

СОВРЕМЕННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

Задача мониторинга морского льда, включая обнаружение опасных ледяных образований (ОЛО), является важной составной частью специализированного гидрометобеспечения хозяйствующих субъектов в Арктике. Ключевую роль в таком ГМО играют спутниковые радиолокационные наблюдения, позволяющие получать изображения ледяного покрова морей в любую погоду и вне зависимости от величины светового дня.

Радиолокационный мониторинг арктических регионов в гражданских целях возможен в настоящее время с нескольких коммерческих спутников: канадского *RADARSAT-2* с радиолокатором С-диапазона; немецких *TerraSAR-X* и *TanDEM-X* и четырех итальянских аппаратов *COSMO-SkyMed* — все с радиолокатором Х-диапазона.

Эти спутники отличает возможность проведения съемки в разных режимах — от детального со сверхвысоким пространственным разрешением (до 1–3 м) при ширине кадра 10–40 км до обзорного с разрешением 100 м при ширине кадра 200–500 км. Малое время первичной обработки снимков позволяет компаниям-операторам этих спутников предоставлять заказчикам радиолокационную информацию в квазисинхронном режиме. Таким образом, заказчик получает возможность проведения оперативных работ в Арктике при информационной поддержке средств спутникового наблюдения, осуществляющих мониторинг полярных районов. *RADARSAT-2* и *TerraSAR-X* обеспечивают возможность использования различной поляризации радиолокационного сигнала при разных режимах съемки, что позволяет получить более достоверную информацию о возрастном составе льдов, картировать полыньи и разводья.

RADARSAT-2 обладает расширенным набором режимов съемки, не имеющим прецедентов среди других ИСЗ. *TerraSAR-X*, благодаря наиболее точному позиционированию спутника, позволяет определять координаты наземных целей с минимальной погрешностью.

Важным аспектом проведения оперативных работ является возможность регулярной ежедневной съемки интересующего района. Для *RADARSAT-2* и *TerraSAR-X* в высоких широтах один и тот же район может быть заснят с одного спутника с интервалом 2–3 сут. При использовании *RADARSAT-2*, однако, могут возникать ситуации невозможности проведения съемки из-за того, что на указанное заказчиком в заявке время съемки уже запланирована другая съемка, более приоритетная. Система из четырех спутников *COSMO-SkyMed* обеспечивает наилучшую повторяемость съемки, объект может быть заснят этой системой несколько раз в сутки. Съемка конкретных районов с зарубежных спутников осуществляется с использованием технологии предварительного заказа с заблаговременностью до трех суток; для экстренных случаев существует режим срочной съемки (в тот же день), но стоимость съемки увеличивается при этом вдвое. К сожалению, отечественных радиолокационных спутников в настоящее время на орбите нет. Российские компании, осуществляющие деятельность на шельфе арктических морей, ежегодно несут миллионные затраты на покупку информации иностранных спутников. Собственная радиоло-

кационная спутниковая система высокого разрешения «Арктика-Р», разрабатываемая в рамках частно-государственного партнерства, планируется к запуску лишь в конце текущего десятилетия. Тогда же ожидается запуск радиолокационного спутника «Обзор-Р» производства ЦСКБ «Прогресс».

В ААНИИ накоплен многолетний опыт использования радиолокационных спутниковых данных для мониторинга морского ледяного покрова, включая классификацию льдов по возрасту. Разработана технология обнаружения ОЛО по данным радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА), использующая спутниковые данные об интенсивности отраженного сигнала, переведенные в значения удельной эффективной площади рассеяния поверхностей (УЭПР, σ^0). УЭПР — это безразмерная величина, нормированная на единицу площади поверхности, выражаемая в дБ ($10 \lg \sigma^0$). Применение УЭПР при использовании спутниковых изображений позволяет перейти от относительных значений интенсивности рассеянного поверхностью сигнала к абсолютным, что, в свою очередь, обеспечивает сравнение разновременных изображений морского льда, выявление динамических изменений в структуре ледяного покрова.

Классификация льдов по возрасту

Основным прямым дешифровочным признаком радиолокационного изображения морского льда является яркость (определяемая УЭПР морских льдов), которая может значительно изменяться в зависимости от вида льда, его форм и шероховатости поверхности. Исследования показали, что даже в холодный период года нельзя однозначно связать значения УЭПР, получаемые для льда по спутниковым данным, с толщиной (возрастом) льда. Например, серый лед, толщина которого не превышает 15 см, при определенных условиях его формирования может давать рассеивающий сигнал, аналогичный сигналу от многолетних льдов.

Возрастные стадии однолетних льдов (толщина от 30 см до 2 м), таким образом, не могут быть классифицированы только лишь по интенсивности обратного рассеяния на РЛ-снимках. Однако проблема классификации льдов может быть решена на основе экспертного анализа относительной яркости ледяных полей и поверхности льда в разводьях с учетом конфигурации и «иерархической» последовательности структуры разломов, разводий полыней. В последние годы широко применяются методы классификации льдов, основанные на статистическом анализе двумерных полей, в частности такие методы, как байесовская классификация, нейронные сети (НС), метод опорных векторов. Для практического применения таких статистических методов требуется большой объем вычислений, поэтому не удивительно, что всплеск интереса к ним совпал с периодом расцвета компьютерных технологий.

Метод байесовской классификации

Байесовский подход, применяемый в теории распознавания образов, использует теорему о том, что если плотности распределения классов известны, то алгоритм классификации, имеющий минимальную вероятность ошибок, можно записать в явном виде. Байе-

совская статистика основана на трудах Томаса Байеса, британского математика и священника XVIII в.

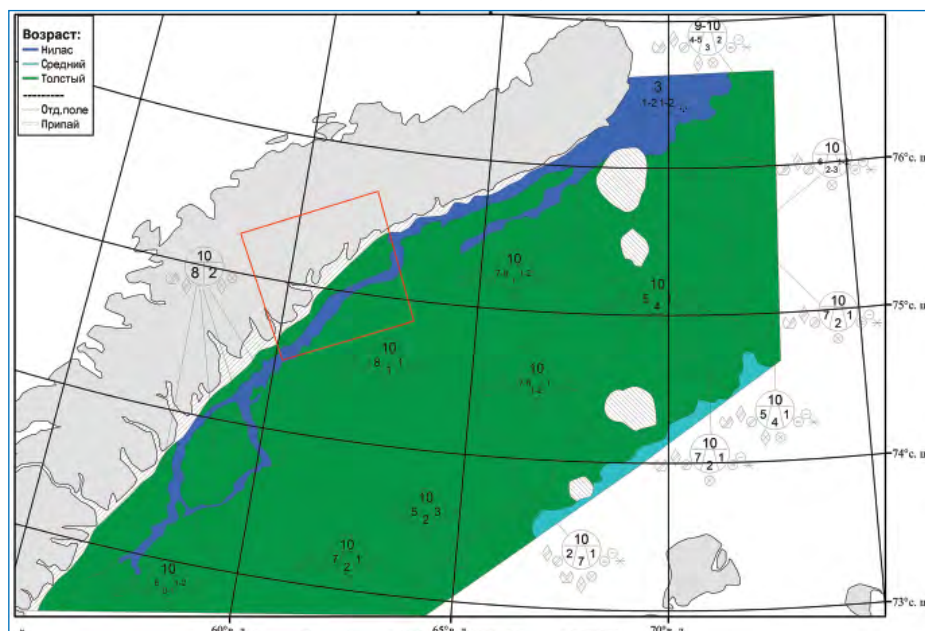
Классификация по Байесу относится к методам «обучения с учителем», иначе называемым контролируемым или управляемым обучением. Под классификацией понимается отнесение объектов наблюдений к одному из заранее известных классов. Отличие байесовской классификации от других методов классификации состоит в том, что она исходит из известной заранее априорной вероятности существования объекта данного класса. В то же время в других методах перед началом классификации подразумевается равновероятность события, состоящего в том, что объект принадлежит к тому или иному классу. Формула Байеса позволяет по известному факту события вычислить вероятность того, что оно было вызвано конкретной причиной, т.е. «переставить причину и следствие».

Точность байесовской классификации зависит от достоверности оценки априорной вероятности. Если такая достоверность низка, то байесовский подход может привести к существенным ошибкам классификации, особенно при распознавании объектов редко встречающихся классов. Поэтому для успешного применения метода Байеса для классификации морского льда по данным дистанционного зондирования необходимо получить наиболее достоверные значения априорной вероятности существования ледяного объекта данного класса в конкретное время в конкретном регионе.

В ААНИИ с использованием метода Байеса разработан алгоритм классификации льдов по возрасту (например, многолетний, однолетний и однолетний деформированный льды) с учетом региональных особенностей этих видов льдов для разных секторов Арктики. В этом алгоритме априорные оценки вероятности наблюдения данного вида льда в конкретном арктическом районе были получены двумя способами:

- 1) на основании опубликованных значений распространенности льдов в определенный сезон года в определенном районе, полученных по результатам многолетних наблюдений;
- 2) с помощью анализа карт ледовой обстановки в арктических морях, построенных ледовым центром ААНИИ

Рис. 1. Карта ледяного покрова участка Карского моря вблизи Новой Земли, построенная ледовыми экспертами ААНИИ. Май 2013 г. Красной рамкой показано положение спутникового снимка, приведенного на рис. 3.



за предыдущие годы с использованием спутниковых данных.

Первый способ предполагает использование результатов среднемноголетних наблюдений классическими средствами в Арктике для оценок априорной вероятности существования ледяных объектов конкретного типа. К сожалению, этот способ оценки априорных вероятностей может привести к существенным ошибкам при байесовской классификации, так как использование среднемноголетних данных не учитывает реальных тенденций в изменении ледовитости арктических морей, складывающихся в последние годы. Второй способ позволяет отчасти избежать подобных ошибок, так как для оценки априорной вероятности используются статистические оценки, полученные по выборке из карт ледовой обстановки, подготовленных в ААНИИ на основании регулярных спутниковых данных последних лет с учетом наблюдений судов и полярных станций. Возрастные градации льда на этих картах были определены ледовыми экспертами. Хотя при таком подходе не удастся полностью избежать субъективных ошибок, повысить достоверность априорных оценок вероятности наблюдения данного вида льда возможно.

Статистический анализ карт ледовой обстановки в арктических морях за период с 2008 по 2012 г., подготовленных ледовым центром ААНИИ (рис. 1), позволил построить сезонные и ежемесячные карты априорных вероятностей основных видов льдов (многолетнего, нескольких стадий развития однолетнего и молодого) для нескольких частей Арктики, в том числе Карского моря и Центральной Арктики (рис. 2). Значения априорных вероятностей существования основных видов льда для конкретного месяца года в отдельных арктических морях были ранжированы с учетом типа сезона («мягкая зима», «умеренная зима», «суровая зима»).

При классификации льда по спутниковым радиолокационным снимкам условные плотности распределения значений УЭПР (апостериорные вероятности) определялись по участкам рассматриваемых видов льдов, выделенных визуально на калиброванных изображениях, получаемых с радиолокатора спутника *RADARSAT-2*, и были взяты как «характерные» для данной части Арктики.

На рис. 3 приведен пример байесовской классификации льда на снимке *RADARSAT-2*. В качестве априорных значений сплоченности льдов использованы оценки, определенные по литературным источникам (рис. 3а), и оценки, полученные с помощью анализа карт ледовой обстановки (рис. 3б).

Результат классификации оценивался на основе визуальной интерпретации и путем сравнения с ледовой картой за тот же день, построенной специалистами ААНИИ. Сравнение показало, что по спутниковым данным с помощью нового алгоритма определения априорных вероятностей можно построить более детальную карту распределения ледяного покрова, выделить разрывы во льдах, полыньи и пр. На классифици-

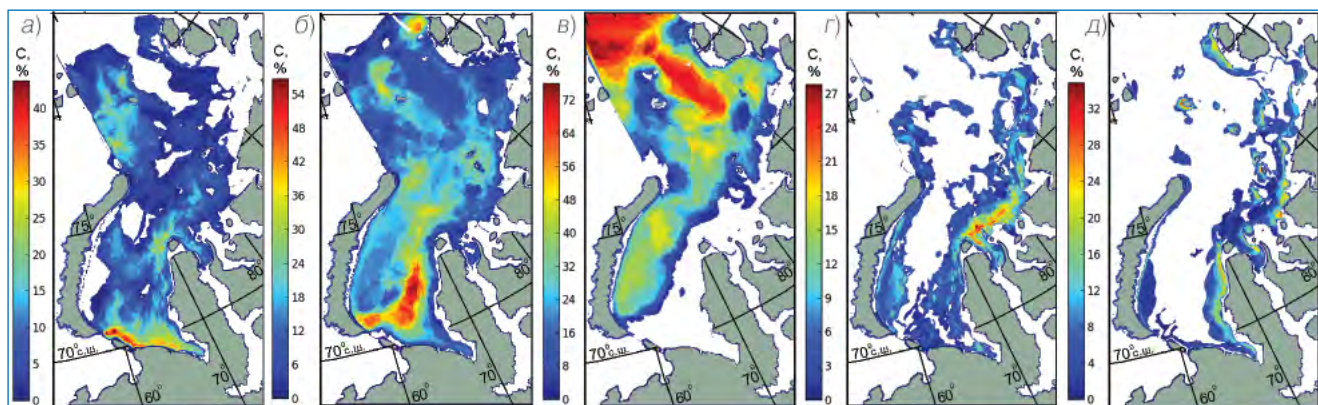


Рис. 2. Распределение средневзвешенной сплоченности (в процентах) основных видов льда в Карском море в мае, построенное по данным комплексных карт ледовой обстановки ААНИИ за 2008–2012 гг.: а) – однолетний тонкий лед; б) – однолетний средний лед; в) – однолетний толстый лед; г) – молодой лед (серый и серо-белый); д) – начальные виды льда и нилас. Отсутствие льда данного типа соответствует белому цвету. Зоны припайного льда не выделялись.

рованном спутниковом изображении хорошо выделяются зоны ниласа (лед до 10 см толщиной), границы которых совпадают с границами, проведенными на картах ледовыми экспертами.

Метод нейронных сетей

Нейронные сети (НС), применяемые для классификации морских льдов по РСА-изображениям, представляют собой основанные на компьютерных технологиях алгоритмы распознавания образов, моделирующие процессы обработки информации человеческим мозгом. НС не требуют априорных знаний о характере распределения классифицируемых данных. Для определения видов морских льдов по РСА-изображениям создают многослойную НС, имеющую несколько скрытых слоев, и задают правила ее обучения. Увеличение числа скрытых слоев ведет к потере скорости без приобретения нового качества, поэтому часто использование одного скрытого слоя может быть достаточным. Наиболее сложной задачей классификации изображений морских льдов является настройка НС с использованием обучающей выборки. Обучаются НС при помощи алгоритма обратного распространения ошибки, являющегося методом градиентного спуска в пространстве весов с целью минимизации суммарной ошибки сети.

Важным моментом при анализе РСА-изображения является выявление текстуры анализируемого изображения, осуществляемое путем расчета статистических характеристик двумерного поля УЭПР, таких как: энергия, энтропия, корреляция, инерция, однородность, выпуклость кластера и т.д. Эти характеристики представляют собой количественное выражение текстуры изображения. По тестовым изображениям ледовые эксперты выбирают наиболее характерные участки конкретных видов льдов, для каждого вида льда рассчитывается набор

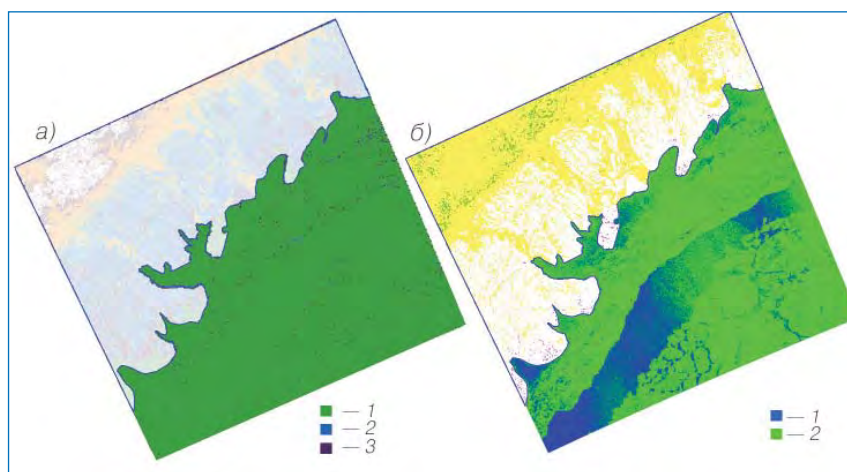
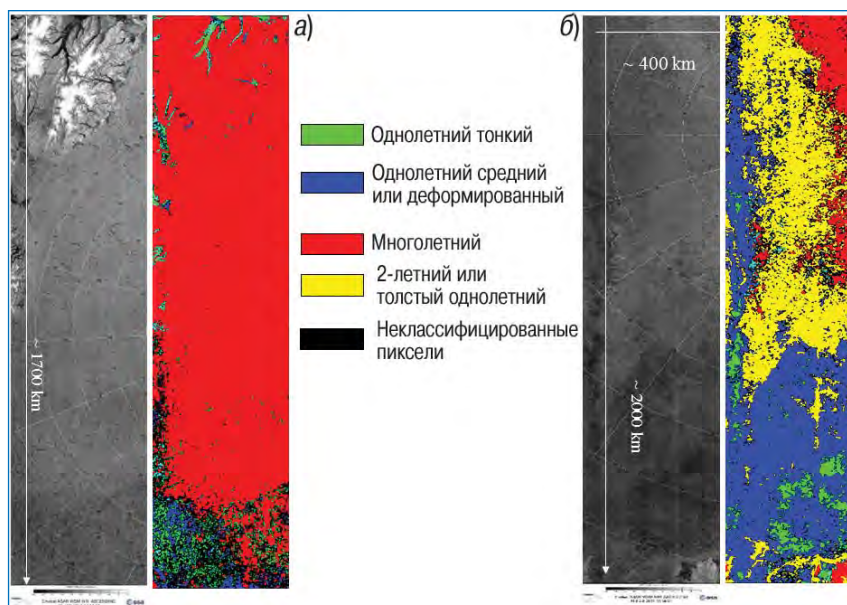


Рис. 3. Ледяной покров участка Карского моря вблизи Новой Земли. Май 2013 г. Байесовская классификация по РСА-изображению, полученному с ИСЗ RADARSAT-2: а) с использованием априорных коэффициентов по данным многолетних наблюдений (1 – однолетний ровный лед; 2 – однолетний деформированный лед; 3 – вода); б) с использованием априорных коэффициентов, полученных по комплексным ледовым картам ААНИИ (1 – вода (нилас), 2 – однолетний средний лед).

Рис. 4. Автоматизированная классификация видов льдов методом НС для фрагментов изображений, полученных ASAR/ Envisat 22.01.2011 г. (а) и 11.02.2011 г. (б).



текстурных характеристик, определяются средние значения УЭПР. Таким образом, для каждого эталона формируется допустимый диапазон значений признаков. Набор чисел образует обучающую выборку из векторов, каждый из которых сформирован для отдельного объекта, который требуется распознавать. Отличительной особенностью такой выборки от неизвестной (т.е. неизвестное РЛ-изображение) является наличие набора пар входов и выходов. В итоге каждому вектору данных (набору характеристик, полученных для определенного участка изображения) соответствует наверняка известный вид морского льда, а обучающий массив состоит из вектора данных и «номера» класса льда, для которого эти данные были рассчитаны.

Таким образом, на входной слой НС подаются признаки РСА-изображения, и число нейронов в первом слое соответствует числу используемых текстурных признаков и значений УЭПР. Пройдя через всю сеть, входной вектор отображается в результирующий вектор на выходе НС. Число элементов в выходном слое соответствует числу классифицируемых видов морского льда.

При распознавании образов, где обучающая выборка может не охватывать всех возможных состояний данных, важнейшим свойством НС становится способность классифицировать векторы данных, которые не использовались при тренировке алгоритма, т.е. способность к обобщению. Это свойство позволяет использовать нейронные сети как универсальный классификатор в задачах дистанционного зондирования.

На рис. 4 приведены результаты классификации при помощи алгоритма НС двух изображений морских льдов в Арктике, полученных с ASAR/Envisat. Первый из представленных исходных фрагментов имеет размеры 1700×400 км, второй — 2000×400 км. Оба фрагмента прошли процедуру коррекции — были приведены к углу зондирования 25°.

Проведенный анализ результатов классификации морского льда в Арктике с помощью последовательного применения НС показал, что использование нейронных сетей позволяет:

- 1) улучшить (в сравнении со стандартными визуальными методами) выделение многолетних льдов при представлении части снимка в виде однородной зоны;
- 2) выделить однолетние ровные льды с достаточно высоким уровнем точности;
- 3) идентифицировать разрывы в массиве многолетнего льда, при этом к классу «спокойная вода/нилас» также относятся некоторые участки с включениями ровного однолетнего льда.

Последовательное применение нескольких нейронных сетей дает возможность разделить обычно сложно различаемые классы: «ровный однолетний лед» и «спокойная вода/нилас».

Сравнение результатов классификации льдов, полученных по методу НС и по Байесу для одних и тех же изображений с РСА, показало удовлетворительное соответствие классификаций по этим двум методикам. Так, для классов «ровного однолетнего» и «многолетнего» льдов классификация по Байесу совпала с результатом классификации методом НС на 99 и 76 % соответственно.

Разделение лед/водная поверхность

Открытая водная поверхность при сильном ветровом волнении в микроволновом диапазоне может иметь такие же рассеивающие свойства, как серый, серо-белый или многолетний лед. Спокойная водная поверх-

ность на радиолокационных изображениях проявляется как зона низкого отраженного сигнала — имеет темный тон, практически такой же, как в случае наблюдения однолетнего тонкого льда.

В условиях сильного ветра и развитого волнения распознавание пространств открытой воды на фоне льдов значительно облегчается при использовании РСА-изображений с двумя поляризациями (ГГ и ГВ), благодаря возникающей значительной разнице в сигнале от воды и льда.

В рамках нескольких международных проектов, совместно с Фондом «Нансен-центр», для разграничения на спутниковых снимках пространств, занятых льдом и свободных ото льда, был разработан классификатор, основанный на различии в поляризационных свойствах воды и льда. Классификатор основан на методе опорных векторов и предполагает работу в автоматизированном режиме.

Классификация методом опорных векторов относится к классу методов «обучения с учителем». В задаче распознавания формируются векторы образцов каждого класса (льда и воды) — объекты, про которые заранее известно, к какому классу они принадлежат. Метод опорных векторов заключается в построении оптимальной разделяющей гиперплоскости. Точность классификации определяется некоторой геометрической линией (в общем случае — оптимальной разделяющей гиперплоскостью), расстояние от которой до каждого класса максимально, т.е. разделяет классы наилучшим образом. Векторы, лежащие ближе всех к разделяющей гиперплоскости, называются опорными векторами.

Для разделения классов «лед» и «вода» обучающие векторы классификатора формируются по данным, полученным с помощью текстурного анализа. Для реализации классификатора осуществляется анализ текстурных характеристик РСА-изображений, основанный на расчете матриц совместной встречаемости, комбинирующих яркостные, градиентные и ориентационные свойства изображений и обеспечивающих детальное представление их структуры и строения. Метод опорных векторов, примененный для автоматизированного разделения объектов лед / вода на спутниковых радиолокационных снимках RADARSAT-2 по Арктическому бассейну, показал хорошее совпадение результатов компьютерной классификации с экспертным анализом ледовой обстановки.

Обнаружение опасных ледяных образований

Для достоверного обнаружения и трассирования ОЛО в космической технологии используется совместный анализ данных, полученных с различных источников:

- радиолокаторы с синтезированной апертурой (спутники *RADARSAT*, *TerraSAR-X* и др.);
- радиометры видимого и инфракрасного спектральных диапазонов (спутники NOAA, Terra, Aqua и др.);
- наземные наблюдения на судах и береговых станциях;
- модельные расчетные данные.

Спутниковые наблюдения за состоянием ледяного покрова проводятся в режиме регулярного мониторинга с использованием оптимального сочетания спутниковых средств наблюдений за ОЛО на различных этапах мониторинга:

- этап фоновый мониторинг: в режиме постоянного слежения за обширными зонами, в которых могут быть ОЛО, применяется совокупность спутниковых средств с преобладающим вкладом данных оптического диапазона;

– этап первичного определения объектов, подозрительных на принадлежность к классу ОЛО. В схему обнаружения и слежения включаются данные РСА высокого пространственного разрешения (3–30 м). Для обнаружения и слежения за перемещением скоплений или отдельных ОЛО в виде крупных многолетних и торосистых однолетних ледяных полей, локальных «пятен» сплоченного сильно торосистого льда, а также всплывших стамух используются данные высокого разрешения со спутников типа *RADARSAT-2*, *TerraSAR-X*.

– этап принятия решения о наличии ОЛО с оценкой опасности для обслуживаемого инженерного объекта. Выполняются модельные расчеты передвижения ОЛО и его прогнозируемого местоположения с последующим подтверждением факта обнаружения ОЛО на основе спутниковой радиолокационной информации высокого

разрешения, заказываемой на район прогнозируемого положения ОЛО.

Современные радиолокационные спутники позволяют обеспечить потребителей оперативной информацией о состоянии ледяного покрова в конкретном районе моря, о наличии полыней и разводий, месте нахождения и направлении дрейфа опасных ледяных образований. Такая информация востребована в настоящее время и используется для прокладки оптимального маршрута судов в арктических морях, ледового менеджмента при ведении буровых работ на шельфе и при эксплуатации месторождений углеводородов.

*И.А.Бычкова, Н.Ю.Захваткина
(ААНИИ, Фонд «Нансен-центр»)*

НЭС «АКАДЕМИК ТРЁШНИКОВ» — ПРОДОЛЖЕНИЕ ТРАДИЦИЙ

«Хорошая традиция — называть экспедиционные корабли именами людей, посвятивших свою жизнь изучению Мирового океана...». Такими словами заканчивает Алексей Федорович Трёшников свою книгу «Их именами названы корабли науки» (Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 128 с.).

Последнее десятилетие XX века и начало XXI явились сложным периодом для ААНИИ и, в частности, для Российской антарктической экспедиции (РАЭ). Начиная с 1993 г., научно-экспедиционное судно «Академик Федоров» оставалось единственным судном для обеспечения задач РАЭ, что привело к резкому сокращению экспедиционных работ и повышению уровня разнообразных рисков при проведении морских операций.

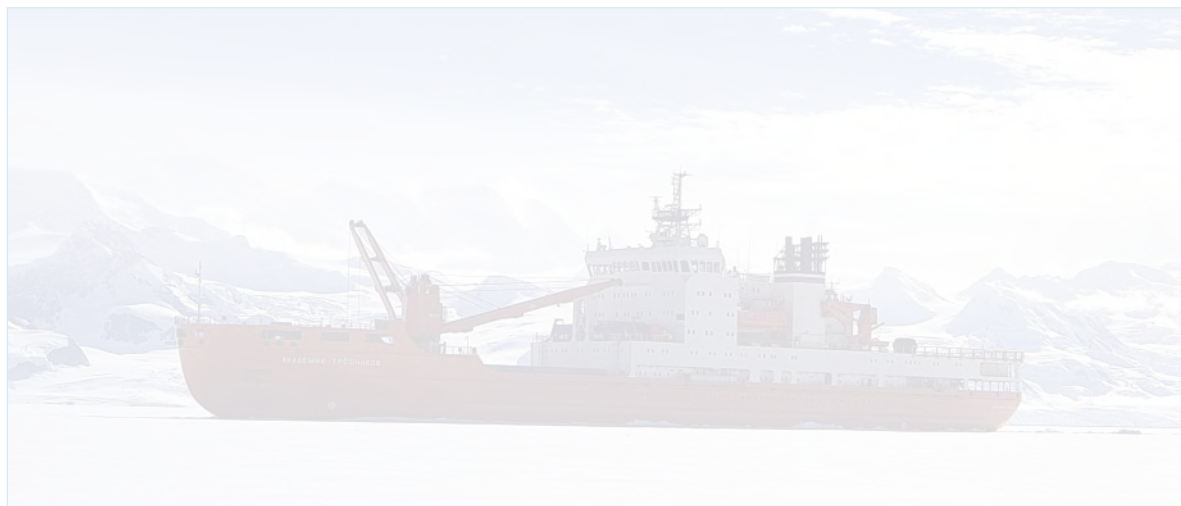
Дирекция института и руководство РАЭ понимали необходимость получения нового судна и прикладывали громадные усилия к обоснованию его строительства. 24.01.2001 г. было подписано Постановление Правительства РФ № 685 «О мерах по обеспечению Российской антарктической экспедиции в 2001–2005 гг.», которое предусматривало разработку технико-экономического обоснования на проектирование и постройку нового судна.

2 июня 2005 г. выходит распоряжение Правительства РФ № 713-Р, в котором указаны сроки на проектирование и постройку нового научно-экспедиционного судна для РАЭ: 2007–2010 гг.

27 января 2009 г. Премьер-министром В.В.Путиным было подписано постановление № 47 «О строительстве научно-экспедиционного судна для Российской антарктической экспедиции», которым предписывалось Министерству финансов и Министерству экономического развития обеспечить финансирование работ на 2009–2011 гг.

Когда, после многолетнего перерыва в строительстве судов для науки, было заложено новое судно для РАЭ, коллектив ААНИИ на заседании Ученого совета, состоявшемся 3 марта 2009 г., вышел с инициативой о присвоении этому судну имени «Алексей Трёшников». ААНИИ получил поддержку этого предложения со стороны целого ряда научных, научно-производственных и учебных заведений нашей страны, связанных по роду своей деятельности с полярными районами нашей планеты.

Руководство Росгидромета также поддержало решение Ученого совета ААНИИ об увековечении имени Алексея Федоровича Трёшникова, но, в силу сложив-



НЭС «Академик Трёшников» в первом рейсе у берегов Антарктиды.