

Развитие методики и алгоритма классификации морских льдов по толщине на спутниковых инфракрасных (ИК) изображениях

А.В. Бушуев, В.С. Лошилов, А.В. Григорьев, С.Н. Буланов,
В.Г. Смирнов, Ю.А. Щербаков

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

Представляются разработанные алгоритмы определения толщины ледяного покрова с использованием спутниковой информации в инфракрасном спектральном диапазоне. Для повышения качества оценок алгоритмы предусматривают использование данных регулярных наземных наблюдений и измерений на сети береговых метеорологических станций. Описывается использованная физическая модель. Приводятся результаты валидации получаемых данных по толщине ледяного покрова.

Ключевые слова: морской лед, толщина льда, спутниковая информация, количественная классификация инфракрасных изображений морских льдов, ледовая обстановка, оперативные информационные продукты.

Введение

Основным источником оперативной информации о ледовой обстановке на трассе СМП являются спутниковые данные, получаемые в различных спектральных диапазонах. Отсутствие в течение ряда лет российских исследовательских и метеорологических спутников вынуждает использовать данные зарубежных спутников.

В первую очередь используются многоканальные данные в оптическом диапазоне спектра с американских спутников серии NOAA и TERRA, которые работают в режиме непосредственной передачи и свободного доступа. Как известно, данные радиолокационных спутниковых систем высокого разрешения являются наиболее предпочтительными для оперативного мониторинга морских льдов, ветра, волнения, так как практически не зависят от условий погоды и естественной освещенности. Такие зарубежные спутники (европейский Envisat-1, канадский RADARSAT_2, американский QuikSCAT и другие) находятся в активном состоянии и принципиально их данные могут быть использованы для исследовательских целей, подготовки информационных продуктов для обеспечения судоходства и другой практической деятельности на арктических морях.

В рамках данной статьи были продолжены работы по развитию методики и технологии автоматизированной классификации спутниковых данных в инфракрасном диапазоне спектра как для мониторинга состояния ледяного покрова арктических морей, так и создания оперативных информационных продуктов. Изложены результаты исследований по развитию методики и алгоритмов классификации инфракрасных спутниковых изображений по стадиям развития (толщине), морских льдов. Также изложены результаты работы по использованию метеорологических наблюдений за снежно-ледяным покровом на наземных прибрежных станциях для повышения точности классификации спутниковых изображений.

Общее состояние системы мониторинга морских льдов по спутниковым данным

Основным источником оперативной информации о ледовой обстановке на трассе СМП и замерзающих морях России являются, как известно, спутниковые данные получаемые в различных спектральных диапазонах. Отсутствие в течение ряда лет группировки российских метеорологических спутников, вынуждает использовать данные зарубежных спутников. В первую

очередь используются многоканальные данные в оптическом диапазоне американских спутников серии NOAA, которые работают в режиме непосредственной передачи и свободного доступа, а также новый спутник TERRA, который оснащен 36 канальным спектрорадиометром MODIS оптического диапазона и имеет каналы относительно высокого разрешения (250 м). Приемный пункт ААНИИ – центр «Север» (в С.-Петербурге) оснащен соответствующей аппаратурой для приема данных этих спутников. Данные с недоступных для С.-Петербурга орбит центр получает от других российских приемных пунктов по каналам наземной связи или системе Интернет.

Данные радиолокационных спутниковых систем высокого разрешения, как известно, являются наиболее предпочтительными для оперативного мониторинга морских льдов, так как их качество практически не зависят от условий погоды и естественной освещенности. Такие зарубежные спутники как Envisat-1, QuikSCAT находятся в активном состоянии и принципиально их данные могут быть использованы и периодически используются. Поэтому, чтобы исключить информационную зависимость от зарубежных ледовых центров и служб, в рамках проектов 2006 – 2008 годов, была разработана первая версия технологии составления векторных цифровых ледовых карт по изображениям радиолокационных спутников. Были продолжены работы по развитию методики и алгоритмов автоматизированной интерпретации спутниковых изображений, определения количественных параметров состояния ледяного покрова, а также программного обеспечения процедур составления ледовых карт и других информационных продуктов.

При составлении оперативных ледовых карт по спутниковым изображениям (как в отечественных, так и в зарубежных ледовых службах) пока используется интерактивный режим с экспертным анализом спутниковых изображений и визуальной оценкой параметров ледяного покрова (возраст, сплоченность). Если эксперт допустит субъективную погрешность определения, например, общей сплоченности льда в выделенной зоне (а она может достигать $\pm 2 - 3/10$), то на эту погрешность будут наложены искажения за счет естественного непрерывного изменения ледовой обстановки во времени. И чем больше интервал времени между моментом приема спутникового изображения и моментом получения готового информационного продукта потребителем, тем меньше он будет соответствовать реальной картине. Поэтому наибольшую актуальность в настоящее время имеет разработка быстрых автоматизированных процедур количественного определения толщины и сплоченности льда. Эти параметры определяют проходимость и время движения судов во льдах, являются основной исходной информацией для краткосрочных прогностических расчетов изменений в ледовой обстановке и выбора оптимального маршрута плавания во льдах.

Развитие методики и алгоритмов классификации морских льдов по возрасту (толщине) на спутниковых инфракрасных (ИК) изображениях

Физическая модель, методика и технология классификации морских льдов были разработаны в 1980-х годах прошлого века и с различными дополнениями и уточнениями были опубликованы в ряде российских изданий [1–4]. Однако широкое применение технологии сдерживалось, помимо естественных ограничений (наличием облачности) еще и рядом методических неоднозначностей, связанных с оперативным использованием данных регулярных наземных измерений параметров атмосферы, снега и льда на сети береговых метеорологических станций.

Новая версия технологии классификации и картографирования толщины льда по спутниковым изображениям в инфракрасном диапазоне основана на сочетании физической модели процессов нарастания льда и данных регулярных наземных измерений на сети береговых метеорологических станций. В настоящее время технология проходит стадию практических проверок, испытаний и доработки ряда модулей программного обеспечения и поэтому считаем целесообразным воздержаться от детального ее изложения в данном промежуточном варианте. Некоторые уточнения физической модели и технологии были представлены на Шестой

всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Москва, ИКИ РАН, 10 – 14 ноября 2008 г.).

Совершенствование и проверка технологии проводилась на ИК изображениях морских льдов Татарского пролива в зимние периоды (декабрь – март) 2007 – 2009 гг. Использовались пятиканальные изображения радиометра AVHRR спутников NOAA, которые имеют свободный доступ, регулярно принимались на острове Сахалин и сохранялись на сайте приемного пункта.

Важной причиной для выбора этого района были регулярные рейсы ледокола «Красин» для проводки танкеров с нефтью из бухты Де-Кастри до южной кромки льдов в Татарском проливе и обратно. На ледоколе работал специалист института, который выполнял измерения и детальное описание характеристик льда по трассе движения. Свои отчеты по каждому рейсу он был обязан без промедления отправлять в институт. Таким путем имитировался оперативный контроль результатов классификации толщины льда по спутниковым данным, которые пока могут быть получены только в институте.

На рисунке 1 представлен пример результатов классификации возраста (толщины) льда на ИК изображении AVHRR спутника NOAA-15.

В соответствии с принятой технологией, классификация выполнялась по равновеликим диапазонам толщины льда, равным 20 см. Исключением является диапазон самого тонкого льда – ниласа, толщина которого не превышает 10 см. Цифровое значение средней толщины каждого класса льда является его цифровым идентификатором (для ниласа идентификатор, в порядке исключения, равен 10 см.)

Далее – молодой лед – от 10 до 30 см при среднем значении 20 ± 10 см, которое является средним значением толщины льда в диапазоне и идентификатором молодого льда.

Примечание: Система цифровых идентификаторов в процессе классификации дублирует условную палитру класса толщины льда. При наведении курсора на любой элемент области классифицированного изображения программа вызывает на экране появление всплывающего цифрового идентификатора толщины льда, например, «Ice 20».

Диапазон толщины льда 30 – 50 см., который классифицируется согласно номенклатуре ВМО как тонкий однолетний лед первой стадии, имеет среднее значение толщины 40 ± 10 см и значение цифрового идентификатора соответственно равным 40 см.

Диапазон толщины 50 – 70 см классифицируется как тонкий однолетний лед второй стадии при среднем значении толщины 60 ± 10 см и значении цифрового идентификатора равном 60 см.

Далее однолетний лед средней толщины первой стадии с диапазоном толщины 70 – 90 см., средним значением толщины 80 ± 10 см и значением цифрового идентификатора равным 80 см.

Диапазон толщины 90 – 110 классифицируется как однолетний лед средней толщины второй стадии, имеет среднее значение толщины 100 ± 10 см и значение цифрового идентификатора, равный 100 см.

Далее диапазон толщины льда от 110 – 130 см. классифицируется как толстый однолетний лед первой стадии со средним значением толщины 120 ± 10 см и цифровом идентификаторе, равном 120 см.

Значение толщины льда более 130 см (без верхней границы диапазона) классифицируется как толстый однолетний лед второй стадии. Обычно на ИК изображениях лед толщиной более 120 – 130 см классифицировать невозможно, поэтому он относится к классу однолетнего толстого льда второй стадии, т.е. толщиной более 130 см. и ему, по аналогии, может быть присвоена средняя толщина 140 ± 10 см и цифровой идентификатор 140 см.

Здесь необходимо заметить, что в официальном документе ВМО не выделено классов толщины (стадий развития) морского льда таких как однолетний лед средней толщины первой и второй стадии, а также толстого однолетнего льда первой и второй стадии развития [5]. Однако в данном случае это отклонение не является игнорированием рекомендации международного документа. Речь идет лишь о детализации принятых ранее граничных значений классов развития (толщины) морского льда на основе вновь появившихся «инструментальных» способах количественных измерений.

Умышленное совпадение цифровых значений средней толщины льда в диапазонах, по которым выполнялась классификация и цифровых значений идентификаторов существенно упрощает визуальный контроль и анализ результатов классификации, а также процедур автоматизированного ввода полученных данных о толщине льда в узлы регулярной сетки расчетных или прогностических моделей.

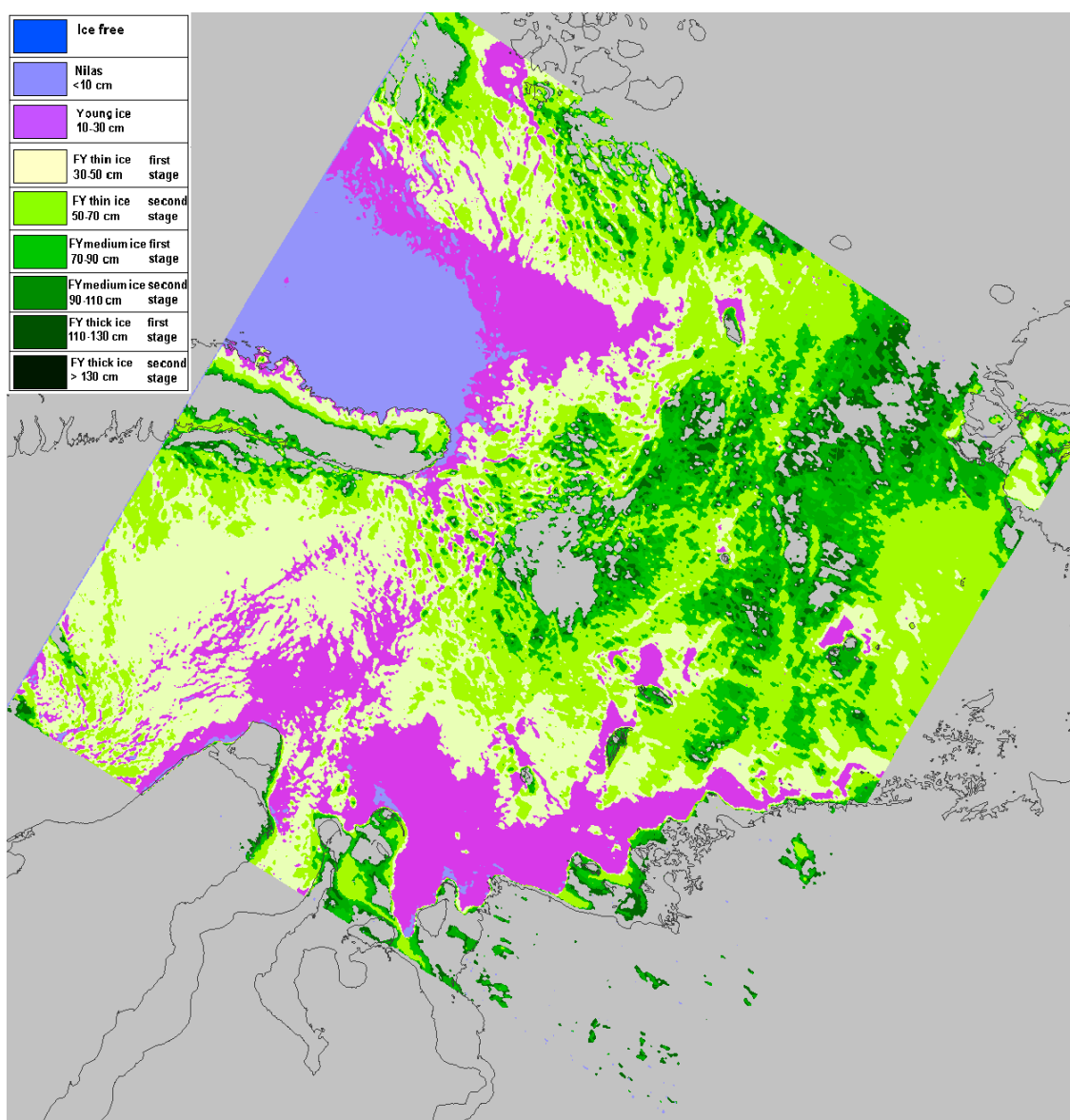


Рис. 1. Классифицированное по возрасту (толщине) льда спутниковое ИК изображение (22.12.2005; 12:48 GMT; AVHRR NOAA 15; канал 4)

Методика и алгоритмы классификации толщины (возраста) льда по ИК изображениям

Методика и алгоритм классификации ИК изображений по толщине льда включает следующие процедуры:

1) Создается программно управляемая и ежедневно пополняемая база данных регулярных измерений толщины льда, высоты снега на льду и температуры воздуха на береговых метеорологических станциях.

2) Ежедекадная подготовка рабочей классификационной таблицы для граничных значений толщины льда и соответствующих безразмерных параметров по данным измерений на береговых метеорологических станциях.

3) Выбор и вырезка фрагмента ИК изображения с полным отсутствием или минимальным количеством помех от облачного покрова. Все измерения уровней яркости выполняются на инфракрасных изображениях в 10 битовом формате.

4) Географическая привязка изображения по орбитальным данным, наложение береговой линии, уточнение географической привязки по изображению береговой линии.

5) Измерение значений яркости изображения «реперных» точек. «Реперные» точки являются постоянными, выбираются на поверхности суши, располагаются вблизи береговых метеорологических станций и имеют неизменные географические (прямоугольные) координаты. Для более равномерного и плотного покрытия акватории моря, выбираются дополнительные «реперные» точки, на относительно низменных островах или прибрежных участках материка независимо от наличия там метеорологических станций. Общее количество «реперных» точек, например для Карского моря, может быть около 20. Значения яркости поверхности суши на ИК изображении, как показали экспериментальные исследования, практически равны яркости «толстого» льда и могут быть использованы для определения безразмерного параметра Q , необходимого для процедур классификации. Особенно это важно для периодов года или акваторий, когда / где «толстый» лед еще отсутствует или образуется по климатическим условиям.. Измеренная яркость «толстого» льда в большом числе точек необходима для более корректной интерполяции и определения значения яркости в каждом элементе (пикселе) изображения, т.е. для создания виртуального растрового изображения значений яркости «толстого» льда.

6) Выполняется интерполяция значений яркости «реперных» точек в сглаженное поле непрерывных значений яркости по всему изображению с сохранением измеренных значений в «реперных» точках. Для выполнения этой функции может быть использован программный модуль INTERPOL (в пакете IDRISIW). Этот модуль по имеющемуся векторному файлу точек, в которых идентификаторами являются яркости, интерполирует всю поверхность в соответствии со взвешенным по расстоянию средним или с потенциальной моделью. В том и другом случае экспонента, связанная с весом расстояния, определяется пользователем.

7) Выполняется процедура вычитания яркости открытой воды при температуре замерзания (в примерах яркость A_w была определена = 617) из яркости каждого пикселя исходного классифицируемого изображения и из яркости каждого пикселя виртуального изображения поля яркости «толстого» льда. A_t .

8) Далее выполняется процедура деления яркости каждого пикселя исходного изображения на яркость соответствующего пикселя виртуального изображения «толстого» льда. Практически выполняется операция деления исходного изображения на виртуальное изображение. Результатом является файл с числовым значением безразмерного параметра (Q) для каждого пикселя обрабатываемого изображения. Результирующий файл используется для определения пространственного положения границ определяемых стадий развития (толщины) льда в процедуре классификации изображения.

9) Подготавливается рабочая классификационная таблица, в которой по данным ежедекадных измерений на береговых станциях толщины льда, высоты снега на льду, а также по результатам теоретических и экспериментальных исследований вычисляется безразмерный параметр (Q) для граничных значений толщины льда определяемых возрастных стадий развития (толщины) льда. Классификационная таблица составляется на начало каждой декады и действительна до конца текущей декады, так как ледовые наблюдения на метеорологических прибрежных станциях выполняются один раз в декаду. Пример такой таблицы представлен ниже (таблица 1).

10) Выполняется процедура так называемой реклассификации изображения содержащего значения безразмерного параметра Q с тем, чтобы определить на изображении положение граничных значений диапазонов толщины каждой возрастной стадии льда и ввести соответствующие цифровые идентификаторы. Эта процедура может быть выполнена при поддержке специализированного программного модуля RECLASS (в пакете IDRISIW) по схеме, представленной в таблице 1.

Таблица 1. Классификационная таблица ИК изображений NOAA-15 на период 20–31 декабря 2005 года

Стадия развития однолетнего морского льда	Диапазон толщины, см	Идентификатор ID	Нп, см	Н, см	Нрп, см	Q	Код RGB заливки
Льда нет		0	0	0	0	0	000-100-255
			0				
Нилас	0 - 10	10	10	0	12	0.401	240-180-250
			10				
Молодой лед	10 – 30	20	30	1	35	0.655	170-040-240
			30				
Тонкий 1 стадии	30 – 50	40	50	2	65	0.790	235-255-190
			50				
Тонкий 2 стадии	50 – 70	60	70	5	104	0.906	175-250-000
			70				
Средний 1 стадии	70 – 90	80	90	6	130	0.940	020-200-020
			90				
Средний 2 стадии	90 – 110	100	110	8	169	0.968	020-180-020
			110				
Толстый 1 стадии	110 - 130	120	130	12	209	0.984	000-120-000
			130				
Толстый 2 стадии (более 130 см)	> 130	140					180- 180-050

Примечания: 1 Нп – граничные значения толщины льда для возрастных стадий, в см;
2 h – высота снега на льду, в см: $h = (Нрп - Нп) / 7 + 0,5$;
3 Нрп – преобразованная (теоретическая) толщина льда, соответствующая границам возрастных стадий;
4 Q – безразмерный параметр (определяется для граничных значений толщины каждой возрастной стадии);
5 ID – идентификаторы = средней толщине льда в диапазонах (Н льда = ID ± 10 см, за исключением стадии – нилас)

Изображение, полученное после реклассификации по представленной в таблице 1 схеме, является подобием набора плоских пластин разной толщины с шагом по толщине через 20 см. Яркость каждой «пластины» соответствует цифровому идентификатору и численно равна средней толщине возрастной стадии льда ± 10 см (вторая и третья колонки в таблице 1).

Заключительным шагом является цветовая заливка изображения по стадиям развития (толщине) льда в соответствии с рекомендацией ВМО для морских ледовых карт. В этой процедуре допущено некоторое отклонение от стандарта ВМО, но сохранен общий принцип «утяжеления» зеленого тона палитры с увеличением толщины льда (см. рис. 1).

Таблица 2. Схема реклассификации изображения значений безразмерного параметра Q для определения пространственного положения граничных значений толщины льда соответствующих возрастным стадиям

Всем величинам Q на изображении		Присваивать новые величины яркости (цифровые идентификаторы)
От:	До, но меньше чем:	
0,0	0,401	10
0,401	0,655	20
0,655	0,790	40
0,790	0,906	60
0,906	0,940	80
0,940	0,968	100
0,968	0,984	120
0,984	1,784	200 (толщина >130 см)

Варианты использования классифицированных по толщине льда ИК изображений для оперативного информационного обеспечения практической деятельности

Классифицированные по возрасту (толщине) льда спутниковые изображения, полученные в инфракрасной части спектра, могут быть использованы для создания целой серии информационных продуктов.

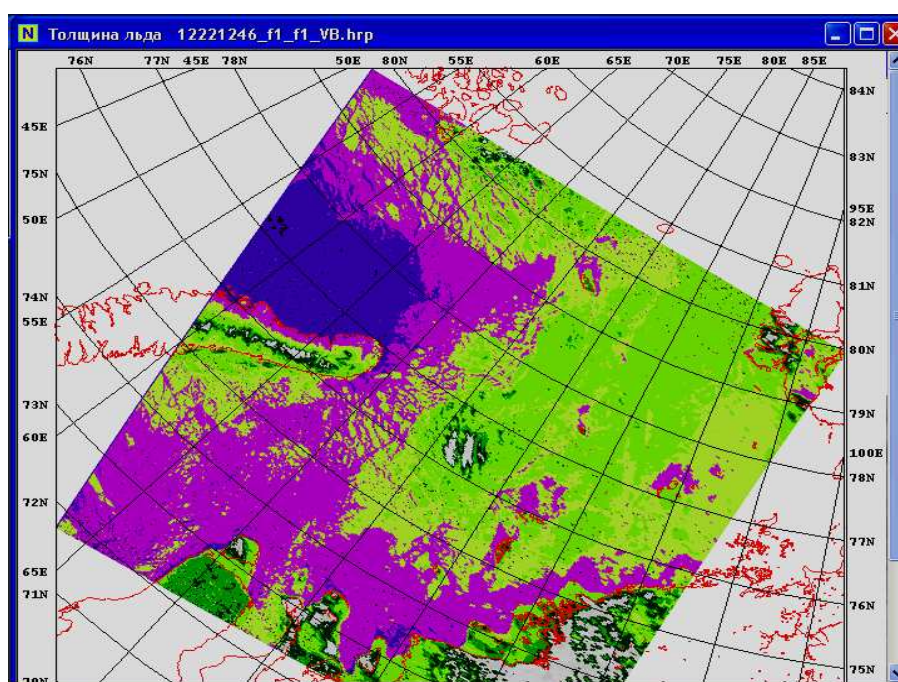


Рис. 2. Классифицированное ИК изображение в стереографической проекции с наложенной координатной сеткой

Во-первых, классифицированное растровое изображение представляет собой карту (фотокарту) в стереографической проекции или проекции Меркатора. На изображение наложена географическая координатная сетка, береговая линия и основные географические пункты. Изображение может быть представлено в виде распечатки на бумажной основе или отображено на экране любой дисплейной системы без ухудшения разрешающей способности и искажений в цветовой заливке. Классифицированное изображение легко поддается визуальному анализу,

позволяет видеть и понимать предшествующие динамические процессы в ледяном покрове, а также существенно упрощает реалистичную оценку ледовой обстановки при планировании или обеспечении любой другой практической деятельности (пример на рисунке 2).

Во-вторых, при составлении ледовых карт по предварительно классифицированным инфракрасным изображениям существенно снижаются субъективные ошибки выделения экспертом границ однородных по возрастному составу ледовых зон, а главное, исключаются ошибки оценки частной сплоченности льдов разного возраста в выделенных зонах. Частная сплоченность с точностью до 1% может быть оперативно определена по результатам анализа гистограммы яркости изображения в выделенной зоне, как представлено на рисунке 3. Гистограмма реклассифицированного изображения имеет вид регулярных вертикальных линий через 20 единиц по оси яркости, а высота линий соответствует относительной площади элементов изображения с этой яркости в выделенной зоне. При совмещении курсора (обычно в виде креста) с той или иной линией гистограммы в таблице справа индицируется значение яркости (“Value”) относительное количество элементов с этим значением яркости (“In range”) с точностью до десятых процента.

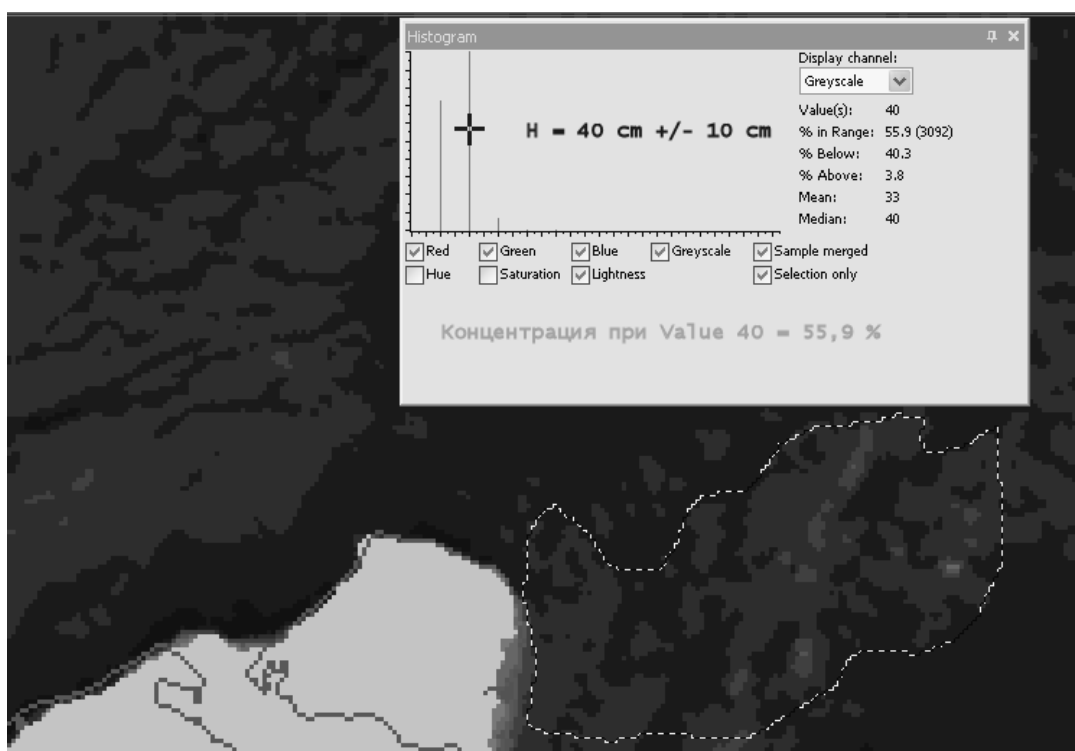


Рис. 3. Пример определения частной сплоченности льда различных возрастных стадий на классифицированном изображении (на рисунке сплоченность тонкого льда первой стадии, толщиной 30 – 50 см, в выделенной зоне составляет 55,9 %)

Эта процедура упрощается тем, что изображения содержат только 8 возрастных классов, яркость каждого из которых численно равна цифровому значению соответствующего идентификатора, т.е. и среднему значению толщины льда в возрастном классе. Эксперту следует только решить – нужно ли выделять в ледовой зоне на карте более 3 возрастных классов льда, определить их частную сплоченность и какие классы игнорировать (обычно те, частная сплоченность которых не превышает нескольких процентов).

В-третьих, результаты классификации толщины льда на инфракрасном изображении (средние значения толщины для каждой возрастной стадии льда) могут быть представлены в виде цифровых массивов в узлах регулярной сетки с заданным пространственным шагом и координатами. Эта информация необходима для использования данных о толщине льда в

модельных расчетах скорости (времени) движения караванов или отдельных судов для выбора оптимального варианта трассы. Кроме того, данные о толщине льда в узлах регулярной сетки необходима также для прогностических расчетов.

В любом варианте использования результатов классификации ИК изображений по стадиям развития льда достоверность и точность полученных данных существенно выше экспертных оценок. Даже при отсутствии благоприятных погодных условий в течение одной — двух декад, наиболее вероятное нарастание толщины льда в выделенных зонах на последнем качественном изображении можно оценить (рассчитать) по сумме отрицательной температуры воздуха на ближайших береговых метеорологических станциях, а также по сравнительному анализу данных измерений толщины льда на этих станциях.

Для общего представления о результатах классификации ИК изображений морского льда по толщине, ниже представлены примеры для Татарского пролива. Примеры расположены в порядке возрастания времени их выполнения (в период 2007-2009 гг.) и одновременно иллюстрируют последовательное изменение (повышение?) качества дизайна постеров.

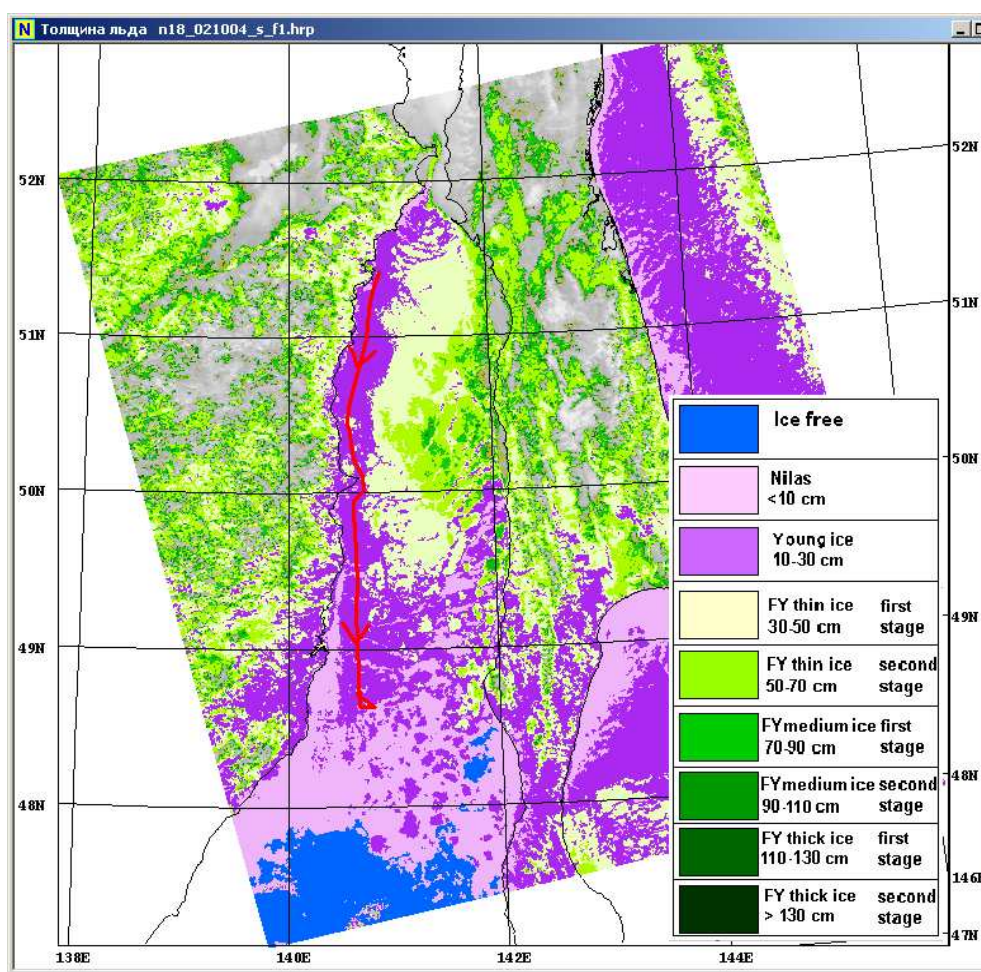


Рис. 4. Результат классификации по толщине льда ИК изображения N18_021004_2008 год. Красная линия — траектория движения ледокола «Адм.Макаров»

В таблице 2 приведено сравнение данных о толщине льда по классификации ИК изображения N18_021004_2008 год и полученных от наблюдателей с борта ледокола «Адм.Макаров». Как очевидно из таблицы, наблюдалось почти полное совпадения классов толщины льда по ИК изображению и оценок наблюдателей с борта ледокола. Наблюдатели на ледоколе давали ряд дополнительных характеристик о состоянии льда.

Таблица 3. Сравнение данных о толщине льда по классификации ИК изображения N18_021004_2008 год и полученных от наблюдателей с борта ледокола «Адм.Макаров»

Данные классификации ИК изображения n18_021004_s_f1.hgr (10.02.2008; 03:40 GMT) по толщине льда и определения толщины льда с борта л/к «Адм. Макаров» (рейс 10/11 февраля 2008, старт 18:50, Татарский пролив, проводка танкера «Капитан Костычев»).						
N п/п	Координаты поворотных точек маршрута		Толщина льда Н по ИК изображению	Толщина льда Н с ледокола	Разность	Примечания: (детальная оценка с борта ледокола)
	φ	λ	Н см	Н см	ΔН	
1	51,43°	140,93°				Start 18:50 GMT 10.02.2008
			10 – 30	<10	?	3/10 наслоенного льда
2	51,30	140,86				
			10 – 30	10 – 30	0	(10–30) = 4/10 + (<10) = 6/10
3	51,24	140,84				
			10 – 30	10 – 30	0	(10–30) = 7/10 + (<10) = 3/10
4	51,20	140,82				
			10 – 30	10 – 30	0	(10–30) = 9/10 + (<10) = 1/10
5	51,16	140,81				
			10 – 30	10 – 30	0	Большие ровные поля.
6	50,98	140,76				
			10 – 30	10 – 30	0	(10–30) = 8/10 + (<10) = 2/10
7	50,90	140,72				
			10 – 30	10 – 30	0	
8	50,55	140,60				
			10 – 30	10 – 30	0	Сжатие -1
9	50,45	140,60				
			10 – 30	10 – 30	0	
10	50,38	140,60				
			10 – 30	10 – 30	0	(10–30) = 8/10 + (<10) = 2/10
11	50,31	140,61				
			10 – 30	10 – 30	0	
12	50,28	140,62				
			10 – 30	10 – 30	0	(10–30) = 7/10 + (<10) = 3/10
13	50,19	140,66				
			10 – 30	<10	?	(<10) = 10/10
14	50,17	140,69				
			(10 – 30)+(<10)	10 – 30	0	(10–30) = 10/10
15	50,11	140,74	(30–50)+(10-30)	(30–50)+(10-30) Траверс Мыса Суркум	0	(30–50)=7/10 + (10–30) = 3/10 Сжатие 2-3, снег 5 см, танкер застрял дважды.
16	50,00	140,73				
			(30–50)+(10-30)	(30–50)+(10-30)	0	(30–50)=7/10 + (10–30) = 3/10
17	50,06	140,75				
			10 – 30	(10 – 30)+(<10)	?	(10–30)=7/10 + (<10)= 3/10
18	49,92	140,65				
			10 – 30	(10 – 30)+(<10)	0	(10 – 30)+ (<10) = 10/10, Сжат-1
19	49,86	140,63				
			10 – 30	10 – 30	0	(10 – 30)= 10/10; наслоен-3
20	49,80	140,64				
			10 – 30	10 – 30	0	(10 – 30) = 9-10/10
21	49,77	140,65				
			10 – 30	10 – 30	0	(10 – 30) = 10/10, сжатие-1
22	49,44	140,67				
			(10– 30) + (<10)	<10	0	(<10) = 9/10
23	49,41	140,67				
			10 – 30	10 – 30	0	(10 – 30) =10/10; сжатие_1, снег-3
24	49,25	140,67				
			(10 – 30)+ (<10)	(10 – 30)+ (<10)	0	(10 – 30) =9/10 + (<10) =1/10
25	48,64	140,66				
26	49,02	140,60	Проводка танкера закончена, подошли к Ванино, легли в дрейф.			

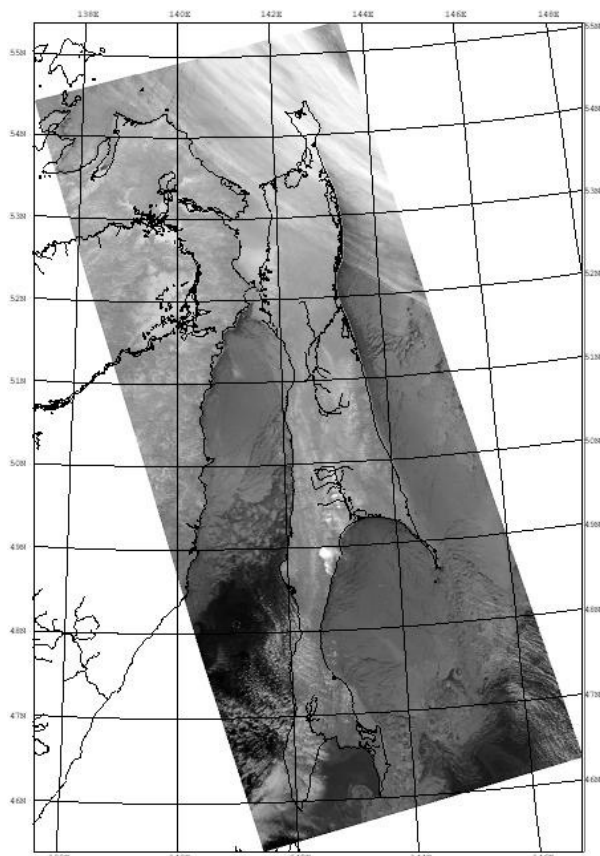


Рис. 5. Исходное ИК изображение от 10 февраля 2009 года (на рис. 6 представлен результат классификации по толщине льда)

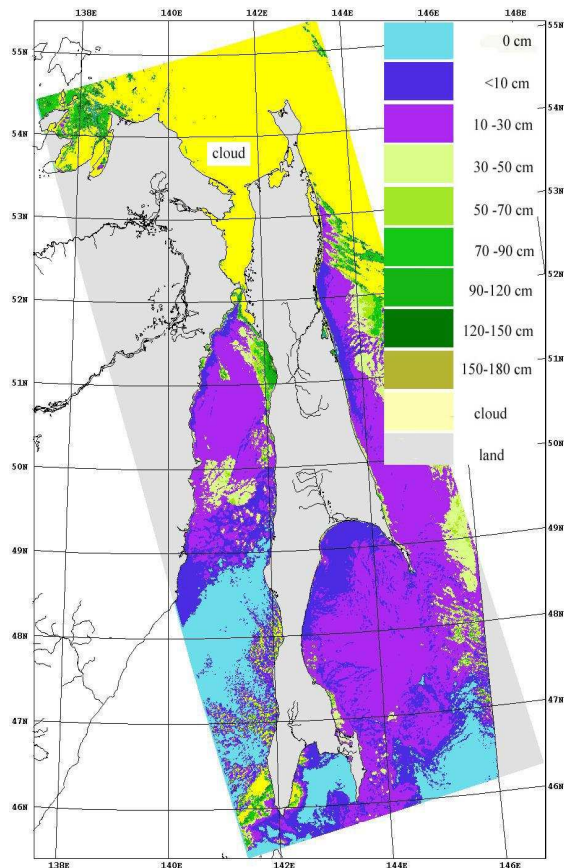


Рис. 6. Результат классификации по толщине льда ИК изображения от 10 февраля 2009 года

Дальнейшие исследования, наряду с практическим использованием технологии, будут направлены на повышение степени автоматизации процедур и оперативности подготовки различных информационных продуктов. Предполагается развитие методик совместного использования для классификации морских льдов инфракрасных и радиолокационных спутниковых изображений высокого разрешения.

Литература

1. Парамонов А.И., Чеботарева В.А. Использование инфракрасных (ИК) аэрокосмических наблюдений арктических морей в навигации и при решении других народнохозяйственных задач // Исследование Арктики, Антарктики и Мирового океана – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – С. 159-169.
2. Богородский В.В., Парамонов А.И. Определение ледовой обстановки полярных морей по результатам радиационных измерений с самолетов и спутников // Тр. Аркт. и антаркт. науч.-исслед. ин-а, 1985. Т. 395. С. 5-17.
3. 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.
4. Парамонов А.И., Лебедев Г.А., Лоцилов В.С. Технология автоматизированного определения толщины морского льда по данным спутникового ИК зондирования // Тр. Аркт. и антаркт. науч.-исслед. ин-а, 2002. Т. 445. С. 40-80.
5. WMO Sea Ice Nomenclature – WMO Report No.259, 1989, 147 pp.). World Meteorological Organization, Geneva.

Development of the algorithms and method for sea ice thickness determination with the use of satellite infrared information

**A.V. Bushuev, V.S. Loshchilov, A.V. Grigoriev, C.N. Bulanov, V.G. Smirnov,
Y.A. Shcherbakov**

Arctic and Antarctic Research Institute, Saint-Petersburg

The developed algorithms for sea ice determination with the use of satellite infrared data are presented. To increase the quality of the calculated ice thickness data the use of ground truth from coastal station is proposed. The physical basic model is described. The results of validation of developed algorithms are presented.

Keywords: sea ice, ice thickness, determination of sea ice thickness, infrared satellite images, ice conditions, operational information products.