

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБНАРУЖЕНИЯ АЙСБЕРГОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИХ ДРЕЙФА В ЗАПАДНОМ СЕКТОРЕ АРКТИКИ

*д-р геогр. наук Е.У. МИРОНОВ, канд. физ.-мат. наук В.Г. СМЕРНОВ,
канд. геогр. наук И.А. БЫЧКОВА, канд. физ.-мат. наук М.Ю. КУЛАКОВ,
вед. программист Д.М. ДЕМЧЕВ*

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

Рассматриваются новые технологии обнаружения айсбергов на основе спутниковых радиолокационных изображений высокого разрешения и прогнозирования их дрейфа на основе совместной модели океан–лед AARI-IOSM и региональной атмосферной модели WRF, адаптированной для условий Баренцева и Карского морей.

Ключевые слова: айсберги, радиолокаторы, спутниковые изображения, динамико-термодинамическая модель, Баренцево море, Карское море.

ВВЕДЕНИЕ

Айсберги могут наблюдаться в большинстве районов морей Западной Арктики, и встреча с ними является одной из наиболее реальных и опасных угроз для различных отраслей экономики (Опасные ледовые явления..., 2010). Айсберги и их обломки из-за своей значительной массы и большой осадки представляют серьезную опасность для транспортных и рыболовных судов, ледоколов, нефтегазовых комплексов, включающих стационарные гидротехнические сооружения и трубопроводы, которые планируется воздвигать на шельфе этого региона. В последние годы в связи с активными работами (геологоразведка, сейсмическая съемка, разведочное бурение и др.) по освоению нефтегазовых месторождений на шельфе Баренцева и Карского морей вопрос айсберговой угрозы возник особенно остро. Поэтому мониторинг айсбергов и прогноз их перемещения имеет важное научное и прикладное значение.

Для исследования распространения айсбергов и закономерностей их дрейфа используются различные методы наблюдений, такие, как спутниковый мониторинг, аэрофотосъемка с вертолета или беспилотного летательного аппарата, установка радиомаяка на айсберг. Значительный опыт мониторинга айсбергов имеется у ледовых служб Канады, Дании и Норвегии. Радиолокационные спутниковые изображения высокого разрешения позволяют осуществлять обнаружение айсбергов и их мониторинг, аэрофотосъемка айсбергов позволяет получать морфометрические характеристики их верхней поверхности, а с помощью радиомаяков, установленных на их верхнюю поверхность, можно отслеживать траектории перемещения айсбергов. Эти данные необходимы для статистического анализа параметров дрейфа и верификации математических моделей дрейфа айсбергов.

Задачей настоящей статьи является рассмотрение современных технологий обнаружения айсбергов с использованием радиолокационных спутниковых снимков и прогнозирования дрейфа айсбергов, разработанных в последние годы.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АЙСБЕРГОВ НА АКВАТОРИИ БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ

Потенциальными источниками айсбергов в Баренцевом море являются ледники арктических архипелагов Шпицберген, Земля Франца-Иосифа, Новая Земля и некоторых небольших арктических островов (Атлас..., 1985). Общая площадь современного оледенения этих архипелагов составляет около 70 тыс. км², а объем накопленного льда — более 20 км³. Наибольшими запасами льда обладает архипелаг Шпицберген, где сосредоточено примерно 30 % от объема ледников Западной Арктики. Существует вероятность дрейфа транзитных айсбергов из Арктического бассейна, от выводных ледников Канадского Арктического архипелага. В Карском море основными источниками образования айсбергов являются архипелаги Северная Земля и Новая Земля (Атлас..., 1985).

Распространение айсбергов в морях Западной Арктики неравномерно, и районы, где они наиболее часто встречаются, тяготеют к выводным ледникам. В то же время айсберги могут наблюдаться и на значительном удалении от них. Это обусловлено тем, что вблизи берегов большинства арктических архипелагов наблюдаются большие глубины, что позволяет айсбергам с осадкой киля более 20 м дрейфовать в сторону моря, а не садиться на мель во фьордах и бухтах. Поэтому айсберги и обломки айсбергов дрейфуют практически по всей акватории Баренцева и Карского морей в соответствии с генеральной схемой циркуляции вод и льдов. Плотность распределения айсбергов по акватории арктических морей имеет выраженную сезонную зависимость. Зимой айсберги встречаются относительно недалеко от источника их образования, а летом распространяются на акватории моря, свободной ото льда.

Исторические данные о распространении айсбергов получены в основном на материалах авиационных ледовых разведок с 1928 по 1991 г. (Abramov, 1996; Ледяные образования..., 2006), которые выполнялись нерегулярно и преимущественно в районах судоходных трасс, поэтому они не могут дать объективную оценку распространения айсбергов. Тем не менее, с учетом многолетнего характера наблюдений, эти



Рис. 1. Южная граница распространения айсбергов в Баренцевом и Карском морях по данным ледовых авиаразведок за период 1928–1991 гг. (Abramov, 1996; Ледяные образования..., 2006).

**Случаи аномального распространения айсбергов
в южной части Баренцева и Карского морей**

Координаты	Дата	Район	Источник
71°00' с.ш. 34,5° в.д.	Апрель 1929 г.	Побережье Мурмана	Визе, 1930
71°28' с.ш. 36°40' в.д.	1942 г.	Юг Баренцева моря	Ледяные образования..., 2006
72°05' с.ш. 46°10' в.д.	Май 2003 г.	Юг Баренцева моря	Наумов и др., 2003
69°30' с.ш. 49°00' в.д.	Май 2003 г.	К северо-западу от о. Колгуев	Наумов и др., 2003
70°30' с.ш. 61°00' в.д.	1961 г.	Юг Карского моря	Abramov, 1996
71°00' с.ш. 60°00' в.д.	?	Юг Карского моря	Abramov, 1996
74°00' с.ш. 70°30' в.д.	?	К северу от о. Белый	Abramov, 1996

данные дают общее представление о возможном характере распространения айсбергов и их повторяемости. На рис. 1 показана южная граница распространения айсбергов.

Специализированные исследования айсбергов, выполненные в последние годы, показали, что возможны аномальные случаи вторжений айсбергов на акватории, где обычно они не наблюдаются. В табл. 1 представлены случаи фиксаций айсбергов в южной части акватории Баренцева и Карского морей, где планируется строительство нефтегазовых комплексов.

Для обнаружения потенциально возможного распространения айсбергов необходимо проводить регулярный спутниковый радиолокационный мониторинг. Для оптимизации заказа радиолокационных изображений целесообразно сочетать его с математическим моделированием дрейфа айсбергов. Такой подход позволит обеспечить оценку айсберговых угроз в различных районах морей Западной Арктики.

**ТЕХНОЛОГИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АЙСБЕРГОВ
НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ**

Обнаружение айсбергов с помощью спутниковых радиолокаторов основано на том, что обратный РЛ-сигнал от айсберга, как правило, выше, чем интенсивность обратного рассеивания от водной поверхности и ледяного покрова.

Принципиальная возможность обнаружения айсбергов на спутниковых радарных изображениях была показана в 1990-е гг. на примере снимков радиолокатора спутника «Алмаз-1», на которых уверенно обнаруживались айсберги среди припая и сплошных дрейфующих льдов (Александров и др., 1996). Позднее для мониторинга айсбергов были успешно использованы европейские и канадские радиолокационные спутники. Было установлено, что обратный РЛ-сигнал дрейфующего льда существенно изменяется в зависимости от возраста, формы, состояния поверхности и других параметров ледяного покрова. Причем вероятность обнаружения айсбергов с помощью спутниковых средств наблюдения зависит от соотношения размера айсберга и пространственного разрешения аппаратуры, формы и степени разрушенности айсберга, угла визирования, состояния моря. При оптимальных условиях наблюдения спутниковые радиолокаторы позволяют обнаруживать айсберги, размер которых приближается к пространственному разрешению аппаратуры, с вероятностью 90 % (Power et al., 2001). Все же, несмотря на явные преимущества, достаточного распространения на обширных арктических акваториях методы детального спутникового радиолокационного мониторинга айсбергов в 1990-е гг. не нашли. Их широкому использованию препятствовала высокая стоимость снимков.

Совершенствование методов обнаружения айсбергов проводится посредством привлечения архивных данных наблюдений за айсбергами в конкретных районах — учитываются размеры айсбергов, географическое положение, направление дрейфа, период наблюдения. Также используются данные модельных расчетов дрейфа айсбергов для подтверждения факта их обнаружения (Спутниковые методы, 2011).

Выделяют три возможные ситуации наблюдения айсбергов: 1) айсберги на открытой воде, 2) айсберги в дрейфующем льду, 3) айсберги в припае. Для каждой из этих ситуаций необходимы разные методические подходы, позволяющие вести спутниковый мониторинг айсбергов. Наиболее сложной является задача обнаружения айсбергов среди дрейфующего льда.

На радарных снимках айсберги видны на фоне океана как яркие мишени, обычно точечные. При увеличении пространственного разрешения снимков возрастает как точность определения размеров объектов, так и возможность отличия айсбергов от судов, также дающих яркий сигнал. Условия сильного ветра и сильного волнения на поверхности моря ограничивают обнаружение айсбергов, так как при этом увеличивается шумовой сигнал от моря. Однако айсберги, размер которых более чем в два раза превышает размер пикселя, могут быть обнаружены даже на взволнованной водной поверхности.

В технологии обнаружения айсбергов, используемой в настоящее время в ААНИИ, основным информационным источником являются данные спутниковых радиолокаторов высокого разрешения. В связи с отсутствием на орбите доступных широкому пользователю российских радиолокаторов высокого разрешения для разработки технологии мониторинга арктических айсбергов использовалась информация зарубежных радиолокационных спутников — канадского RADARSAT-2, немецких TerraSAR-X и Tandem-X, итальянских спутников COSMO-SkyMed-1-4.

Для мониторинга ледяного покрова и айсбергов вблизи объектов инженерной инфраструктуры на шельфе арктических морей спутниковые данные анализируются совместно с другими доступными источниками информации.

Технологии, применяемые в ААНИИ для обнаружения айсбергов, основаны на оптимальном сочетании спутниковых средств наблюдений, включающих как радиолокационные данные с пространственным разрешением от 3 до 25 м, так и данные оптического спектрального диапазона высокого пространственного разрешения (метры). Такой подход обеспечивает синергетический эффект усвоения данных об объектах мониторинга, полученных с различных дистанционных носителей в разных спектральных диапазонах. Снимок с ИСЗ в видимом диапазоне с высоким разрешением позволяет достоверно идентифицировать айсберг, определить его форму (используя особенности тени или применяя режим стереосъемки), отличить его от торосов, заструг и пр. Снимок в видимом диапазоне может дать больше информации об айсберге по сравнению с радиолокационным; но это преимущество оптической съемки может быть реализовано только в светлый период года и при благоприятной облачной ситуации.

Допустимое рассогласование во времени между анализируемыми снимками с разных космических носителей зависит от задач, решаемых при мониторинге ледяных объектов. Так, при обнаружении айсбергов в припае хорошие результаты обеспечивает комплексирование радиолокационных данных информацией видимого диапазона, полученной со спутников в течение предшествующей недели. Возможность

Процесс нахождения айсбергов начинается с процедур сегментации изображения, основанных на поиске связанных пикселей. На первом этапе тематической обработки изображение разделяется на гомогенные области. Для этого применяется оператор выделения границ σ/μ . Далее в поле полученных значений «сигма-мю» выделяются гомогенные зоны, границей между отдельными гомогенными зонами считается положение пикселей с максимальными значениями σ/μ (зона максимальной гетерогенности). Соседние гетерогенные пиксели считаются таковыми, если значение σ/μ в них превышает пороговое значение T . Пороговое значение определяется по гистограмме значений оператора σ/μ на данном снимке — как локальный максимум в правой краевой части. После установления величины порога σ/μ выполняется второй этап поиска айсбергов на снимках. Для этого применяется метод поиска связанных пикселей при обработке матрицы σ/μ скользящим окном 3×3 элемента. В заключение проводится маркировка выделенных гомогенных областей с выделением фоновых объектов (открытое море, острова, ледяной покров) и объектов мониторинга (айсберги, суда, инженерные сооружения и др.).

Полученные сегменты изображения анализируются с целью идентификации айсбергов. Как потенциальные айсберги рассматриваются пиксели, в которых сигнал выше порогового значения, устанавливаемого как 99 % перцентиль распределения радарного сигнала в данном полигоне. Производится выбраковка случаев ложного обнаружения айсбергов, когда за айсберг может быть принято, например, судно. Главными критериями различия являются разная яркость объектов, разная геометрическая форма и разная скорость перемещения объекта. На радарных снимках высокого разрешения суда легко опознаются благодаря их четким геометрическим контурам и наличию характерной регулярной засветки, обусловленной особенностями сложения когерентных сигналов, используемых в радиолокаторах с синтезированной апертурой. Обработанные данные о пространственном положении и размерах айсбергов экспортируются в формат, усваиваемый программой ArcGIS. Конечному пользователю передаются шейп-файлы с координатами и размерами объектов, а также квик-луки изображений в формате geotif объемом до 5 Мб с нанесенными объектами (рис. 3).



Рис. 3. Пример оперативной информационной продукции об айсбергах Карского моря, подготовленной специалистами ААНИИ для передачи конечному пользователю. Снимок со спутника Landsat-8, 27 августа 2014 г.

Анализ спутниковых наблюдений за последние годы позволяет сделать выводы о тенденциях в развитии айсберговой опасности в конкретных районах Арктики в определенный сезон года. Например, ежегодно на акватории Карского моря по спутниковым данным обнаруживается несколько тысяч айсбергов, при этом происходит некоторое увеличение числа айсбергов у восточного побережья Новой Земли. Основная масса айсбергов концентрируется вблизи выводных ледников, причем наибольшее число айсбергов генерировали ледники Кропоткина и Мощный. Наименьшая плотность айсбергов была близ ледника Средний, где наблюдались лишь единичные обломки айсбергов.

По последовательным спутниковым снимкам в ряде случаев можно оценить скорость дрейфа отдельных айсбергов. При этом, как правило, временной интервал между снимками не должен превышать одни сутки, а отслеживаемый айсберг должен иметь характерную, опознаваемую форму либо находиться в группе совместно перемещающихся айсбергов, образующих характерный рисунок.

Природа обнаруживаемых на спутниковых снимках с одиночной поляризацией мелких яркостных аномалий не всегда может быть трактована однозначно. Эти аномалии могли быть обусловлены айсбергами, но могли иметь и другое происхождение, связанное, например, с проявлением поверхностных течений, атмосферными эффектами, наличием техногенных объектов на водной поверхности. По снимку в одной поляризации, без привлечения дополнительной информации (данные съемки в других диапазонах и иной поляризации) однозначное заключение о природе яркостных аномалий в ряде случаев дать сложно. Поэтому дальнейшее развитие технологий мониторинга айсбергов по спутниковым РЛ-снимкам должно ориентироваться на использование разных поляризаций. Причем надежды на широкое использование в оперативной практике технологий автоматизированного обнаружения айсбергов по РЛ-снимкам с различной поляризацией связаны, в том числе, с реализацией планов вывода на орбиты перспективных радиолокационных спутников с режимом компактной поляриметрической моды. Этот режим, сочетающий широкий пространственный обзор с хорошими классификационными возможностями поляриметрических данных, позволит увеличить эффективность обнаружения айсбергов при одновременном снижении затрат на приобретение поляриметрической информации.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДРЕЙФА АЙСБЕРГОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ОКЕАН-ЛЕД AARI-IOSM И РЕГИОНАЛЬНОЙ АТМОСФЕРНОЙ МОДЕЛИ WRF

Уравнение баланса сил, действующих на айсберг, дрейфующий в поверхностном слое воды, можно записать в виде:

$$m \frac{d\vec{W}_i}{dt} = \vec{F}_a + \vec{F}_w + \vec{F}_{if} + \vec{F}_p + \vec{F}_c,$$

где \vec{W}_i — скорость дрейфа айсберга, m — его масса, \vec{F}_a — сила воздействия ветра, \vec{F}_w — сила воздействия течения, \vec{F}_{if} — сила воздействия дрейфующего льда, \vec{F}_p — сила градиента давления, \vec{F}_c — сила Кориолиса, t — время.

Сформулированная задача после представления сил в правой части уравнения известными аналитическими выражениями и эмпирическими параметризациями позволяет численными методами определить скорость, а в дальнейшем и траекторию дрейфа айсберга при известных форсингах. Однако если существует несколько до-

ступных путей получения скорости ветра, то такие параметры, как скорость течения, скорость дрейфа льда и денивеляция поверхности уровня моря, можно получить только путем их расчета в модели совместной циркуляции вод и льдов. С этой целью будем использовать модель *AARI-IOCM* (Кулаков и др., 2012). Эта модель лежит в основе «Метода и технологии расчета и краткосрочного прогноза уровня моря и течений в Северном Ледовитом океане и его морях на основе трехмерной гидродинамической модели совместной циркуляции вод и льдов», получивших в 2012 г. рекомендацию Центральной методической комиссии Росгидромета для использования в оперативной работе ААНИИ. В настоящий момент модель адаптирована к акватории Северного Ледовитого океана (СЛО) и прилегающей акватории Атлантического океана и имеет пространственное разрешение 13,8 км. В качестве внешнего форсинга обычно используются данные об атмосферном давлении на уровне моря и температуре воздуха на высоте 2 м из архива *NCEP/NCAR* для диагностических расчетов или прогностические данные Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), представленные на сетке $2,5 \times 2,5^\circ$.

Модель была верифицирована по данным радиомаяков ARGOS, установленных на айсберги в Карском море. В качестве примера на рис. 4 показаны фактические траектории по данным четырех радиомаяков и модельные траектории. Результаты расчетов показали, что модель удовлетворительно воспроизводит дрейф айсбергов, однако для улучшения качества прогнозирования необходимо улучшать пространственное разрешение как модели океана, так и полей метеорологической информации.

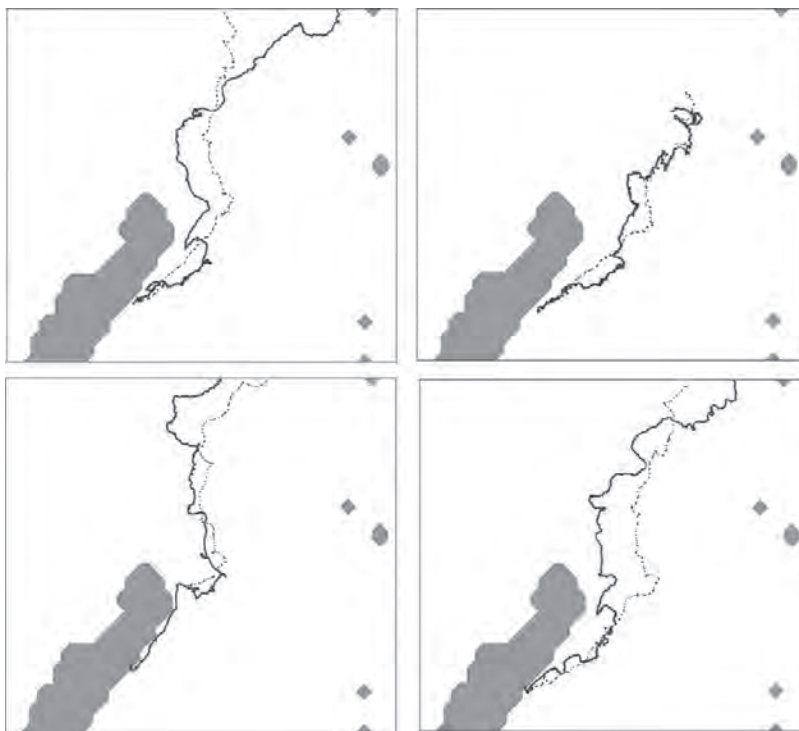


Рис. 4. Сопоставление наблюдаемых (сплошная линия) по данным четырех радиомаяков и рассчитанных по модели (пунктирная линия) траекторий айсбергов.

Для уменьшения пространственного шага модели *AARI-IOCM* использовалась процедура телескопирования, при которой на всей акватории СЛО используется обычный большой шаг (в нашем случае 13,8 км), а на акватории, для которой проводится прогнозирование, в несколько раз меньше. Эта процедура уже реализована для акватории Карского моря, на которой шаг модели в 3 раза меньше.

Для лучшего учета ветрового воздействия целесообразно использовать региональные модели атмосферы, учитывающие локальную топографию и подстилающую поверхность. Исследования по созданию региональных атмосферных моделей для Арктики ведутся в России и США. Наиболее развитой технологически является модель Polar WRF (Bromwich et al., 2009), поэтому для воспроизведения атмосферного форсинга она включена в модельный комплекс расчета айсбергов. В настоящий момент модель Polar WRF адаптирована для района, покрывающего юго-западную часть Карского моря и юго-восточную часть Баренцева моря с горизонтальным разрешением 4 км. Основными отличительными особенностями полярной от стандартной версии WRF являются:

- оптимальное описание энеרגообмена с использованием модели Noah LSN (Chen, Dudhia, 2001) над поверхностями, покрытыми морским и другими видами льда;
- возможность количественного описания ледяного покрова (сплоченность, толщина льда и снега на льду) в ходе численных расчетов.

Общая схема разработанной в ААНИИ технологии прогнозирования дрейфа айсбергов приведена на рис. 5.

В технологии можно выделить ряд крупных технологических блоков, или составляющих.

Подготовка исходных данных. В этот блок включены процедуры поступления и преобразования входных данных к форматам, позволяющим обеспечить ввод этой информации в модель. К этим данным относятся:

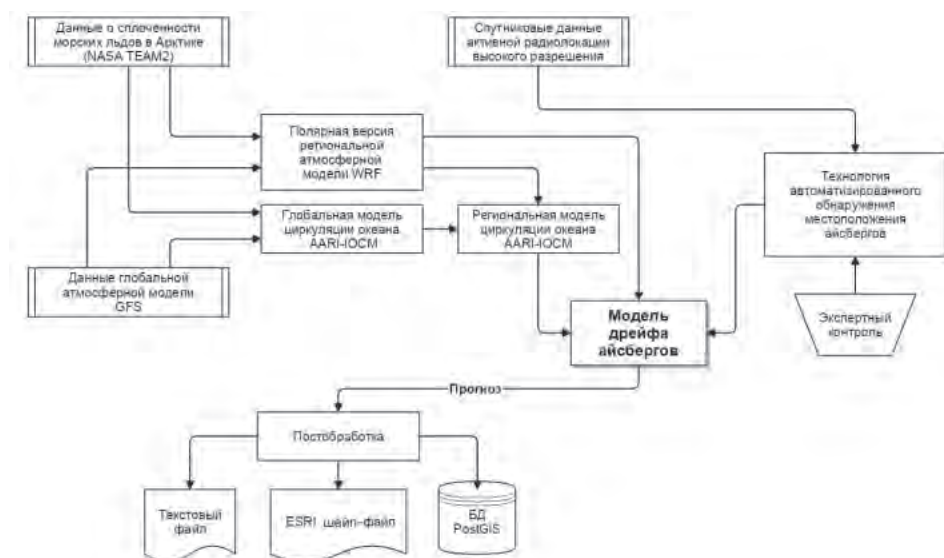


Рис. 5. Схема технологии прогноза дрейфа айсбергов.

– данные глобальной атмосферной модели GFS, с горизонтальным разрешением сетки $0,5 \times 0,5^\circ$. Данные скачиваются ежедневно с официального сайта NOAA: http://nomads.ncdc.noaa.gov/data.php#hires_weather_datasets;

– гридированные данные о сплоченности морских льдов по данным пассивного микроволнового зондирования, с использованием прибора SSMI, на основе алгоритма NASA TEAM (NT2) с сайта: ftp://sidacs.colorado.edu/pub/DATASETS/nsidc0081_nrt_nasateam_seaice/north/.

Расчеты на глобальной модели AARI-IOCM. Производится расчет всех элементов ледово-гидрологического состояния СЛО на период используемого метеорологического прогноза GFS. С временной дискретностью 1 ч выводятся значения полных потоков на границах сеточной области региональной модели AARI-IOCM.

Расчеты на региональной модели WRF. Инициализация Polar WRF происходит раз в сутки в 00 часов по Гринвичу, на основе данных глобальной модели GFS. В качестве данных о подстилающей поверхности используются результаты восстановления сплоченности морского льда на основе данных обработки пассивного микроволнового зондирования. В процессе расчетов выводятся значения атмосферного давления, приведенного к уровню моря, компонент скорости ветра и температуры воздуха на высоте 2 м с временной дискретностью 1 ч. Эти результаты будут использованы для расчетов по региональной модели AARI-IOCM.

Расчет на региональной модели AARI-IOCM. Производится расчет всех элементов ледово-гидрологического состояния на период используемого метеорологического прогноза. С временной дискретностью 6 ч выводятся значения составляющих скорости течения на 8 горизонтах (2,5; 7,5; 15; 25; 40; 62,5; 87,5 и 112,5 м), уровень моря, составляющие скорости ветра, толщина и сплоченность льда, а также составляющие скорости его дрейфа. Все выведенные результаты хранятся в файлах, с названиями, содержащими название параметра и время, которому они соответствуют.

Инициация модели дрейфа айсбергов. На этом этапе формируется файл, содержащий информацию по айсбергам, для которых будут проводиться расчеты. В этом файле содержится информация о количестве айсбергов, их номера, время фиксации координат, координаты, длина, ширина, высота, осадка и масса каждого айсберга, указываются пути к директориям с входной информацией и местам хранения результатов расчетов.

Расчет на модели дрейфа айсбергов. Модель дрейфа айсбергов реализована в лагранжевой постановке, поэтому значения всех необходимых для расчета форсингов ледово-гидрологических параметров интерполируются в точку с координатами айсберга. После расчета величин всех сил, действующих на айсберг, численно решается дифференциальная задача об определении скорости дрейфа айсберга и определяются новые координаты айсберга. После этого вся процедура повторяется и так до достижения времени окончания прогноза. В результате расчетов по модели для каждого айсберга, участвовавшего в расчетах, формируется и записывается в выходной директорий файл, содержащий последовательность координат положений айсберга на каждые 6 часов (временной интервал может быть изменен в любую сторону) на весь период прогноза.

Постобработка результатов расчетов. С помощью скриптов постобработки на языке Python формируются линейные шейп-файлы, которые являются конечным продуктом технологической цепочки. Эти файлы позволяют потребителям инфор-

мации оперативно просматривать результаты расчетов, а также контролировать качество расчетов. Кроме того, ведется параллельная запись в геопространственную базу данных PostGIS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Айсберги дрейфуют практически по всей акватории Баренцева и Карского морей в соответствии с генеральной схемой циркуляции поверхностных вод. Плотность распределения айсбергов по акватории арктических морей имеет выраженную сезонную зависимость. Зимой айсберги встречаются относительно недалеко от источника их образования, а летом распространяются на акватории моря свободной ото льда.

Анализ исторических данных и специализированные исследования айсбергов, выполненные в последние годы, показали, что возможны аномальные случаи вторжений айсбергов на акватории, где обычно они не наблюдаются. Это относится к южной части акваторий Баренцева и Карского морей, где в ближайшие годы планируется активное строительство нефтегазовых комплексов.

В ААНИИ разработана технология обнаружения айсбергов на основе данных спутниковых радиолокаторов высокого разрешения, в комплексе с информацией оптического диапазона.

Самым важным звеном в создании надежной, независимой от внешних факторов системы информационного оповещения пользователей о наличии айсберговой угрозы в морях Западной Арктики должен стать вывод на орбиту российского радиолокационного спутника высокого пространственного разрешения.

В ААНИИ разработана технология прогнозирования дрейфа айсбергов с использованием модели океан–лед *AARI–IOCM* и региональной атмосферной модели *Polar WRF*. Технология позволяет в автоматическом режиме выполнять прогноз перемещения айсбергов на срок до 5 суток и представлять результаты в виде шейп-файлов.

Таким образом, разработанные технологии могут стать важными блоками при создании автоматизированной системы управления ледовой обстановки в арктических морях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России при выполнении прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИЭР) по теме «Создание новых методов и средств мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки на архипелаге Шпицберген и в Западной Арктической зоне Российской Федерации» (Соглашение о предоставлении субсидии от 20.10.2014 № 14.610.21.0006, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI61014X0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александров В.Ю., Лоцилов В.С., Проворкин А.В. Исследование айсбергов и морских льдов в Антарктике по данным РСА спутника «Алмаз-1» // Айсберги Мирового океана / Под ред. И.К. Попова, В.А. Воеводина. СПб.: Гидрометеониздат, 1996. С. 30–36.

Атлас Арктики. М.: Изд. ГУГК, 1985. 204 с.

Визе В.Ю. Айсберги у северных берегов Европы в 1929 г. // Известия Государственного гидрологического института. 1930. № 29. С. 77–84.

Кулаков М.Ю., Махитас А.П., Шутилин С.В. *AARI–IOCM* — совместная модель циркуляции вод и льдов Северного Ледовитого океана // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 2 (92). С. 6–18.

Ледяные образования морей западной Арктики / Под ред. Г.К. Зубакина. СПб.: ААНИИ, 2006. 272 с.

Наумов А.К., Зубакин Г.К., Гудошников Ю.П., Бузин И.В., Скутин А.А. Льды и айсберги в районе Штокмановского газоконденсатного месторождения // Труды РАО-03. Санкт-Петербург, 16–19 сентября 2003 г. СПб., 2003. С. 337–342.

Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике / Под ред. Е.У. Миронова. СПб.: ААНИИ, 2010. 320 с.

Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей / Под ред. В.Г. Смирнова. СПб.: ААНИИ, 2011. 239 с.

Abramov V. Atlas of Arctic icebergs. Backbone Publishing Company, 1996. 70 p.

Bromwich D.H., Hines K.M., Bai L.-S. Developments and Testing of Polar Weather Research and Forecasting model: 2. Arctic Ocean // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114. D08122, doi:10.1029/2008JD010300.

Chen F., Dudhia J. Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system, part I, Model implementation and sensitivity // Mon. Weather Rev. 2001. Vol. 129. P. 569–585.

Power D., Youden J., Lane K., Randell C., Flett D. Iceberg Detection Capabilities of RADARSAT Synthetic Aperture Radar // Canadian Journal of Remote Sensing. 2001. Vol. 27. № 5. P. 476–486.

YE.U. MIRONOV, V.G. SMIRNOV, I.A. BYCHKOVA, M.YU. KULAKOV, D.M. DEMCHEV

MODERN TECHNOLOGIES FOR ICEBERG DETECTION AND THEIR DRIFT FORECASTING IN THE WESTERN ARCTIC

New technologies for iceberg detection with the use of SAR high spatial resolution satellite imagery and iceberg drift forecasting based on couple ice-ocean model AARI-IOCM and regional atmosphere model WRF, adopted to the Barents and Kara seas conditions are considered.

Keywords: icebergs, radars, satellite imagery, dynamic-thermodynamic model, Barents Sea, Kara Sea.