

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ МОРСКИХ ЛЬДОВ

канд. физ.-мат. наук В.Г.СМИРНОВ, д-р геогр. наук А.В.БУШУЕВ,
канд. геогр. наук И.А.БЫЧКОВА, канд. физ.-мат. наук Н.Ю.ЗАХВАТКИНА,
канд. геогр. наук В.С.ЛОЩИЛОВ

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

Рассмотрены методы мониторинга морских льдов по данным спутниковых наблюдений в различных спектральных диапазонах. Подчеркнута неоднозначность интерактивных методов картирования ледяного покрова. Сделан вывод о практическом отсутствии алгоритмов автоматической обработки спутниковых данных для морских льдов, применимых в оперативной практике без процедур интерактивной коррекции. Проанализированы возможности аппаратуры функционирующей в настоящее время ИСЗ для определения основных параметров ледяного покрова. Дана оценка методических погрешностей, возникающих при расчете характеристик ледяного покрова по спутниковым данным. Рассмотрены перспективы использования российских спутниковых средств наблюдений для мониторинга морского ледяного покрова.

Ключевые слова: спутник, ИК, СВЧ-диапазоны, радиолокатор, объективные методы картирования морского льда, морской лед, сплоченность, возраст льда, дрейф льда, толщина льда, нейронные сети.

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковые данные для картирования льдов начали применять с 1970-х гг., когда были запущены первые метеорологические спутники. Спутниковые методики картирования льдов развивались на основе использования авиационных методов картирования льдов, как визуальных, так и инструментальных. Опыт ледовых авиационных разведок, проводившихся с 1914 г., способствовал быстрому развитию и внедрению в оперативную практику новых спутниковых технологий картирования ледяного покрова [1, 5, 7]. Ныне методы спутникового дистанционного зондирования являются основными методами мониторинга окружающей среды, обеспечивающими оперативное получение информации о ее состоянии. Особое значение такие методы приобретают для мониторинга морского ледяного покрова отдаленных замерзающих акваторий, где использование традиционных контактных измерений затруднено, а в ряде случаев невозможно.

Анализ спутниковых данных о ледяном покрове в настоящее время, как правило, производится в интерактивном режиме с учетом всех имеющихся в распоряжении ледового эксперта спутниковых материалов по району работ. Качество получаемой ледовой информации целиком зависит от опыта интерпретатора – ледового эксперта. Для повышения качества интерпретации используется принцип синергетического дополнения многоспектральной спутниковой информации. Так, спутниковые радары применяют совместно с СВЧ-радиометрами, хотя пространственное разрешение пассивных микроволновых радиометров более чем на два порядка хуже, чем у радаров. Однако СВЧ-изображения дают важную информацию о ледяном покрове в дополнение к данным радара. Это обусловлено отрицательной корреляцией интенсивности излучения и интенсивности рассеяния волн СВЧ-диапазона льдом одного

и того же возраста в зимний период. На радарном изображении старые льды выделяются сильным рассеянным сигналом, а на изображениях СВЧ-радиометра – слабым собственным излучением. Молодые и однолетние льды, наоборот, выделяются слабым рассеянным сигналом и сильным собственным излучением.

Одним из первых спутников, производивших съемку ледяного покрова морей одновременно разными приборами в нескольких диапазонах спектра, стал отечественный ИСЗ «Океан». Спутники этой серии функционировали в 1983–2000 гг. и оснащались сканером видимого диапазона, радаром бокового обзора и СВЧ-радиометром. Такая комплектация позволяла безошибочно распознавать границы распространения однолетних и старых льдов в период интенсивного летнего таяния, открытую воду на крупных разводьях и полыньях, а также положение кромки льдов при взволнованной открытой водной поверхности [8].

Современные исследования по развитию методик и технологий автоматизированной интерпретации и классификации морских льдов по спутниковым данным направлены на то, чтобы свести к минимуму субъективные экспертные оценки количественных параметров состояния ледяного покрова в информационных продуктах.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОБЪЕКТИВНОЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ МОРСКОГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Большое внимание в разных странах уделялось разработке автоматических/автоматизированных процедур обработки спутниковых данных о ледяном покрове, однако значительных успехов достичь пока не удалось. Подавляющее большинство существующих технологий интерпретации спутниковых данных для ледового картирования в национальных ледовых службах основаны на интерактивном анализе с участием опытного ледового эксперта.

Наибольшее развитие среди спутниковых технологий, применяемых национальными ледовыми службами, получили технологии, основанные на использовании данных радиолокаторов с синтезированной апертурой (SAR). Для автоматической интерпретации данных SAR применялись различные подходы. Так, для определения типов льда разрабатывались различные алгоритмы с использованием величины коэффициента обратного рассеяния сигнала ледяным покровом [3, 4]; проводилось исследование текстуры изображений с использованием полей Маркова [12]; исследовались процессы взаимодействия сигнала SAR с поверхностью льда различного возраста [11] и др.

В 1990-х гг. предпринимались попытки внедрения автоматизированных алгоритмов интерпретации SAR-данных, разработанных Канзасским университетом США [18]. При этом желаемые результаты достигнуты не были, и в настоящее время такие алгоритмы не используются. Интерпретация данных SAR, как правило, выполняется вручную с использованием автоматизированных интерактивных процедур. В настоящее время только Финская ледовая служба для картирования ледовых условий применяет программный комплекс ICEMAP [15], предусматривающий возможность автоматической обработки данных SAR (RADARSAT и Envisat). Однако такая технология требует наличия большого числа подспутниковых измерений и постоянного контроля выходной продукции ледовым экспертом, что обусловлено высокой вероятностью ошибок интерпретации при использовании автоматических процедур обработки данных SAR. Эта технология изначально разработана для Балтики и не подходит для районов с наличием двухлетнего и многолетнего льда.

Сплоченность

Для оценки сплоченности льда применяются алгоритмы автоматической обработки данных микроволнового пассивного зондирования. Преимущества использования СВЧ-диапазона для мониторинга морского льда обусловлены значительной разницей в микроволновом диапазоне в излучательной способности открытой воды

и различных типов льда, а также всепогодностью микроволновых датчиков, способностью осуществлять измерения в любое время суток. СВЧ-радиометры могут осуществлять ежедневный мониторинг параметров морского льда как в глобальном, так и в региональном масштабе. Однако на сегодняшний день эти приборы имеют малое пространственное разрешение (лучшее из них – у радиометра AMSR-E/Aqua: 6×4 км), что препятствует использованию микроволновых данных в региональных целях, в частности при обеспечении ледового плавания. СВЧ-радиометры применяются для глобального мониторинга ледяного покрова, при построении обзорных ледовых карт. Данные о сплоченности ледяного покрова, полученные с СВЧ-радиометров, собираются в информационных центрах (NESDIS, NSIDC) и предоставляются потребителям по всему земному шару в квазиреальном масштабе времени.

Существующие алгоритмы оценки сплоченности льда по данным СВЧ-измерений основаны на линейной комбинации яркостных температур и их разностей на частотах 19, 37 и 85/89 ГГц при вертикальной и горизонтальной поляризациях. Среди наиболее распространенных алгоритмов оценки сплоченности льда, используемых в ледовых центрах, следует отметить: NASA Team, Bootstrap, TUD, ARTIST [13].

Алгоритм NASA Team (NT) использует два отношения: поляризационное (горизонтальная и вертикальная поляризации канала 19 ГГц) и градиентное (вертикальная поляризация каналов 19 и 37 ГГц). Использование отношения уменьшает зависимость получаемой в итоге сплоченности от температуры поверхности. Алгоритм применим для трех типов поверхности: воды и двух типов льда (в условиях Арктики – однолетнего и многолетнего; модифицированный алгоритм – для областей с однолетним льдом и тонким льдом). Для снижения вероятности ложного обнаружения морского льда в открытых водах NT использует два погодных фильтра, основанных на расчете пороговых значений по отношению вертикальной поляризации каналов 37 и 19 ГГц (23 и 19 ГГц). Улучшенная версия NT – алгоритм NASA Team 2 использует дополнительно данные канала 85 ГГц, очень чувствительного к атмосферному излучению и менее чувствительного к неоднородности снега или льда. Вклад атмосферы в значения сигнала корректируется путем использования модели переноса излучения, исходя из 11 типичных полярных атмосфер. В итоге алгоритм позволяет повысить точность оценки сплоченности льда.

Свои недостатки и преимущества в зависимости от времени года и конкретной ледовой обстановки имеют и остальные из перечисленных алгоритмов.

Важно отметить, что микроволновые радиометры в настоящее время позволяют автоматически различать ежесуточно границу льда и общую сплоченность морского льда в течение сезонных периодов вне летнего таяния и осеннего замерзания. Однако автоматическая оценка сплоченности многолетнего льда все еще нестабильна и менее точна, чем оценки, основанные на экспертном анализе SAR или видимых/ИК изображений. В периоды летнего таяния и осеннего замерзания величина ошибок для автоматически получаемых продуктов увеличивается – в два раза и более (табл. 1). Для снижения погрешности необходима дополнительная экспертная проверка качества последовательных серий информационных продуктов.

Возраст льда

Спутниковые наблюдения в различных диапазонах спектра позволяют определить возрастной состав льда – важнейшую характеристику ледяного покрова. При этом по изображениям видимого диапазона опытный ледовый эксперт может при визуальном анализе определить до 8 стадий развития (возраста) льдов; причем ниласовые и молодые льды классифицируются на несколько возрастных градаций, а более старые льды объединяются в одну категорию, не разделяемую по стадиям. По ИК-изображениям могут быть определены толщины ниласовых, молодых и однолетних тонких и средних льдов. По радиолокационным изображениям дешифрируются старые льды. Таким образом, по спутниковым изображениям

Таблица 1

Характеристики ледяного покрова, измеряемые с ИСЗ
(для видимого и ИК-диапазонов – в условиях ясного неба, для видимого также при высоте солнца над горизонтом более 5°)

Характеристика Погрешность измерения	ПАССИВНАЯ ЛОКАЦИЯ						АКТИВНАЯ ЛОКАЦИЯ						Примечание
	Видимый диапазон		ИК		СВЧ		Альзиметр		Радар с син-тезированной апертурой		Скап-терометр		
	Зима	Лето	Зима	Лето	Зима	Лето	Оптический лазер	Радар	Зима	Лето			
											Зима	Лето	
Сплошность	–	+	++	–	+++	–	–	–	+	–	–	–	
Погрешность, балл	2–3/10	2–3/10	2–3/10	–	1	2	–	–	++	–	–	–	
Возраст льда	++	–	++	–	++	++	–	–	–	–	–	–	
Кол-во градаций	4	2	8	–	2	2	–	–	–	–	–	–	
Толщина льда	–	–	++	–	+	–	–	–	+	–	–	–	Радар совместно с лазером
Погрешность, м	–	–	0,10	–	0,10	–	–	–	0,5	–	–	–	
Положение кромки льда	++	++	+	–	+++	+++	–	–	+	–	–	–	
Погрешность, км	–	–	–	–	5	10	–	–	–	–	–	–	
Деформация льда	++	++	++	–	++	++	–	–	–	–	–	–	
Дрейф льда	–	–	+++	–	++	++	–	–	–	–	–	–	
Погрешность, км/сут	–	–	1	–	1,5	–	–	–	–	–	–	–	
Температура льда	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
Погрешность, К	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
<i>Дискретность измерений:</i>													
Пространственное разрешение, км	0,001–1	–	1	1	> 24	7	0,07	–	–	0,01–0,15	–	–	Определяется возможностями аппаратуры ИСЗ
Временной интервал, сут.	1–3	–	1–3	–	Ежесуточно	3	–	–	–	–	–	–	

Обозначения: «–» – измерение невозможно; «+» – данные получаются в экспериментальном режиме, нуждаются в валидации; «++» – оперативный информационный продукт, получаемый в автоматизированном режиме на квазирегулярной основе (при благоприятной облачной ситуации) для отдельных регионов; «+++» – оперативный информационный продукт, получаемый в автоматическом режиме на регулярной основе (ежесуточно) для всех замерзающих морей

ИК-диапазона могут определяться все основные возрастные стадии льдов среднеширотных морей. В условиях Арктики в зимнее время диагностировать возрастную состав льдов можно путем совместного использования ИК и СВЧ-диапазона [6].

*Картирование морских льдов
по радиолокационным данным СВЧ-диапазона*

Технологии использования данных микроволнового диапазона для картирования льда по возрастным градациям развиваются с 1980-х гг. Одна из первых методик оперативного картирования ледовой обстановки была разработана применительно к использованию микроволновых данных российского ИСЗ «Океан», единственного на тот период спутника, оснащенного радиолокатором бокового обзора. В процедурах картирования применялся как метод визуальной экспертной интерпретации изображений, так и алгоритмы автоматизированной количественной оценки льдов [1, 2]. Данные спутника «Океан» широко использовались в ААНИИ для ежедневного анализа оперативной ледовой обстановки по изображениям на отдельных орбитах и для составления еженедельных композитных ледовых карт для всей трассы СМП. Мозаики формировались из предварительно нормализованных по яркости и трансформированных в стереографическую картографическую проекцию полос изображений РБО [9]. После 1990 г., в связи с прекращением авиационных ледовых наблюдений, практически весь объем информации о ледовой обстановке на трассе СМП поступал от метеорологических спутников.

*Автоматизированное картирование морских льдов
на основе метода нейронных сетей*

Одним из методов объективного оценивания возрастных градаций ледяного покрова является метод нейронных сетей (НС) [7], широко применяемый при обработке данных дистанционного зондирования благодаря ряду преимуществ перед традиционно используемыми статистическими методами классификации. Нейросетевые алгоритмы показывают лучшие результаты при наличии спекл-шума в спутниковых радиолокационных данных. Обученные НС имеют более высокое быстродействие, что позволяет использовать их для обработки больших массивов информации, что особенно важно при оперативной работе со спутниковыми изображениями с высоким пространственным разрешением. Наиболее сложной задачей является настройка (тренировка) НС с использованием обучающей выборки. 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, то есть способность к обобщению. Это свойство позволяет использовать нейронные сети как универсальный классификатор в задачах дистанционного зондирования.

Метод НС был применен нами для разработки метода картирования ледяного покрова по спутниковой радиолокационной информации SAR. На начальном этапе были определены текстурные характеристики изображения. Статистический анализ полученных текстурных характеристик показал, что наиболее значимые признаки — это корреляция, инерция и выпуклость кластера. Энергия, гомогенность и энтропия менее значимы, однако являются источниками дополнительной информации. Для получения равноконтрастного изображения по всей полосе обзора была разработана методология приведения УЭПР морских льдов к одному углу зондирования [3, 4]. Разработанный алгоритм приведения изображения к фиксированному углу зондирования включает в себя пересчет яркости SAR-изображения в значение УЭПР для данного угла зондирования, пересчет полученного значения для угла зондирования 25° и пересчет скорректированной УЭПР в новое значение яркости по ранее определенным коэффициентам, уникальным для каждого класса льда (однолетнего, однолетнего деформированного и старого льда).

Верификация алгоритма оценки возрастных градаций льда по методу НС проводилась по акватории Российской Арктики, в частности по району дрейфа СП-35. Были использованы SAR-изображения Envisat с разрешением 150 м и полосой обзора 400 км. Благодаря высокоширотному положению станции, ее изображение (точнее морских льдов в области станции) можно было получать практически ежедневно. Согласно экспертной оценке, ледяное поле, на котором был построен лагерь дрейфующей станции, состояло из смерзшихся обломков полей старого льда различных размеров, толщины и конфигурации. Монолитные обломки полей старого льда разделены полосами однолетнего льда с включениями битого старого льда. Поэтому сеть была настроена на выделение трех классов: старого льда, однолетнего ровного льда и однолетнего деформированного льда. Для обучения сети использовался стандартный алгоритм обратного распространения ошибки. Сеть была настроена на классификацию SAR-изображений центрального района Арктики в зимний период. Полученные результаты классификации соответствовали результатам экспертного дешифрирования. Рассчитанные ошибки классификации составили: для однолетнего ровного льда 15 %, для однолетнего деформированного льда 17 % и для старого льда 20 %. Обученная сеть также была использована для автоматического картирования этих же возрастных градаций льда по данным Envisat в Карском море (рис. 1).

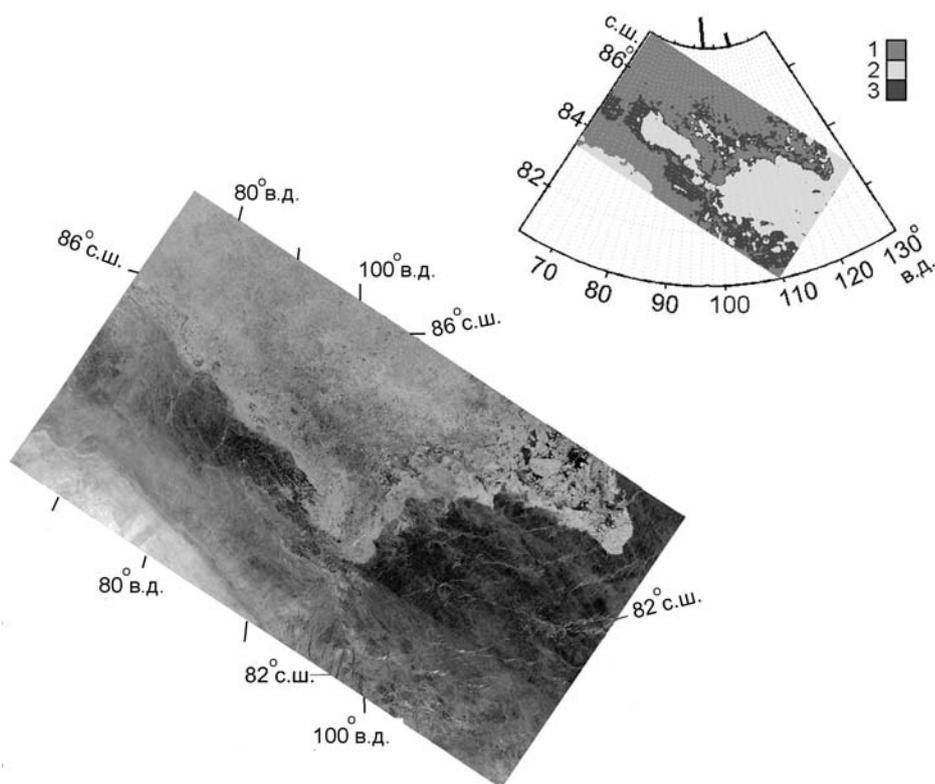


Рис. 1. Картирование возрастных стадий льда в Карском море с помощью метода нейронных сетей по данным Envisat, 03.11.2009:

1 – старый лед; 2 – однолетний ровный лед; 3 – однолетний деформированный лед

Для использования в автоматическом режиме с целью оперативного картирования возрастных стадий льда метод НС нуждается в совершенствовании. Необходимо настройка сети в направлении выделения большего количества классов ледовых образований, верификация результатов с использованием проверки в рамках подспутникового эксперимента с регистрацией широкого круга параметров. Особенно это необходимо для обеспечения возможности выделения «точечных объектов» — айсбергов, ледяных островов и всплывших стамух. Основной проблемой при выделении таких объектов методом НС является дефицит обучающих выборок. Помимо текстурных характеристик для выделения опасных ледяных образований могут использоваться и иные входные параметры. Например, для айсбергов это могут быть наличие и конфигурация открытой воды за движущимся айсбергом и ветровые данные.

Дрейф льда

Дрейф льда определяют с помощью интерактивных или автоматических процедур, основанных на использовании координат одних и тех же опорных точек на последовательных спутниковых изображениях. Погрешность оценки вектора дрейфа зависит от точности географической привязки опорных точек; для расчетов по данным AVHRR/NOAA, например, вектор дрейфа определяется с погрешностью ± 4 км. Определение дрейфа в интерактивном режиме занимает значительное время и в оперативной практике не применяется. Для расчета дрейфа льда предпочтительно использовать данные SAR, не зависящие от освещенности и облачности. В автоматизированном режиме для оценки векторов дрейфа по данным ИСЗ применяют следующие методы: полиномиальный, кросс-корреляционный, гибридный, метод оптического потока.

Полиномиальный метод. По двум спутниковым изображениям интерактивно определяются координаты идентичных ледовых образований. Затем строится полиномиальная модель, коэффициенты которой вычисляются по методу наименьших квадратов. Полученная зависимость позволяет по координатам ледового объекта на первом изображении определить вероятные координаты этого объекта на втором изображении. Таким образом, оператор имеет возможность производить поиск соответствующего ледового объекта на втором изображении в окрестности предсказанной точки, что ускоряет определение дрейфа в интерактивном режиме.

Кросс-корреляционный метод. Основан не на опознавании и определении координат идентичных точек изображений, а на нахождении соответствия между небольшими участками (шаблонами) на паре последовательных изображений путем поиска максимума кросс-корреляции [16]. Выбранный на первом изображении шаблон сравнивается с таким же по размеру шаблоном на втором изображении; второй шаблон последовательно передвигается в пределах района, размер которого определяется оператором с учетом максимально возможной для этого района скорости дрейфа. Модификация метода использует пирамидальную структуру изображений, включающую в себя несколько уровней, каждый из которых представляет собой исходное изображение с различным усреднением. По модифицированному алгоритму сначала находят векторы дрейфа для изображений самого низкого разрешения, а затем эту информацию используют при поисках максимума коэффициента кросс-корреляции — последовательно на каждом уровне пирамиды, начиная с вершины. Так поле векторов дрейфа уточняется на каждом уровне пирамиды. Пирамидальная структура изображений позволяет ограничить область поиска на втором изображении и снижает вероятность грубых ошибок расчета дрейфа.

Гибридный метод. По интерактивно определенным векторам дрейфа строится полиномиальная модель дрейфа, уточняемая методом кросс-корреляции. Определенная полиномиальной моделью точка на втором изображении является центром

площади поиска максимума коэффициента кросс-корреляции. Размер зоны поиска, определяющий объем вычислений, и точность конечного результата зависят от точности полиномиальной модели.

Метод оптического потока. Алгоритм основан на вычислении компонент скорости движения льда по яркости каждой точки изображения при помощи частных производных [19]. Предварительно строится пирамидальная структура спутниковых изображений – на вершине находится изображение наиболее грубого разрешения, а в основании – исходное изображение. На уровне грубого разрешения методом кросс-корреляции получают грубые векторы дрейфа. На каждом последующем уровне пирамиды вычисляют оптический поток – трехмерное векторное поле, получаемое из скалярной функции яркости последовательных по времени изображений $B(x, y, t)$, где x и y – координаты, а t – время. Яркость объекта во время движения принимается постоянной. Градиент яркости изображения также считается стационарным во времени. Метод используется для детального наблюдения движения льда и позволяет получить информацию о трансформациях ледяного покрова – сжатиях, разрежениях, взаимных подвижках, деформациях. Алгоритм требует предварительной калибровки снимков по значениям яркости.

Толщина льда

Методов прямых измерений толщины льда с помощью ИСЗ не существует. Косвенные методы оценки толщин льда основаны либо на найденных закономерностях между измеряемыми параметрами (температурой поверхности льда, ТПЛ) и собственно толщиной льда, либо на вычислении разницы в длине пути луча, проходящего до границы снег–воздух, и луча, отраженного непосредственно от ледовой поверхности. Грубая оценка толщины льда может быть получена по спутниковым данным о возрасте льда, так как толщина льда и его возраст – два взаимосвязанных параметра.

Определение толщины льда по данным измерений в ИК-диапазоне

Технология оценки толщины льда по данным ИК-каналов ИСЗ разработана в ААНИИ и основана на решении уравнений теплопроводности [10] для системы вода–лед–снег–воздух. Установлено, что при отрицательных температурах воздуха ТПЛ обратно пропорциональна его толщине: чем толще лед, тем ниже ТПЛ. По экспериментальным данным, при толщине льда 240–250 см наблюдается эффект насыщения: ТПЛ приобретает минимальные для данных гидрометеорологических условий значения, не меняющиеся при дальнейшем увеличении толщины. Такие льды относятся к категории «толстые». При положительных температурах воздуха на поверхности льдов образуется талая вода, экранирующая собственное излучение льда, и ледовые наблюдения в ИК-диапазоне становятся невозможны.

Снежно-ледяной покров морей зимой рассматривается как промежуточный слой между морской водой, имеющей у нижней поверхности льда постоянную температуру, равную температуре замерзания морской воды данной солености, и слоем воздуха, температура которого для арктических морей в большинстве случаев находится в пределах $-20 \dots -50$ °С. Оценка толщины льда производится по ИК-изображениям ИСЗ NOAA/AVHRR.

Автоматизированное определение толщины морского льда по спутниковым изображениям ИК-диапазона и классификация этих изображений по возрастным стадиям развития возможны только для безоблачных ситуаций.

В модели по значению ТПЛ непосредственно определяется не истинная толщина льда и снега в данном пикселе, а преобразованная толщина H_p , приведенная к толщине только льда, имеющего одинаковую теплопроводность со льдом, покрытым снегом:

$$H_p = H + h \times L/l,$$

где H и L – толщина и теплопроводность льда, h и l – толщина и теплопроводность снега.

Параметрическая модель оценки толщины морского льда, применяемая нами, имеет на входе безразмерный параметр Q , представляющий собой «коэффициент подобия» между топографией поля льда и соответствующим ему температурным полем снежно-ледяной поверхности. Q вычисляется для каждого пиксела ИК-изображения:

$$Q = (T_i - T_w) / (T_l - T_w),$$

где T_i – радиационная температура участка, на котором измеряется толщина льда, T_l , T_w – средние радиационные температуры тестовых участков «толстого» льда и чистой воды. Тестовые участки «толстого» льда и чистой воды могут выбираться интерактивно ледовым экспертом. Если выбранные участки «толстого» льда прилегают к береговой черте, на расстоянии от нее 1–2 пиксела, необходимо учитывать возможные краевые эффекты, связанные со смешением в одном пикселе разнотемпературных сигналов от морского льда и суши. Практика показывает, что более надежные значения параметра Q для «толстого» льда получаются для областей с температурой воздуха ниже -10 °С.

Усовершенствование модели

Дальнейшим усовершенствованием модели стало использование при расчетах истинной температуры. Для получения истинной температуры применяется стандартная процедура многоканальной коррекции по данным радиационных температур в отдельных каналах с заданными для исследуемого региона постоянными коэффициентами. Таким образом выполняется устранение эффекта атмосферного влияния на значения ИК-сигнала.

Зависимость параметра Q от преобразованной толщины определяется экспериментально по еженедельным измерениям толщин льда и снега на припаяе, проводимым береговыми полярными станциями.

Определение параметра Q путем опознавания и измерения на тестовых участках чистой воды и старых льдов, как правило, не может быть выполнено корректно. При низких температурах воздуха на разводьях и разрывах сразу начинают образовываться ниласовые и молодые льды, а тестовые участки «толстого» льда в осенние и раннезимние периоды даже в арктических морях могут отсутствовать. В морях умеренных широт наиболее толстыми льдами обычно являются тонкие и средние однолетние льды. В усовершенствованной технологии температура замерзания морской воды определяется по справочной океанографической литературе как функция солености в районе наблюдения. В качестве тестовых участков «толстого льда» используется сеть постоянных реперных точек заснеженной суши. Истинная толщина льда, образование и нарастание которого происходило в бесснежные периоды, равняется преобразованной. Высоты снега на льдах той или иной преобразованной толщины определяются по данным береговых станций, а не по среднемноголетним статистическим данным.

На практике при использовании спутниковой информации ИК-диапазона для конкретной акватории необходимо определять толщины льда различного времени образования. Для этого по осредненным данным береговых станций конкретного моря о высотах снега и декадных суммах среднесуточных температур формируется оперативная база высот снега, расчетных и преобразованных толщин льда (приведенных к толщине незаснеженного льда), а также расчетных и преобразованных толщин снежно-ледяного покрова различного времени образования. Вычисления выполняются по десятисуточным периодам, соответственно с датами измерения толщин льда и снега припаяе береговыми станциями. На завершающем этапе формируется классификационная таблица: для каждой возрастной стадии (с шагом 20 см) указываются средняя высота снега, преобразованные толщины и безразмерные параметры Q . По этой таблице исходное ИК-изображение (рис. 2а) трансформируется в классифицированное изображение (карту-схему) возрастных градаций (толщин) льда (рис. 2б).

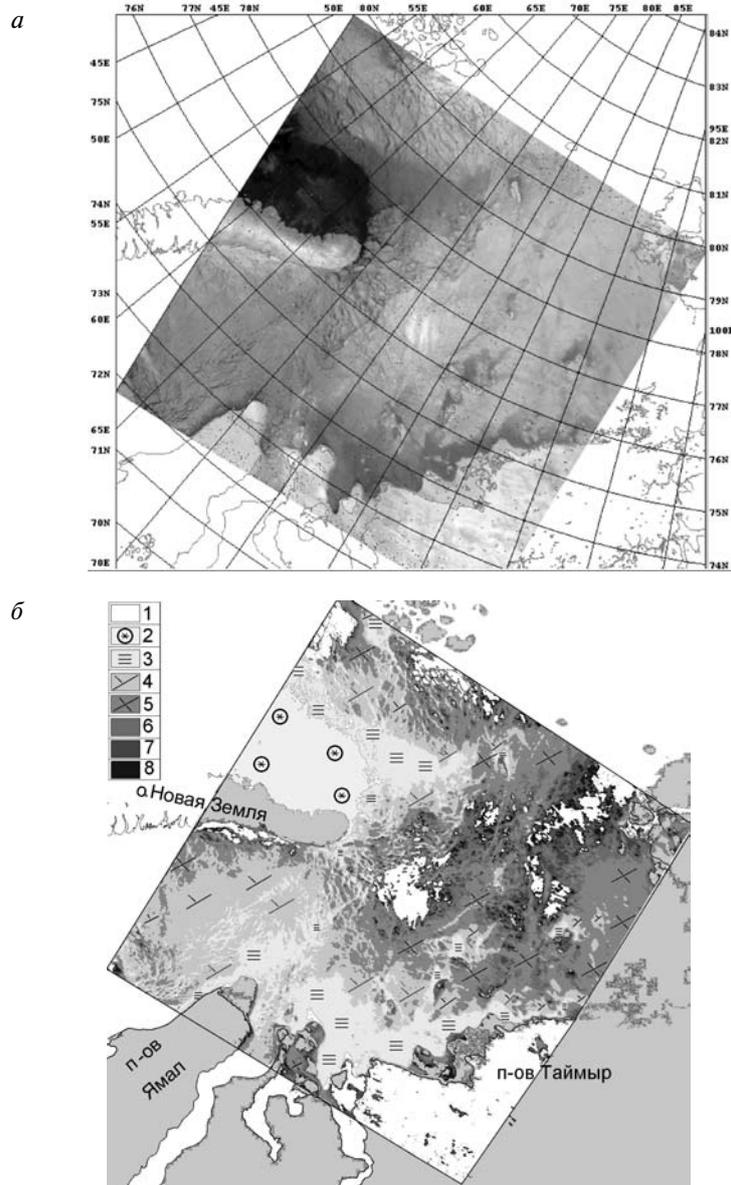


Рис. 2. Возрастные градации льда по результатам классификации ИК-канала AVHRR/NOAA, 22 декабря 2005 г.:

а) исходное изображение AVHRR/NOAA; б) классифицированное изображение

1 – облачность; 2 – нилас, менее 10 см толщиной; 3 – молодой лед, 10–30 см; 4 – тонкий однолетний лед 1-й стадии, 30–50 см; 5 – тонкий однолетний лед 2-й стадии, 50–70 см; 6 – средний однолетний лед 1-й стадии, 70–90 см; 7 – средний однолетний лед 2-й стадии, 90–110 см; 8 – однолетний толстый лед 1-й стадии, 110–130 см

Оценка точности оценки толщин льда по спутниковым ИК-наблюдениям проводилась с использованием синхронных наблюдений с ледоколов. Погрешность оценки толщины молодых и однолетних тонких льдов составила ± 5 –10 см, а однолетних средних ± 10 –15 см. Возрастные стадии определяются, как правило, безошибочно.

Классифицированные ИК-изображения могут быть использованы при составлении ледовых карт. Так, на композитном снимке, составленном из серии классифицированных ИК-изображений, могут быть проведены границы зон с примерно одинаковыми ледовыми характеристиками. В дальнейшем для каждой зоны автоматически определяется относительное количество льдов каждой возрастной стадии. Правильность автоматической интерпретации оценивается ледовым экспертом.

Определение толщины льда по данным измерений в СВЧ-диапазоне

В микроволновом диапазоне возможности измерения толщины льда в значительной степени зависят от применяемой длины волны и чувствительности радиометра. Так, при рабочей длине волны 21 см максимальная толщина льда, которую можно измерить СВЧ-радиометром, составляет 173 см – при приборной чувствительности $\Delta T = 0,01$ К и 132 см при $\Delta T = 0,1$ К. При рабочей длине волны 2 см максимальная измеряемая толщина льда составляет 27 см для аппаратуры с $\Delta T = 0,01$ К и 21 см – для $\Delta T = 0,1$ К [20]. Толщину льда в микроволновом диапазоне лучше определять с помощью многочастотных СВЧ-радиометров, причем для тонких льдов использовать коротковолновые каналы 8 мм – 5 см, а для толстых льдов – канал 21 см. В настоящее время отладка разработанной модели выполняется с использованием данных измерений самолетных СВЧ-радиометров [20].

Комбинированные методы

В последнее время развиваются методы оценки толщины ледяного покрова с помощью спутниковой альтиметрии – лазеров и радаров-альтиметров. Луч лазера и луч радара обладают различной способностью проникновения в поверхностный слой снега: лазерный сигнал отражается от поверхности снега, а радарный проходит сквозь слой снега (h_s) до поверхности льда. Таким образом, радары-альтиметры измеряют надводную толщину льда, а лазерные альтиметры позволяют измерять расстояния от спутника до верхней границы снежного покрова, находящегося на льду (h_f). Комбинирование этих двух видов измерений позволит более точно оценивать толщину ледяного покрова (h_i). Расчет h_i проводят по уравнению плавучести с учетом плотности морской воды (ρ_w), снега (ρ_s) и льда (ρ_l) [14]:

$$h_i = h_f \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_l} + h_s \frac{\rho_s}{\rho_w - \rho_l}.$$

Основным недостатком радаров-альтиметров является зондирование только в узкой вдольтрассерной полосе и низкое пространственное разрешение (порядка 7 км для радара-альтиметра RA-2), что не позволяет в настоящее время рассматривать радары-альтиметры в качестве источников ледовых данных для решения оперативных задач.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МОНИТОРИНГА МОРСКИХ ЛЬДОВ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В предыдущем разделе статьи были рассмотрены основные виды спутниковых средств наблюдения за морскими льдами и охарактеризованы существующие методики обработки спутниковых данных о ледяном покрове, включая как интерактивные, так и автоматические технологии. В сводной таблице отражены возможности современной спутниковой аппаратуры при определении важнейших параметров морского льда в автоматическом/автоматизированном режиме. Наиболее соответствуют задачам мониторинга морских льдов на ежедневной основе технологии оценки сплоченности и положения кромки льдов по данным СВЧ-радиометрии.

К сожалению, приборы этого типа имеют пока недостаточное для многих приложений пространственное разрешение. Самыми информативными являются приборы активной локации — радары; они позволяют определять наибольшее число параметров ледяного покрова (табл. 1), причем круглогодично и при любых облачных условиях. Данные видимого диапазона, напротив, обладают весьма ограниченной применимостью, особенно в арктических морях, ввиду невозможности проведения съемки в темное время года. Данные ИК-диапазона представляют хорошие интерпретационные возможности при мониторинге льдов в зимний период; этот диапазон предпочтителен для разработки технологий оценки толщины льда.

Таблица иллюстрирует только аппаратные возможности и наличие необходимых технологий обработки данных. Реальное использование тех или иных спутниковых средств для мониторинга морских льдов зависит также от экономических факторов, от доступности спутниковой информации конкретным потребителям. Собственно экономические факторы и определяют целесообразность использования данных различных ИСЗ для целей мониторинга ледяного покрова. Так, высокая стоимость информации радиолокаторов типа RADARSAT препятствует широкому использованию данных этого вида для целей мониторинга. Ряд ледовых служб мира используют радарную информацию дозированно, не в режиме мониторинга, а сообразуясь с имеющимися фондами для закупки спутниковых данных и конкретными заказами клиентов. Страны, не имеющие собственных радиолокационных ИСЗ (а к таким в настоящее время относится и РФ), вынуждены приобретать информацию у зарубежных коммерческих фирм через посредников; причем практикуется система предварительного заказа снимков с заблаговременностью 3 и более суток. Подобное положение приводит к нецелесообразности использования коммерческих радиолокационных снимков для целей регионального мониторинга льдов, и экономически, и ситуационно. Оправданным применение радиолокационных снимков следует считать в чрезвычайных ситуациях на море, когда есть непосредственная угроза безопасности людей либо угроза крупных экологических катастроф.

В настоящее время для мониторинга льдов наиболее подходят оперативные ИСЗ, информация с которых поступает потребителям без ограничения, в режиме непосредственной передачи. К таким спутникам относятся, в частности, американские ИСЗ с аппаратурой видимого и ИК-диапазонов серии NOAA/AVHRR и Terra (Aqua)/MODIS. Спутники NOAA на сегодняшний день наиболее широко используются национальными ледовыми службами при подготовке информационных продуктов о состоянии ледяного покрова.

В то же время делать ставку в организации мониторинга льдов только на зарубежные спутники нецелесообразно, так как политика иностранных государств — владельцев информации в отношении предоставления спутниковых данных другим странам может меняться в соответствии с их государственными интересами. Поэтому для России так важно восстановить собственную орбитальную группировку, и определенные шаги в этом направлении предпринимаются.

Осуществленный 17 сентября 2009 г. запуск российского космического аппарата «Метеор-М» ознаменовал окончание многолетнего периода отсутствия в околоземном пространстве российской космической группировки метеорологических спутников. В настоящее время информация, получаемая с указанного спутника, уже используется для решения ряда природоресурсных задач, а данные бортового спектрофотометра с пространственным разрешением 60 м смогут быть использованы для изучения тонкоструктурных особенностей строения морского ледяного покрова. Также готовится второй спутник серии «Метеор», запуск которого запланирован на 2011 г. Вся же российская группировка метеоспутников будет состоять из трех аппаратов, причем третий планируется оборудовать радиолокатором с активной фазированной решеткой с очень высоким пространственным разрешением, порядка 1 м.

В соответствии с федеральной космической программой в период до 2015 г. будет завершена реализация мероприятий по вводу в эксплуатацию Многоцелевой космической системы (МКС) «Арктика». Система будет состоять из двух космических аппаратов (КА) «Арктика-М», функционирующих на высокоэллиптических орбитах типа «Молния» с периодом обращения 12 часов, и двух космических аппаратов «Арктика-Р», запускаемых на низких околополярных орбитах и оснащенных радиолокаторами с синтезированной апертурой. Подсистема «Арктика-М» позволит осуществлять непрерывный мониторинг окружающей среды Арктики, включая наблюдения за состоянием ледяного покрова в видимом и инфракрасном спектральных диапазонах. Также КА «Арктика-М» будут оснащены бортовой аппаратурой точного определения положения в навигационном поле ГЛОНАСС-GPS и радиотехническими средствами для передачи данных наблюдения непосредственно на наземные станции приема НКПОР-АРКТИКА.

Построение подсистемы «Арктика-Р» будет оптимизировано по критерию приоритетного наблюдения арктического региона. При этом будут обеспечены:

- режимы радиолокационной съемки: обзорный, детальный, маршрутный, наблюдения морских судов;
- разрешение в обзорных режимах от 50 м при ширине полос захвата 150 км до 500 м при ширине полос захвата 800 км;
- разрешение в детальном режиме до 1 м – при размере районов съемки не менее 10×10 км² и до 5 м при размере районов съемки не менее 50×50 км²;
- разрешение при маршрутной съемке 3–6 м на маршруте с шириной полосы захвата 30 км и длиной до 4000 км;
- погрешность определения координат объектов без использования опорных точек местности и другой независимой информации о текущих координатах транспортного средства или стационарного объекта, идентифицируемого на радиолокационном снимке, – не хуже 500 м;
- режим непосредственной передачи на наземные центры и в режим записи информации в бортовой накопитель для последующей передачи на НКПОР-АРКТИКА.

Необходимо отметить, что имеющиеся методы экспертной интерактивной интерпретации спутниковых изображений и разрабатываемые методы объективной оценки параметров морского ледяного покрова по данным спутниковых измерений после соответствующей адаптации смогут быть использованы для обработки данных наблюдений МКС «Арктика».

Перспективы развития технологий мониторинга морских льдов зависят также от степени разработанности ледовых моделей, позволяющих прогнозировать краткосрочные и долгосрочные изменения параметров ледяного покрова (в том числе модели дрейфа льда, дрейфа айсбергов, нарастания толщин льда и пр.). В моделях должна быть предусмотрена возможность усвоения спутниковых данных. Прогностический блок должен стать полноценной составляющей технологии мониторинга морских льдов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обладая обширными арктическими акваториями, Россия должна иметь собственные технические средства для обеспечения контроля этих пространств. Спутниковый блок системы наблюдений должен включать развитую орбитальную группировку метеорологических и природоресурсных ИСЗ, обязательным компонентом которой должен быть многополяризационный радар. Наличие необходимых средств мониторинга высокоширотных районов – это вопрос суверенитета, важнейший вопрос государственной политики в Арктике. Одним из практических шагов при решении этого вопроса могла бы стать организация единой национальной Ледовой службы РФ. В настоящее время такой единой службы нет, а ее функции

выполняют несколько учреждений, зачастую имеющих различные подходы к организации спутникового мониторинга льдов и разные стандарты обработки спутниковых данных. Одной из задач Ледовой службы могла бы стать подготовка ледовых экспертов в области интерпретации спутниковой информации — подготовка специалистов по единым программам и в соответствии с едиными квалификационными требованиями на специализированных курсах. Как показал анализ существующих технологий обработки спутниковых данных, интерактивные методы интерпретации по-прежнему занимают ведущее место. В обозримом будущем такая ситуация сохранится. Поэтому понятно, какое значение приобретает квалификация ледового эксперта. Для решения задач мониторинга необходимо обеспечить сопоставимость результатов дешифрирования спутниковой информации, проведенного различными экспертами, минимизировать роль субъективного фактора.

Работа, проведенная российскими разработчиками комической техники в последние годы, позволяет с оптимизмом смотреть на возможность реализации спутникового мониторинга ледяного покрова с помощью отечественных ИСЗ. МКС «Арктика» должен стать важной составной частью системы мониторинга ледяного покрова и в сочетании с другими техническими и аналитическими средствами позволит обеспечить информационную безопасность Российской Федерации в таком стратегически важном регионе, как Арктика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров В.Ю., Лоцилов В.С. Количественная интерпретация спутниковых радиолокационных изображений морских льдов с использованием априорных данных // Исследование Земли из космоса. 1985. № 3. С. 28–31.
2. Александров В.Ю., Лоцилов В.С., Терентьев И.В. Оценка возможности автоматизированного определения характеристик разрывов в ледяном покрове по спутниковым радиолокационным изображениям // Исследование Земли из космоса. 1989. № 3. С. 12–17.
3. Александров В.Ю., Пиотровская Н.Ю. Оценка УЭПР морских льдов разного возраста по радиолокационным изображениям спутника ENVISAT // Исследования Земли из космоса. 2008. № 4. С. 3–11.
4. Александров В.Ю., Пиотровская Н.Ю. Цифровая обработка РСА-изображений морских льдов спутника ENVISAT // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 1(78). С. 90–94.
5. Бушуев А.В. Развитие и совершенствование системы и методов ледовых наблюдений // Проблемы Арктики и Антарктики. 1991. Вып. 66. С. 170–183.
6. Бушуев А.В. Сбор, обработка и анализ данных по льду // Морской лед: Справочное пособие. СПб.: Гидрометеиздат, 1997. С. 317–386.
7. Бушуев А.В., Быченков Ю.Д. Исследование распределения и динамики морских льдов по телевизионным снимкам ИСЗ «Метеор», 1978: Временная инструкция. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 132 с.
8. Бушуев А.В., Быченков Ю.Д., Лоцилов В.С., Масанов А.Д. Исследование ледяного покрова с помощью радиолокационных станций бокового обзора (РЛС БО): Методическое пособие. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 120 с.
9. Бушуев А.В., Лоцилов В.С., Смирнов В.Г., Щербаков Ю.А. Спутниковый мониторинг ледяного покрова // Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами: сборник докладов второй всероссийской научной конференции. Санкт-Петербург, РГГМУ, 16–18 июня 2004 г. СПб., 2004. Т. 2. С. 42–47.
10. Лоцилов В.С., Парамонов А.И. Определение и картографирование толщины морского льда в Арктике по спутниковым изображениям в ИК-диапазоне // Исследование Земли из космоса. 1997. № 5. С. 63–72.
11. Abreu R.D. RADAR Sea Ice Signatures: An Operational Primer // Proceedings of a workshop on mapping and archiving of sea ice data — the expanding role of radar. Ottawa, Canada, 2–4 May 2000. WMO/TD № 1027. P. 85–94.

12. *Clausi D.A.* Texture Analysis of SAR ICE Imagery Using MRFs // Proceedings of a workshop on mapping and archiving of sea ice data – the expanding role of radar, Ottawa, Canada, 2–4 May 2000, WMO/TD-№ 1027. P. 287–292.
13. *Comiso J.C.* SSMI ice concentrations using the Bootstrap Algorithm. NASA Report № 1380. 1995. 50 p.
14. *Connor L. N., Laxon S.W., Ridout L.R. et al.* Comparison of Envisat radar and airborne laser altimeter measurements over Arctic sea ice // Remote Sensing of Environment. 2009. Vol. 113. Issue 3. P. 563–570.
15. *Gronvall H., Seina A., Simila M.* The Finish Ice Service and Real-Time Automatic Classification of SAR Data // Nordic Space Activities. 1996. Vol. 4. P. 28–29, 33–35.
16. *Fily M., Rothrock D.A.* Sea ice tracking by nested correlation // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1987. Vol. 25. № 5, P. 570–580.
17. *Hara Y., Atkins R.G., Shin R.T. et al.* Application of Neural Networks to Radar Image Classification // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1994. Vol. 32. № 1. P. 100–109.
18. *Haverkamp D., Son L.K. Tsatsoulis C.* A Comprehensive, Automated Approach to determining Sea Ice Thickness from SAR data // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 1995. Vol. 33. № 1. P. 46–57.
19. *Sun Y.* A new correlation technique for ice motion analysis // EARSeL Advances in Remote Sensing. 1994. Vol. 3. № 2. P. 57–63.
20. *Ji Y., Zhang J., Meng Y.* ABMR ice thickness model and its application to Bohai Sea in China // Progress in Electromagnetic Research. 2007. Vol. 76. P. 183–194.

*V.G.SMIRNOV, A.V.BUSHUEV, I.A.BYCHKOVA,
N.YU.ZAKHVATKINA, V.S.LOSCHILOV*

SATELLITE MONITORING OF THE SEA ICE

Objective methods for sea ice monitoring with the use of satellite data in the various spectral ranges are considered. The ambiguity of the interactive methods of sea ice charting is pointed out. The conclusion about the lack of the reliable algorithms for satellite data automatic processing which could be applied for operational work is drawn. The capabilities of the existing satellite sensors for determination of the main sea ice cover parameters are analyzed. The evaluation of methodical errors related to the determination of sea ice cover characteristics using satellite data is presented. Perspectives of the use of the Russian satellites for sea ice monitoring are considered.

Key words: Satellite, infrared, microwave spectral ranges, satellite radar, objective methods for ice charting, sea ice, ice concentration, stage of development, ice drift, ice thickness, method of neural network.