Сергей А. Лебедев ^{1, 2} Андрей Г. Костяной ³ Шамиль Р. Богоутдинов ¹

- ¹ Геофизический центр РАН
- ² Майкопский государственный технологический университет
- ³ Институт Океанологии им. П.П. Ширшова РАН

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ КРОМКИ ЛЬДА В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ И МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЕЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Matochkin Shar



SVALBARD (NOR.)

ARCTIC OCEAN

Barents Sea



Баренцево море







Ледовая обстановка



Баренцево море относится к числу ледовитых, но это единственное из арктических морей, которое никогда полностью не замерзает. Ежегодно около 1/4 его поверхности не покрывается льдом в течение круглого года. Это объясняется притоком в его юго-западную часть теплых атлантических вод, не позволяющих воде охлаждаться до температуры замерзания и служащих своеобразным барьером для льдов, надвигающихся с севера. Вследствие слабых течений из Карского моря в Баренцево принос льдов оттуда незначителен. Таким образом, в Баренцевом море наблюдаются льды местного происхождения. В центральной части и на юго-востоке моря это однолетние льды, которые образуются осенью и зимой, а весной и летом растаивают. Лишь на крайнем севере и северо-востоке, куда спускаются отроги океанического ледяного массива, встречаются старые льды, в том числе и арктический пак.

Спутниковое изображение Баренцева моря спектрорадиометра MODIS на 23 апреля 2000.



Ледовая обстановка



сентябре, в центральных районах в октябре и на юговостоке в ноябре. В весенне-летнее время однолетние льды быстро тают. В мае южные и юго-восточные районы освобождаются ото льдов, а к концу лета почти все море очищается ото льдов, за исключением районов, прилегающих к Новой Земле, к Земле Франца-Иосифа и восточным берегам Шпицбергена. Ледовитость Баренцева моря изменяется от года к году, что связано с различной интенсивностью Нордкапского течения, характером крупномасштабной атмосферной циркуляции, общим потеплением или похолоданием Арктики в целом

Льдообразование в море начинается на севере в



Климатическое положение кромки льда в Баренцевом море по данным ИК и СВЧ-радиометрии.



30°

Десятая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 9–12 апреля 2019г.



70°

Дистанционное зондирование морского льда

Методы	Преимущества	Недостатки
	Пассивные методы зондирования	
Радиометр видимого диапазона	Высокое пространственное разрешение	Чувствительность к облачному покрову и времени суток. Низкая частота повторного обзора.
Радиометр инфракрасного диапазона	Хорошее пространственное разрешение. Высокая частота повторного обзора.	Чувствительность к облачному покрову
Радиометр микроволнового диапазона	Всепогодность. Высокая частота повторного обзора.	Низкое пространственное разрешение
	Активные методы зондирования	
Радар с синтезированной аппретурой	Всепогодность. Высокое пространственное разрешение.	Низкая частота повторного обзора.
Скаттерометрия	Всепогодность. Высокая частота повторного обзора.	Низкое пространственное разрешение
Альтиметрия	Всепогодность.	Измерения в надир вдоль треков. Низкая частота повторного обзора.





Геометрия метода



Помимо этого спутниковая альтиметрия позволяет анализировать:

амплитуду скорости приводного ветра

• значимые высоты морских волн

высота геоида или эквипотенциальной поверхности гравитационного поля Земли высота орбиты спутника высота спутника над поверхностью моря высота морской поверхности с учетом ряда поправок (ΔH_i), связанных с прохождением радиосигнала через атмосферу, инструментальными ошибками и состоянием подстилающей поверхности: $H_{ssh} = H_{orb} - H_{alt} - \Sigma \Delta H_i$ H_{dt} – динамическая топография как отклонения морской поверхности относительно геоида: $H_{dt} = H_{ssh} - H_g$





Анализ формы отраженного импульса



Форма импульса, отраженного от безграничной подстилающей поверхностью, аппроксимированная по формуле Брауна (синяя линия) и осредненная за 1 с форма отраженного импульса для условий открытого океана (красная линия),

где τ_0 – середина переднего фронта или «эпоха».

Желтой областью выделена ширина переднего фронта, зависящая от значимых высот волн (h_{swh})





Теоретическая модель формы отраженного импульса

При малых отклонения оси антенны от положения надира среднюю форму принятого альтиметром отраженного от морской поверхности сигнала, вывод которой базируется на модели некогерентного (по мощности) рассеяния радиоволн шероховатой поверхностью

- $P(t) = P_{FSI}(t) \otimes s_r(t) \otimes q_s(t)$
- средняя мощность сигнала, отраженного плоской поверхностью
- форма импульса, отраженного от плоской поверхности
- плотность вероятности распределения высот зеркальных точек

Модель Брауна построена в рамках следующих предположений:

- отражающая поверхность содержит достаточно большое число независимых отражающих элементов;
- статистики возвышений поверхности являются постоянными в пределах освещаемой радаром поверхности;
- отражение является скалярным процессом без эффектов поляризации;
- нормированное сечение обратного рассеяния является постоянным для всей освещаемой площади, т.е. в пределах диаграммы направленности не зависит от угла падения;
- эффектом Доплера можно пренебречь.



 $P_{FSI}(t)$



Модифицированная формула Брауна $P(t) = K \frac{\sigma_0}{2} \exp\left(-\frac{4}{\gamma} \sin(\xi)^2\right) \left[1 + \operatorname{erf}\left(u\right)\right] \exp\left(-v\right)$

 $K = 1, \quad \gamma = 0.724 \left(\sin \left(\theta_{3dB} \right) \right)^2$





$$\sigma_c = \sqrt{\sigma_P^2 + \left(\frac{h_{swh}}{2c}\right)^2}, \quad \sigma_P = \frac{0.5}{BW}$$

– «эпоха», номер гейта

- коэффициент обратного рассеивания
 - значимая высота морских волн

 σ_0

 θ_{3dB}

- угол отклонения антенны от положения надира
- угловое разрешение антенны
- расстояние от спутника до поверхности
- радиус Земли
- скорость света





Данные спутниковой альтиметрии



Расположение по акватории Баренцева моря треков изомаршрутных программ спутников ERS-1/2 (E1/2), ENVISAT (En), SARAL/AltiKa (S/A)и Sentinel-3A/3B (Se3).

Массив данных спутника E1 представляет собой прерывистый, но длительный временной ряд измерений фазы С (04/1992 - 12/1993) и фазы G (04/1995 - 06/1996) с возможностью его расширения спутником E2 (04 / 1995 - 06/2002), спутник En (03/2002 -04/2012), спутник S / А (02/2013 - настоящее время) и Se3 (02/2016 настоящее время).







© 2020, С.А. Лебедев, А.Г. Костяной, Ш.Р. Богоутдинов



Метод идентификации положения кромки льда



Зависимость мощности отраженного сигнала от широты вдоль 216 трека спутника SARAL/AltiKa для 104 цикла (12 декабря 2016 г.).







Метод идентификации положения кромки льда

Положение кромки льда

Зависимость мощности отраженного сигнала от широты вдоль 216 трека спутника SARAL/AltiKa для 104 цикла (12 декабря 2016 г.).









Алгоритм распознавания скачов JUMP

Неформальная логика, лежащая в основе поиска скачков на записи, может быть описана следующим образом: «Скачок – аномалия на записи, приводящая к смещению ее уровня». В основе алгоритма лежит нечеткая мера скачкообразности, представляющая собой функционал исходной записи с областью значений от 0 до 1. Большие значения этого функционала соответствуют резкому изменению уровня исследуемой записи, а их выбор происходит с использованием нечетких сравнений



Фрагмент исследуемой записи магнитограммы (сверху) и соответствующая записи мера скачкообразности (снизу)





Алгоритм распознавания скачов JUMP







Алгоритм распознавания скачов JUMP













Алгоритм ретрекинга Ісе-2

 $\frac{u}{2} \exp\left(S_T(t-\tau)\right) \left(1 + \operatorname{erf}\left(\sigma_L(t-\tau)\right)\right) + P_n$ P(t)

- амплитуда отраженного сигнала
- угол отклонения антенны от положения надира
- «эпоха», номер гейта
- наклон логарифма задней фронта
- уровень теплового шума



 σ_I

 P_n







Метод идентификации положения кромки льда



Изменчивость мощности отраженного импульса (а), радиояркостных температур на частотах 23,8 и 37 ГГп и коэффициента экспоненциально го наклон заднего фронта алгоритма ретрекинга Ісе-2 (б) вдоль 118 трека на основании альтиметрически х измерений альтиметра RA спутника ERS-2 (11 цикл, 6 мая 1996 г.).



Десятая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 9–12 апреля 2019г.



© 2020, С.А. Лебедев, А.Г. Костяной, Ш.Р. Богоутдинов

Метод идентификации положения кромки льда





Десятая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 9–12 апреля 2019г.



© 2020, С.А. Лебедев, А.Г. Костяной, Ш.Р. Богоутдинов

Межгодовая изменчивость положения кромки льда





Десятая Международная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли», Таруса, 9–12 апреля 2019г.



© 2020, С.А. Лебедев, А.Г. Костяной, Ш.Р. Богоутдинов

Заключение

- Разработано и протестировано два метода идентификации положения кромки льда. Первый основан на анализе формы отраженного импульса. Второй – на анализе изменчивости вдоль трека наклона логарифма задней фронта, получаемого при использовании алгоритма ретрекинга Ice-2.
- Согласно результатам для Баренцева моря (пролив между Новой землей и архипелагом Франца-Иосифа) минимальная скорость перемещения кромки льда в северо-восточном направлении за период 1992–2018 гг. ~ 7 км/год наблюдается вдоль 102 трека, затем она возрастает до ~ 13,8 км/год вдоль 416 трека, падает до ~ 10 км/год вдоль 788 трека и снова растет.
- Средняя скорость перемещения кромки льда вдоль треков в северовосточном направлении за период 1992–2018 гг. составила 10,9±2,3 км/год. В целом, скорость дрейфа кромки льда имеет тенденцию к увеличению на 0,3 км/год на градус по долготе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-80065_Опасные_явления «Анализ и прогнозирование опасных гидрометеорологических явлений в прибрежных районах Арктической зоны Российской федерации»









