моря и ряда других акваторий.

В Гидрометцентре России одной из первых была разработана система краткосрочного прогноза уровня и течений Каспийского моря, в основе которой лежит трехмерная бароклинная гидродинамическая модель [20]. Из рис. 2 видно, что по прогнозу на 02 ч 10 апреля 2019 г. в северо-восточной части моря ожидается сгон (понижение уровня) на 15—25 см.

В качестве входной метеорологической информации используются поля приземного атмосферного давления и ветра, рассчитываемые по модели COSMO. Учет осушения и затопления прибрежной зоны осуществляется с помощью специальной технологии. Шаг расчетной сетки составляет одну милю (1856 м).

После катастрофического наводнения в Таганроге 24 сентября 2014 г. аналогичная система была разработана для Азовского моря [18], где расчеты уровня и течений производятся на сетке с шагом 0,5 мили. В базу данных записывается уровень моря с дискретностью один час на 14 береговых ГМС Азовского моря и ежечасные поля уровня по всему Азовскому морю. Результаты прогнозов доступны потребителям через ftp-сервер.

При разработке системы прогноза уровня и течений для Баренцева и Белого морей [17] было важно учесть приливные движения, которые в Баренцевом и Белом морях весьма существенны. Наибольшие приливы наблюдаются в Мезенской губе Белого моря (до 8 м) и Чешской губе Баренцева моря (до 6 м), причем максимальная амплитуда штормовых нагонов в этих морях меньше, чем приливных колебаний, и не превышает 3—4 м. Из рис. 3 видно, что по прогнозу на 02 ч 9 апреля 2019 г. на северном побережье Кольского полуострова ожидается понижение уровня на 1,5—2,0 м, а на побережье юго-восточной части Баренцева моря и Чешской губы — повышение на 0,5—1,2 м.

Для учета приливных движений на жидкой границе задаются колебания уровня в виде суммы приливной и непериодической составляющих уровня моря. Приливная составляющая задается в виде суммы восьми основных приливных волн (гармоник), а непериодическая рассчитывается по полю ветра и климатическим

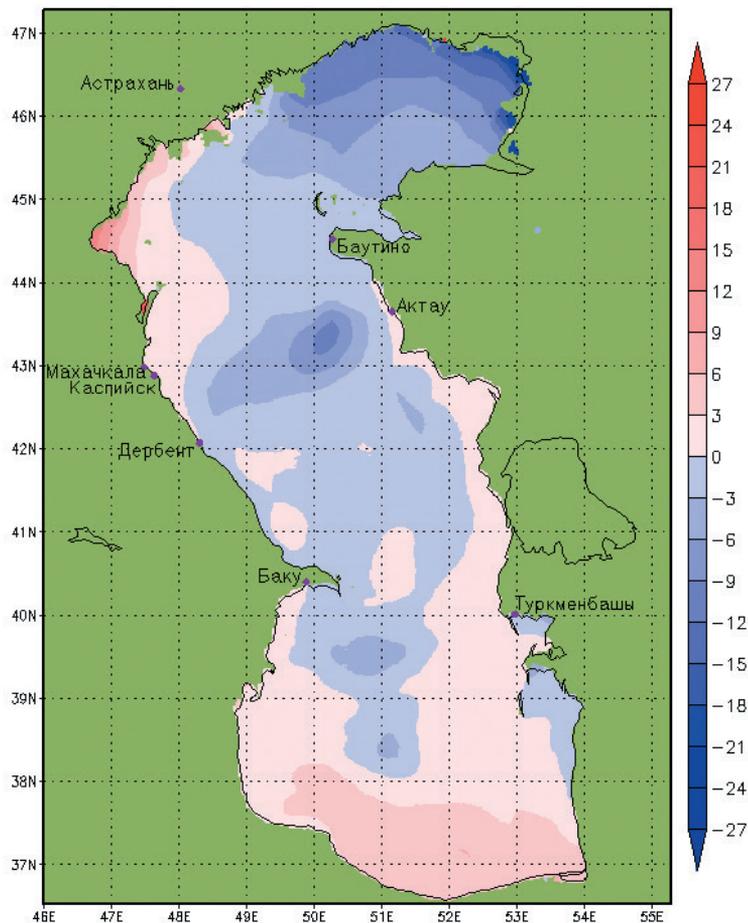


Рис. 2. Прогноз отклонения (см) от невозмущенного уровня Каспийского моря на 02 ч 10 апреля 2019 г.

полям температуры и солености воды. В модели также учитывается наличие льда, который значительно изменяет амплитуду и фазу приливных волн, особенно в прибрежных районах.

С целью защиты от невыходных наводнений в Санкт-Петербурге с 2011 г. функционирует комплекс защитных сооружений (КЗС). Для его работы необходим расчет времени оптимального открытия и закрытия ворот КЗС, для чего, в свою очередь, требуется расчет (прогноз) уровня и течений в верхней части Финского залива. Для достижения этой цели используются двумерные [9] и трехмерные [19] гидродинамические модели. В модели [19] расчет для всего моря производится на сетке с шагом две мили, а для вершины Финского залива — с шагом 90 м. Поля ветра и приземного давления задаются на основе выходной продукции атмосферной модели HIRLAM.

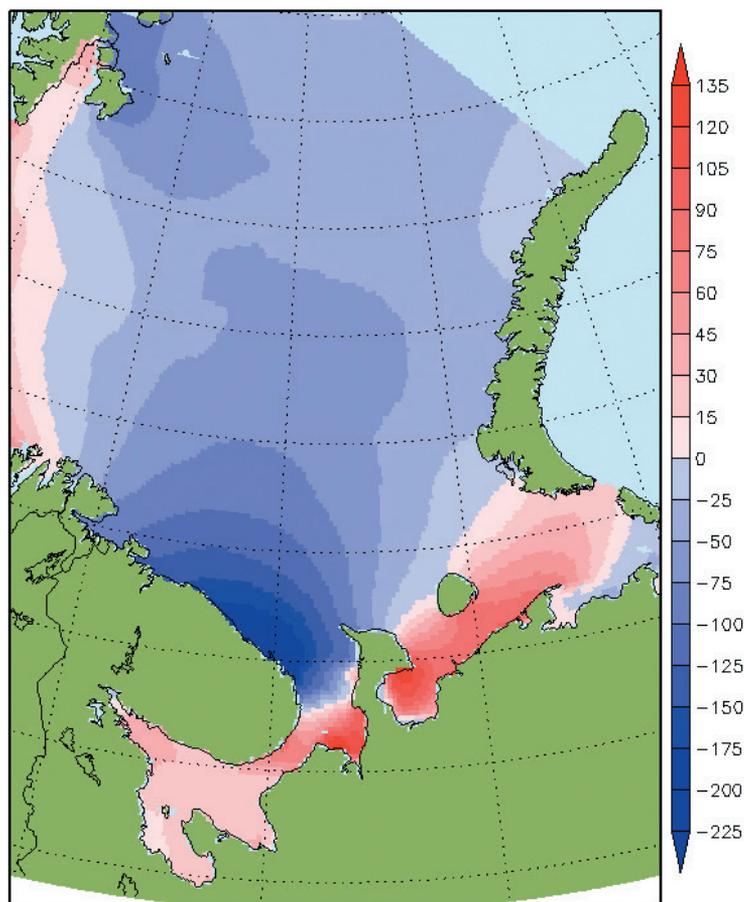


Рис. 3. Прогноз отклонения (см) от невозмущенного уровня Баренцева и Белого морей на 02 ч 9 апреля 2019 г.

Были выполнены численные эксперименты для трех наводнений в Санкт-Петербурге: 21 ноября — 2 декабря 2011 г., 20 декабря 2011 г. — 1 января 2012 г., 26—30 октября 2013 г. Для учета работы КЗС в модели было задано время закрытия и открытия водопропускных ворот (рис. 4). Из рисунка видно, что максимальный подъем уровня в пункте Горный институт 29 октября 2013 г. составил 110 см и был удовлетворительно воспроизведен моделью. При расчете характеристик этого наводнения по модели [9] было получено, что расчетный уровень в пункте Горный институт 29 октября 2013 г. был меньше фактического, что в [9] объясняется неточностью в задании процесса закрытия ворот КЗС.

Средний коэффициент корреляции фактического уровня в пункте Горный институт и расчетного уровня по модели [19] для трех наводнений оказался равным 0,92. Численные эксперименты показали, что модель может использоваться для прогноза уровня моря в Санкт-Петербурге с заблаговременностью 60 ч.

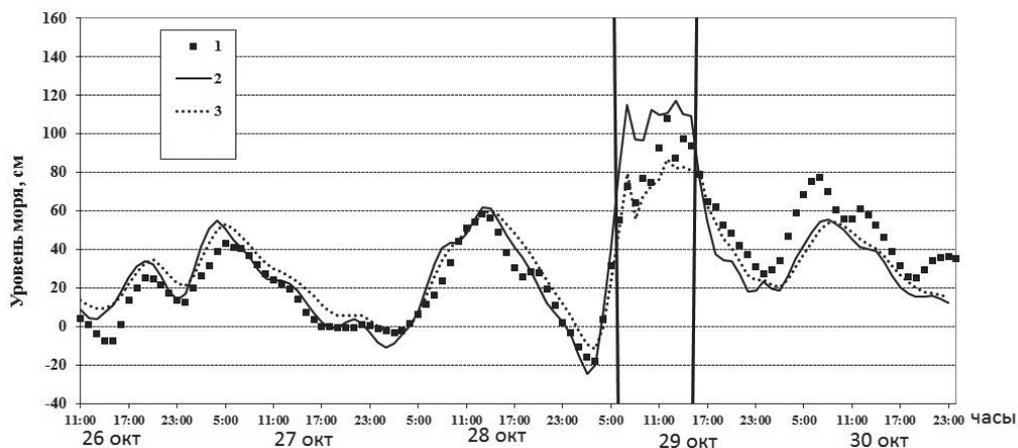


Рис. 4. Расчет уровня моря для пункта Горный институт на 26—30 октября 2013 г. по модели [19].

1 — данные наблюдений; 2 и 3 — модель с дамбой, шаг сетки 2 мили (2) и 90 м (3).
Вертикальные прямые — время закрытия и открытия ворот дамбы.

Ледовые прогнозы

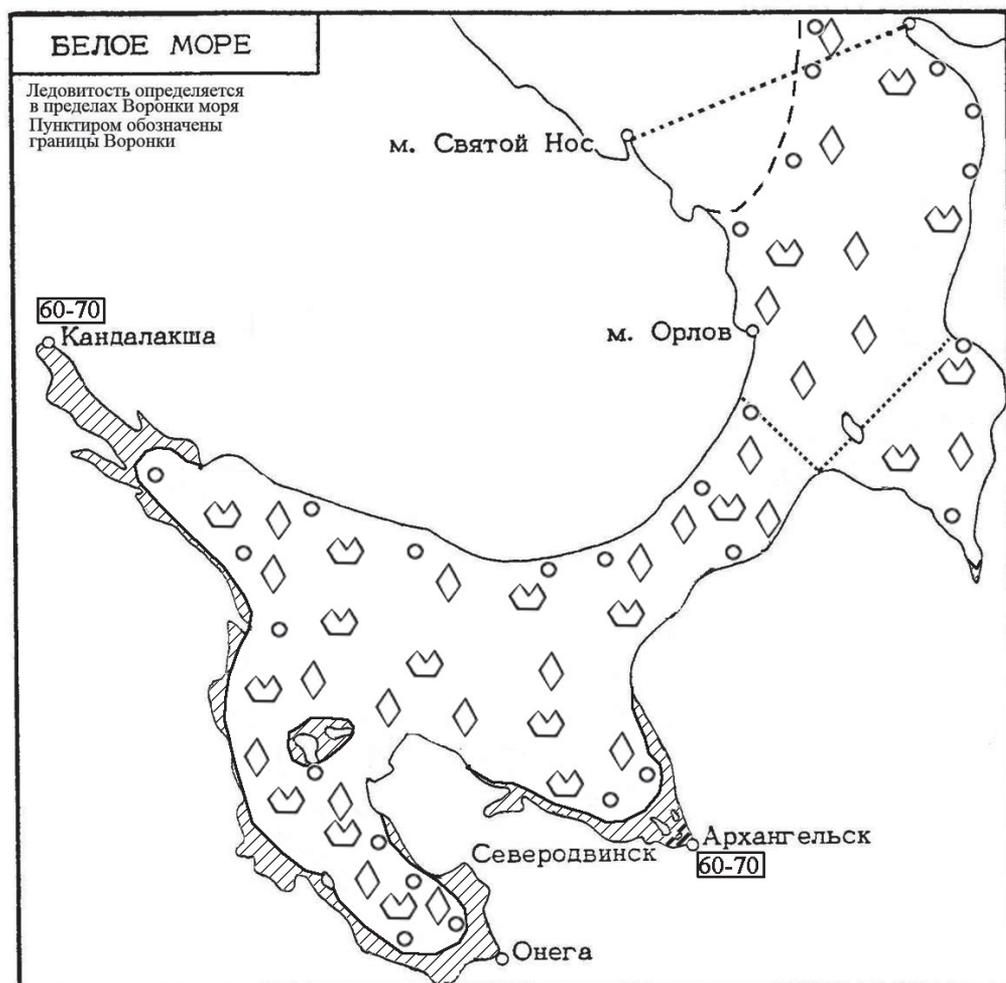
Долгосрочные ледовые прогнозы на неарктических морях России основываются в основном на физико-статистических методах. Ледовые процессы на морях связаны с предшествующими атмосферными процессами, которые, в свою очередь, определяются состоянием центров действия атмосферы в месяцы, предшествующие ледовому сезону. На этом основан единый подход к разработке методов долгосрочных ледовых прогнозов на неарктических морях.

Технология долгосрочного ледового прогноза состоит из двух этапов [4]:

- 1) расчет ледовых характеристик по уравнениям множественной регрессии на основе использования полей приземной температуры воздуха и приземного давления над атлантико-европейским сектором;
- 2) разложение кривых межгодовой изменчивости ледовых характеристик на гармонические составляющие с последующей экстраполяцией их сумм на предстоящий ледовый сезон.

В окончательном прогнозе учитывается вклад каждого из этих компонентов.

На основе этого подхода в Гидрометцентре России были разработаны методы долгосрочного ледового прогноза для Баренцева, Белого, Балтийского, Азовского, Каспийского и дальневосточных морей. Прогнозируются следующие характеристики: дата первого появления льда, максимальные за ледовый сезон среднемесячная ледовитость моря (рис. 5) и толщина припайного льда, дата окончательного очищения моря от льда, продолжительность ледового периода. Эти прогнозы ежегодно публикуются в начале октября в бюллетене «Долгосрочный прогноз ледовых условий на неарктических морях на предстоящий ледовый сезон», который рассылается потребителям.



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

*	Начальные виды льда		Граница неподвижного льда
	Дрейфующий лед		Кромка дрейфующего льда
	Припай		Толщина льда (см)
			Чистая вода

Рис. 5. Прогноз максимального развития ледяного покрова в Белом море в марте 2019 г.

В случае сложной ледовой обстановки важен прогноз ледовых характеристик на несколько суток. Такая обстановка сложилась в Азовском море в феврале 2017 г. В результате резкого похолодания в конце января — начале февраля 2017 г. происходило очень быстрое ледообразование на всей акватории моря. Под воздействием северо-восточного ветра ледяные поля из северной части моря начали смещаться на юго-запад, причем скорость дрейфа составляла около 2 км/ч [21], что относится к опасным явлениям.

Ледовая обстановка особенно осложнилась к середине февраля, когда дрейфующий лед вошел в Керченский пролив (рис. 6).

Дрейф льда сопровождался торошением, особенно интенсивным в прибрежных районах, где высота торосов достигала 1 м. Эти процессы создали угрозу для строительства Крымской переправы. Однако в соответствии с краткосрочным метеорологическим прогнозом ожидалось изменение направления ветра на южное, в связи с чем был дан прогноз о том, что дальнейшее развитие ледовой обстановки не представляет угрозы для переправы.

Гидрометеорологическое обеспечение в изменяющихся климатических условиях

Одним из факторов, влияющих на успешность и эффективность гидрометеорологического обеспечения, являются климатические условия. Если эти условия изменяются достаточно быстро, возрастает интенсивность и повторяемость экстремальных явлений, и это должно учитываться при разработке прогностических методов и технологий. Во многих исследованиях показано, что за последние 50—100 лет возросла повторяемость глубоких циклонов, выходящих с акватории Северной Атлантики на Европу. В качестве примера можно привести циклоны Anatol, Kurt, Lothar и Martin в декабре 1999 г., которые привели к гибели 150 человек и причинили ущерб странам Западной и Центральной Европы в размере около 13,5 млрд долларов [16].

Увеличение повторяемости глубоких циклонов приводит к усилению штормового волнения, что представляет серьезную угрозу для судоходства. В связи с этим необходима надежная информация о климатической изменчивости волнения в морях и океанах. В настоящее время создаются справочники нового поколения по волновому климату морей и океанов, и необходимо дальнейшее развитие волновых моделей.

Последние десятилетия характеризуются увеличением повторяемости опасных явлений на территории России, и в частности невских наводнений в Финском заливе [6]. Если в начале XVIII века повторяемость невских наводнений составляла шесть случаев за 10 лет, то в последние десятилетия она достигла 16 случаев за 10 лет [12]. В связи с этим продолжается изучение механизмов возникновения невских наводнений и развитие технологий прогноза течений и уровня моря в Финском заливе на основе гидродинамических моделей с учетом работающей дамбы.

Наиболее ярко климатические изменения, связанные с глобальным потеплением, выражены в Арктике. В арктических морях в XXI веке произошло

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
 ФГБУ "ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ"

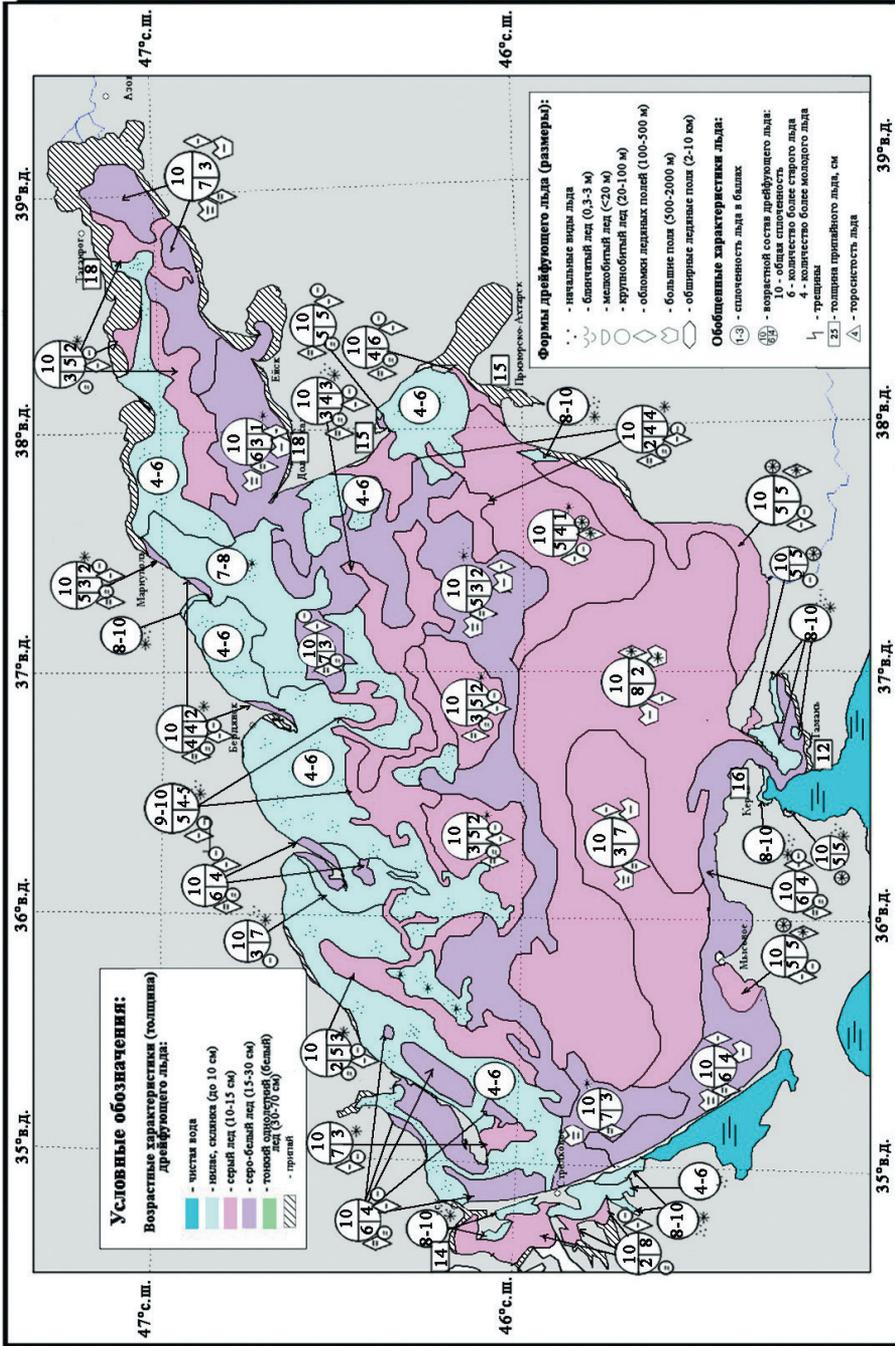


Рис. 6. Анализ ледовой обстановки в Азовском море на 17 февраля 2017 г.

значительное сокращение площади ледяного покрова по сравнению со второй половиной XX века. В среднем в июне — сентябре сокращение площади ледяного покрова составило в Карском море 18 %, в море Лаптевых 14 %, в Восточно-Сибирском море 19 %, в юго-западной части Чукотского моря 20 % [5].

Вместе с тем особенности короткопериодной изменчивости ледовых условий на акватории отдельных морей могут отличаться от общих тенденций. Например, если в 1950-х и 1960-х годах максимальное увеличение ледовитости Азовского моря между 10-дневными периодами составляло 50—70 %, то в период с 2000 по 2017 г. оно в отдельные зимы достигало 90—100 %, что свидетельствует об увеличении изменчивости ледовых условий моря. Поскольку долгосрочные ледовые прогнозы основываются в основном на статистических зависимостях, то изменения климата в таких прогнозах могут учитываться путем включения новых предикторов в прогностические уравнения и увеличения длины рядов исходных данных.

Выводы

В Гидрометцентре России разработаны оперативные технологии прогноза основных характеристик, необходимых для гидрометеорологического обеспечения деятельности на неарктических морях России: волнения, течений, уровня, ледовых условий. Дальнейшее развитие оперативных технологий заключается в увеличении разрешающей способности моделей, что позволит прогнозировать указанные выше характеристики в проливах, заливах, бухтах и т. д. Для этого необходимо развитие самих атмосферных и морских прогностических моделей (описание мезомасштабных процессов и т. д.). Например, очень важным является прогноз полей ветра с высоким разрешением, что актуально для обеспечения безопасности мореплавания.

Список литературы

1. Абузаров З.К., Думанская И.О., Нестеров Е.С. Оперативное океанографическое обслуживание. М.: ИГ «Социн», 2009. 287 с.
2. Абузаров З. К., Думанская И.О., Нестеров Е.С. Развитие технологий морских гидрологических прогнозов / В сб.: 80 лет Гидрометцентру России. М.: Триада, 2010. С. 376—388.
3. Абузаров З.К., Нестеров Е.С. Морское метеорологическое обслуживание в системе Росгидромета: современное состояние и перспективы развития // Метеоспектр. 2014. № 2. С. 99—111.
4. Думанская И.О. О методике долгосрочного прогноза ледовых условий на европейских морях России // Метеорология и гидрология. 2011. № 12. С. 64—77.
5. Думанская И.О. Некоторые тенденции в изменении ледовых характеристик арктических морей в XXI веке // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 362. С. 129—154.
6. Захарчук Е.А., Сухачев В.Н., Тихонова Н.А. Механизмы опасных подъемов уровня моря в Финском заливе. СПб: Петербург — XXI век, 2017. 151 с.
7. Зеленко А.А., Реснянский Ю.Д. Морские наблюдательные системы как составная часть оперативной океанологии (обзор) // Метеорология и гидрология. 2018. Вып. 12. С. 5—30.
8. 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. № 215. С. 90—101.
9. Клеванный К.А., Колесов А.М., Мостаманди М.-С. В. Прогноз наводнений в Санкт-Петербурге и восточной части Финского залива в условиях работы комплекса защитных сооружений // Метеорология и гидрология. 2015. № 2. С. 61—70.

10. Код для оперативной передачи данных морских береговых гидрометеорологических наблюдений (КН-02 SEA). М., 2014. 44 с.
11. *Комчатов В.Ф., Лучков В.П.* Вековая морская береговая гидрометеорологическая сеть — основа изучения гидрологического режима шельфовой зоны морей РФ и обеспечения гидрометеорологической безопасности // Труды ГОИН. 2011. Вып. 213. С. 5—14.
12. *Малинин В.Н., Гордеева С.М.* Изменчивость невских наводнений и морского уровня в Финском заливе в современных климатических условиях // Водные ресурсы. 2015. Т. 42, № 5. С. 544—557.
13. *Мысленков С.А., Архипкин В.С.* Система регионального прогноза ветрового волнения в Цемеской бухте Черного моря // Труды ГОИН. 2014. Вып. 215. С. 117—125.
14. *Нестеров Е.С.* Оперативные системы прогноза параметров морской среды для европейских морей // Метеорология и гидрология. 2005. № 1. С. 121—126.
15. *Нестеров Е.С.* Оперативное гидрометеорологическое обеспечение деятельности на морях России // Труды ГОИН. 2013. Вып. 214. С. 305—316.
16. *Нестеров Е.С.* Гидрометеорологическое обеспечение морской деятельности в меняющихся климатических условиях // Труды ГОИН. 2018. Вып. 219. С. 227—234.
17. *Попов С.К., Лобов А.Л., Елисов В.В., Батов В.И.* Прилив в оперативной модели краткосрочного прогноза уровня моря и скорости течений в Баренцевом и Белом морях // Метеорология и гидрология. 2013. № 6. С. 68—82.
18. *Попов С.К., Лобов А.Л.* Моделирование изменений уровня Азовского моря в 2015—2016 годах // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 364. С. 131—143.
19. *Попов С.К., Лобов А.Л.* Гидродинамическое моделирование наводнений в Санкт-Петербурге с учетом работающей дамбы // Метеорология и гидрология. 2017. № 4. С. 80—89.
20. *Попов С.К., Лобов А.Л.* Диагноз и прогноз уровня Каспийского моря по оперативной гидродинамической модели // Метеорология и гидрология. 2017. № 9. С. 90—99.
21. *Федоренко А.В.* Особенности ледовых условий в Азовском море и Керченском проливе зимой 2016/17 г. // Труды Гидрометцентра России. 2017. Вып. 364. С. 193—202.