

НАБЛЮДЕНИЕ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА С ПОМОЩЬЮ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Захваткина Н. Ю.^{1,2}

¹ ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»
199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, e-mail: piotrovskayan@yandex.ru

² Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена. 199034, Россия, Санкт-Петербург, 14-я Линия В.О., дом 7, офис 49.

Рассмотрены физические основы образования и свойства различных видов морских льдов, а также их дистанционное зондирование в микроволновом диапазоне. Данные о возрасте, наряду со сплоченностью, имеют решающее значение для навигационной оценки ледяного покрова. Особенно важным этот элемент наблюдений является в зимний период, когда преобладает сплошной лед, и возрастные характеристики дают основание судить о его проходимости и пространственно-временной изменчивости. Анализ существующих средств и методов дистанционного зондирования позволил определить, что необходимым и достаточным условием для регулярного получения основных навигационных характеристик морского льда является использование радиолокационных изображений ледяного покрова. Определены возможности и информативность спутниковых радиолокационных изображений морского льда. На основе анализа принципов работы радиолокационных станций показаны пути применения радиолокационных изображений для мониторинга ледяного покрова.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, морской лед, радиолокатор с синтезированной апертурой.

SEA ICE COVER OBSERVATION USING RADAR REMOTE SENSING SYSTEMS

Zakhvatkina N.^{1,2}

¹ Federal State Budgetary Institution "Arctic and Antarctic Research Institute",
38 Bering str., St.Petersburg, Russian Federation, 199397.

² Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre, Vasilievsky Island,
14th Line, 7, office 49N, St.Petersburg, Russia, 199034.

The physical basis of sea ice type formation and properties and their remote sensing in the microwave range are considered. Data about sea ice age and concentration is very important for navigation in ice. In winter these are the most important elements when solid ice is dominated and age characteristics provide a basis to judge about terrain and the spatial and temporal variability of sea ice cover. Analysis of existing techniques of remote sensing allowed to set that the necessary and sufficient conditions for the regular acquisition of the main characteristics of sea ice is using of radar images of the ice cover. The capabilities of satellite radar images for determination of the main sea ice parameters are analyzed. The ways of the radar image applicability for the monitoring of ice cover were shown on the basis of the principles of the radar.

Key words: remote sensing, sea ice, synthetic aperture radar.

Дистанционным зондированием (ДЗ) называют процесс наблюдения, измерения и фиксации энергетических и поляризационных характеристик собственного и/или отраженного при контролируемых условиях излучения элементов суши, океана и атмосферы Земли в различных диапазонах электромагнитных волн [3]. Дистанционное зондирование морских льдов, как и других объектов системы «атмосфера – подстилающая поверхность», осуществляется с использованием физических процессов отражения, рассеяния и поглощения электромагнитного излучения.

Морской лед можно считать сложной поликристаллической смесью, состоящей из чистого льда с включениями рассола и воздуха, как правило, покрытого слоем снега.

Обратное рассеяние такой структуры зависит от многих физических параметров, таких как шероховатости поверхности, солёности, наличия воздушных включений, кристаллической структуры, снежного покрова и других [7].

Отраженный от ледовой поверхности радиолокационный сигнал в значительной степени определяется шероховатостью поверхности в различных масштабах: участки битого льда имеют более высокое обратное рассеяние, чем тот же лед с ровной поверхностью. Многократные отражения от двух или более почти перпендикулярных друг другу поверхностей могут создавать так называемый эффект уголкового рассеяния, который может на порядок увеличить величину отраженного сигнала [6].

Существуют также и региональные особенности, влияющие на величину обратного рассеяния морского льда, которые связаны с упорядоченностью поверхности относительно основной массы дрейфующих льдов.

Основным прямым дешифровочным признаком радиолокационных изображений морского льда является яркость изображения, которая определяется коэффициентом обратного рассеяния поверхности [3]. На основе различий в пространственном распределении рассеянного излучения определяются основные виды льдов.

Гидрометеорологические процессы, вызывающие изменения количества льда в море, по характеру воздействия на процессы ледообразования подразделяются на термические и динамические.

Действие термических процессов приводит к увеличению или уменьшению массы льда путем агрегатного преобразования вода-лед (нарастание или таяние льда), а также к изменению его теплосодержания и солёности, которые приводят к изменению теплосодержания и распределения солёности окружающих вод. Процесс таяния льда происходит в результате поглощения льдом потоков тепла, воздействие которых может быть выражено уравнением теплового баланса.

Действие динамических процессов может приводить к перераспределению массы льда на какой-либо акватории в результате сплочения, разрежения, сжатия и торошения ледяного покрова, а также к изменению этой массы за счет ледообмена с соседними акваториями. Таким образом, оба вида процессов вызывают изменения ледового баланса как на единице площади, так и в море в целом [2].

Обобщение характеристик морского льда, которые можно определить с помощью ДЗ, приведены в таблице 1 [4].

Таблица 1 Обобщенные характеристики морского льда, определяемые по данным ДЗ

Характеристики	Содержание	Классификация определений
----------------	------------	---------------------------

ВОЗРАСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЬДА	Относительное количество льдов каждого возраста в баллах	Сч
ФОРМЫ НЕПОДВИЖНОГО ЛЬДА	Припай, торосистости, заснеженности, разрушенности и т. д., положение основных гряд торосов, барьеров, торосов, стамух и крупных полей многолетнего льда, вмерзших в припай.	ОЛП
ДРЕЙФУЮЩИЙ ЛЕД	Сплоченность, которая оценивается по десятибалльной шкале	Сч
ФОРМЫ ПЛАВУЧЕГО ЛЬДА	Горизонтальные размеры льдов, оцениваемые по соотношению площадей, занимаемых льдами той или иной формы по отношению ко всей площади моря, на которой производится оценка.	ОЛП
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЛЬДА	Перемычка. Ледяной затор. Сплоченная кромка льда. Разреженная кромка льда. Кромка припая, граница припая, граница между льдами различной сплоченности	ОЛП
ДИНАМИКА ДРЕЙФУЮЩИХ ЛЬДОВ	Распływ льда. Зона разрежения. Сжатие льда. Зона сжатия. Подвижка льда. Дрейф льда. Дрейфораздел.	П
ПРОСТРАНСТВА ЧИСТОЙ ВОДЫ СРЕДИ ЛЬДА	Трещина. Приливная трещина. Полоса тертого льда Разводье. Зона разводий. Канал. Прибрежная прогалина, заприпайная прогалина. Прибрежная. Промоина. Заприпайная полынья. Полынья.	ОЛП
ХАРАКТЕРИСТИКА ЛЕДЯНОЙ ПОВЕРХНОСТИ	Обобщенная характеристика в баллах: «Наслоенность», «Торосистость», «Всхолмленность многолетнего льда», «Заснеженность», «Загрязненность».	ОЛП
СТАДИИ ТАЯНИЯ	Разрушенность льда. Снеженицы. Пятна мокрого снега. Лужи на льду. Озерки. Проталина. Обсохший лед. Гнилой лед. Затопленный лед. Водяной заберег.	ОЛП
ЛЕД МАТЕРИКОВОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ	Ледяная стена. Язык ледника. Шельфовый ледник. Ледяной барьер. Айсберг. Разрушающийся айсберг, ледяной дрейфующий остров.	ОЛП

В таблице обозначены: П – процесс, ОЛП – объект ледяного покрова, Сч – рассчитываемая характеристика.

Процессы образования и разрушения морского льда вследствие его свойств термозависимости и деформируемости создают различные структуры ледяного покрова, в том числе поверхностные. Анализ приведенных в таблице 1 данных показывает, что для получения указанных характеристик необходимо и достаточно выполнение предварительной, первичной и вторичной обработки. Таким образом, необходимым и достаточным условием круглогодичного получения характеристик морского льда является использование радиолокационных изображений ледяного покрова, получаемых в микроволновом диапазоне без исследования физических явлений свойства среды и термодинамических процессов ледообразования. Иными словами, для этого достаточно проводить классификацию изображений морского льда.

Характеристики наблюдаемых структур являются признаками, отражающими как протекающие процессы, так и свойства ледяного покрова в момент наблюдения. Наиболее оптимальным способом наблюдения морского льда является его наблюдение датчиками, реагирующими на изменения, вызванные как рассеянием приповерхностным слоем ледовой или снежной поверхности, так и их рассеянием всей толщиной вещества. Такими датчиками являются активные датчики, работающими в микроволновом диапазоне длин волн.

Достоверное определение возраста льда является одной из самых трудных задач. Поскольку каждой возрастной стадии льда соответствует определенный диапазон толщин – данные о возрасте, наряду со сплоченностью, имеют решающее значение для навигационной оценки ледяного покрова. Особенно важным этот элемент наблюдений является в зимний период, когда преобладает сплошной лед, и возрастные характеристики дают основание судить о его проходимости и пространственно-временной изменчивости.

Рассеяние радиоволн в период таяния определяется рассеянием на поверхности мокрого льда, увеличением шероховатости поверхности однолетнего льда, абсорбированием энергии радиоволны в слоях мокрого снежного покрова, рекристаллизацией снежного покрова, наличием пленок на плоской ледяной поверхности. Все эти факторы существенно влияют на физические и электрические свойства зондируемой поверхности, что существенно усложняет идентификацию типов морских льдов в весенне-летний период.

Наблюдение морских льдов с помощью аэрокосмических средств ДЗ, работающих в активном режиме в микроволновом диапазоне, обеспечивает следующие преимущества:

- всесезонность (возможность наблюдения в условиях полярной ночи и в ночное время суток);
- возможность формирования поля излучения, контролируемого по своим параметрам (мощность излучения в импульсе, вид поляризации);
- практическая всепогодность;

- регистрацию отраженного/рассеянного излучения, содержащего параметры отражающей/рассеивающей поверхности.

Впервые радиолокатор на борту океанографического ИСЗ был установлен в 1978 году (ИСЗ SEASAT). Была использована 23.5 см длина волны L диапазона с горизонтальной поляризацией. Угол зондирования находился в пределах $9^\circ - 15^\circ$. Пространственное разрешение на земной поверхности составляло 25 м при ширине полосы обзора 100 км. Материалы регулярной съемки моря Бофорта (более чем 100 ежедневных снимков) показали потенциал использования спутниковых радиолокаторов как для научного, так и для оперативного применения на покрытых льдом акваториях.

В отечественной практике радиолокатор для наблюдения за морскими льдами впервые был применен на борту специализированного океанографического ИСЗ "Космос-1500", запущенного в 1983 г. Спутник стал головным в серии космической программы «Океан». На его борту была установлена радиолокационная станция бокового обзора (РЛСБО). РЛСБО работали в X-диапазоне с длиной волны 3.2 см и вертикальной поляризацией излучаемых и принимаемых сигналов. РЛСБО обеспечила получение изображений с пространственным разрешением порядка 2 км при размерах реальной апертуры антенны около 12 м.

Радиолокационные изображения малого разрешения РЛСБО спутников «Океан» содержали достаточно большой объем информации и позволяли при любых погодных условиях оценить следующие основные характеристики ледяного покрова: возрастной состав льдов в холодный период года (молодой лед, однолетний и многолетний); формы ледовых образований (обширные и гигантские ледяные поля); границы распространения и зоны многолетнего льда; положение кромки льдов, границы припая, каналы, крупные разводья и полыньи; векторы дрейфа льдов по парам последовательных перекрывающихся изображений.

Точность определения местоположения выделенных границ зон и отдельных ледовых образований составляла около 5–6 км. Каналы и разводья шириной менее 1.5 км не определялись. Минимальная ширина разводий в старых льдах зимой, которые могли быть обнаружены на изображениях, составляла 500 м. Отдельные ледяные поля старого льда обнаруживались на изображениях при минимальном размере около 250 м. Зоны сплоченных старых льдов на фоне молодых и однолетних в зимний период выделялись на изображениях с контрастом от 3 до 9 дБ. Общая и частная сплоченность льдов в выделенных зонах определялась с точностью $1-2/10$ [1].

Дальнейшее совершенствование космической техники привело к созданию спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), которые позволили

получить значительно более высокое пространственное разрешение по сравнению с РЛСБО. РСА, установленный на космический аппарат (КА) «Алмаз-1», работал на длине волны 9.6 см с горизонтальной поляризацией и шириной полосы обзора 40 км и позволял получать изображения высокого разрешения в 15 метров. Наклонение орбиты спутника было меньше 90°, что не обеспечивало возможность съемки в приполярных районах за исключением узкой широтной полосы. С помощью полученных изображений можно было определить размеры айсбергов, а также некоторые характеристики льда, такие как границы распространения льда, границы припая, возраст льда (нилас, молодой лед и однолетний лед), формы ледовых образований, гряды торосов и районы сильно деформированного льда.

Среди зарубежных ИСЗ, на борту которых были установлены РСА для наблюдения за морской поверхностью, следует отметить спутники Европейского Космического Агентства ERS –1,2 и ENVISAT, канадские RADARSAT –1 и 2, японский – ALOS.

ERS работали в С – диапазоне с вертикальной поляризацией и шириной полосы 100 км (разрешение 26 на 30 м), при угле падения 19° – 26°. Информация с указанного РСА использовалась для мониторинга морских льдов на трассе Северного Морского Пути и для составления оперативных сводок о ледовых условиях, подготовки ледовых карт и ледовых прогнозов; для получения детальной информации о морских льдах, необходимой для выбора путей судов во льдах. Однако препятствием для широкого оперативного использования данных РСА ERS являлась достаточно узкая полоса обзора, которая не обеспечивала покрытие больших площадей подстилающей земной поверхности.

Канадский ИСЗ RADARSAT–1, запущенный на орбиту Канадским Космическим Агентством в ноябре 1995 года, работает в С – диапазоне в 7 режимах и на горизонтальной поляризации сигнала. Ширина полосы обзора составляет 50 – 500 км с углом падения луча от 20° до 49° и пространственным разрешением 100 × 100 м. Для мониторинга морского ледяного покрова используется режим ScanSAR с шириной полосы обзора 500 км и разрешением 100 м, что позволяет наблюдать поверхность Арктики и Канады с минимальным трехдневным циклом [5].

Спутник RADARSAT–2 был выведен на аналогичную RADARSAT–1 орбиту 14 декабря 2007 года. На его борту установлена РСА, обладающая, как и спутник RADARSAT–1, возможностями изменения ширины полосы съемки и пространственного разрешения, которое может в режиме Ultra-Fine достигать значения 3 метров в полосе съемки 20 км. РСА имеет ряд новых возможностей, полезных для мониторинга морских и речных льдов, в особенности возможность получения изображений на различных поляризациях, включая режимы с полной поляризацией (Fine Quad-pol и Standard Quad-pol).

В 2002 г. Европейским Космическим Агентством был запущен космический аппарат ENVISAT. Основным прибором на спутнике ENVISAT является радиолокатор с синтезированной апертурой ASAR. Данные РСА использовались для изучения характеристик волнения на поверхности морей, морского льда, вырубки лесов, особенностей земной поверхности, а также давали возможность обнаруживать и контролировать особо опасные явления и стихийные бедствия. Широкая полоса обзора обеспечивала полное покрытие Арктики два раза в неделю с возможностью получения таких важных для безопасного мореплавания характеристик морского льда, как положение кромки, возраст и сплоченность. Начиная с 2003 года систематические наблюдения со спутника ENVISAT на ГГ– и ВВ–поляризациях использовались для выбора путей судов в морских льдах в западной части трассы Северного Морского Пути. Эксплуатация спутника официально закончена в мае 2012 года.

24 января 2006 г. был выведен на орбиту японский спутник ALOS с РСА L–диапазона PALSAR. РСА дает возможность круглосуточного и всепогодного режима наблюдения Земли, позволяющего получать изображения с разрешением от 10 до 100 м с возможностью изменения углов визирования $10^{\circ} - 51^{\circ}$ относительно надира. Одним из основных режимов наблюдения указанной РСА является так называемый “точный режим”, обладающий высокой разрешающей способностью.

Радиолокаторы с синтезированной апертурой обеспечивают возможность круглосуточного и круглогодичного наблюдения поверхности Земли. Этот фактор особенно важен для мониторинга морских льдов в полярных областях, где облачность, туманы и темнота значительно ограничивают использование данных видимого и ИК диапазонов. Радиолокационные изображения высокого разрешения (100 м и более) содержат значительно больше детальной информации о состоянии ледяного покрова.

Перечень параметров, характеризующих состояние ледяного покрова и точность их определения, зависят от диапазона и участка спектра электромагнитных волн, чувствительности, разрешающей способности и поляризации радиолокационного датчика ДЗ.

Существует несколько алгоритмов автоматизированной классификации изображений морского льда по РСА-изображениям различных спутников, однако, ни один из них не обеспечивает необходимую точность, что обуславливает необходимость дальнейших исследований в этом направлении.

Список литературы

1. Бельчанский Г. И., Дуглас Д. С., Мордвинцев И. Н. Идентификация типов морского льда по радарным данным спутников «Океан-01» и эталонным таблицам // Исслед. Земли из Космоса. – 1998. – №6. – С. 52 – 65.
2. Гудкович З. М. Тема 2. Особенности формирования морского льда в зависимости от гидрологических и метеорологических условий [Электронный ресурс] // Наблюдение морского льда: учеб. пособие для подготовки ледовых наблюдателей / ААНИИ. – Электрон. дан. – СПб., 2008. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Загл. с этикетки диска. – № гос. регистрации 0320802237.
3. Дистанционное зондирование морских льдов на Северном морском пути: изучение и применение / О. М. Йоханнесен, В. Ю. Александров, И. Е. Фролов, С. Сандвен, Л. Х. Петтерссон, Л. П. Бобылев, К. Клостер, В. Г. Смирнов, Е. У. Миронов, Н. Г. Бабич. – СПб.: Наука, 2007. – 512 с.: ил. – (Научные исследования в Арктике: в 3 т.; т. 3).
4. Захваткина Н. Ю. Мониторинг ледяного покрова с помощью спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой // Метеорологический вестник: электронное издание. – 2009. – Т. 2, вып. 1 (2) [март]. – С. 1–37. URL: <http://www.elibrary.ru/download/66079385.pdf> (дата обращения 12.05.2009).
5. Ramsay, B. R., Weir, L., Wilson, K., and Arkett, M. Early results of the use of RADARSAT ScanSAR data in the Canadian Ice Service // Proceedings of the Fourth Symposium on Remote Sensing of the Polar Environments, Lyngby, Denmark, 29 April - 1 May 1996. – P. 95-117.
6. Ulaby, F. T., Moore, R. K., and Fung, A. K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive // Addison-Wesley Publishing Company, 1981. – P. 456.
7. Weeks, W. F., Ackley, S. F. Growth Structure and Properties of Sea Ice // The Geophysics of Sea Ice / ed. N. Untersteiner. – New York : Plenum Press, 1986. – Vol. 146, chap. 1. – P. 9–153. – (NATO ASI Series. Series B: Physics).

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007 – 2013 годы» по государственному контракту № 16.515.11.5074.

Рецензенты:

Александров Виталий Юрьевич, доктор физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Международного центра по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена (Фонд Нансен-Центр), г. Санкт-Петербург.

Смирнов Виктор Николаевич, доктор физ.-мат. наук, заведующий лаборатории физики льда в ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» Росгидромета, г. Санкт-Петербург.