

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗА ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ

*Е.У. МИРОНОВ, В.Г. СМИРНОВ, И.А. БЫЧКОВА, С.В. КЛЯЧКИН,  
Л.Н. ДЫМЕНТ, Н.Ю. ЗАХВАТКИНА, Р.И. МАЙ, Р.Б. ГУЗЕНКО,  
Е.Б. САПЕРШТЕЙН, С.В. МИХАЛЬЦЕВА, Е.В. ПЛАТОНОВА, Л.А. СТАРЦЕВ*

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

Рассматриваются новые методы автоматизированного определения параметров ледяного покрова по спутниковым данным и модернизированный метод краткосрочного прогноза ледовой обстановки на основе численной модели «океан–лед». Дана характеристика разработанных новых программных средств. Приводится описание созданного экспериментального аппаратно-программного комплекса спутникового мониторинга и прогноза ледовой обстановки, состоящего из пяти подсистем.

*Ключевые слова:* ледовая обстановка, спутниковые изображения, методы классификации, динамико-термодинамическая модель, моря Западной Арктики, аппаратно-программный комплекс.

### ВВЕДЕНИЕ

Ледяной покров является одним из наиболее значимых факторов окружающей среды, затрудняющих активную хозяйственную деятельность в арктических морях. Так, ледяной покров препятствует плаванию судов без ледовых усилений, рыболовству, геологоразведке, строительству гидротехнических сооружений и т.д. Особая актуальность проблем совершенствования методов мониторинга и прогнозирования ледовой обстановки в арктических морях вызвана активизацией судоходства на Северном морском пути и интенсивным освоением нефтегазовых месторождений на континентальном шельфе (Grigoryev, 2017).

Появившиеся в последние годы технические средства в сочетании с современными информационными технологиями позволяют создавать новые и совершенствовать существующие методы и программные средства мониторинга и прогнозирования ледовой обстановки (Миронов и др., 2010; Смирнов, Бычкова, 2015; Спутниковые методы, 2011; Клячкин и др., 2015).

В ААНИИ при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в 2014–2016 гг. были разработаны новые и усовершенствованы существующие методы мониторинга и прогнозирования состояния ледяного покрова, программная реализация которых позволила создать аппаратно-программный комплекс спутникового мониторинга и прогнозирования ледовой обстановки (ЭАПК «Лед»).

ЭАПК «Лед» предназначен для автоматизации процесса определения сплоченности и возраста морского льда по спутниковым снимкам и выполнения краткосрочного прогноза ледовой обстановки.

## **МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТНОЙ СПЛОЧЕННОСТИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПО СПУТНИКОВЫМ РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

Разделение морского льда по возрасту на радиолокационных (РЛ) изображениях основано на разнице в механизмах рассеяния электромагнитных волн СВЧ-диапазона различной поляризации, свойственных конкретным видам морского льда и открытой воде. Открытая водная поверхность при сильном ветровом волнении может иметь в микроволновом диапазоне такие же рассеивающие свойства, как серый, серо-белый или многолетний лед. Спокойная водная поверхность на радиолокационных изображениях отображается как зона низкого отраженного сигнала, то есть имеет темный тон, практически такой же, как в случае наблюдения однолетнего тонкого льда. Для взволнованной водной поверхности при использовании горизонтальной поляризации излучения характерны высокие значения сигнала на РЛ-изображении, сопоставимые по яркости со значениями, свойственными многолетним льдам. Такая неоднозначная зависимость однополяризационного сигнала от типа подстилающей поверхности затрудняет классификацию морского льда по возрасту. Избежать неоднозначности удастся путем использования РЛ-изображений с двумя поляризациями (НН и НV), благодаря возникающей значительной разнице в сигнале от воды и льда.

Нейронные сети (НС), применяемые в ЭАПК «Лед» для классификации морских льдов по возрасту, представляют собой алгоритмы распознавания образов, имитирующие процессы обработки информации человеческим мозгом. Для определения видов морских льдов по РЛ-изображениям создается многослойная НС, имеющая несколько скрытых слоев, задаются правила ее обучения. Настройка НС проводится по материалам специально подобранной (для данного региона, спутника, периода года) обучающей выборки и является наиболее сложным этапом классификации по методу НС. Обучение производится с использованием алгоритма обратного распространения ошибки и имеет целью минимизацию суммарной ошибки сети. Для анализа текстуры изображения в ЭАПК производится расчет следующих статистических характеристик поля удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР): энергия, энтропия, корреляция, инерция, однородность, выпуклость кластера и др. По тестовым изображениям опытные ледовые эксперты выбирают наиболее типичные участки льдов определенного вида; для каждого вида льда рассчитывается набор текстурных характеристик, определяются средние значения УЭПР. В итоге каждому вектору данных (набору характеристик, полученных для эталонного участка изображения) соответствует достоверно известный вид морского льда; обучающий массив состоит из вектора данных и номера класса льда, для которого такой расчет был произведен (Bogdanov et al., 2005; Zakhvatkina et al., 2013).

На входной слой НС подаются текстурные признаки анализируемого РЛ-изображения, число нейронов в первом слое соответствует числу используемых текстурных признаков и значений УЭПР. Пройдя через НС, входной вектор отображается в результирующий вектор на выходе НС. Число элементов выходного слоя равно числу классифицируемых видов морского льда.

НС обладают важным свойством классифицировать векторы данных, которые не использовались при тренировке сети. Эта способность НС к обобщению позволяет использовать их как универсальный классификатор спутниковых изображений морского ледяного покрова. На рис. 1 дан пример классификации спутникового РЛ-изображения морских льдов, выполненной по методу НС.

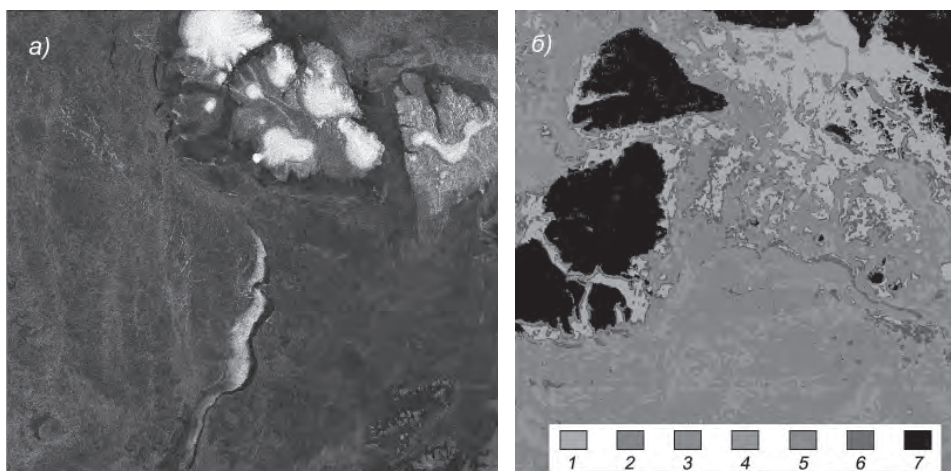


Рис. 1. Пример автоматизированной классификации РЛ-изображения ИСЗ RADARSAT-2 от 27.04.2015 г. с применением алгоритма НС: *а* — РЛ-изображение ИСЗ RADARSAT-2, НН-поляризация; *б* — классифицированное РЛ-изображение.

1 — припай; 2 — однолетний толстый лед; 3 — однолетний лед средний; 4 — однолетний лед тонкий; 5 — молодой лед; 6 — спокойная чистая вода/нилас; 7 — объекты суши.

#### МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ СПЛОЧЕННОСТИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА

Для оценки общей сплоченности ледяного покрова в ЭАПК «Лед» применяется автоматизированная сегментация оптического изображения морских льдов на зоны различной сплоченности ледяного покрова. Сегментация производится в два этапа. На первом этапе реализуется пороговая классификация, при которой каждый пиксел морской поверхности ассоциируется либо с ярким объектом (морской лед), либо с темным фоном (вода).

Территория суши исключается из рассмотрения с помощью наложения маски в виде шейп-файла береговой линии, хранящегося в базе данных. Аналогично исключаются из анализа участки, занятые облачностью и туманом. Для подготовки шейп-файла облачности оператором ЭАПК используется информация нескольких оптических спектральных каналов.

Пороговая классификация изображения морских льдов выполняется по методу японского ученого Н. Оцу (Otsu, 1979), основанному на расчете гистограммы двумерного поля яркости для расчета порога  $t$ . Метод применим для 8-битного изображения, гистограмма которого имеет бимодальный характер. Нахождение порога, разделяющего классы, по методу Оцу сводится к минимизации внутриклассовой дисперсии, представляющей собой взвешенную сумму дисперсий двух классов:

$$\sigma_{\omega}^2(t) = \omega_1(t)\sigma_1^2(t) + \omega_2(t)\sigma_2^2(t),$$

где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  — вероятности первого и второго классов соответственно, а  $\sigma_1^2$  и  $\sigma_2^2$  — дисперсии этих классов.

Оцу показал, что минимизация внутриклассовой дисперсии эквивалентна максимизации межклассовой дисперсии, которая равна:

$$\sigma_b^2(t) = \omega_1(t)\omega_2(t) [\mu_1(t) - \mu_2(t)]^2,$$

где  $\mu_1$  и  $\mu_2$  — средние арифметические значения этих двух классов. Значения  $\mu_i$  могут обновляться итеративно при изменении порога.

На втором этапе обработки изображения морских льдов выполняется расчет сплоченности льдов по квадратам регулярной сетки. Шаг сетки может меняться в зависимости от района и расчетной сетки прогностической ледовой модели. По спутниковым данным проводится оценка сплоченности ( $N$ ) морских льдов в баллах для каждого элемента сетки, площадью  $a^2$ :  $N = (\sum A_i)/n \times 10$ , где  $A_i$  — значение яркости в пикселе на бинарном снимке ( $A_i = 0$  для воды и  $A_i = 1$  для льда),  $n$  — количество информативных пикселей в квадрате сетки (т.е. без пикселей суши и облачности).

На рис. 2 представлен пример использования метода Отсу для автоматизированного выделения морского льда на спутниковом снимке оптического диапазона.

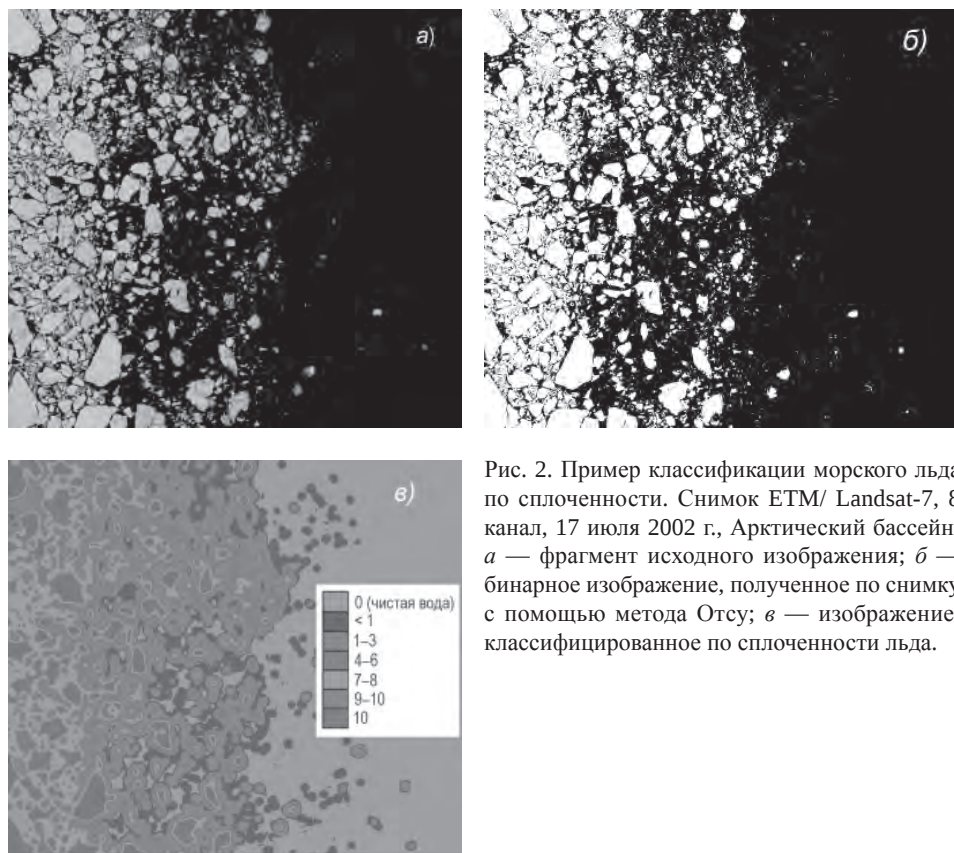


Рис. 2. Пример классификации морского льда по сплоченности. Снимок ETM/ Landsat-7, 8 канал, 17 июля 2002 г., Арктический бассейн: а — фрагмент исходного изображения; б — бинарное изображение, полученное по снимку с помощью метода Отсу; в — изображение, классифицированное по сплоченности льда.

## МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА И ЕГО ДРЕЙФА

Метод прогнозирования распределения и дрейфа ледяного покрова в арктических и замерзающих неарктических морях России был разработан в ААНИИ в начале 2000-х гг. За последние 10–15 лет этот метод достаточно широко использовался для

составления оперативных краткосрочных ледовых прогнозов, достоверность которых в целом оказалась вполне удовлетворительной (Клячкин и др., 2015).

Метод представляет собой численную реализацию системы уравнений динамики и термодинамики ледяного покрова и океана с соответствующими граничными условиями.

Прогноз изменения термохалинной структуры водной толщи основан на уравнениях баланса тепла и солей, проинтегрированных в пределах верхнего квазиоднородного слоя. В качестве граничных условий задаются потоки тепла и солей на поверхности моря и на нижней границе верхнего квазиоднородного слоя. Прогноз динамики моря строится на основе нестационарной модели океана, в которой используются уравнения неразрывности и движения в гидростатическом приближении с граничными условиями, традиционными для задач подобного рода. Прогноз термической эволюции ледяного покрова основывается на уравнении теплового баланса двухслойной среды «лед–снег» при условии равенства потоков тепла через слой льда и слой снега.

Динамика ледяного покрова прогнозируется на основе уравнения баланса количества движения в нестационарной постановке. Тангенциальные напряжения на верхней и нижней поверхности льда определяются с помощью квадратичного закона, силы внутреннего взаимодействия в ледяном покрове описываются с помощью вязко-пластической реологической модели. Ледяной покров имитируется с помощью метода маркеров — условных льдин, каждая из которых обладает своими «индивидуальными» признаками: координатами, скоростью, толщиной, разрушенностью, торосистостью и специальным признаком, позволяющим отличать дрейфующий лед от припая.

Опыт краткосрочного численного прогнозирования показал, что в целом модель позволяет получить вполне адекватное представление о ледовых условиях, ожидаемых в течение ближайших 1–5 суток. Оправдываемость прогнозов достаточно высока, эффективность — устойчиво положительна.

Вместе с тем модель, положенная в основу прогностического метода, несвободна от недостатков. В первую очередь это относится к океанскому блоку модели. Уравнения и соответствующие граничные условия, описывающие динамику океана, сформулированы в упрощенном виде, в результате чего проявляются определенные погрешности при расчетах течений, денивеляции уровня моря, термохалинной структуры и т.д. В некоторых случаях это приводит к ошибкам прогнозов, в особенности молодых льдов, которые наиболее «чутко» реагируют на изменения динамики и термохалинной структуры океана.

Таким образом, главным направлением модификации метода прогноза дрейфа и перераспределения ледяного покрова являлась радикальная перестройка океанского блока модели. Для выполнения этой задачи было решено использовать одну из последних версий океанской модели Принстонского университета (Princeton Ocean Model, POM) (Blumberg, Mellor, 1987; Mellor, 2003). В ААНИИ имеется достаточный опыт использования этой модели для исследования различных океанографических явлений в арктических морях (Май, 2007; Май, 2008; Некрасов, Май, 2009; Ионов и др., 2015).

Система уравнений движения и неразрывности в модели POM реализована в так называемых  $\sigma$ -координатах, где вертикальная дискретизация выполнена не для горизонтов с фиксированной толщиной, а для заданного количества слоев (рис. 3). Модель позволяет рассчитывать как баротропную, так и бароклинную моду динамики

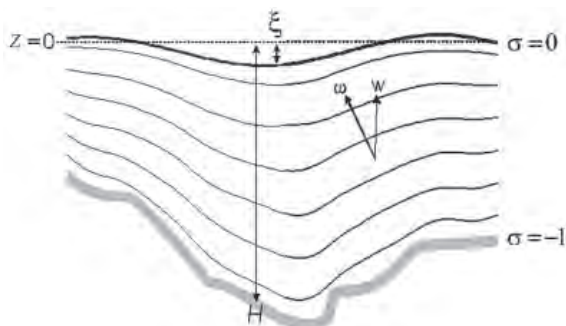


Рис. 3. Система  $\sigma$ -координат.

$H$  — глубина моря,  $\xi$  — отклонение уровневой поверхности,  $w$  — вертикальная составляющая скорости течений в  $Z$ -координатах,  $\omega$  — вертикальная составляющая скорости течения в  $\sigma$ -координатах.

океана, при этом коэффициенты турбулентного обмена рассчитываются с помощью уравнений баланса турбулентной энергии.

Вторая относительно устойчивая погрешность прогностической модели, ухудшающая результаты прогнозов, проявлялась в случайных флуктуациях сплоченности льда, не обусловленных ни динамикой (дивергенция/конвергенция), ни термикой (замерзание/таяние). Природа этих «неоправданных» флуктуаций связана с тем, что первоначальное положение маркеров в ячейке, имитирующих ледяной покров, определяется с помощью генератора случайных чисел. В результате даже при нулевой дивергенции движущиеся маркеры иногда могут случайным образом перейти или не перейти в соседнюю ячейку, в результате чего сплоченность льда может измениться.

Понятно, что этот эффект более вероятен, когда количество маркеров в ячейке незначительно. Поэтому была предпринята попытка купировать такие случайные колебания сплоченности за счет увеличения максимально возможного количества маркеров в ячейке с 20 до 40, т.е. 40 маркеров в ячейке соответствуют 10 баллам сплоченности, 36 маркеров — 9 баллам и т.д.

Наконец, третьим ключевым направлением модификации прогностического метода являлась его адаптация к региону Западной Арктики и району архипелага Шпицберген. Эта, по существу, чисто технологическая задача сводилась к разработке регулярной сетки, аппроксимирующей данный регион, построению матриц глубин и берегов, матрицы значений толщины льда в момент сезонного максимума, а также некоторых вспомогательных матриц, необходимых для визуализации расчетных полей.

### БАЗА ДАННЫХ ПО РАЗРЫВАМ В ЛЕДЯНОМ ПОКРОВЕ

Важной характеристикой ледяного покрова в зимний период являются нарушения сплошности ледяного покрова (НСЛ), которые включают в себя трещины, каналы, разводья, а также узкие протяженные зоны с повышенной раздробленностью льда. НСЛ принято называть разрывами в ледяном покрове, т.к. они образуются в холодный период года под воздействием динамических факторов, связанных с пространственной неравномерностью скорости дрейфа льда (Горбунов и др., 1986).

База данных (БД) крупных разрывов в ледяном покрове Западной Арктики, входящая в состав ЭАПК «Лед», была создана на основе информации о НСЛ, полученной со снимков ИСЗ NOAA малого разрешения. Минимальная ширина каналов, дешифрируемых на таких снимках, составляет 500 м (Бушуев, 1991). Для заполнения БД исходной информацией о

разрывах было обработано 3240 снимков. Период наблюдений охватывает с некоторыми промежутками временной интервал с 1979 по 2015 г. включительно.

При разработке БД требовалось выбрать структуру записи в ней таким образом, чтобы сделать последующие расчеты характеристик разрывов независимыми от ориентации в пространстве выбранной системы координат и размера исследуемой акватории, а также от шага осреднения. Поэтому в качестве объекта, описываемого одной строкой в БД, была принята точка, ограничивающая один из концов относительно прямолинейного отрезка разрыва, т.е. ее географические координаты (широта и долгота). Сочетание даты наблюдения, номера разрыва на снимке и порядкового номера точки, принадлежащей этому разрыву, делало каждый объект в БД уникальным. Такая организация структуры записи позволяет рассчитывать направление разрывов относительно любого заданного меридиана и определять протяженность разрывов в любой заданной области, не привязываясь к какой-либо конкретной сетке.

Для расчета по «Базе данных крупных разрывов в Западной Арктике» обобщенных характеристик разрывов было разработано специальное программное обеспечение. Созданный интерфейс позволяет пользователю выбирать из предложенного списка характеристику разрывов и форму представления результатов ее расчета. Характеристики разрывов, вычисление которых включено в состав программного обеспечения, можно разделить на три группы: характеристики ориентации разрывов (первая и вторая по значимости модальная ориентация, обеспеченность обоих модальных интервалов и результирующее направление разрывов), характеристики плотности разрывов (удельная длина и расстояние между разрывами) и их протяженность. Все эти характеристики учитываются при планировании морских операций и используются для анализа пространственной и временной изменчивости разрывов. Алгоритмы определения большинства из них приводятся в работах (Дымент, 2000; Горбунов и др., 2014).

Пространственное осреднение всех характеристик ориентации и удельной длины разрывов может производиться как по квадратам сетки 100×100 км или 200×200 км, так и по всей акватории Западной Арктики в целом. Распределение протяженности разрывов рассчитывается по всей акватории, а распределение среднего расстояния между разрывами — как по всей акватории, так и по выделенным районам. Временной период обобщения данных задается пользователем, однако он не может быть менее одного месяца.

В зависимости от выбранной характеристики разрывов форма представления результатов ее расчета может быть разной (рис. 4 цвет. вклейки). Характеристики ориентации отображаются как численными значениями их средней величины и диапазонов изменений, так и в виде ориентированных отрезков по квадратам сетки. При этом размер отрезков, ориентированных в направлении первой и второй моды, пропорционален обеспеченности соответствующего модального интервала. Программное обеспечение предусматривает возможность построения круговой диаграммы распределения ориентации разрывов и гистограммы распределения обеспеченности модального интервала по всей акватории. Для последней характеристики и для удельной длины формируются все необходимые файлы для построения полей их распределения при помощи пакета Surfer, входящего в ЭАПК «Лед».

#### **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ**

Разработка программных средств, предназначенных для автоматизированного определения характеристик ледяного покрова в Западной Арктике по спутниковым

данным оптического спектрального диапазона и спутниковым радиолокационным изображениям высокого разрешения, заключалась в программной реализации алгоритмов определения возраста ледяного покрова и сплоченности морского льда. Особенностью работ было то, что разрабатываемые программные средства должны позволять проводить по спутниковым изображениям высокого разрешения автоматизированное определение характеристик ледяного покрова в оперативном режиме. Для спутниковых изображений высокого разрешения характерен большой объем; размеры спутниковых кадров составляют от сотен мегабайт до нескольких гигабайт. При этом время от загрузки спутникового снимка в ЭАПК и до получения выходной продукции в виде, готовом для отправки потребителям по спутниковым (или иным) каналам связи, не должно превышать 2 ч. Такие условия предъявляют высокие требования к быстродействию программы, к оптимальной организации работы программных блоков с большими информационными массивами.

Для численной реализации метода определения возраста льда разработана и опробована программа «Возраст льда». Программа усваивает данные спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой. В настоящее время могут использоваться РЛ-изображения с функционирующих ИСЗ RADARSAT-2, TerraSAR-X, Sentinel-1. Для определения общей сплоченности разработана и опробована программа «Сплоченность льда». Программа усваивает спутниковые данные оптического спектрального диапазона.

Модули расчета частной и общей сплоченности производят вычисления сплоченности льда по спутниковым изображениям и сохраняют результаты в текстовом файле. Автоматизированная оценка частной сплоченности ледяного покрова подразумевает отнесение каждого пиксела к определенному классу, представляющему различные категории морских льдов или относящемуся к открытой водной поверхности. Оценка общей сплоченности при этом выполняется посредством объединением всех классов льда в квадрате сетки с расчетом процентного соотношения «вода–лед».

Результирующий файл представляет собой последовательность текстовых строк, каждая из которых содержит номер ячейки по широте, номер ячейки по долготе, широту центра ячейки, долготу центра ячейки и сплоченность льда в баллах. Номера и координаты ячеек соответствуют номерам и координатам ячеек файла координатной (регулярной) сетки.

Модификация прогностической модели потребовала внесения существенных коррективов в программное обеспечение, причем эти изменения в основном затронули организацию взаимодействия между океанским и ледовым блоками модели. В новой версии программного обеспечения модели океанский блок выступает в роли головной программы, а все процедуры, связанные с расчетом состояния ледяного покрова, организованы в виде подпрограмм. Из океанского блока в ледовый передаются данные о состоянии поверхностного слоя моря (скорости течений, денивеляция уровня, температура, соленость, вертикальный поток тепла). Из ледового блока в океанский передаются данные по основным характеристикам ледяного покрова (скорость дрейфа, общая сплоченность), а также данные о вертикальных потоках солей, обусловленных стеканием рассола при увеличении толщины льда.

Кроме того, модификация океанского блока модели включала, помимо нюансов, связанных с ледяным покровом, разработку некоторых процедур, обеспечивающих подготовку начальных полей температуры и солености:

– извлечение  $T-S$  данных из глобального массива (Locarnini et al., 2013; Zweng et al., 2013) для выбранного региона и выбранного месяца;

- приведение  $T-S$  данных к сетке модели с помощью сплайн-интерполяции;
- приведение месячных данных (Locarnini et al., 2013; Zweng et al., 2013) к заданной дате с помощью линейной интерполяции;
- преобразование данных по вертикальной структуре океана из традиционных  $Z$ -координат в  $\sigma$ -координаты.

## СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗА ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ

Система мониторинга ледовой обстановки должна соответствовать определенным требованиям, касающимся оперативности, полноты, форм представления, устойчивости к разным помехам, независимости от субъективных факторов и т.д. Для обеспечения этих требований создан экспериментальный аппаратно-программный комплекс спутникового мониторинга и прогноза ледовой обстановки. Функциональная схема ЭАПК «Лед» приведена на рис. 5.

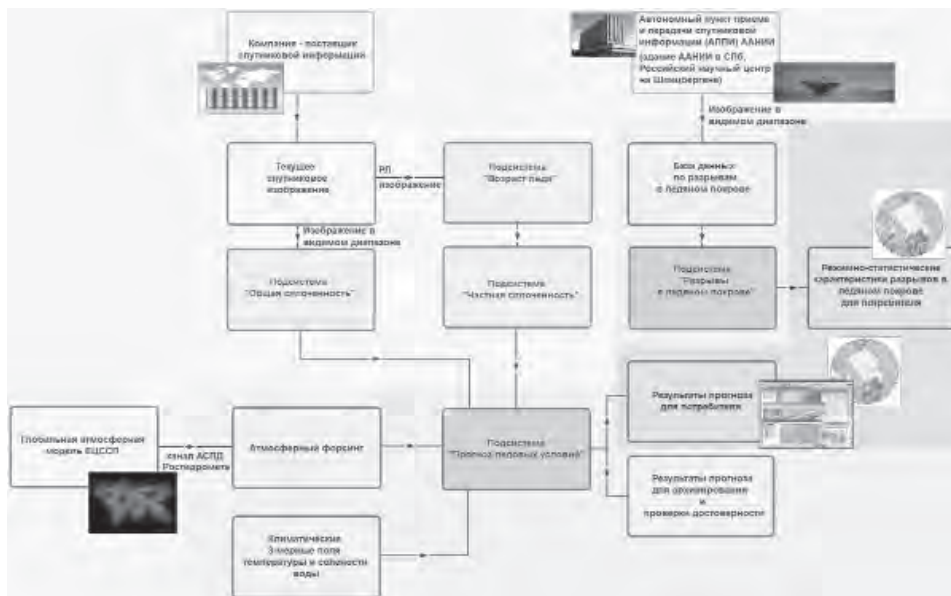


Рис. 5. Функциональная структура ЭАПК спутникового мониторинга и прогноза ледовой обстановки.

В состав ЭАПК «Лед» входят четыре рабочие станции и каналы связи трех типов для обмена информацией внутри комплекса и между ЭАПК и внешней средой:

- рабочая станция для создания и обучения нейронных сетей;
- рабочая станция для определения общей и частной сплоченности ледяного покрова;
- рабочая станция для прогноза дрейфа и распределения ледяного покрова;
- рабочая станция для расчета режимных характеристик разрывов в ледяном покрове;
- канал связи, использующий глобальную сеть интернет, осуществляющий обмен информацией между ЭАПК и внешней средой;
- канал связи, использующий ведомственную сеть Росгидромета, осуществляющий подачу информации определенного типа извне на вход ЭАПК;

– канал связи, использующий локальную сеть ААНИИ, осуществляющий обмен информацией как внутри ЭАПК, так и между ЭАПК и внешней средой.

Каждая рабочая станция представляет собой компьютер с соответствующими периферийными устройствами, оснащенный как стандартным программным обеспечением, так и специальным программным обеспечением, необходимым для решения специфических задач ЭАПК. База данных по разрывам в ледяном покрове, используемая для расчета их режимных характеристик, также установлена на жестком диске соответствующей рабочей станции.

Все пять подсистем ЭАПК «Лед» (рис. 5) работают в единой управляющей оболочке, состоящей из модуля управления, модуля обработки и хранения усвоенной информации, модуля визуализации и управления режимами отображения, модуля представления данных в ГИС. Программный модуль управления реализован на высокоуровневом языке C++ в среде разработки Embarcadero RAD Studio XE6 и предназначен для функционирования под операционной системой Windows. Информация обрабатывается компонентами программного обеспечения ЭАПК. Конечный продукт, подготовленный в ЭАПК «Лед», сохраняется в специальной директории, определенном в модуле управления обработкой и хранением усвоенной информации.

В программных средствах ЭАПК «Лед» предусмотрены:

- модульный принцип обработки информации;
- возможность подключения специальных библиотек, ускоряющих работу с массивом;
- оптимальное использование оперативной памяти;
- использование статистических алгоритмов обработки двумерных полей яркости, основанных на использовании анализа градиентных изменений, не требующих абсолютной калибровки сигнала;
- применение динамических массивов при построении программного кода, численное решение системы дифференциальных уравнений.

Программное обеспечение комплекса обладает следующими свойствами: функциональная достаточность (полнота); надежность (в т.ч. восстанавливаемость, наличие средств выявления ошибок); модифицируемость; модульность построения; удобство эксплуатации.

Программное обеспечение комплекса построено таким образом, чтобы отсутствие отдельных данных не сказывалось на выполнении функций комплекса, при реализации которых эти данные не используются. Также реализованы меры по защите от ошибок при вводе и обработке информации, обеспечивающие заданное качество выполнения функций комплекса. Обеспечена защита уже сгенерированной и загруженной части программного обеспечения от случайных изменений.

Для разработанного ЭАПК «Лед» подготовлен полный комплект эксплуатационной документации, включающий пакет Технической документации и пакет Программной документации. Кроме того, были проведены приемочные испытания комплекса на реальных массивах спутниковых и наземных наблюдений, полученных по морям Западной Арктики.

## **ВЫВОДЫ**

В ходе работы по созданию ЭАПК «Лед» разработана принципиально новая методика автоматизированного дешифрирования морского льда по спутниковым снимкам видимого спектрального диапазона с ИСЗ Landsat-8 и радиолокационным

изображениям различной поляризации со спутников RADARSAT-2, TerraSAR-X, Sentinel-1, основанная на статистических методах анализа двумерных полей, включая нейро-сетевые алгоритмы. Использование объективных методов анализа позволяет в автоматизированном режиме составлять электронные ледовые карты в согласованном формате с минимизацией фактора субъективного взгляда ледового эксперта.

Для подготовки с помощью ЭАПК «Лед» краткосрочного прогноза ледовой обстановки разработана оригинальная численная прогностическая модель «лед–океан», с научной и технологической точек зрения отвечающая современному мировому уровню. В модели реализованы подходы, положенные в основу океанской модели Принстонского университета и ледовой модели ААНИИ, что позволило совместить представление океана в терминах  $\sigma$ -координат и представление ледяного покрова как набора маркеров. Особенностью разработанной прогностической модели является способ задания начальных условий прогностического расчета ледяного покрова, основанный на оперативной информации, полученной в ЭАПК по спутниковым данным по оригинальной методике дешифрирования спутникового снимка.

Созданный экспериментальный аппаратно-программный комплекс позволяет в автоматизированном режиме осуществлять:

- определение общей и частной сплоченности морского льда по спутниковым снимкам видимого диапазона и радиолокационным снимкам высокого пространственного разрешения;
- определение возрастных характеристик льда по спутниковым радиолокационным снимкам высокого пространственного разрешения;
- краткосрочный прогноз ледовой обстановки (распределения и дрейфа льдов);
- расчет режимно-статистических оценок нарушений сплошности ледяного покрова (разрывов).

Использование ЭАПК «Лед» позволит минимизировать риски техногенных катастроф, связанных с разрушающим воздействием льдов на стационарные и мобильные технические объекты в районах разведки и добычи энергетических сырьевых ресурсов на шельфе в Западной Арктике, а также повысить безопасность навигации по Северному морскому пути и транзитным маршрутам.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бушуев А.В. Развитие и совершенствование системы и методов ледовых наблюдений // Проблемы Арктики и Антарктики. 1991. Вып. 66. С. 170–183.
- Горбунов Ю.А., Дымент Л.Н., Лосев С.М. Средние многолетние характеристики крупных нарушений сплошности льда в Карском море и в северо-восточной части Баренцева моря: Справочное пособие. СПб.: ААНИИ, 2014. 36 с.
- Горбунов Ю.А., Карелин И.Д., Лосев С.М. Природа нарушения сплошности морского ледяного покрова в зимнее время // Материалы гляциологических исследований. 1986. Вып. 55. С. 131–134.
- Дымент Л.Н. Применение кластерного анализа для выделения районов с однородными системами разрывов в ледяном покрове Арктического бассейна // Метеорология и гидрология. 2000. № 12. С. 52–59.
- Ионов В.В., Май Р.И., Смагин Р.Е. Численная гидродинамическая модель приливных явлений в губе Кереть (Кандалакшский залив, Белое море) // Известия РГО. 2015. Т. 147 (2). С. 22–37.
- Клячкин С.В., Гузенко Р.Б., Май Р.И. Численная модель эволюции ледяного покрова арктических морей для оперативного прогнозирования // Лед и снег. 2015. Т. 55. № 3. С. 83–96.

Май Р.И. Нелинейные приливные явления Белого моря // Комплексные исследования процессов, характеристик и ресурсов российских морей Северо-Европейского бассейна / Под ред. Г.Г. Матишова. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2007. С. 185–200.

Май Р.И. Линейные и нелинейные приливные явления в морях Европейской Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 3 (80). С. 115–125.

Мионов Е.В., Аших И.М., Дымов В.И., Кулаков М.Ю., Клячкин С.В. Модели и методы расчета и прогноза ледовых и океанографических условий в арктических морях // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 2 (85). С. 16–28.

Некрасов А.В., Май Р.И. О двумерном анализе структуры полусуточного прилива в некоторых районах Белого моря // Океанология. 2009. Т. 49 (6). С. 820–834.

Смирнов В.Г., Бычкова И.А. Спутниковый мониторинг ледяных образований при обеспечении безопасности работ на шельфе арктических морей // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 4. С. 79–87.

Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова / Под ред. В.Г. Смирнова. СПб.: ААНИИ, 2011. 240 с.

Blumberg, A.F., Mellor G.L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model // Three-Dimensional Coastal Ocean Models / Edited by N. Heaps. American Geophysical Union, Washington, D.C., 1987. Vol. 4. P. 208.

Bogdanov A.V., Sandven S., Johannessen O.M., Alexandrov V.Y., Bobylev, L.P. Multisensor approach to automated classification of sea ice image data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2005. Vol. 43. № 7. P. 1648–1664.

Grigoryev M. Russia's Arctic Projects: Shipping support, challenges and decisions // 13th Annual Arctic Shipping Forum, 25–27 April 2017, Helsinki. URL: [www.arcticshippingforum.com](http://www.arcticshippingforum.com) [дата обращения 10.05.2017].

Locarnini R.A., Mishonov A.V., Antonov J.I., Boyer T.P., Garcia H.E., Baranova O.K., Zweng M.M., Paver C.R., Reagan J.R., Johnson D.R., Hamilton M., Seidov D.. World Ocean Atlas 2013. Vol. 1: Temperature. NOAA Atlas NESDIS 73. 2013. 40 p.

Mellor G.L. A three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model. Users guide. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences Princeton University. Princeton, NJ 08544-0710. 2003. 53 p.

Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1979. Vol. 9. № 1. P. 62–66.

Zakhvatkina N.Y., Alexandrov V.Y., Johannessen O.M., Sandven S., Frolov I.Y. Classification of Sea Ice Types in ENVISAT Synthetic Aperture Radar Images // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2013. Vol. 51. № 5. P. 2587–2600.

Zweng M.M., Reagan J.R., Antonov J.I., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Boyer T.P., Garcia H.E., Baranova O.K., Johnson D.R., Seidov D., Biddle M.M. World Ocean Atlas 2013. Vol. 2: Salinity. NOAA Atlas NESDIS 74. 2013. 39 p.

E.U. MIRONOV, V.G. SMIRNOV, I.A. BYCHKOVA, S.V. KLJACHKIN, L.N. DYMENT,  
N.JU. ZAHVATKINA, R.I. MAJ, R.B. GUZENKO, E.B. SAPERSHTEJN, S.V. MIHAL'CEVA,  
E.V. PLATOVA, L.A. STARCEV

## EXPERIMENTAL HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX OF SATELLITE MONITORING AND FORECAST OF ICE CONDITIONS

New methods for automated determination of sea ice cover features based on satellite data and upgraded method of short-term forecast of ice conditions based on numerical model “ocean-ice” are considered. The characteristic of the developed new software tools is given. The description of the experimental hardware-software complex of satellite monitoring and forecasting of ice conditions, consisting of five subsystems is presented.

**Keywords:** ice conditions, satellite images, methods, dynamic-thermodynamic model, the Western Arctic Seas.

К статье Е.У. Миронова, В.Г. Смирнова, И.А. Бычковой, С.В. Клячкина,  
Л.Н. Дымент, Н.Ю. Захваткиной, Р.И. Мая, Р.Б. Гузенко, Е.Б. Саперштейн,  
С.В. Михальцева, Е.В. Платоновой, Л.А. Старцева

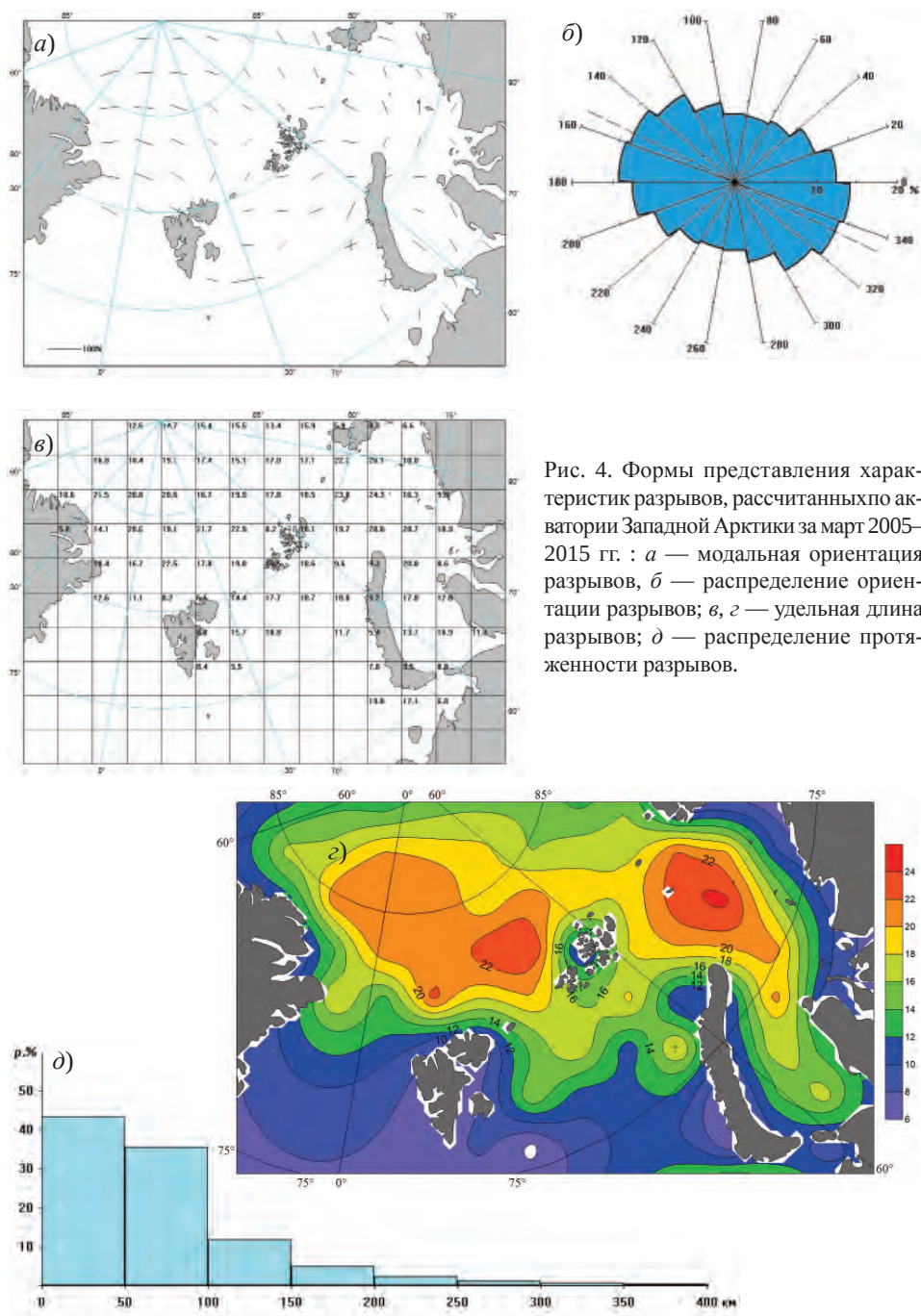


Рис. 4. Формы представления характеристик разрывов, рассчитанных по акватории Западной Арктики за март 2005–2015 гг. : *а* — модальная ориентация разрывов, *б* — распределение ориентации разрывов; *в*, *з* — удельная длина разрывов; *д* — распределение протяженности разрывов.