

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ПРОГНОЗА ЛЕДОВЫХ И ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ

*д-р геогр. наук Е.У.МИРОНОВ, канд. геогр. наук И.М.АШИК,
ст. науч. сотр. В.И.ДЫМОВ, канд. физ.-мат. наук М.Ю.КУЛАКОВ,
канд. геогр. наук С.В.КЛЯЧКИН*

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, mir@aari.ru

Рассматриваются усовершенствованные и новые модели и методы прогнозов ледовых и океанографических условий в арктических морях, разработанные за последнее десятилетие. Модели и методы прогнозов составляют основу технологий, использующих современные геоинформационные системы. Показано, что выпуск морских гидрологических прогнозов различной заблаговременности является обязательной компонентой специализированного гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в Арктике в современных условиях.

Ключевые слова: модели, методы прогноза, ледовые условия, циркуляция вод, ветровое волнение, арктические моря.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных функций Федеральной службы по гидрометеорологии является прогнозирование гидрометеорологических процессов различной заблаговременности для снижения ущерба от неблагоприятных и опасных природных явлений и выработки оптимальных управленческих решений. Совершенствование существующих и создание новых методов прогнозов гидрометеорологических условий входит в ряд приоритетных государственных задач. Это особенно актуально для суровых климатических условий Арктики, где хозяйственная деятельность осуществляется на грани риска.

Развитие методов расчета и прогноза ледовых и океанографических условий в арктических морях является актуальной проблемой в связи с активизацией экономической деятельности в Арктике в последнее десятилетие. Кроме судоходства на трассах Северного морского пути, началось активная деятельность по освоению углеводородных месторождений на шельфе арктических морей. Это обусловило появление ряда новых задач, а именно: необходимость прогнозирования состояния моря в течение года с большей детализацией в пространстве и времени, оценки вероятности возникновения экстремальных характеристик ледовых и океанографических параметров для минимизации экологических и экономических потерь.

Оперативное слежение за развитием ледовых и океанографических условий в арктических морях, обеспечение потребителей сведениями о фактических условиях и выпуск морских гидрологических прогнозов различной заблаговременности являются обязательной компонентой специализированного гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в Арктике.

МЕТОДЫ ДОЛГОСРОЧНЫХ ЛЕДОВЫХ ПРОГНОЗОВ

Методология долгосрочного прогнозирования основана на совместном анализе многолетних рядов, которые характеризуют прогнозируемый элемент и факторы, определяющие его вариации, и на выявлении статистических связей между ними. В связи с тем, что при поиске статистических зависимостей большое внимание уделяется их физическому обоснованию, такие методы прогнозов принято называть физико-статистическими [4, 5].

В работах [11, 12] выполнен анализ современного состояния методов долгосрочного прогнозирования и показано, что дальнейшее развитие физико-статистических методов долгосрочных ледовых прогнозов целесообразно осуществлять по следующим основным направлениям:

- изучение физической природы крупномасштабных и региональных изменений ледовых условий и их взаимосвязи с процессами в атмосфере и океане;
- создание методов выбора информативных предсказателей и построения статистических или вероятностных прогностических схем с учетом быстрого развития компьютерных технологий.

Последнее направление подразумевает совершенствование методов и технологий прогнозирования по следующим основным принципам:

- развитие структурных методов компрессии – система преобразований исходной информации (разложение на естественные ортогональные функции, выделение классов и типов и др.);
- развитие релятивных методов компрессии – выбор наиболее информативных предсказателей и расчет обобщенных предикторов (метод группового учета аргументов, перебор различных комбинаций определяющих факторов и др.);
- построение прогностических схем – построение уравнений множественной регрессии на основе обобщенных предикторов или создание вероятностной матрицы для определения класса и типа;
- построение прогностического поля – восстановление реального поля характеристик ледовых условий (на основе коэффициентов разложения или типовых полей различных характеристик ледовых условий);
- представление прогностической информации в электронном виде с использованием современных геоинформационных технологий.

В последнее десятилетие совершенствование методов долгосрочного прогнозирования осуществлялось с учетом этих основных принципов.

Успешно развивался метод использования типизации ледовых условий, созданный на базе анализа многолетних рядов и диагноза типа развития ледовых процессов на основе сочетания различных определяющих факторов, а также оценки вероятности типа процессов в весенне-летний период.

В работе [6] показано, что различные комбинации гидрометеорологических факторов приводят к образованию характерных ледовых условий отдельно для каждого естественного однородного района. В результате формируется ограниченное количество типов ледовых условий, которые устойчиво сохраняются в течение всего летнего периода. Разработан метод локально-генетической типизации, который обеспечивает выделение внутри однородного района устойчивых типов ледовых условий по определенным сочетаниям аномалий природных предикторов. На основе этой методологии был разработан метод прогноза распределения сплоченности льда в Карском море в летний период с декадной дискретностью с заблаговременностью от 10 до 90 суток. Созданная база данных распределения льда позволяет в оперативном режиме формировать прогностические поля сплоченности льда.

Принципы локально-генетического подхода использовались при разработке метода прогноза наступления осенних ледовых явлений в Карском море, что позволяет получать пространственное распределение явления в виде изохрон.

Перебор различных комбинаций определяющих факторов использовался при разработке метода прогноза сроков взлома и разрушения припая. На основе отобранных предикторов строились уравнения множественной регрессии, при этом ледовые параметры определялись на основе качественно новой информации – спутниковых снимках ледяного покрова, которые позволяют диагностировать состояние припая на акватории однородного района моря, а не в отдельной точке, в пределах видимости наблюдателя. Единые принципы построения прогностической модели позволили разработать прогностические схемы для прогноза состояния припая в весенний период для всех арктических морей. В настоящее время заканчиваются оперативные испытания по восточным морям, а для западных арктических морей методы успешно прошли оперативные испытания.

Все разработанные за последние годы методы долгосрочных ледовых прогнозов прошли испытания на зависимых и независимых рядах, а также производственные испытания и рекомендованы Центральной методической комиссией по прогнозам (ЦМКП) Росгидромета к использованию в оперативной практике (табл. 1).

В настоящее время долгосрочные ледовые прогнозы разрабатываются в ААНИИ в рамках ведомственного заказа Росгидромета. Составляются два основных про-

Таблица 1

Методы долгосрочных ледовых прогнозов, прошедшие производственные испытания и рекомендованные ЦМКП к использованию в оперативной практике за 2000–2009 гг.

№	Наименование метода	Авторы	Период испытаний	Дата утверждения ЦМКП
1	Метод прогноза распределения льдов в Баренцевом море заблаговременностью 10–30 суток	Лебедев А.А., Миронов Е.У.	1998–2000	2000
2	Метод прогноза распределения льдов в Карском море заблаговременностью 10–30 суток	Егоров А.Г., Спичкин В.А.	1998–2000	2000
3	Метод прогноза распределения сплоченных льдов в Восточно-Сибирском и Чукотском морях заблаговременностью 1–3 месяца	Юлин А.В., Егоров А.Г.	1999–2000	2001
4	Метод прогноза распределения сплоченных льдов в море Лаптевых заблаговременностью 1–3 месяца	Карелин И.Д., Егоров А.Г.	1999–2000	2001
5	Метод долгосрочного прогноза ледообразования в юго-западной части Карского моря	Егоров А.Г.	2001–2002	2003
6	Метод долгосрочного прогноза очищения ото льда западной части моря Лаптевых	Карелин И.Д.	2001–2003	2004
7	Метод прогноза типа и распределения льдов в юго-западной части Карского моря в летний период заблаговременностью до 30 суток	Спичкин В.А., Саперштейн Е.Б.	2004–2005	2006
8	Метод долгосрочного прогноза ледообразования в Печорском море	Тюряков А.Б.	2002–2005	2006
9	Метод прогноза разрушения припая в Карском море заблаговременностью до 1 месяца	Карклин В.П., Карелин И.Д.	2006–2007	2008
10	Метод прогноза разрушения припая в море Лаптевых заблаговременностью до 1 месяца	Карелин И.Д., Карклин В.П.	2007–2008	2009

гностических бюллетеня: в марте на первую половину навигации (июнь—август) и в августе на вторую половину навигации (август—сентябрь). Основные прогнозы уточняются в июне и сентябре. Таким образом, выпускается четыре прогностических бюллетеня, содержащих долгосрочную прогностическую информацию о развитии ледовых условий на трассе Северного морского пути в летний период. В этих бюллетенях содержатся около 200 прогностических показателей по основным элементам ледового режима: сроки разрушения припая, положение кромки дрейфующих льдов, ледовитость, площади ледяных массивов, сроки устойчивого ледообразования, сроки достижения льдом толщины 20–25 см. Заблаговременность прогнозов составляет от 1 до 5 месяцев, а уточнений — от 10 до 30 суток.

Порядок составления и распространения долгосрочных ледовых прогнозов регламентируется новым Положением «Об обеспечении организаций, находящихся в ведении Федерального агентства морского и речного транспорта, долгосрочными ледовыми прогнозами по арктическим морям и устьевым областям сибирских рек» [15]. В Положении отражены современные реальные возможности долгосрочного ледового прогнозирования, закреплены перечень прогностической продукции, сроки составления и передачи информации.

МЕТОДЫ КРАТКОСРОЧНЫХ ЛЕДОВЫХ ПРОГНОЗОВ

Краткосрочные прогнозы ледовых условий (заблаговременностью до 5–7 суток) составляются, как правило, с помощью методов динамико-термодинамического численного моделирования. Этот подход, основанный на численном решении уравнений динамики и термодинамики системы «лед—океан», применяется достаточно давно и успешно.

Прогноз изменения термохалинной структуры водной толщи основан на уравнениях баланса тепла и солей, проинтегрированных по вертикали в пределах от поверхности до глубины верхнего квазиоднородного слоя [16]. Для решения уравнений баланса тепла и солей необходимо знать термохалинную структуру в верхнем деятельном слое моря, для чего привлекаются уравнения состояния, движения воды, неразрывности, диффузии тепла и солей. В качестве граничных условий на верхней и нижней границах деятельного слоя используются потоки тепла и солей. В результате теплообмена море теряет или, наоборот, приобретает тепло, что приводит к образованию и нарастанию либо таянию и исчезновению льда.

Прогноз динамики моря строится на основе модели океана, включающей уравнения движения, гидростатики, неразрывности. Система уравнений дополняется граничными условиями на поверхности океана и на нижней границе деятельного слоя, а также на берегах и на границах расчетной области. Бароклинная составляющая динамики моря в синоптическом временном масштабе обычно задается как поле постоянных течений.

Прогноз термического нарастания и разрушения льда основывается на уравнении теплового баланса [14]. В качестве граничных условий на верхней и нижней поверхностях ледяного покрова используются соответствующие потоки тепла. При оценке потока тепла на границе «лед (снег) — воздух» необходимо учитывать изменчивость альбедо ледяного покрова, влияние льда на температуру воздуха, толщину снежного покрова на льду и т.д. Поток тепла на нижней поверхности ледяного покрова определяется вертикальным турбулентным обменом в деятельном слое, включая эффекты, связанные с выпадением соли при ледообразовании.

Динамика ледяного покрова прогнозируется на основе уравнения баланса количества движения в нестационарной постановке. Тангенциальные напряжения на верхней и нижней поверхностях ледяного покрова определяются с помощью хорошо известного квадратичного закона [1]. Сила Кориолиса и проекция силы тяжести на поверхность моря задаются традиционно. Параметризация сил внутреннего взаимо-

действия в ледяном покрове зависит от принятой реологической модели. Реальный ледяной покров, представляющий собой совокупность большого числа льдин разных форм, толщины и размеров, проявляет свойства, характерные как для вязких, так и упругих и пластических сред. Поэтому практически невозможно найти реологическое соотношение, отражающее всю гамму свойств реального ледяного покрова. По этой причине формулировка реологического соотношения является самостоятельной задачей и решается в каждом конкретном случае в зависимости от пространственно-временных масштабов модели, специфики рассматриваемого региона, сезона и т.д.

Методы численных ледовых прогнозов развиваются в ААНИИ в течение нескольких десятков лет, и за эти годы создан ряд прогностических моделей, причем каждая новая версия развивает, дополняет и уточняет предыдущую [1, 12, 16]. В последние годы широкое применение в оперативной практике ААНИИ получила прогностическая модель, разработанная в конце 1990-х – начале 2000-х гг. З.М.Гудковичем и С.В.Клячкиным [7, 12].

Первые попытки использовать данную модель для оперативного обеспечения морских операций на шельфе Печорского моря были предприняты в 2001–2002 гг. Эти первые опыты показали, что технологическая реализация прогностического обеспечения неудовлетворительна. По этой причине в течение ряда лет основные усилия были сосредоточены на совершенствовании технологии составления численных ледовых прогнозов.

Составление краткосрочных численных ледовых прогнозов осуществляется с помощью автоматизированного рабочего места «Ледовый прогнозист» (АРМ ЛП). Программное обеспечение АРМ ЛП позволяет в автоматизированном режиме:

- воспринимать исходную информацию, поступающую от других АРМ;
- преобразовывать информацию в формат численной модели;
- осуществлять комплексирование информации, т.е. восполнять пробелы за счет привлечения других источников;
- осуществлять прогностический расчет;
- преобразовывать результат прогностического расчета в формат, совместимый с программами визуализации географической информации;
- передавать прогностический результат в заданном формате в другие АРМы для дальнейшего использования (например, для составления навигационных рекомендаций) и непосредственно для отправки потребителю;
- накапливать исходные данные и, при необходимости, прогностические результаты в специальных информационных массивах;
- оценивать достоверность составленных прогнозов.

Наиболее существенным достижением технологического развития представляется автоматизация процесса подготовки исходной ледовой информации. Еще лет 15–20 назад эта процедура осуществлялась путем накладывания палетки на ледовую карту и ручного ввода данных по каждой ячейке сетки в специальные таблицы. Затем была разработана программа, позволяющая в интерактивном режиме воспроизводить на экране монитора ледовую карту (т.е. границы однородных ледовых зон) и вводить характеристики ледяного покрова по каждой зоне. Излишне говорить, что обе эти процедуры были весьма трудоемкими и отнимали много времени.

В настоящее время, благодаря применению технологий геоинформационных систем (ГИС), удалось кардинально усовершенствовать процесс подготовки ледовых данных. Эксперт, дешифрирующий спутниковый снимок, работает непосредственно в среде ГИС ArcView и составляет ледовую карту сразу в виде векторного шейп-файла, содержащего информацию о границах ледовых зон и о характеристиках льда в каждой зоне. Шейп-файл подается на вход АРМ ЛП, где специальная программа (также работающая в среде ГИС ArcView) сопоставляет координаты границ ледовых зон с координатами ячеек расчетной сетки модели и формирует цифровой файл-матрицу



Рис. 1. Интерфейс программы преобразования исходной ледовой карты из формата ГИС ArcView в матричный формат численной модели

в формате ASCII, содержащий информацию о характеристиках ледяного покрова по каждой ячейке сетки. При необходимости этот файл дополняется данными из других источников (на практике чаще всего – результатами предыдущего прогноза).

Аналогичным образом осуществляется преобразование результатов прогнозов из матричного формата численной модели в векторный формат ГИС ArcView и затем в специальный формат, соответствующий программному обеспечению терминала конечного пользователя, где визуализируются результаты прогноза, определяется оптимальный маршрут плавания и т.п.

На рис. 1 и 2 показаны интерфейс программы преобразования исходной ледовой карты из формата ГИС ArcView в матричный формат численной модели и результат этого преобразования в виде композитной карты-схемы (с добавлением данных предыдущего прогноза).

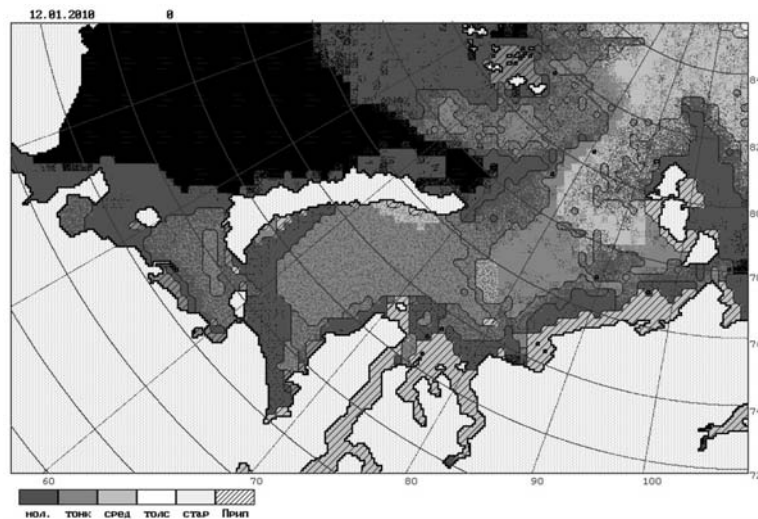


Рис. 2. Композитная карта-схема ледовых условий после преобразования в матричный формат численной модели

В настоящее время модель адаптирована, с той или иной степенью надежности, ко всем арктическим морям России и к некоторым замерзающим морям умеренного пояса России (Японское, Охотское, Балтийское, Каспийское).

Помимо технологического развития, постоянно совершенствуются физические основы методов краткосрочных ледовых прогнозов. В последние годы выполнена существенная работа по уточнению океанологической части прогностических моделей, позволившая более точно учитывать приливные компоненты динамики льда. Разработана методика прогноза отрыва припая, дающая хотя и приближенные, но во многих случаях весьма полезные результаты.

Методы численного моделирования позволяют получать прогностические оценки некоторых опасных и неблагоприятных явлений, таких как интенсивный дрейф, сильные сжатия, воздействие торосов и айсбергов на морское дно, образование береговых навалов.

Как показывает опыт, в последние десять лет интерес потребителей к краткосрочным ледовым прогнозам заметно повысился, что говорит о важности этого компонента специализированного гидрометеорологического обеспечения и о необходимости продолжать работу по его совершенствованию.

МЕТОДЫ ПРОГНОЗОВ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ И ТЕЧЕНИЙ

При гидрометеорологическом обеспечении морских операций в арктических морях диагностическими и прогностическими расчетами дрейфа и перераспределения льда, колебаний уровня и течений в настоящее время используется оперативная гидродинамическая модель совместной динамики воды и льда, разработанная в ААНИИ [2, 3]. В настоящее время действующая оперативная модель подверглась серьезной модернизации, которая позволяет говорить о переходе к модели нового поколения.

Модифицированная модель основана на примитивных уравнениях движения воды в приближении Буссинеска и гидростатическом приближении, уравнении неразрывности для несжимаемой жидкости, уравнениях диффузии и адвекции тепла и соли и уравнении состояния. Для сокращения времени вычислений модель расщеплена на трехмерную (бароклинную) и двумерную (баротропную) задачи. Двумерная часть представляет собой классическую задачу по определению средней по вертикали скорости течения и уровня моря в рамках теории «мелкой воды». Подобный прием используется в большинстве разработанных к настоящему времени моделей циркуляции океана [18, 22], поскольку позволяет значительно сократить время вычислений. Достигается это тем, что с малым временным шагом, ограниченным критерием Куранта–Фридрихса–Леви, интегрируется только двумерная задача. Временной шаг в трехмерной задаче может превышать последний критерий в десятки раз.

Для расчета коэффициента вертикальной турбулентной вязкости используется параметризация Кочергина [23]. Коэффициенты горизонтального турбулентного обмена рассчитываются по хорошо известной параметризации Смагоринского.

Аппроксимация производных в уравнениях модели и вычислительный процесс организованы на двух вложенных сетках. В двумерной задаче применяется сеточный шаблон С по классификации Аракавы. Трехмерная задача решается на шаблоне В.

Для оптимизации процесса вычислений трехмерной задачи применяется расщепление по физическим процессам согласно [10]. Такой подход позволяет, с одной стороны, увеличить шаг интегрирования за счет применения метода прогонки при решении уравнения по вертикальной координате, с другой стороны, уменьшает схемную вязкость расчета адвекции за счет использования метода коррекции потоков (FCT) [17].

Модель предназначена, в первую очередь, для работы в Северном Ледовитом океане (СЛО) и его морях, по этой причине она дополнена ледовым блоком. Поскольку на этапе разработки модели не ставились задачи детального прогноза

ледовых явлений, то ледовый блок построен на достаточно упрощенных уравнениях динамики льда [19, 20] с вязкой реологией [21, 24, 25].

Модель позволяет воспроизводить течения различного происхождения (бароклинные, ветровые, стоковые, приливные), а также соответствующие им колебания уровня моря. Возможно использование модели как для диагностических, так и для краткосрочных прогностических расчетов. На данный момент заблаговременность прогностических расчетов ограничена отсутствием термодинамического блока в ледовом блоке модели.

Кроме того, разработан блок транспорта и трансформации различных трассиров, находящихся в воде в растворенном и взвешенном состоянии. Региональный вариант модели был использован при изучении динамики взвеси в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском [8]. В рамках проектов Целевой научно-технической программы Росгидромета (ЦНТП) проводились испытания модели в качестве динамического блока модели переноса нефтяных загрязнений.

В настоящий момент модель адаптирована к акватории СЛО с пространственным разрешением 13,8 км. Выполнены тестовые расчеты по воспроизведению ветровой и термохалинной циркуляции вод в СЛО, а также 4-х основных приливных волн (M_2 , S_2 , K_1 , N_1). В качестве примера, на рис. 3 приведен результат расчета термохалинной циркуляции вод в поверхностном слое СЛО в летний период по данным о температуре и солености из «World Ocean Atlas 2005» (приведен только каждый четвертый вектор течения). На рис. 4 представлена рассчитанная котидальная карта приливной волны M_2 .

Результаты вычислений по модифицированному варианту модели были сопоставлены с данными наблюдений уровня моря на береговых станциях и данными наблюдений за скоростью течения на притопленной буйковой станции в море Лаптевых и продемонстрировали хорошее совпадение.

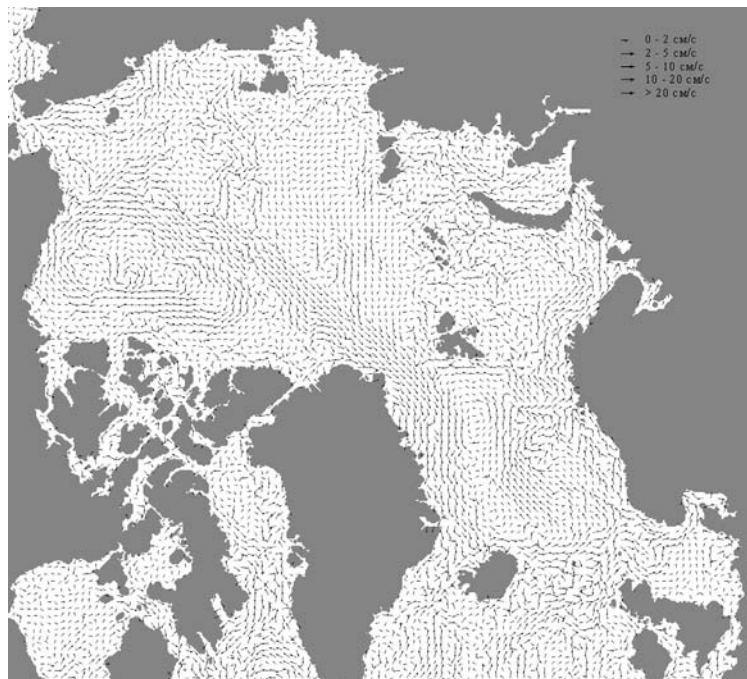


Рис. 3. Термохалинная циркуляция Северного Ледовитого океана в поверхностном слое (лето)

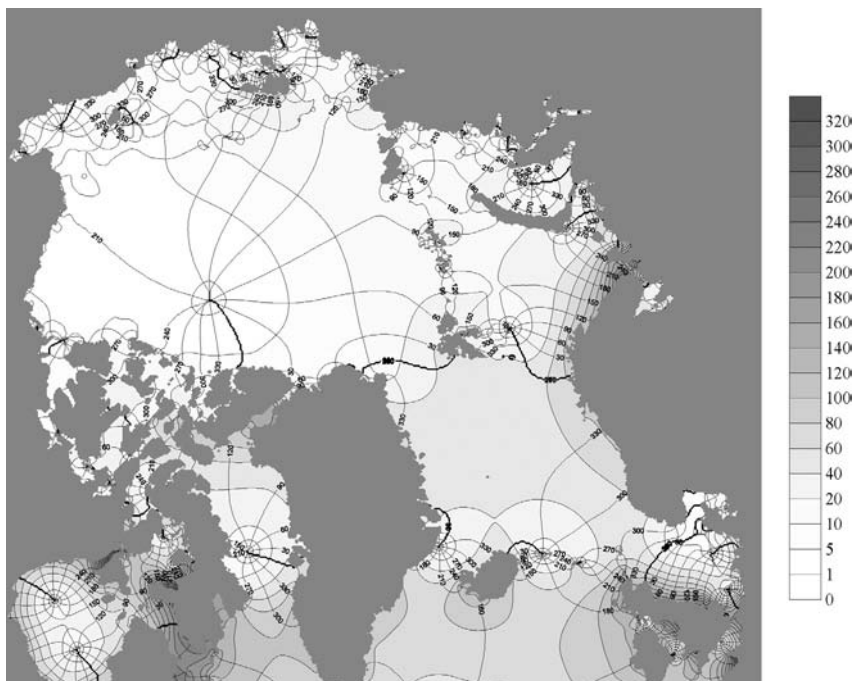


Рис. 4. Котидальная карта волны M_2 в Северном Ледовитом океане

МЕТОДЫ ПРОГНОЗОВ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ

Одним из наиболее важных параметров гидрометеорологического обеспечения экономической деятельности в открытом море, на шельфе и в прибрежных районах являются расчеты и прогнозы ветрового волнения, а также режимные (климатические) характеристики волнения, включающие экстремальные оценки редкой повторяемости.

Современные математические модели расчета ветрового волнения основываются на численном решении спектрального уравнения баланса волновой энергии (дискретно-спектральные модели) или на решении уравнений для основных параметров спектра (спектрально-параметрические модели). Оба эти пути разработки моделей расчета ветрового волнения имеют свои достоинства и недостатки.

Технология расчетов и прогнозов ветрового волнения, разработанная в ААНИИ, основывается на авторской спектрально-параметрической модели (СПМ), получившей в дальнейшем название ААРИ-PD2. В отличие от дискретно-спектральных моделей в спектрально-параметрической модели вначале разделяются частотно-направленные спектры и другие характеристики (чисто) ветровых волн и волн зыби, а характеристики суммарного волнения определяются как результат их взаимодействия. Модель создавалась в СПО ГОИН Т.А.Пасечник под руководством И.Н.Давидана, а затем совершенствовалась в ААНИИ под руководством И.В.Лавренова [9]. С 2001 г. глобальная версия модели внедрена в оперативную практику ГМЦ России, и по ней регулярно дважды в сутки выполняются оперативные прогнозы волнения.

Эта технология постоянно совершенствуется и в своем современном варианте позволяет ежедневно усваивать положение кромки льда по спутниковым многоканальным микроволновым данным о сплоченности морского льда (SSM/I и AMSR) в арктических и замерзающих морях России, а также рассчитывать интенсивность брызгового обледенения судов (рис. 5).

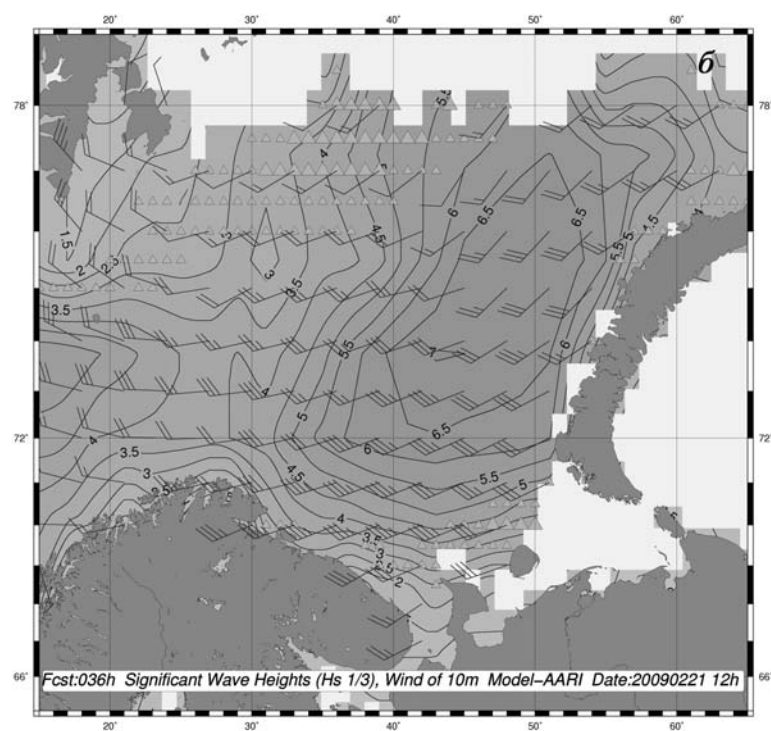
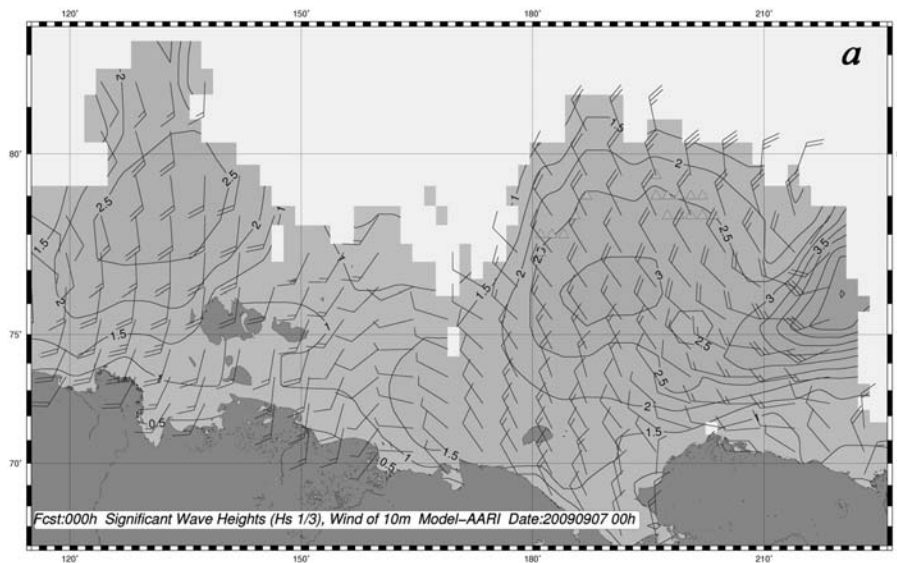


Рис. 5. Примеры прогнозов волнения, ветра и брызгового обледенения судов в арктических морях с усвоением спутниковых данных (SSM/I и AMSR) по сплоченности морского льда: *a* – прогноз по акватории Баренцева моря на 12 UTC 21 февраля 2009 г.; *б* – прогноз по акватории морей Восточной Арктики на 00 UTC 7 сентября 2009 г. Треугольниками на рисунках обозначены степени (1–3) брызгового обледенения судов среднего водоизмещения

В результате совместных исследований, выполненных в последнее время волновыми лабораториями СПО ГОИН и ААНИИ, существенно увеличена точность расчета ветрового волнения по спектрально-параметрической модели не только в морях, но и в океанических условиях, где волны зыби играют очень большую роль в формировании режима ветрового волнения. Это достигнуто путем обработки и анализа данных многочисленных непрерывных измерений ветрового волнения в различных районах Мирового океана. Анализ позволил существенно уточнить зависимость, связывающую параметры спектра ветровых волн со скоростью трения в очень широком диапазоне интенсивности ветрового волнения и условий его развития, а также уточнить блок взаимодействия ветровых волн с волнами зыби.

Была проведена верификация модели путем сопоставления расчетов с большим числом измерений волнения на 16 буях в северной части Атлантического океана. Выполнено также сопоставление расчетов по спектрально-параметрической модели с моделями, используемыми в настоящее время для диагноза и прогноза волнения в Службе погоды США (WAVEWATCH) и Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды (WAM). Сравнительный анализ результатов сопоставлений показал, что расчеты по спектрально-параметрической модели в целом не уступают по точности перечисленным выше моделям, а в ряде случаев даже превосходят их, выигрывая при этом на порядок в быстродействии.

Решением ЦМКП от 16 мая 2008 г. модель ветрового волнения AARI-PD2 в сетке с повышенным разрешением ($1,25^\circ \times 1,25^\circ$) рекомендована для использования в оперативно-прогностической работе ГМЦ России и ААНИИ на новой вычислительной платформе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен обширный цикл работ, направленных на совершенствование существующих и разработку новых моделей и методов ледовых и океанографических прогнозов в арктических морях.

В последнее десятилетие основные усилия были сосредоточены на совершенствовании технологий оперативного гидрометеорологического обеспечения в целом и составления численных ледовых и океанографических прогнозов в частности. В результате в 2005–2006 гг. в ААНИИ был разработан адаптируемый комплекс мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы и гидросферы для обеспечения морской деятельности в арктических и замерзающих морях России (АКМОН) [13].

АКМОН представляет собой аппаратно-программный комплекс для создания информационных систем мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы и гидросферы на базе локальных автоматизированных рабочих мест обработки гидрометеорологической информации путем связывания их в единую технологическую цепочку и организации доведения готовой информационной продукции до потребителей стандартным способом. Решение указанных задач осуществляется средствами разработанных в ААНИИ АРМов, расчетную основу которых составляют описанные выше численные модели. Создание комплекса АКМОН позволило вывести специализированное гидрометеорологическое обеспечение (и в том числе краткосрочное прогнозирование) на принципиально новый технологический уровень.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аппель И.Л., Гудкович З.М.* Численное моделирование и прогноз эволюции ледяного покрова арктических морей в период таяния. Л.: Гидрометеиздат, 1992. 143 с.
2. *Ашик И.М.* Численные прогнозы колебаний уровня моря и сплоченности льдов в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском // Научные результаты экспедиции ЛАПЭКС-93. СПб.: Гидрометеиздат, 1994. С. 199–209.

3. *Ашик И.М.* Численные расчеты и прогнозы колебаний уровня, течений и дрейфа льда на шельфе морей Западного сектора Арктики // *Навигация и гидрография.* 1997. № 4. С. 85–94.
4. *Визе В.Ю.* Основы долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей. М.: Изд-во Главсевморпути, 1944. 273 с.
5. *Гудкович З.М., Кириллов А.А., Ковалев Е.Г., Сметанникова А.В., Спичкин В.А.* Основы методики долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей. Л.: Гидрометеоздат, 1972. 348 с.
6. *Егоров А.Г., Спичкин В.А.* Метод локально-генетической типизации ледовых условий // *Тр. ААНИИ.* 1994. Т. 432. С.146–163.
7. *Клячкин С.В., Гудкович З.М.* Методика среднесрочного ледового прогноза для Печорского моря на основе численной динамико-термодинамической модели // *Информационный сборник ГМЦ РФ.* 2005. № 31. С. 104–119.
8. *Кулаков М.Ю.* Циркуляция вод и перенос взвесей в моря Лаптевых и Восточно-Сибирском // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2008. Вып. 3 (80). С. 86–97.
9. *Лавренов И.В.* Математическое моделирование ветрового волнения в пространственно-неоднородном океане. СПб.: Гидрометеоздат, 1998. 499 с.
10. *Марчук Г.И.* Численное моделирование в проблеме окружающей среды. М.: Наука, 1982. 320 с.
11. *Мионов Е.У.* Ледовые условия в Гренландском и Баренцевом морях и их долгосрочный прогноз. СПб.: ААНИИ, 2004. 320 с.
12. *Мионов Е.У., Иванов В.В., Клячкин С.В.* Современное состояние и основные направления развития методов ледовых и метеорологических прогнозов в Арктике // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2000. Вып. 72. С. 26–41.
13. *Мионов Е.У., Лавренов И.В., Бресткин С.В., Смирнов В.Г.* Адаптируемый комплекс мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы и гидросферы. Патент на полезную модель № 59844 от 27 декабря 2006 г.
14. *Николаева А.Я., Шестериков Н.П.* Метод расчета ледовых условий (на примере моря Лаптевых) // *Тр. ААНИИ.* 1970. Т. 292. С.143–217.
15. Об обеспечении организаций, находящихся в ведении Федерального агентства морского и речного транспорта, долгосрочными ледовыми прогнозами по арктическим морям и устьевым областям сибирских рек. СПб.: ААНИИ, 2009. 10 с.
16. *Фролов И.Е.* Численная модель осенне-зимних ледовых явлений. // *Тр. ААНИИ.* 1981. Т. 372. С. 73–81.
17. *Boris J.P., Book D.L.* Flux-Corrected Transport I: SHASTA – A Fluid Transport Algorithm That Works // *J. Comput. Phys.* 1973. № 11. P. 38–69.
18. *Hedstrom K.S.* User's Manual for an S-Coordinate Rutgers University Model (SCRUM). Version 3.0. Institute of Marine and Coastal Sciences at Rutgers University. 1997. 116 p.
19. *Hibler W.D.* A Dynamic/Thermodynamic Sea Ice Model // *J. Phys. Oceanogr.* 1979. Vol. 9. P. 815–846.
20. *Hibler W.D., Bryan K.* A Diagnostic Ice-Ocean Model // *J. Phys. Oceanogr.* 1987. 17. P. 987–1015.
21. *Johnson W.R., Kowalik Z.* Modeling of storm surges in the Bering Sea and Norton Sound // *J. of Geoph. Res.* 1986. Vol. 91. № C4. P. 5119–5128.
22. *Killworth P.D., Stainforth D., Weeb D.J., Paterson S.M.* The Development of a Free-Surface Bryan-Cox-Semtner Ocean Model // *J. Phys. Oceanogr.* 1991. Vol. 21. № 9. P. 1333–1348.
23. *Kochergin V.P.* Three-dimensional prognostic models. Three-Dimensional Coastal Ocean Models / N.S.Heaps, ed. // *Coastal Estuarine Science Series. Amer. Geophys. Union.* Vol. 4. 1987. P. 201–208.
24. *Kowalik Z.* A study of M tide in the ice-covered Arctic Ocean // *Modeling Identif. and Control.* 1981. № 2(4). P. 201–203.
25. *Kowalik Z.* Storm surges in the Beaufort and Chukhi Seas // *J. of Geoph. Res.* 1984. Vol. 89. № C6. P. 10570–10578.

YE.U.MIRONOV, I.M.ASHIK, V.I.DYMOV, M.YU.KULAKOV, S.V.KLYACHKIN

**MODELS AND METHODS OF CALCULATIONS
AND FORECASTS OF ICE AND OCEANOGRAPHIC CONDITIONS
IN THE ARCTIC SEAS**

The improved and new models and methods of ice and oceanographic condition forecasts in the Arctic Seas developed in recent decade are under consideration. The models and methods of forecasts comprise the basis of technologies using the modern geo-information systems. The sea hydrological forecasts of various periods of advance are shown to be the obligatory component of the specialized hydrometeorological support of economic activities in the Arctic in modern conditions.

Key words: models, methods of forecast, ice conditions, water circulation, wind waves, Arctic Seas.