

Дистанционное зондирование ледяного покрова Арктики

Шалина Е.В.

Санкт-Петербургский государственный университет
Фонд «Нансен-Центр»

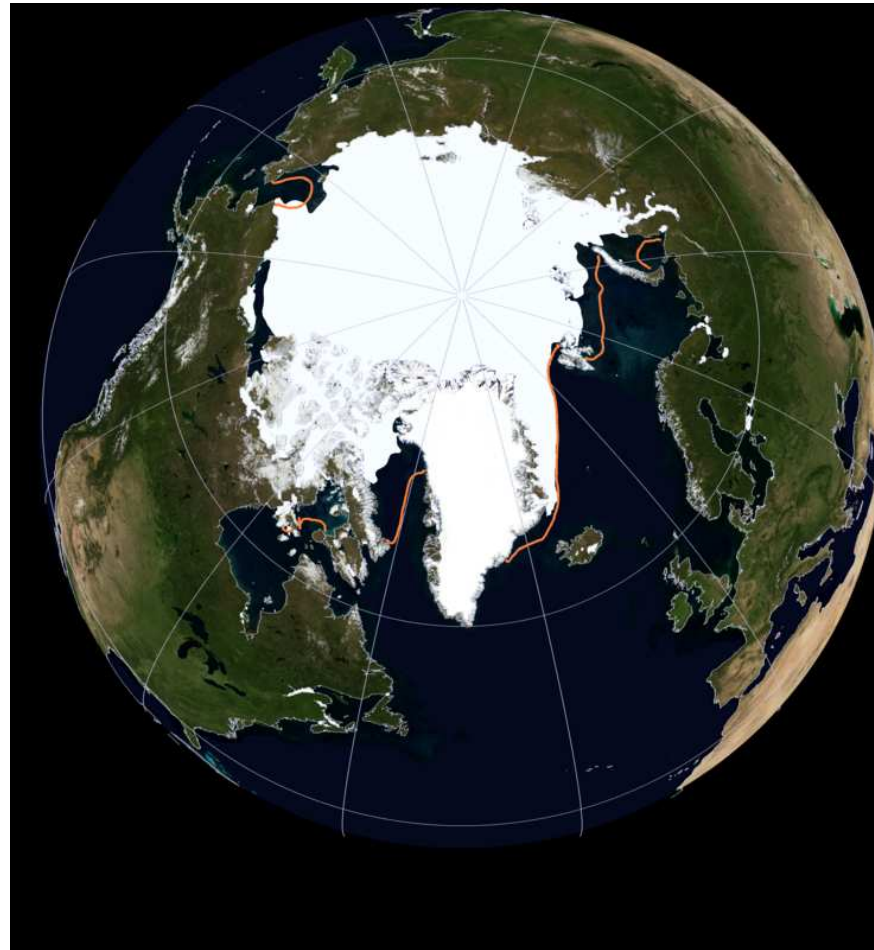
Содержание

- Лёд Арктики
 - Параметры, которые можно получить, обрабатывая данные ДЗ
 - Изменение свойств ледяного покрова в течение года
- Сплоченность ледяного покрова
- Положение кромки льдов
- Толщина ледяного покрова
- Температура поверхности ледяного покрова
- Дрейф льдов

Ледяной покров Арктики

Как это выглядит?

Ледяной покров Арктики
на прошлой неделе



Почему важно иметь данные о ледяном покрове Арктики?

Постоянно воздействует на взаимодействие океана и атмосферы , ограничивая обмен между ними и отражая большую часть падающей солнечной радиации

Воздействует на термохалинную циркуляцию океана. При формировании или таянии льда солёность морской воды соответственно увеличивается или уменьшается, лёд имеет меньшую солёность, чем морская вода

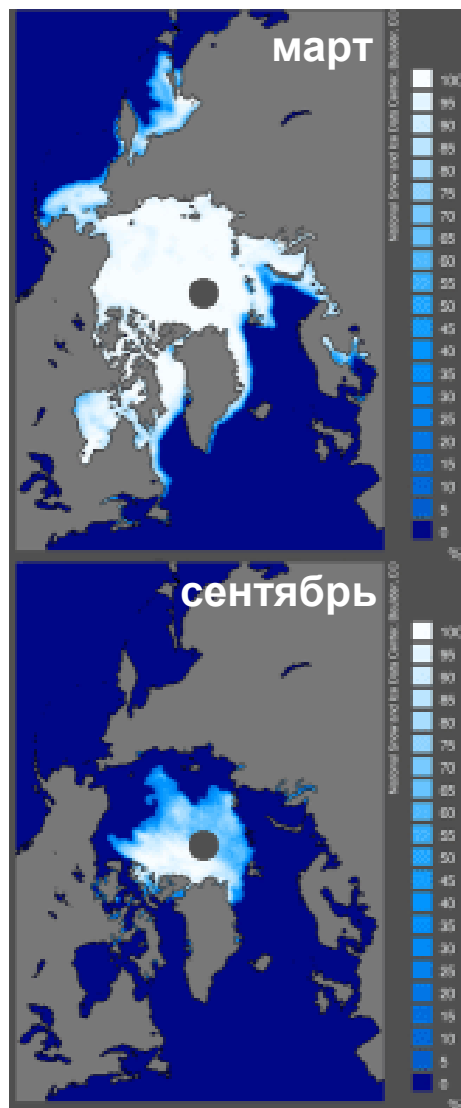
Влияет на температуру поверхности океана при перемещении своих холодных масс

Положительная обратная связь «лёд-альbedo-потепление»

Высокое альbedo ледяного покрова (как правило, покрытого снегом) способствует тому, что большая часть солнечной энергии отражается. Арктика, покрытая льдом должна оставаться холодной.

Низкое альbedo воды, напротив, способствует поглощению большей части дошедшей до поверхности солнечной энергии. Изменение соотношения льда и открытой воды а Арктике должно приводить к потеплению этого региона и ускорять таяние ледяного покрова.

Площадь арктических льдов



≈



Площадь Сибири (Азиатской части РФ) = 13 090 000 км²

Площадь Европейской части РФ = 3 960 000 км²

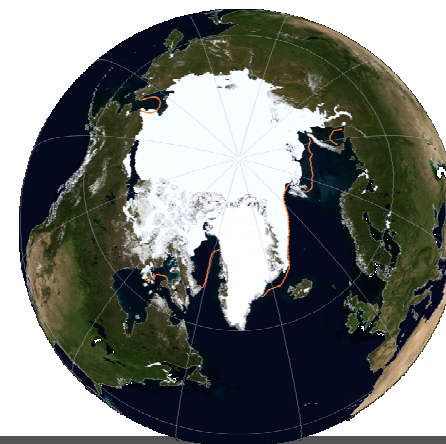
≈



Что можно узнать про арктический лёд, обрабатывая спутниковые данные?

Параметры, которые можно получить, обрабатывая данные дистанционного зондирования (ДЗ):

- Сплоченность ледяного покрова
- Положение кромки льдов
- Тип и возраст льдов, составляющих ледяной покров
- Толщину ледяного покрова
- Картину дрейфа (перемещения) льдов
- Температуру поверхности ледяного покрова

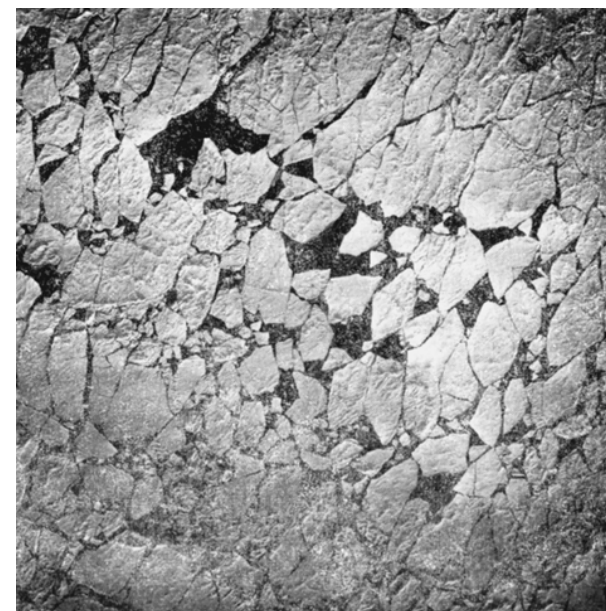


Сплоченность ледяного покрова

Сплоченность льда – это отношение, выраженное в десятых долях (или баллах от 1 до 10) и описывающее площадь морской поверхности, покрытую льдом как часть всей рассматриваемой площади.

В англоязычной науке это **concentration**, и измеряют её чаще в процентах: от 0 до 100%.

Пример. Ледяной покров сплоченностью **8-9 баллов**, состоящий из обломков тонких однолетних полей.



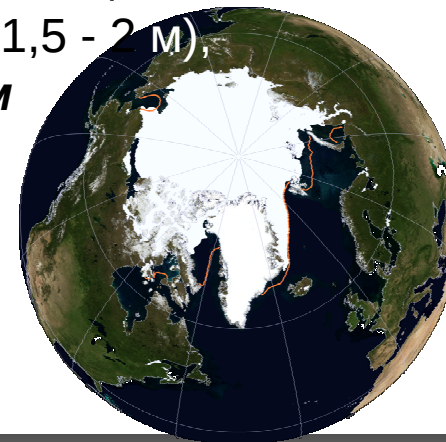
Типы морского льда

Морской лёд по своему *местоположению и подвижности* можно разделить на два типа:

- припай (сплошной ледяной покров, связанный с берегом или мелководными участками дна) ,
- плавучие (дрейфующие) льды.

По стадиям развития льда различают:

- **начальные виды льда** (ледяные иглы, ледяное сало, и шуга),
- **нилас** (лёд толщиной 5-10 см),
- **молодые льды**, которые подразделяются на серый (толщина 10 - 15 см) и серо-белый (толщиной 15 - 30 см) лёд,
- **однолетний лёд** (развивающийся из молодого льда и имеющий возраст не более одного зимнего периода, а толщину до 1,5 - 2 м),
- **многолетний лёд** (переживший летнее таяние лёд). *Чем старше лёд, тем меньше его солёность, так как солёный рассол при таянии стекает в море*



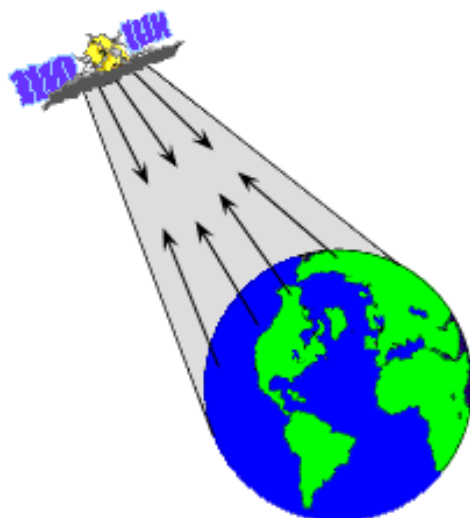
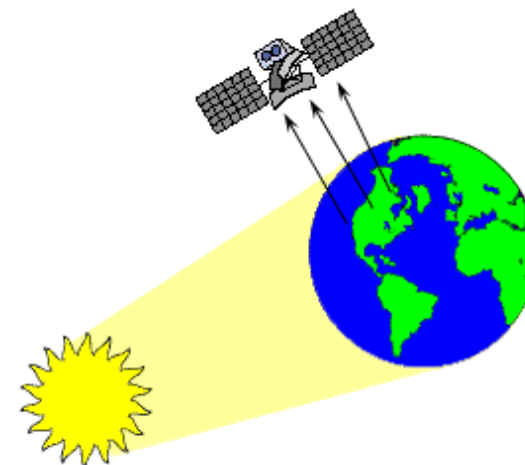
Пассивное / активное дистанционное зондирование

Системы дистанционного зондирования, настроенные на измерение излучения **естественных** излучателей работают по схеме **пассивного дистанционного зондирования**

Соответственно, эти системы могут производить измерения, когда естественное излучение доступно:

Днем - в видимом диапазоне

Днем и ночью - в тепловом ИК, микроволновом

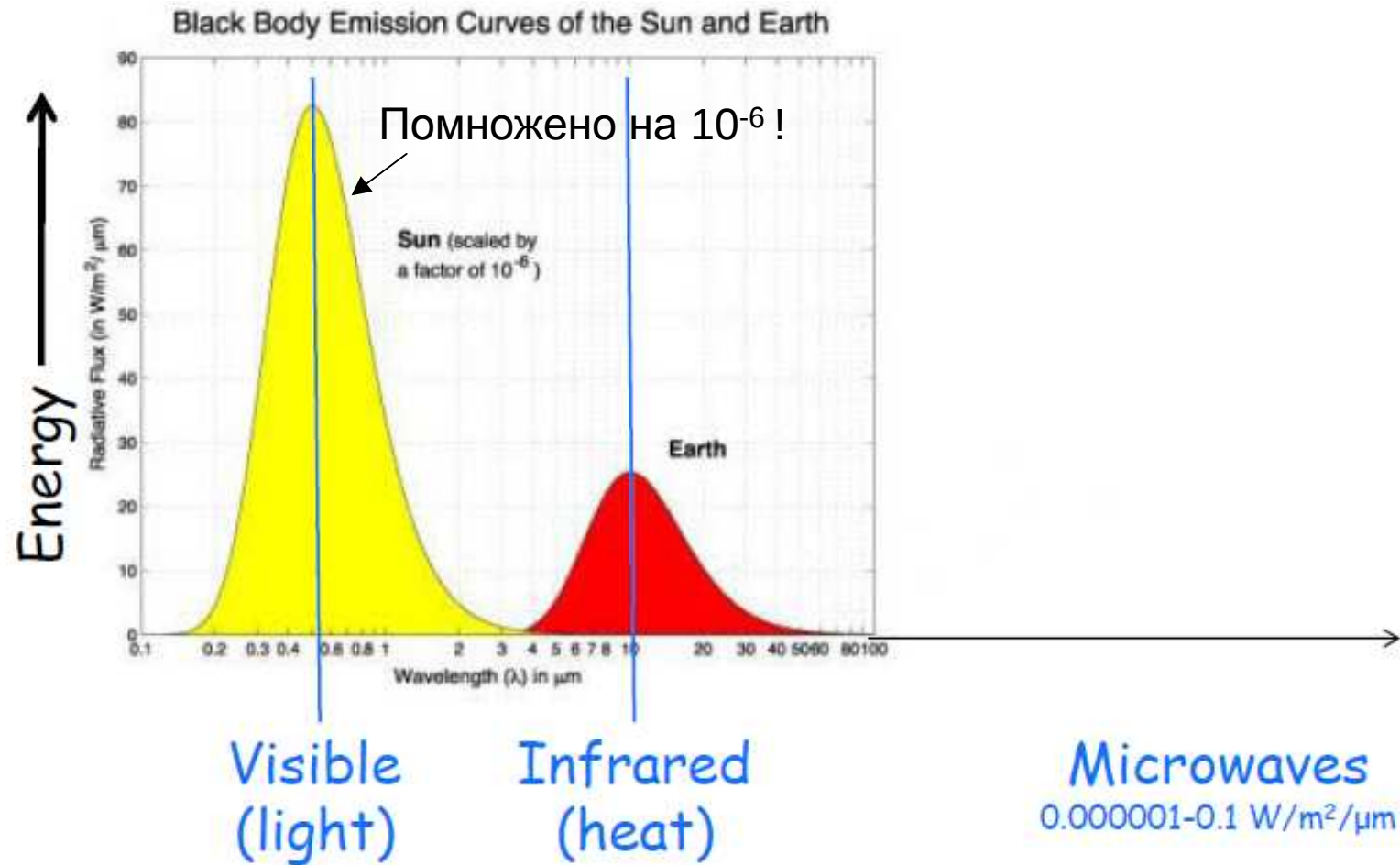


В случае **активного дистанционного зондирования** прибор на спутнике имеет при себе источник излучения, который направляется на объект исследования, а затем отраженное излучение фиксируется.

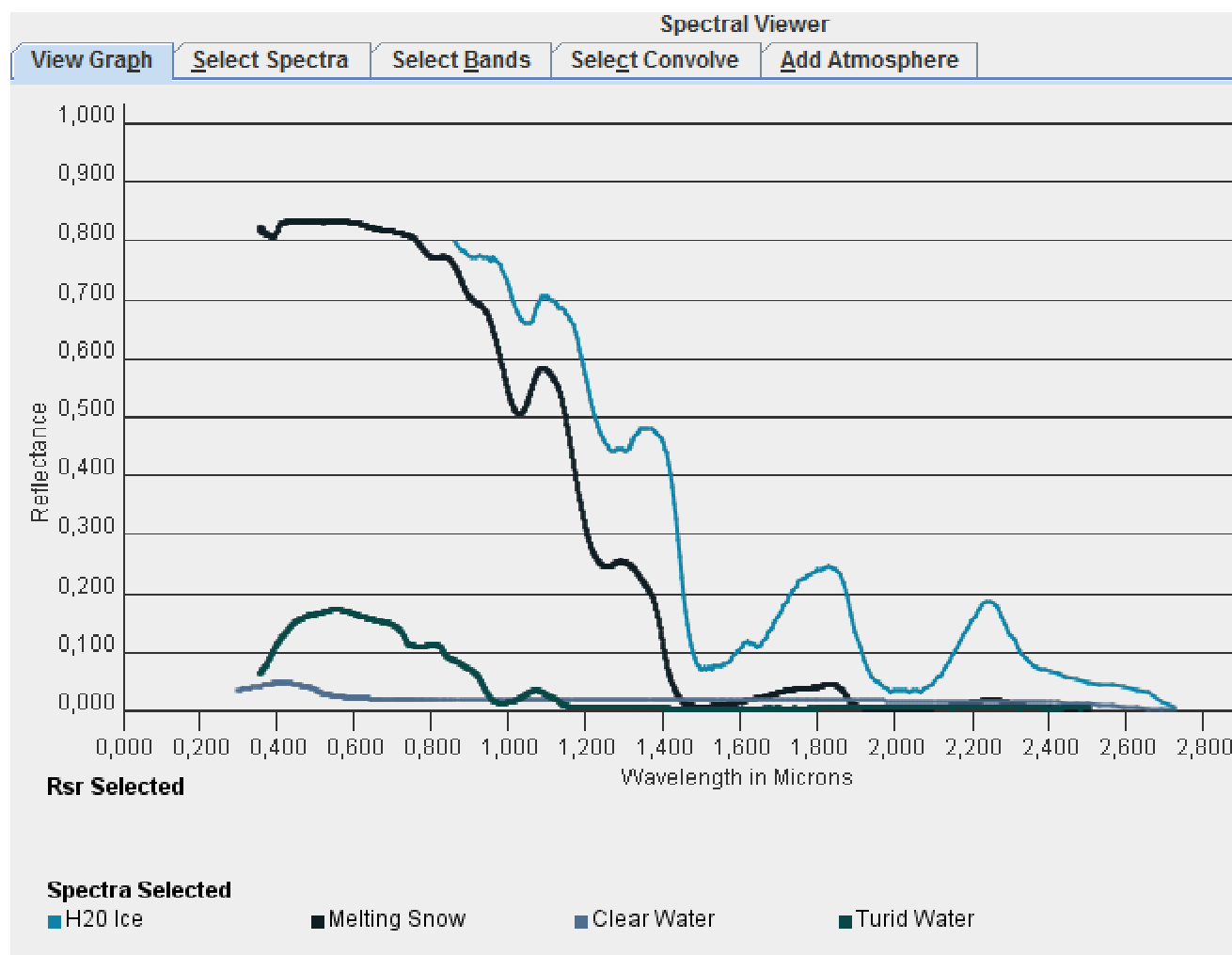
Преимущества:

- измерения могут проводиться в любое время суток,
- есть контроль над облучающим потоком излучения,
- можно использовать длины волн, которые слишком слабо представлены в спектрах естественных излучателей

Использование данных пассивного дистанционного зондирования



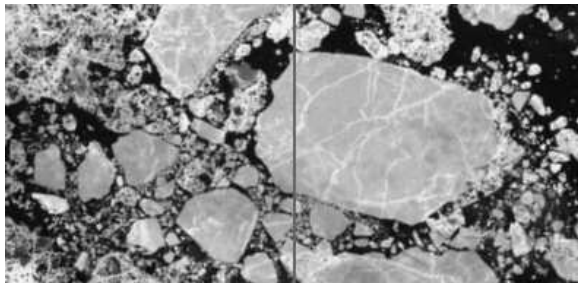
Использование датчиков видимого и ИК диапазона



Вычисление сплоченности ледяного покрова по спутниковым данным

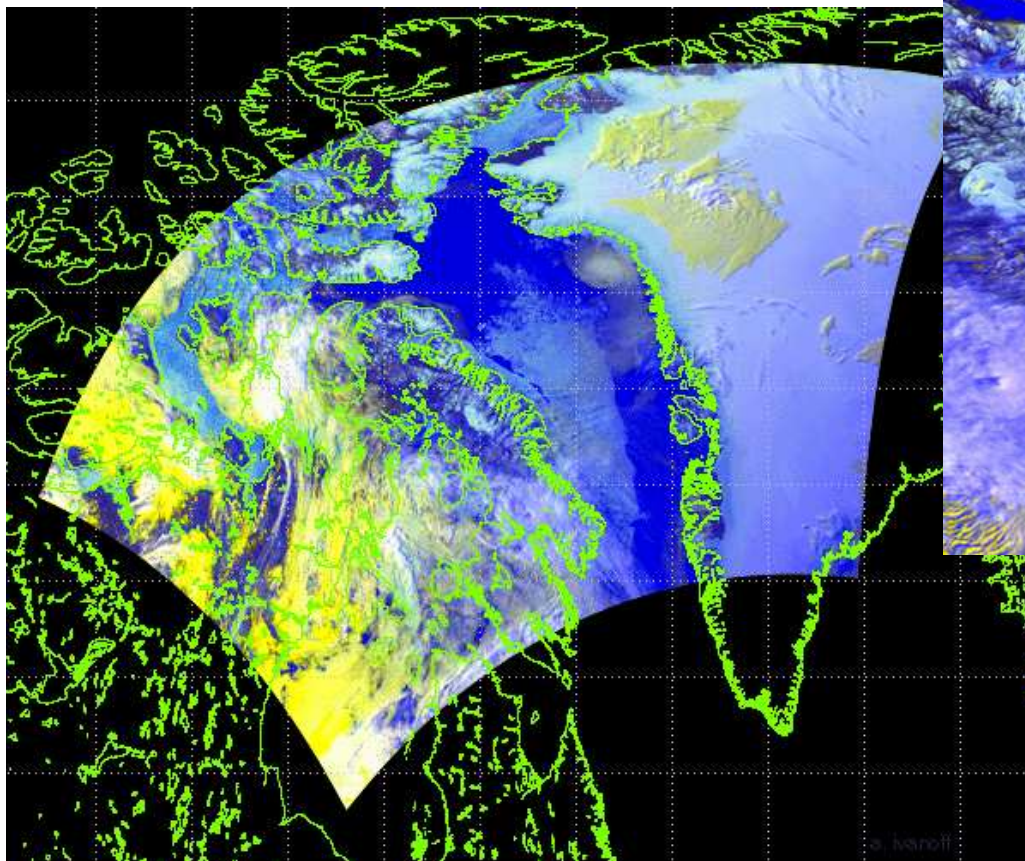
Датчики видимого и ИК диапазона

<i>спутник захвата</i>	<i>разрешение</i>	<i>полоса</i>
AVHRR	NOAA 1.1 км	2900 км
MODIS	Terra и Aqua 250 м (канал 1-2) 500 м (канал 3-7) 1000 м (канал 8-36)	2330 км
ETM+	Landsat 15 м (Pan) 30 м (Vis, Nir, Mir) 60 м (Therm IR)	185 км

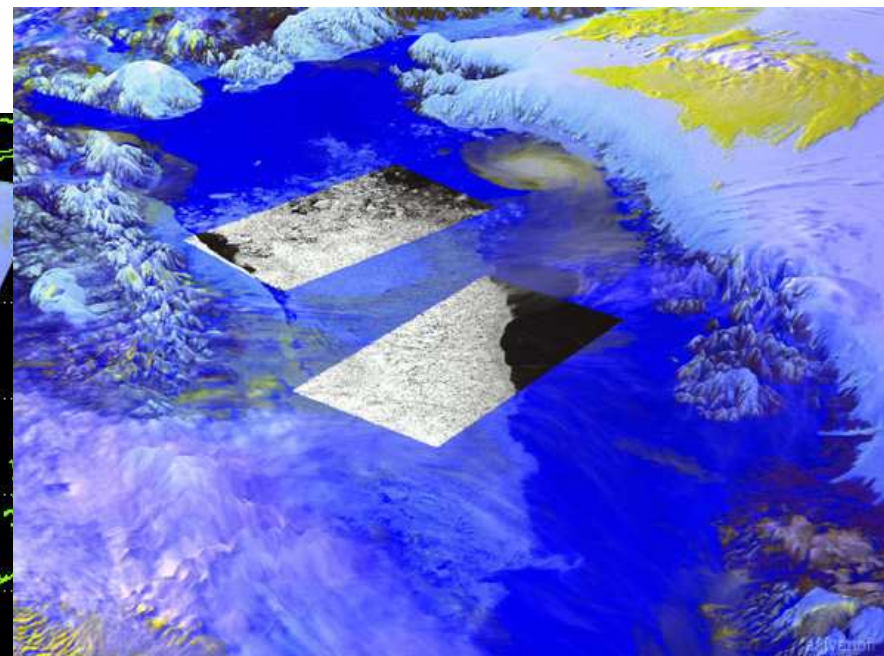


Классификация лёд/вода проводится по яркости; **сплоченность** оценивается подсчетом и сопоставлением числа пикселей

AVHRR / ETM+ (Landsat)

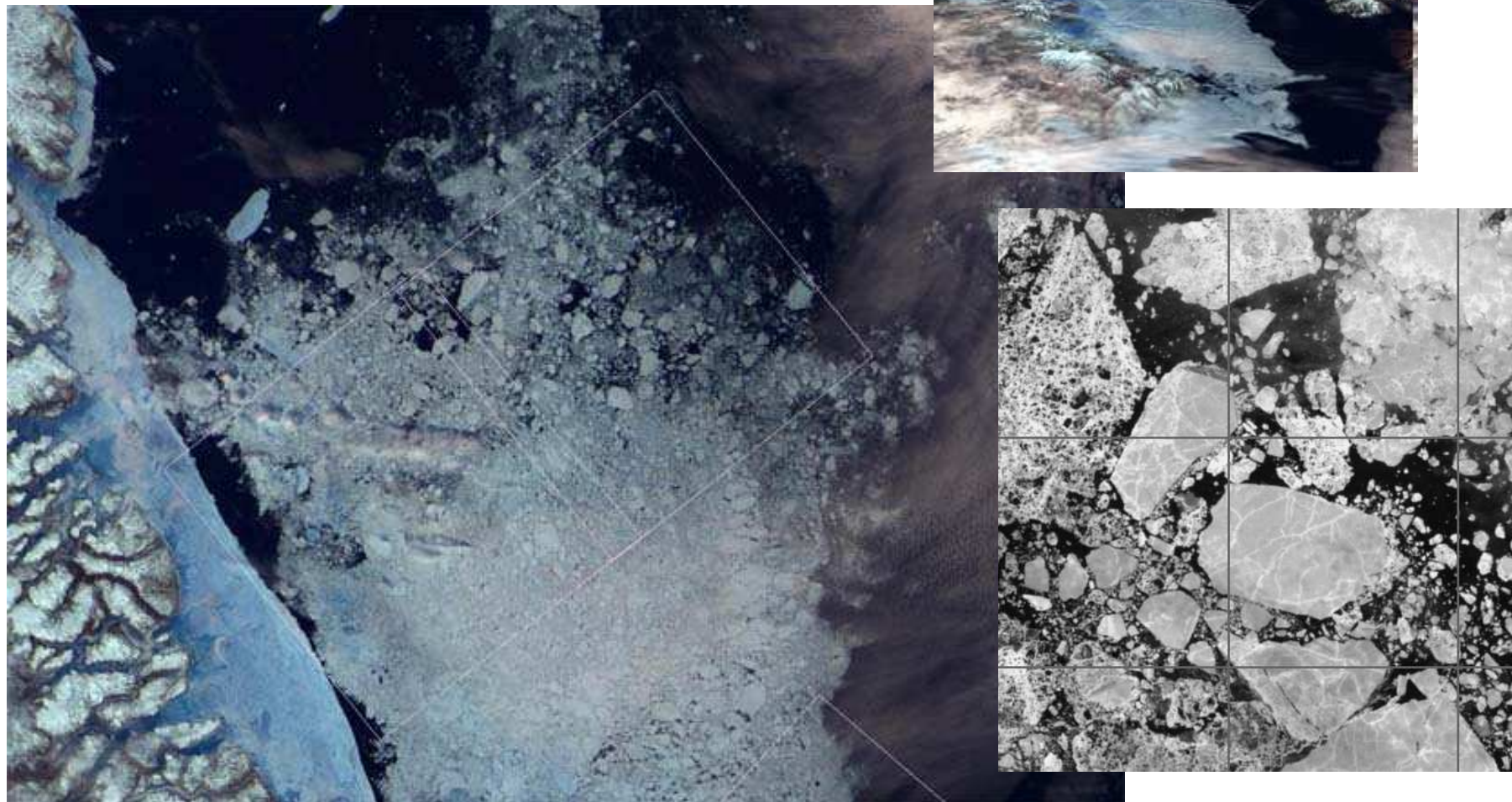


Изображение, полученное прибором AVHRR,
27 июня 2000 г.



По 2 последовательные
сцены прибора Landsat,
полученные 26-го и 27-го
июня

MODIS / ETM+ (Landsat)



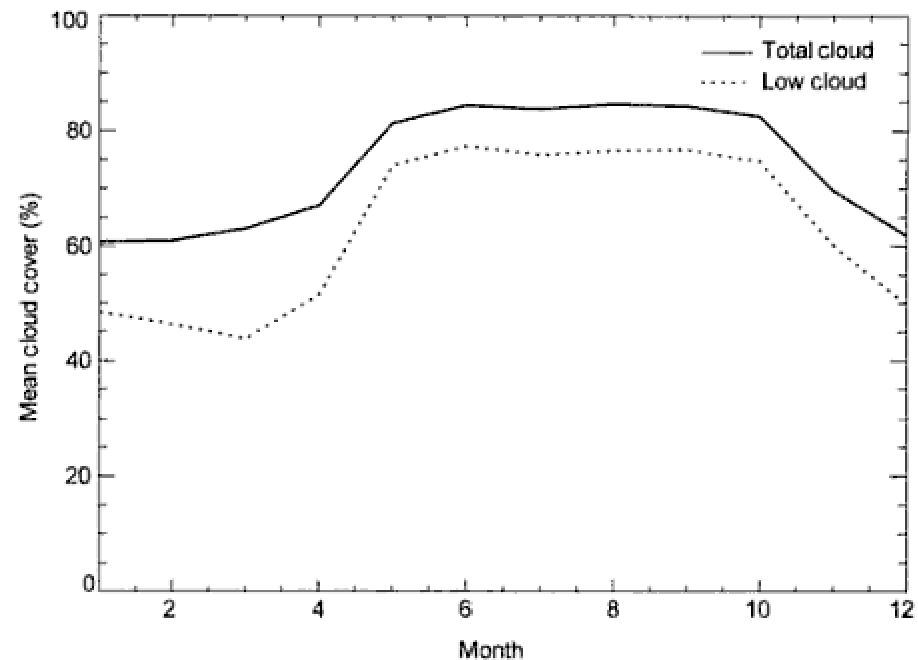
Часть изображения, полученного прибором MODIS, 27 июня 2000 г. Разрешение 500 м. Белые прямоугольники показывают размер изображений, полученных со спутника Landsat.

ИКИ, Москва, 16 ноября 2010 г.

Облачность – главный мешающий фактор при использовании данных видимого и ИК диапазонов

Данные из книги
«The Arctic climate system»

Авторы: Mark C. Serreze и Roger Graham Barry



Облачность в Арктике – средние данные. Показано распределение по месяцам. Пунктиром представлена облачность в нижних слоях атмосферы.

Использование данных приборов, измеряющих микроволновое излучение

Микроволновое излучение = Сверхвысокочастотное излучение (СВЧ-излучение) — электромагнитное излучение, включающее в себя сантиметровый и миллиметровый диапазон радиоволн (от 1 мм — частота 300 ГГц до 30 см — 1 ГГц).

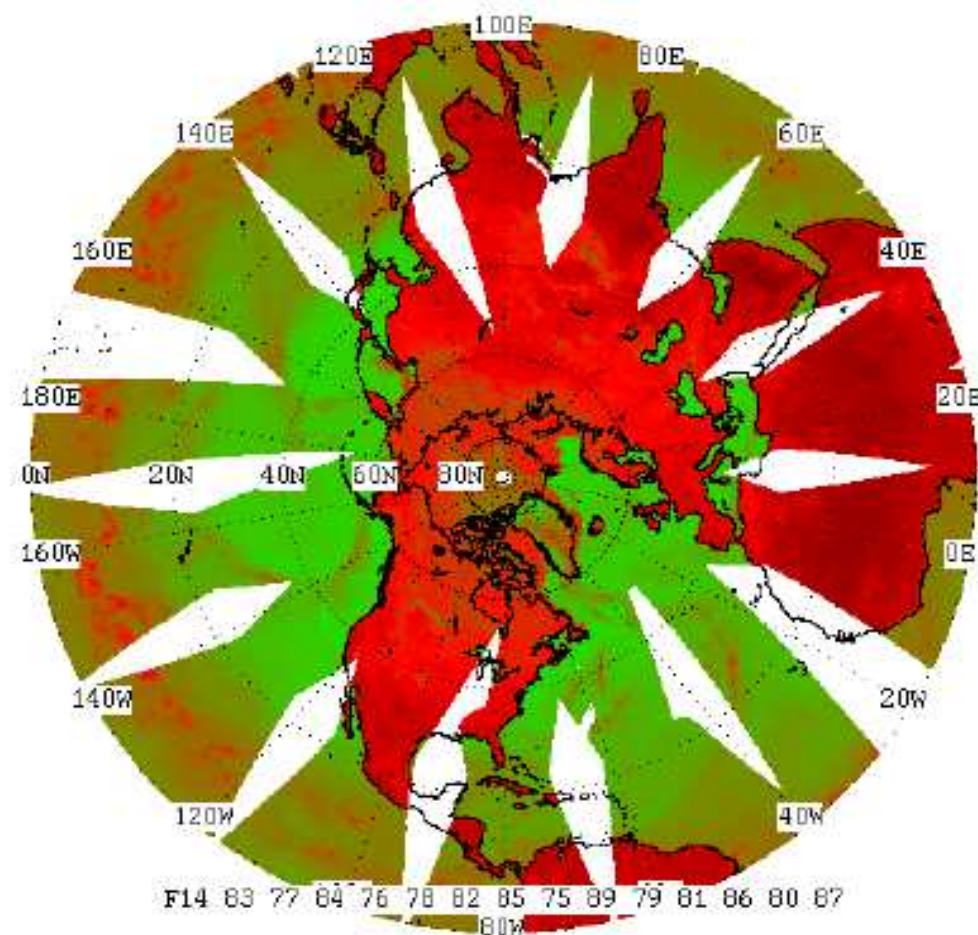
Спутниковое пассивное микроволновое зондирование — одно из наиболее важных и эффективных средств мониторинга ледяного покрова Арктики

- независимость от наличия облачности
- независимость от условий освещения

Основные спутниковые пассивные микроволновые радиометры

Спутник	Радиометр	Период функционирования	Каналы	Разрешение
Nimbus-7	Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR)	1978-1987	<u>10 каналов:</u> 6, 10, 18, 21, 37 ГГц (H, V)	18 - 150 км
Defense Meteorological Satellite Programme (DMSP)	Special Sensor Microwave Imager (SSM/I),	1987-настоящее время	<u>7 каналов :</u> 19, 37, 85 ГГц (H, V) 22 ГГц (V)	15 – 69 км
Defense Meteorological Satellite Programme (DMSP), F17-F18	Special Sensor Microwave Imager / Sounder (SSM/I/S)	2003 - настоящее время	<u>11 каналов:</u> 19, 37, 91.6 ГГц (H, V) 22 ГГц (V) + 150 и 183 ГГц	14 – 73 км
Aqua	Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth Observing System (AMSR-E)	2002 - настоящее время	<u>12 каналов:</u> 6, 10, 18, 23, 36, 89 ГГц (H, V)	5 - 56 км

Пассивные микроволновые наблюдения — данные за 1 день



Основные алгоритмы восстановления сплочённости морского льда по пассивным микроволновым измерениям

NORSEX (Svendsen et al., 1983)

NASA/TEAM (Cavalieri et al., 1984)

Bootstrap (Comiso, 1986)

85-GHz алгоритм (Svendsen et al., 1987)

Cal-Val (Ramseier, 1991)

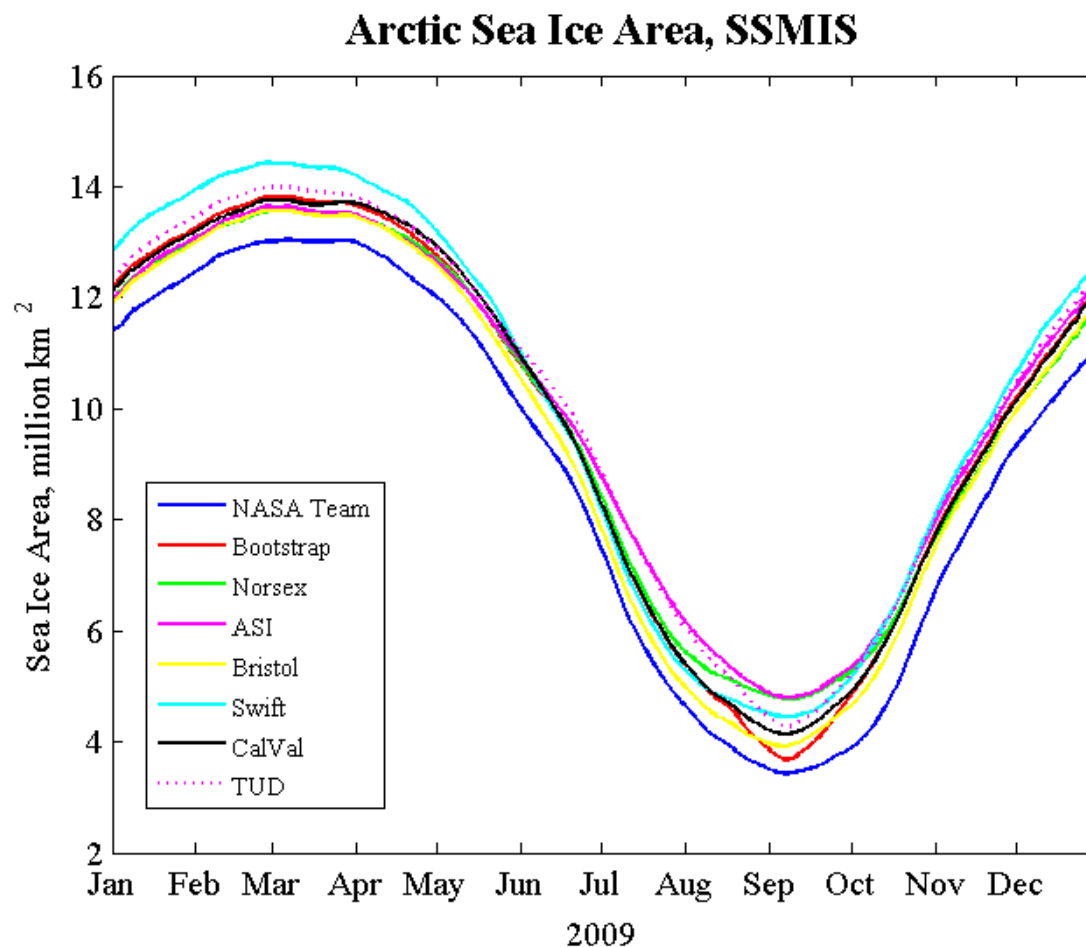
Bristol (Smith, 1996)

TUD гибридный алгоритм (Pedersen, 1998)

NASA/TEAM2 (Markus & Cavalieri, 2000)

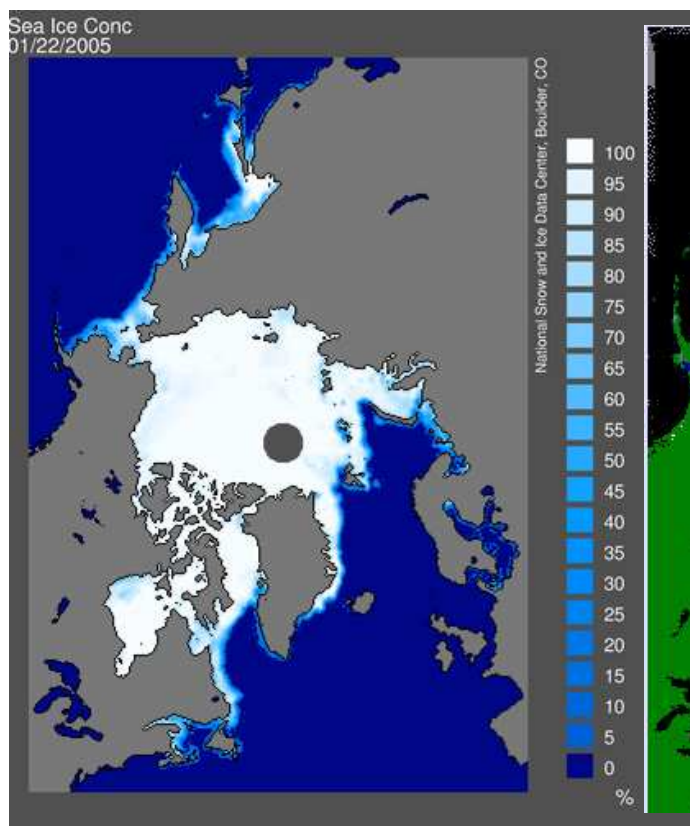
ASI или Artist Sea Ice алгоритм (Kaleschke et al., 2001)

Сравнение алгоритмов восстановления сплочённости морского льда по пассивным микроволновым измерениям

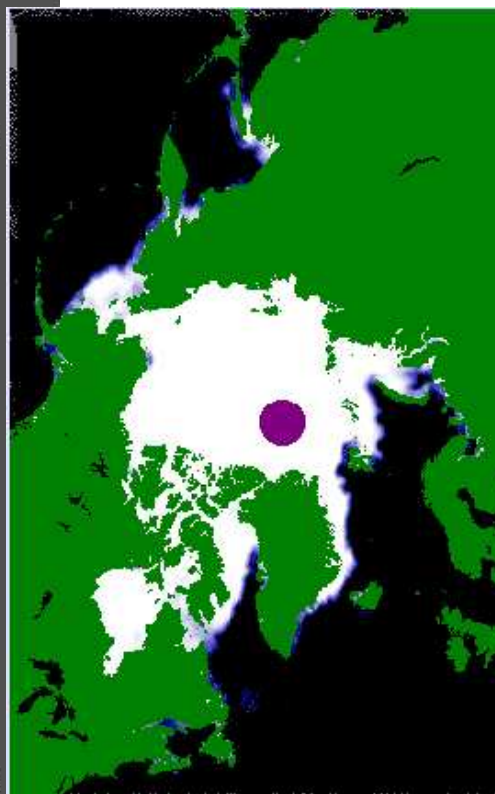


Источник: <http://arctic-roos.org/observations/comparison-of-algorithms>

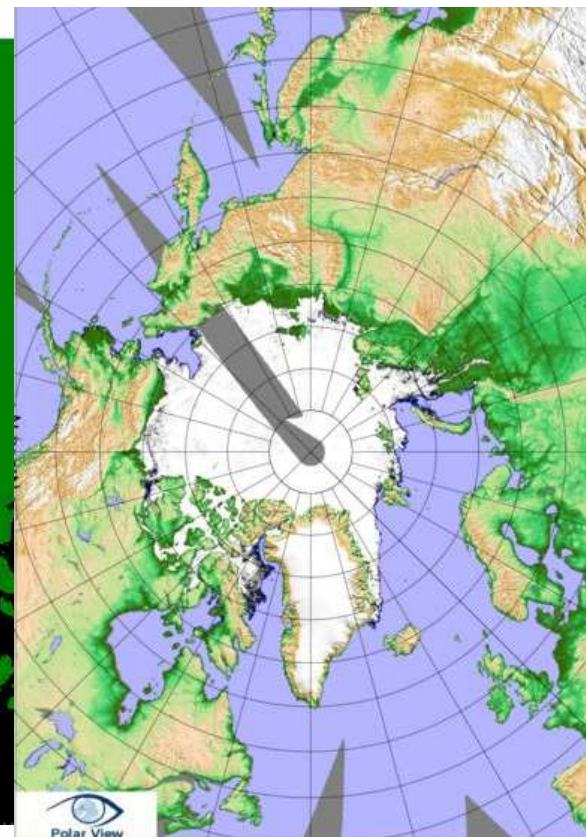
Карты сплочённости морского льда по пассивным микроволновым измерениям



NASA Team



NORSEX



ASI

NASA Team алгоритм

$$PR = [TB(19V) - TB(19H)] / [TB(19V) + TB(19H)]$$

$$GR = [TB(37V) - TB(19V)] / [TB(37V) + TB(19V)]$$

polarization и spectral gradient ratio

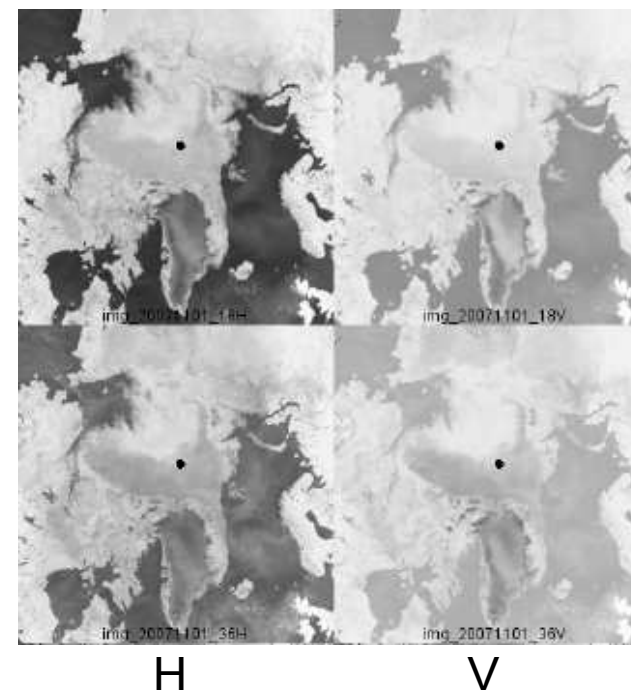
$$C_F = (a_0 + a_1PR + a_2GR + a_3PR * GR)/D$$

$$C_M = (b_0 + b_1PR + b_2GR + b_3PR * GR)/D$$

$$C_T = C_F + C_M ,$$

где TB – яркостные температуры, измеренные на соответствующих частотах спутниковым прибором,

C_T , C_F , C_M – общая сплоченность ледяного покрова и частные сплоченности (однолетнего и многолетнего льда)



NORSEX алгоритм

Внутри-пиксельная классификация

$$C_{MY} + C_{FY} + C_{OW} = 1$$

$$T_b = C_{MY}e_{MY}T_{MY} + C_{FY}e_{FY}T_{FY} + C_{OW}e_{OW}T_{OW},$$

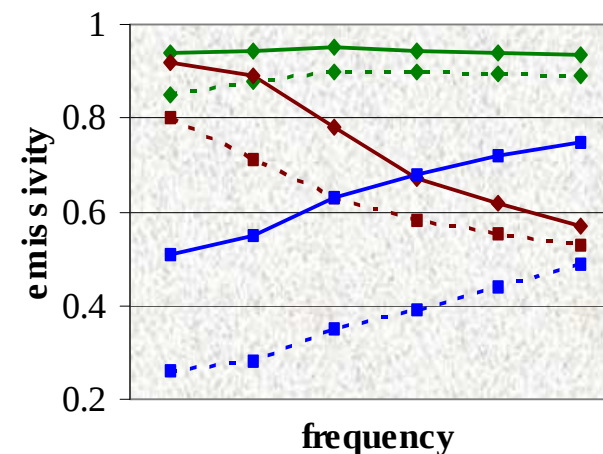
где T_b – яркостная температура,

C_{MY} , C_{FY} , C_{OW} процентное содержание в пикселе многолетнего льда, однолетнего льда и открытой воды

e_{MY} , e_{FY} , e_{OW} – излучательные способности ,

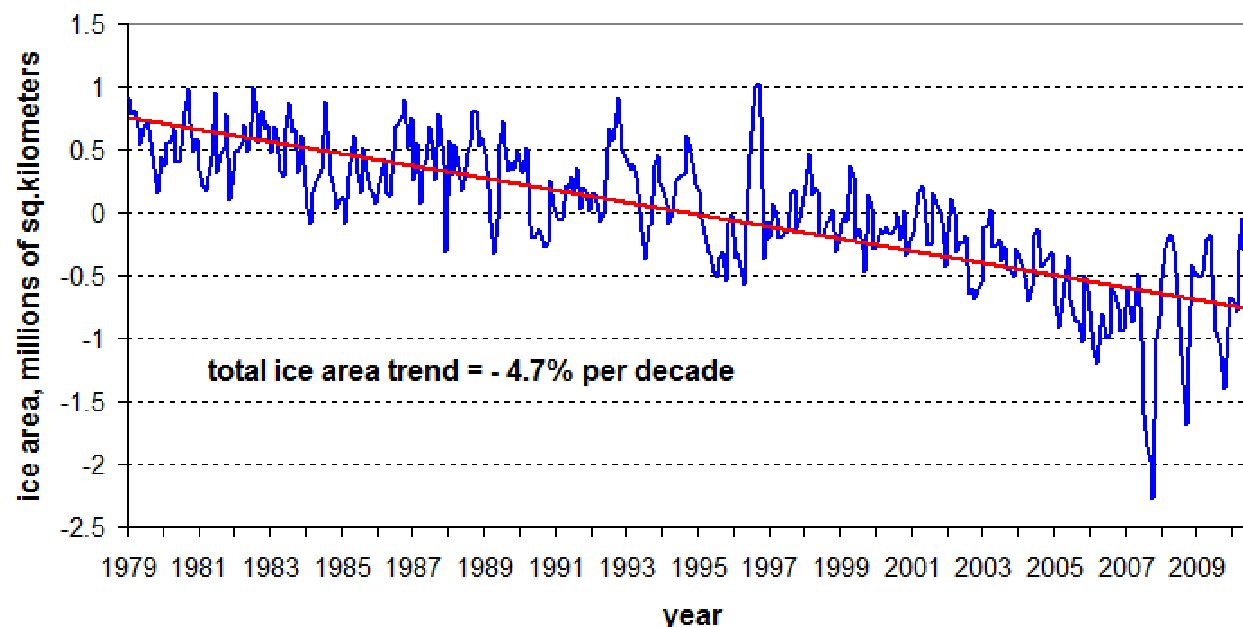
T_{MY} и T_{FY} -температуры многолетнего и однолетнего льда ,

$T_{OW} = 272K$, T_{MY} и T_{FY} рассчитываются с использованием температуры воздуха



Изменения арктического морского льда по данным микроволновых наблюдений

Спутниковое пассивное микроволновое зондирование – одно из наиболее важных и эффективных средств мониторинга изменений ледяного покрова Арктики

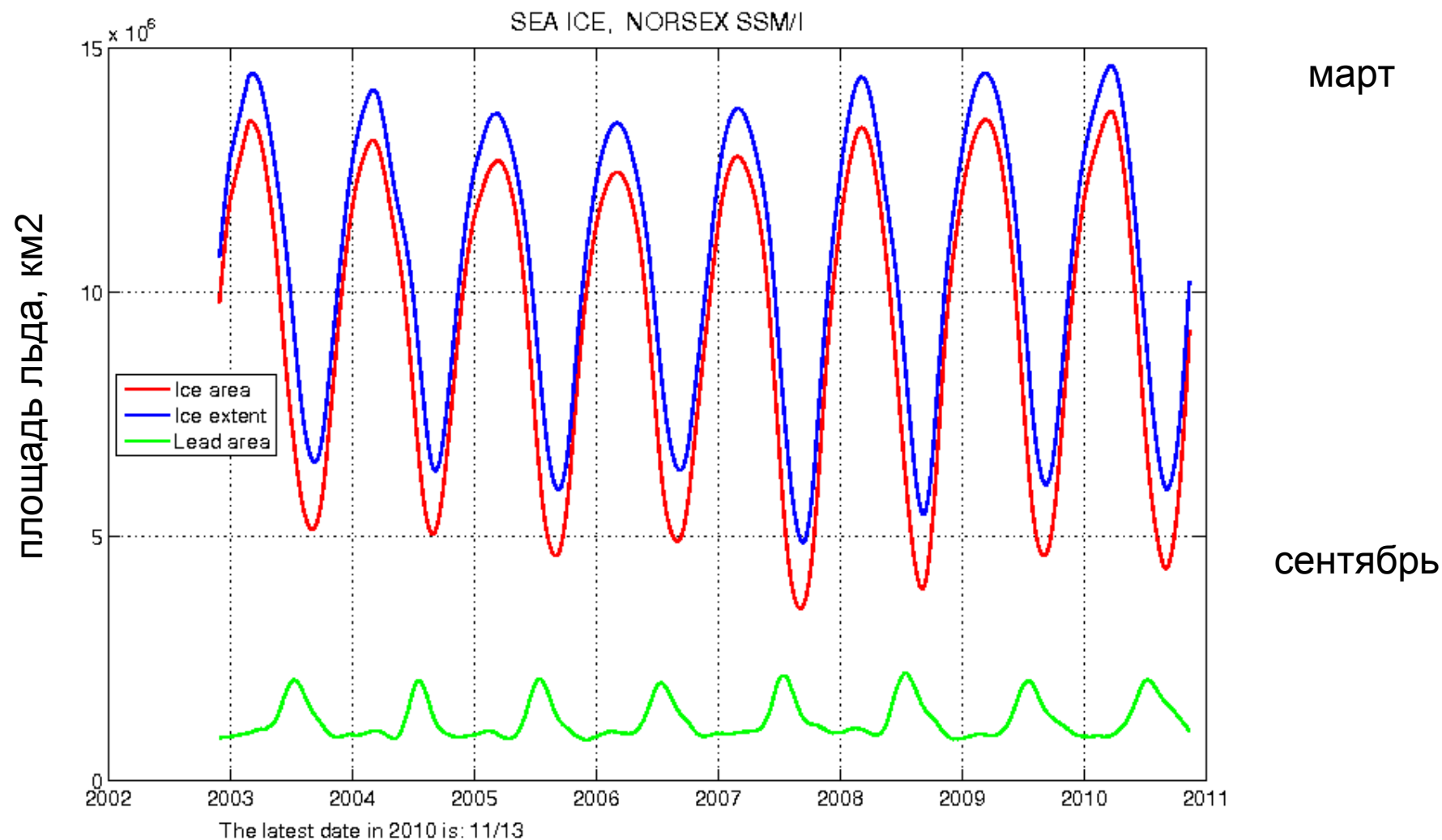


NORSEX:

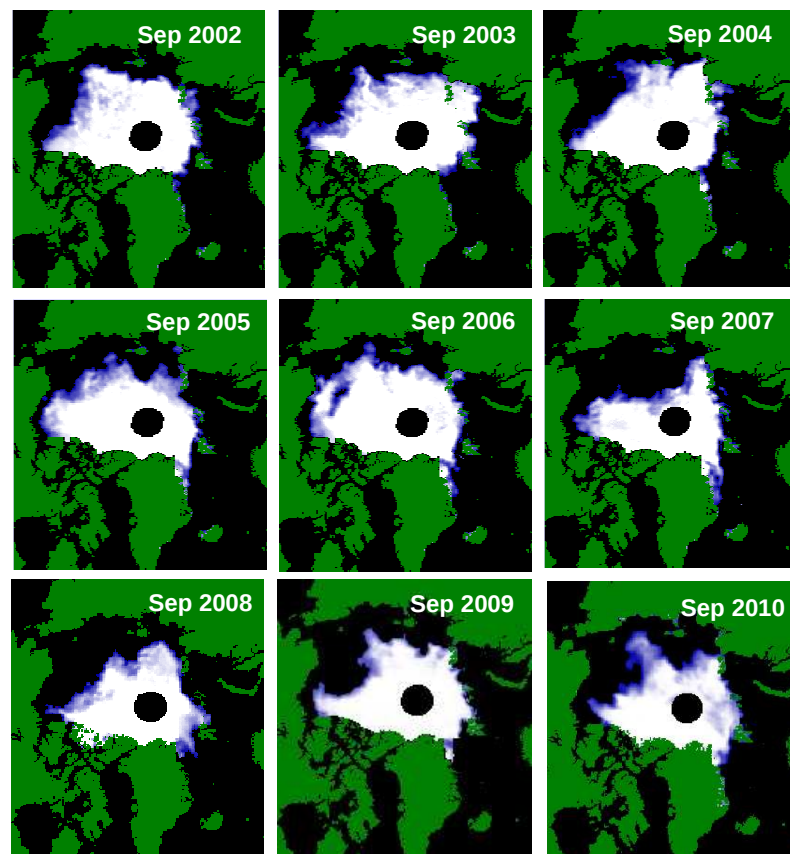
Общая площадь ледяного покрова уменьшалась за время наблюдений в среднем на **48 388 ± 1 870 км² в год**

Полное уменьшение за 32 года составляет примерно **15%**

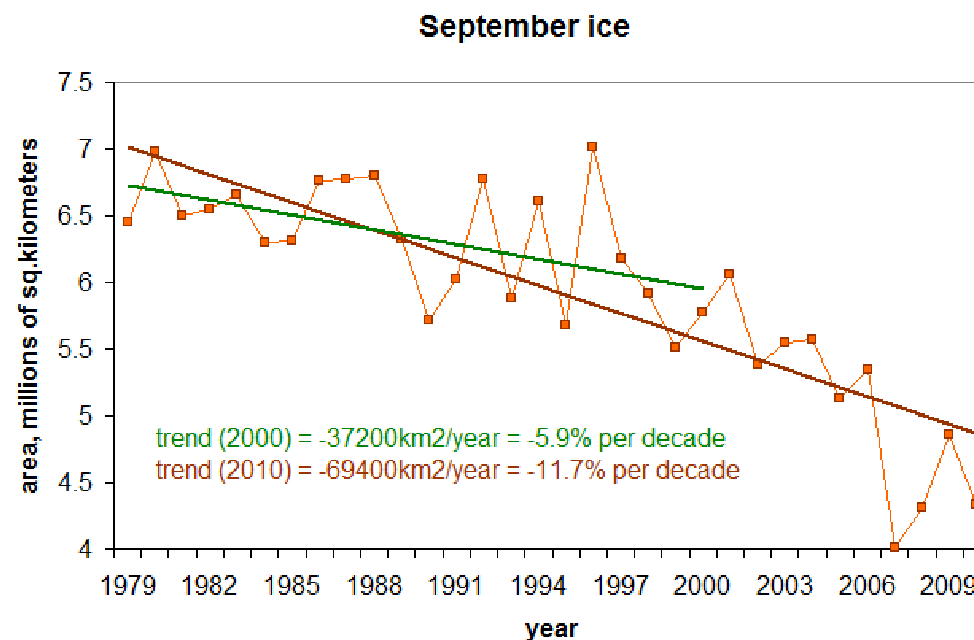
Изменения арктического морского льда по данным микроволновых наблюдений



Изменения арктического морского льда по данным микроволновых наблюдений



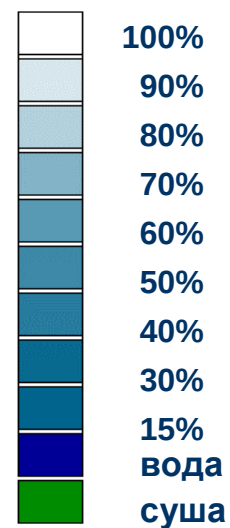
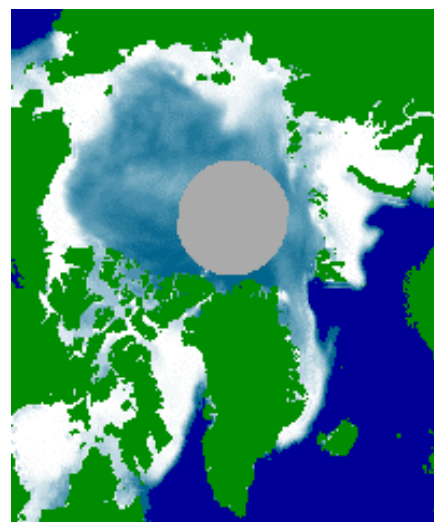
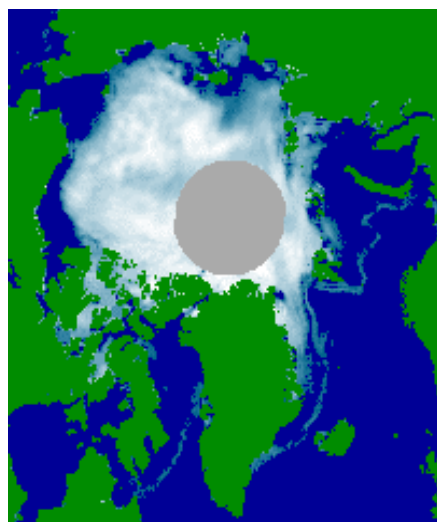
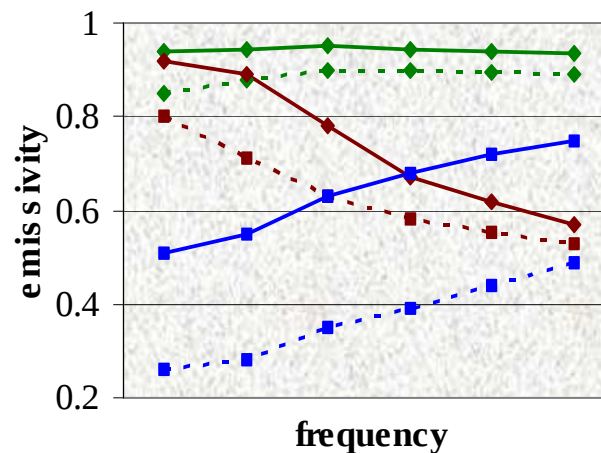
Ледовые карты за сентябрь месяц



Площадь морского льда в сентябре 2002 была меньше, чем в сентябре 1979, на **1.07 млн. км²**

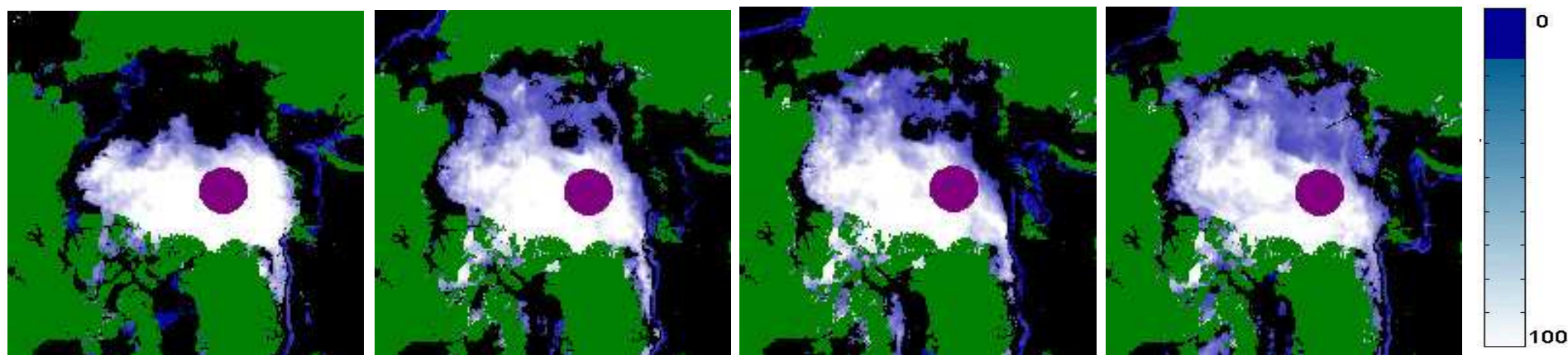
С сентября 2002 по начало сентября 2007 Арктика потеряла уже более **1.3 млн. км²** морского льда

Определение типа морского льда по данным пассивных микроволновых измерений

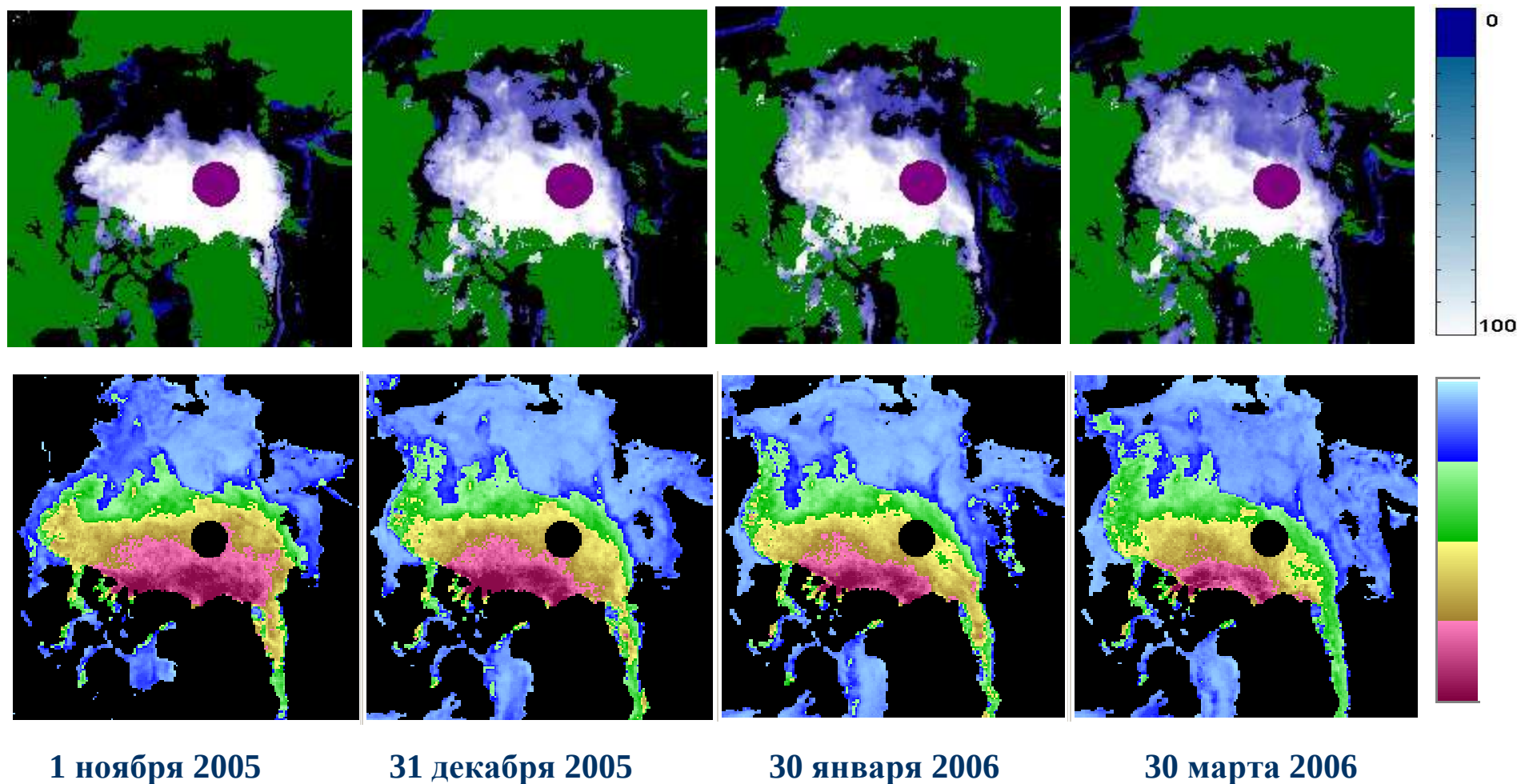


Общий ледяной покров = Многолетний лёд + Однолетний лёд

Карты многолетнего льда, полученные по алгоритму NORSEX

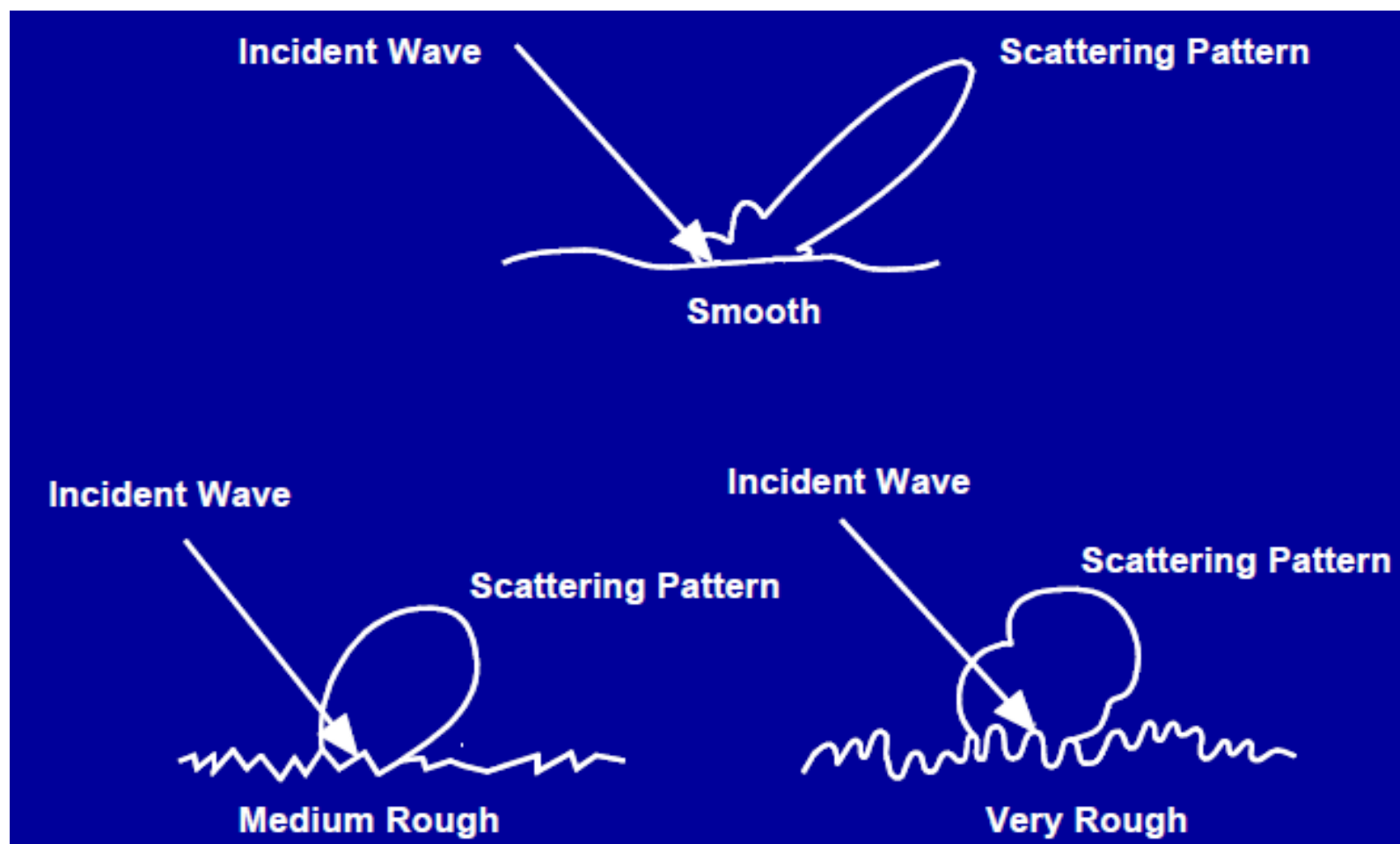


Карты многолетнего льда, полученные по алгоритму NORSEX и данные скаттерометра



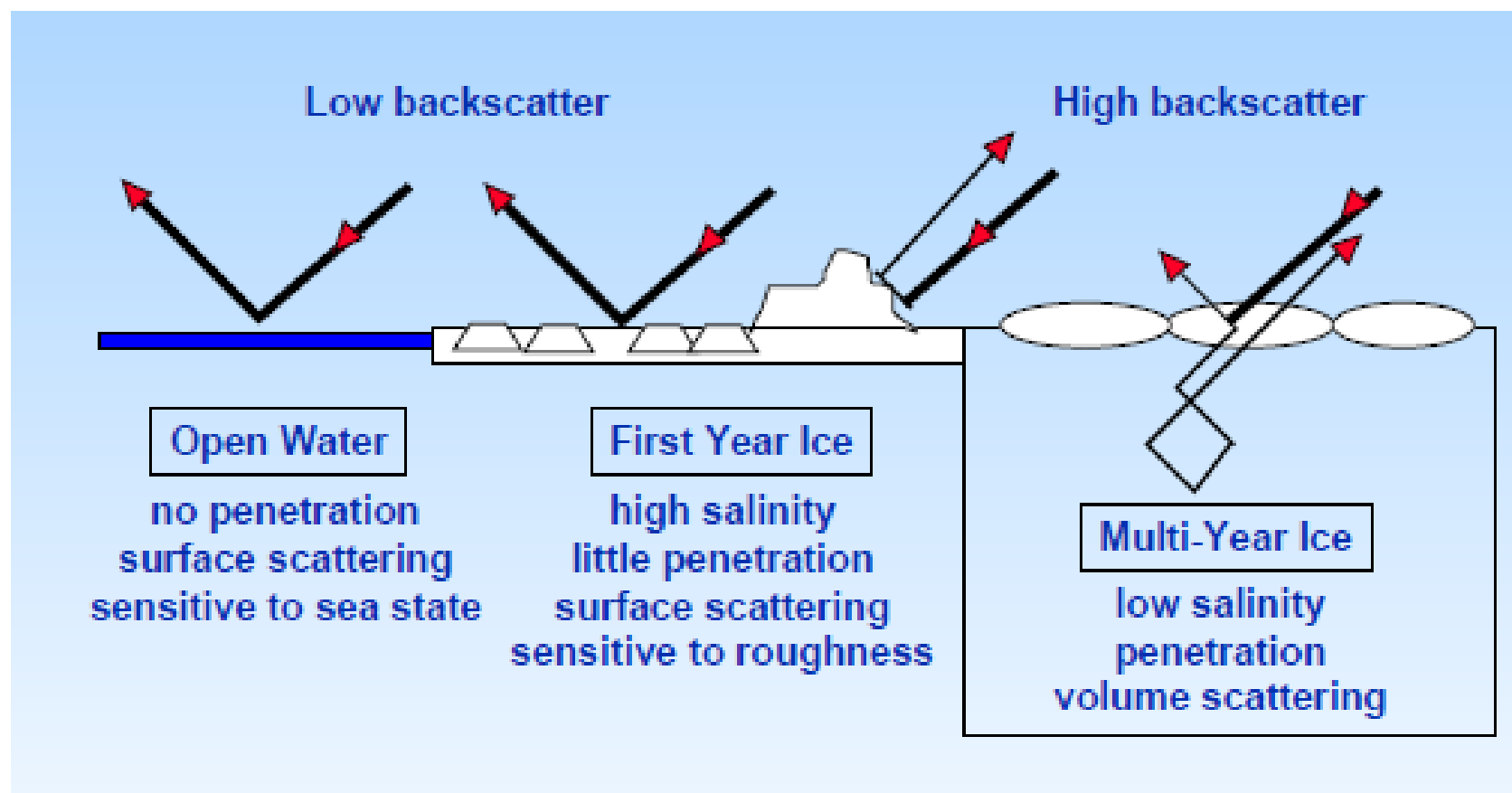
Данные скаттерометра позволяют разделить однолетний и многолетний лёд

Использование данных активного дистанционного зондирования



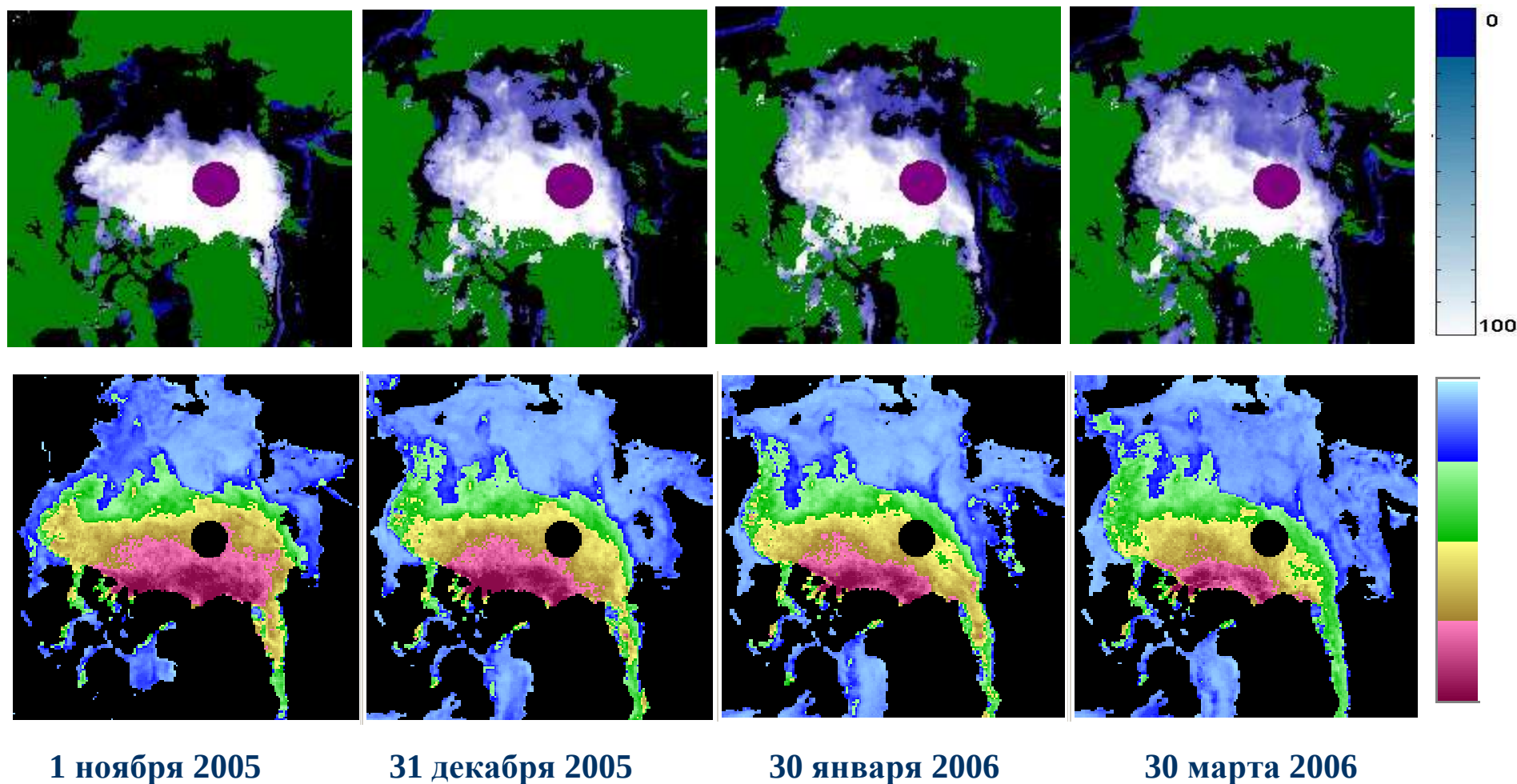
гладкая → шероховатая поверхность

Использование данных активного дистанционного зондирования



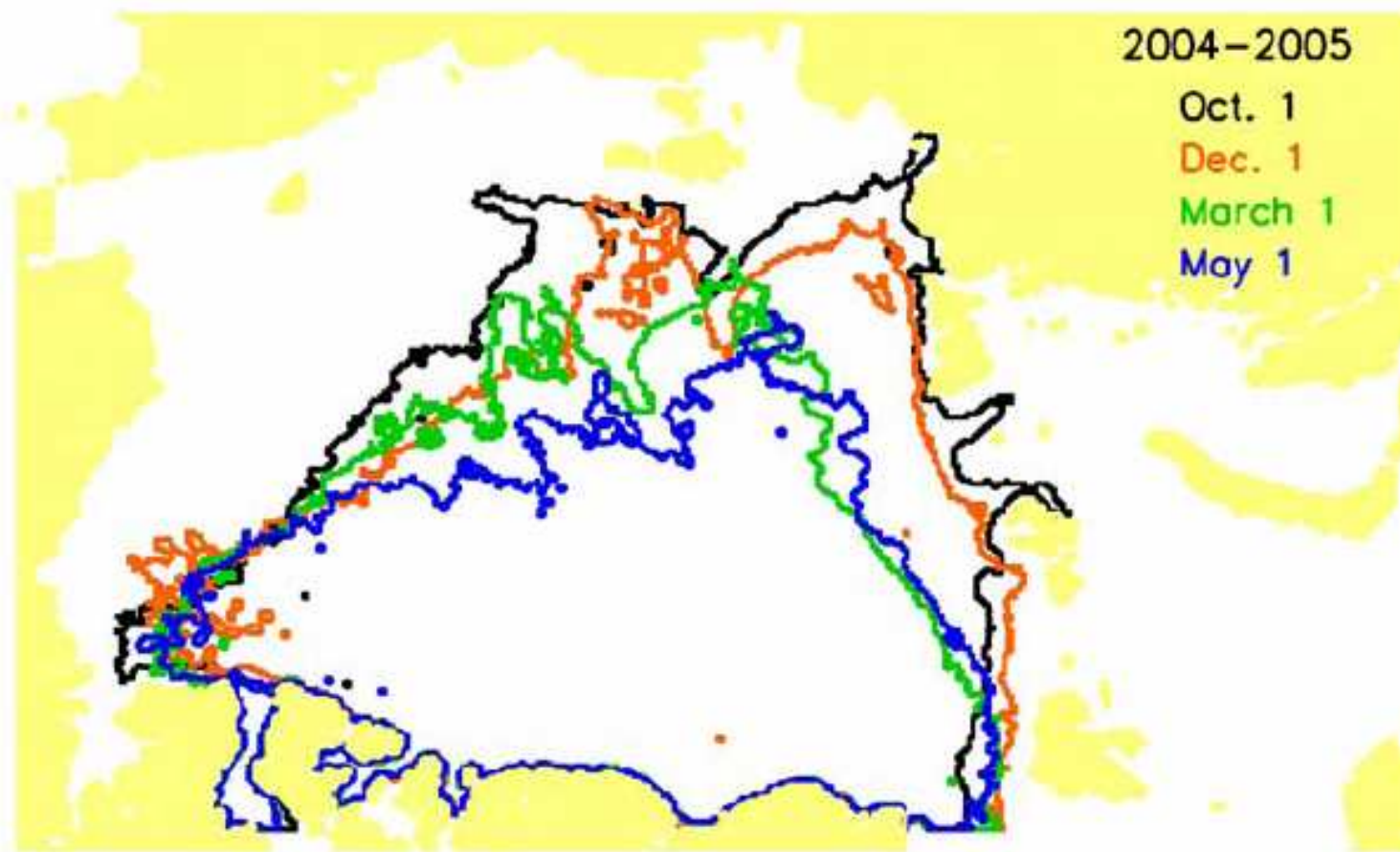
открытая вода - однолетний лёд - многолетний лёд

Карты многолетнего льда, полученные по алгоритму NORSEX и данные скаттерометра



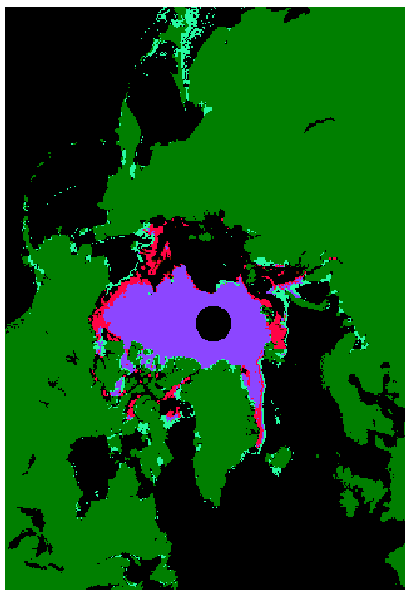
Данные скаттерометра позволяют разделить однолетний и многолетний лёд

Многолетний лёд по данным скаттерометра QuikSCAT

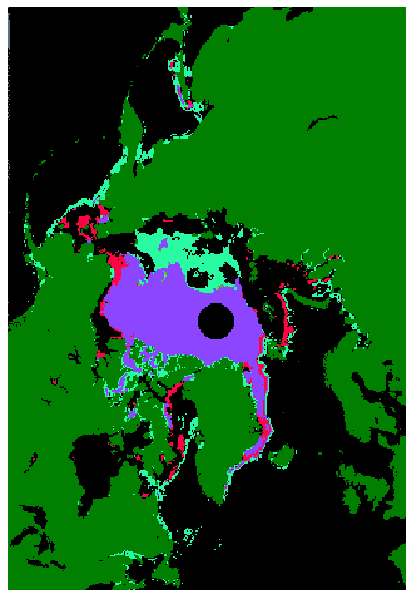


Источник: IFREMER

Совместная обработка данных пассивных радиометров и скаттерометра -> многолетний лёд



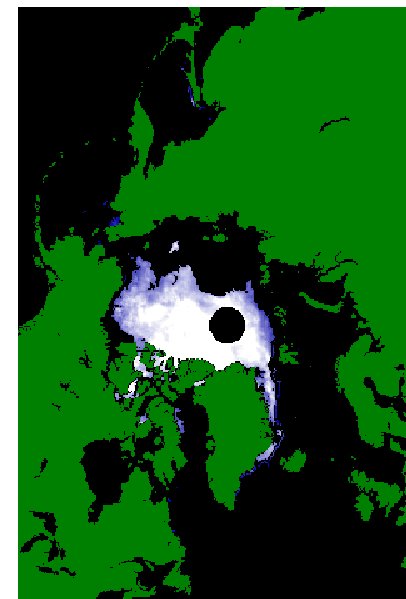
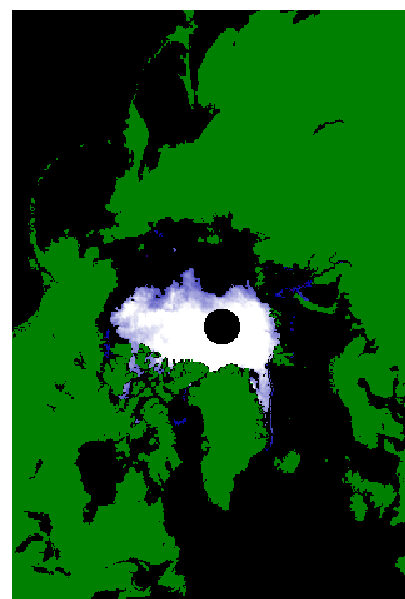
01 ноябрь 2005



01 январь 2006

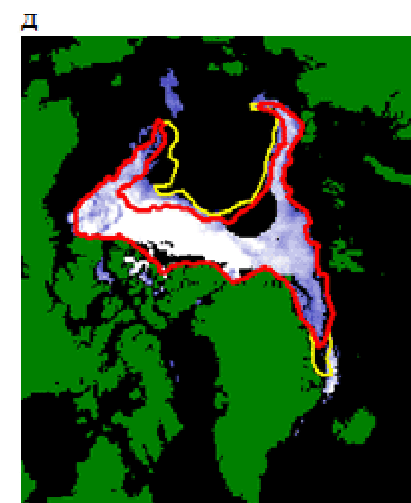
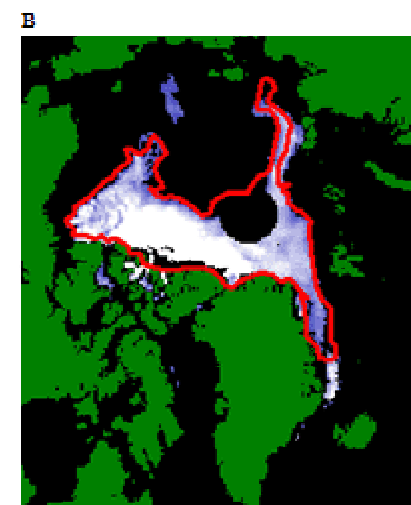
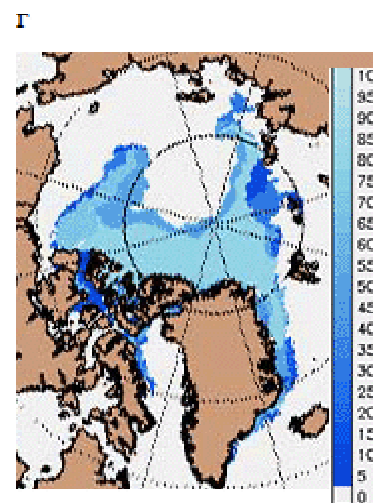
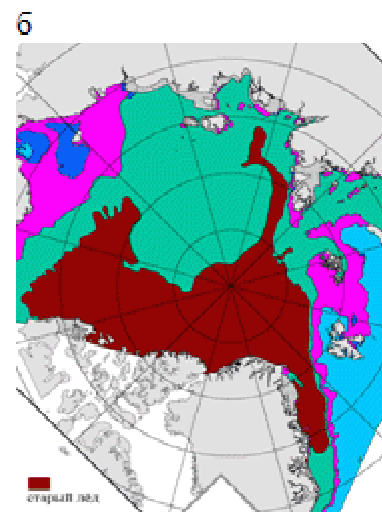
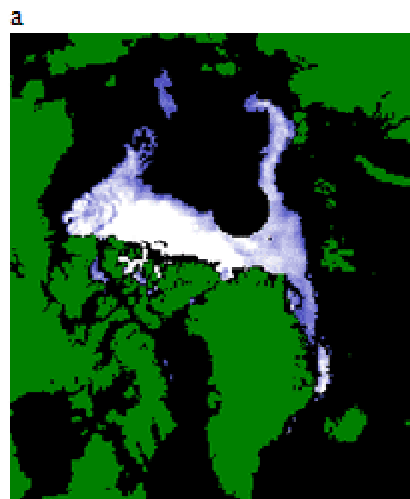
- Многолетний лёд по данным пассивного микроволнового зондирования
- Многолетний лёд по данным скаттерометра
- Пересечение
- Не многолетний лёд
- Маска суши

Результат совместной обработки →

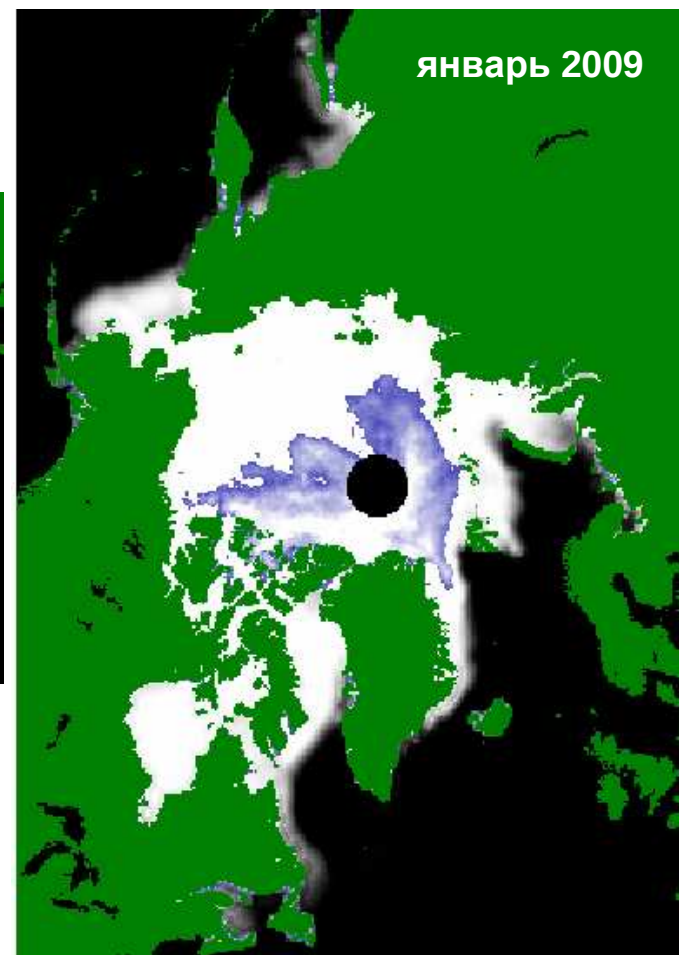
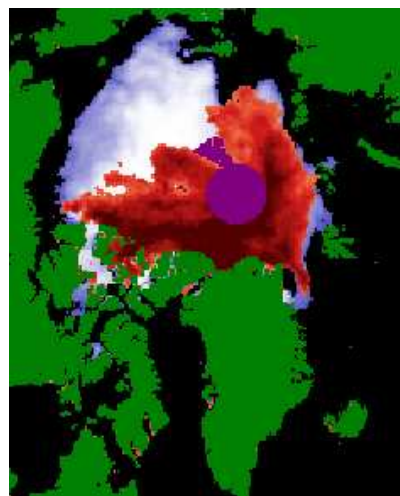
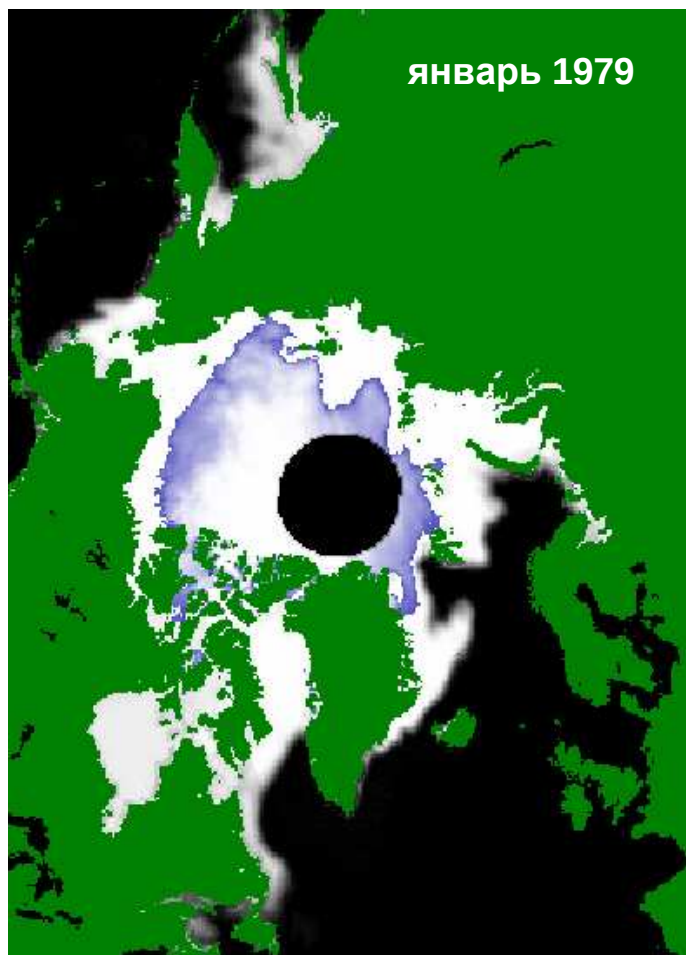


Верификация карт многолетнего льда

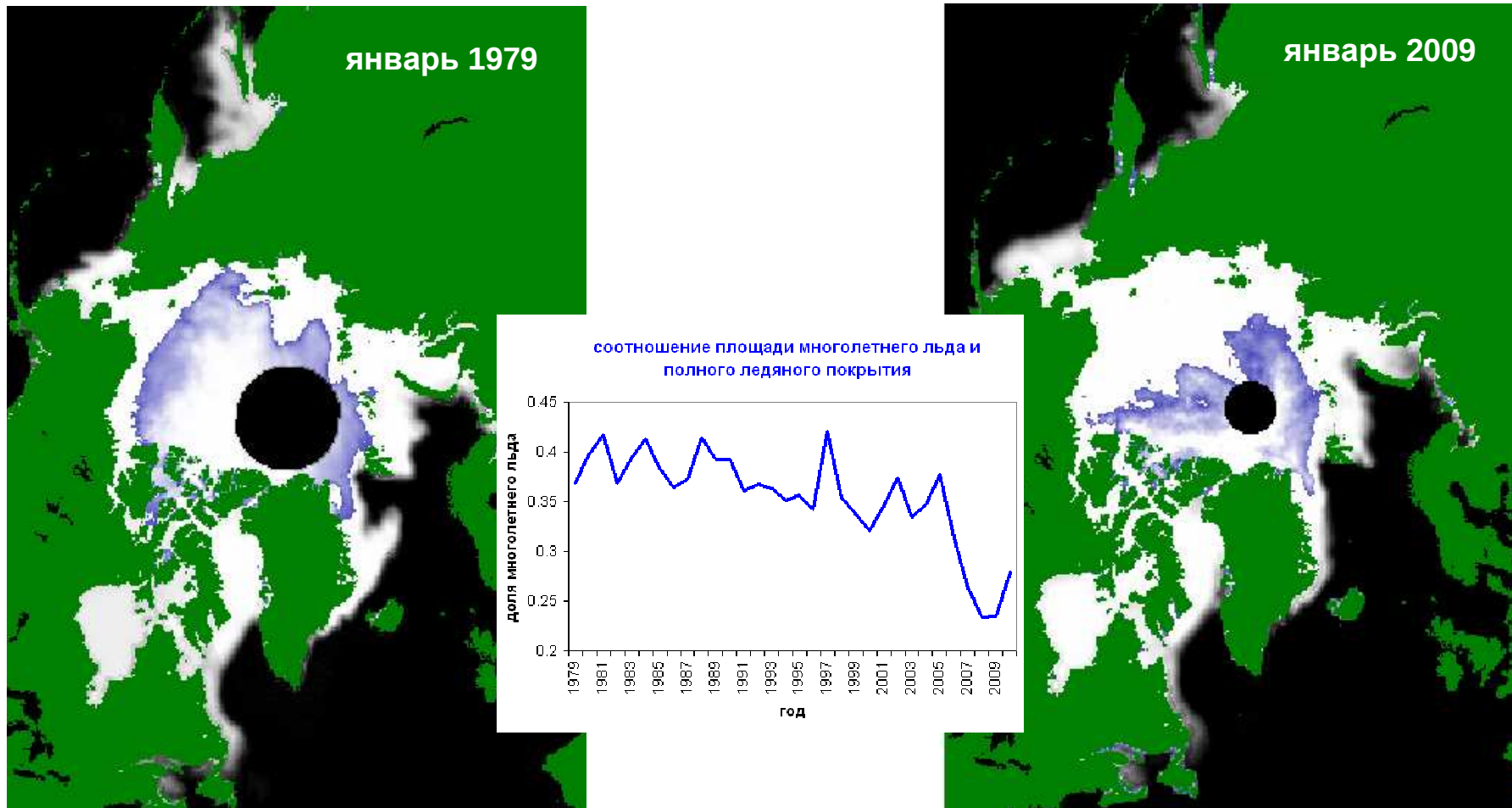
а – многолетний лёд по данным пассивного м/в зондирования,
б – ледовая карта ААНИИ,
в – сравнение,
г – ледовая карта NIS (Американского ледового центра),
д – сравнение.



Сопоставление многолетнего льда в 1979 и 2009 годах



Соотношение многолетнего льда и полного ледяного покрытия в январе, 1979/2009

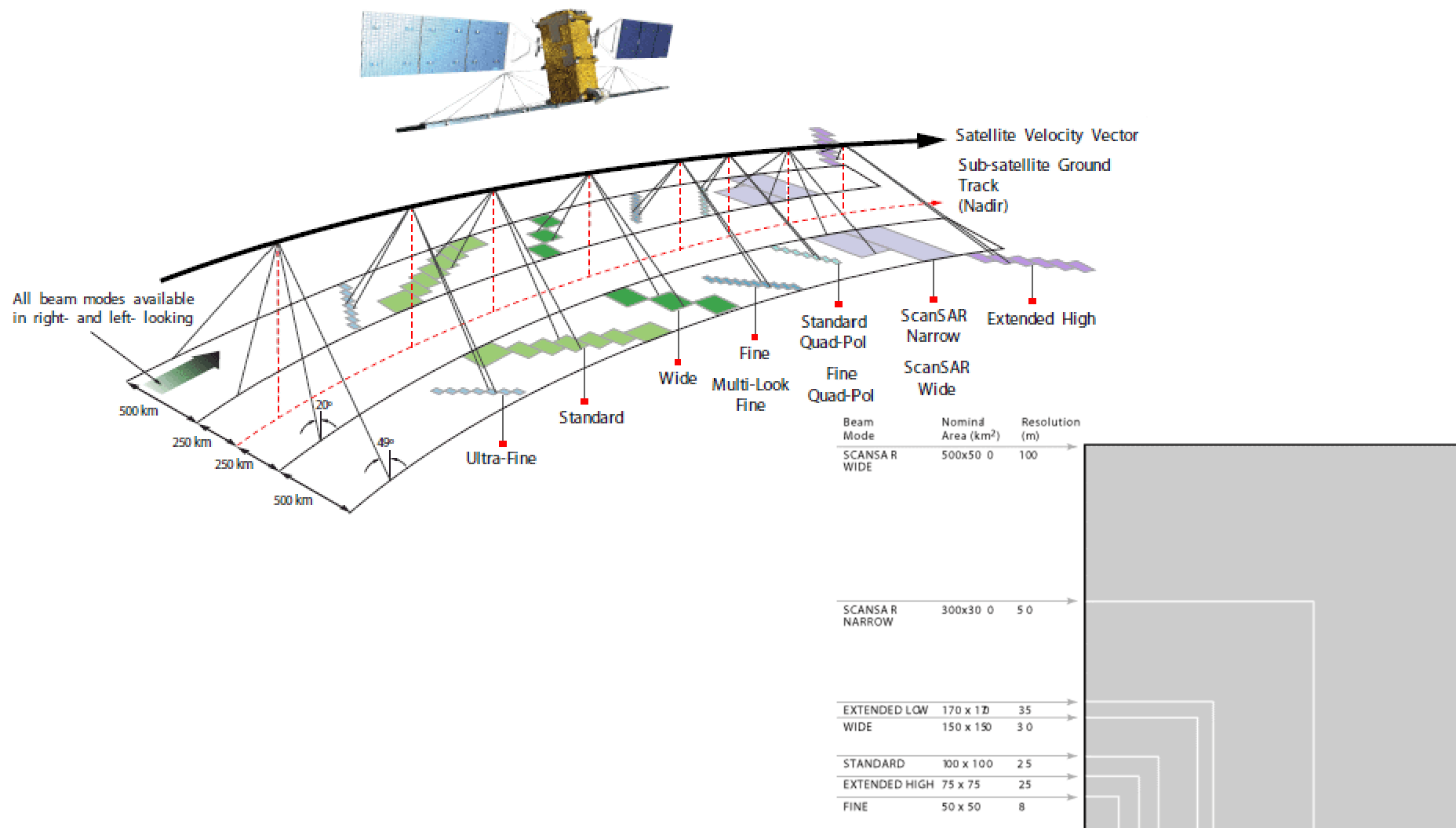


Уменьшение $\approx 40\%$

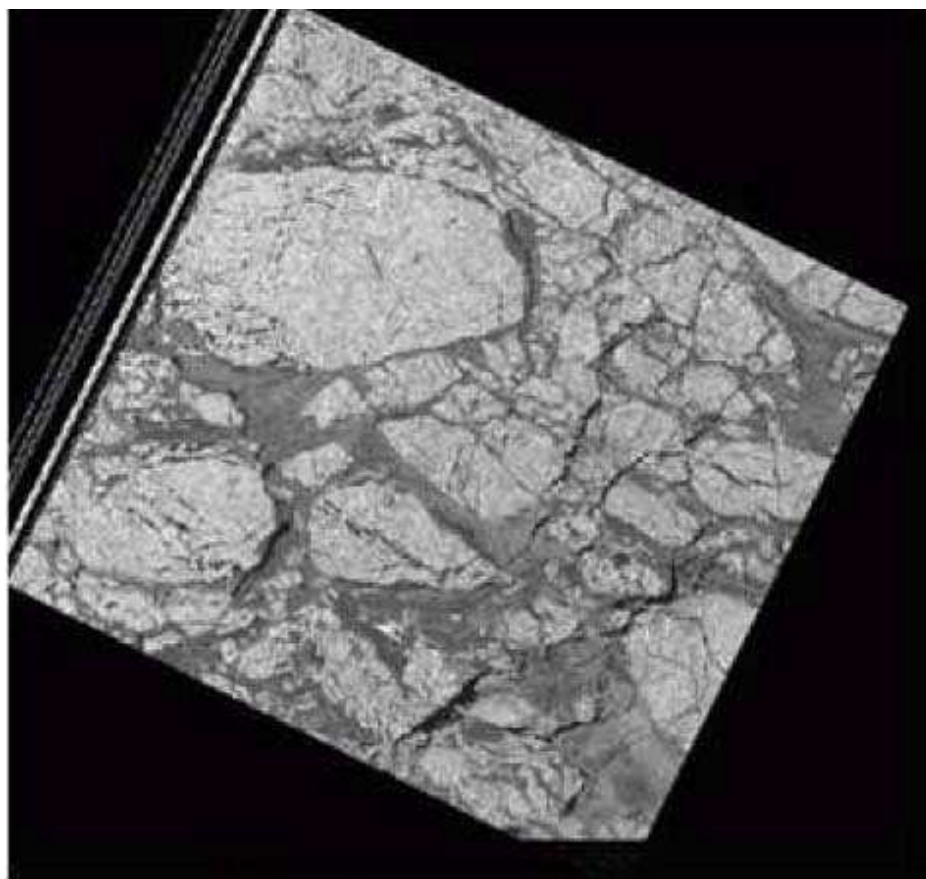
**Основные спутники,
имеющие на борту
радары с
синтезированной
апертурой (SAR)**

- ERS-2, SAR, C-band (5,7 см), VV поляризация, полоса обзора 100км (1995 г.)
- ENVISAT, ASAR, C-band, 5 режимов работы, VV или HH поляризация (2002 г.)
- RADARSAT-1 (1995 г.) → RADARSAT-2 (2007 г.), ...

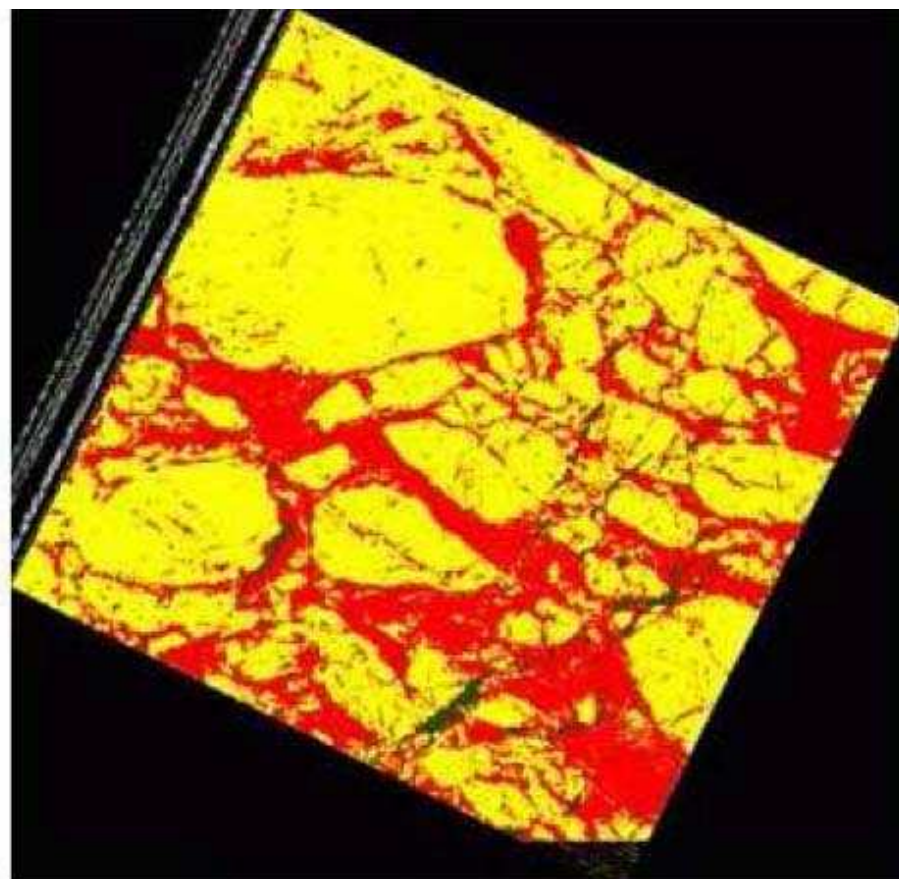
RADARSAT - 2



Определение типов льда по данным SAR



SAR image



Classified image

Colour code:  = open water,  = leads,  = ridges,  = new ice,  = old ice

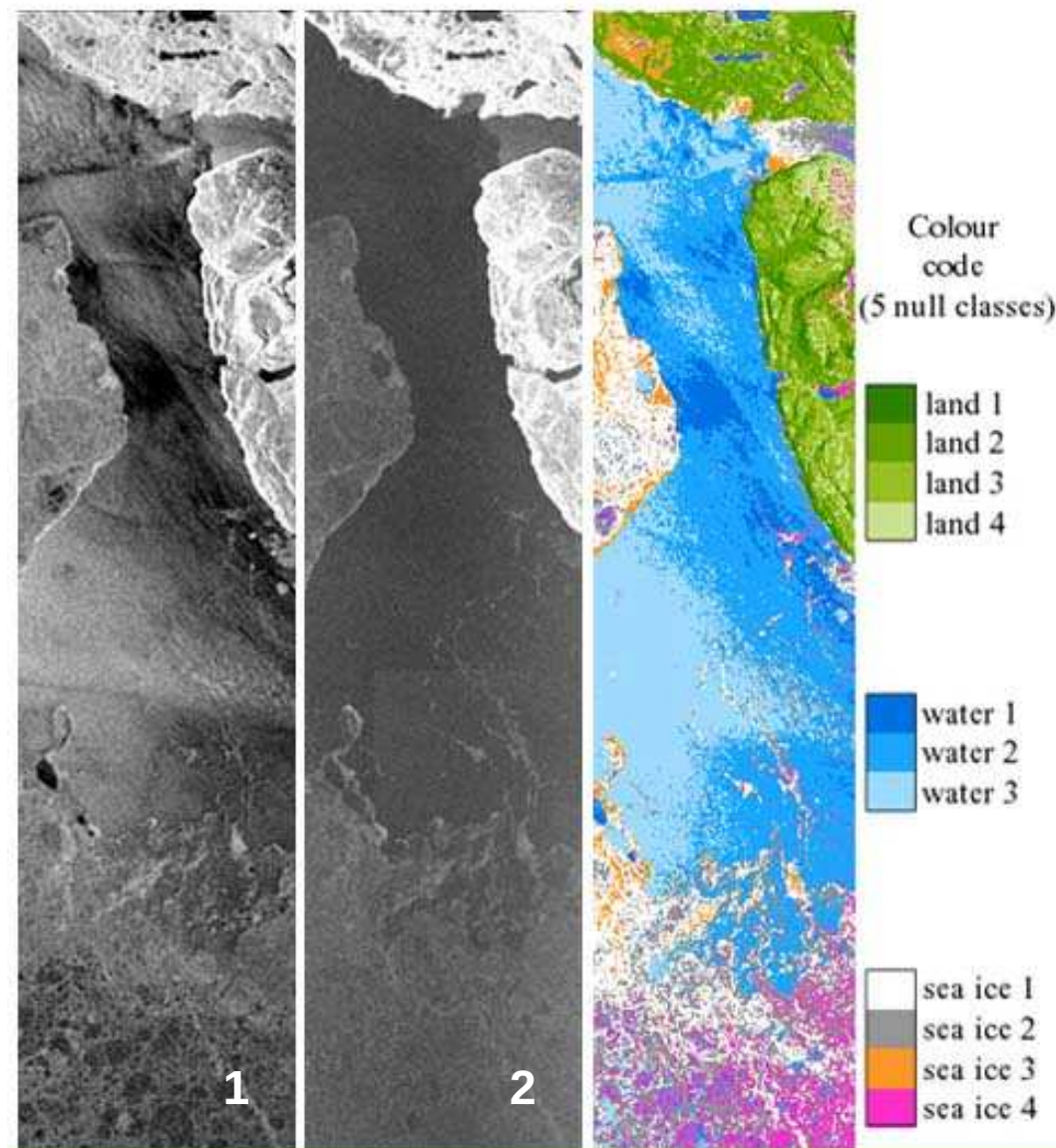
Определение типов льда по данным SAR

Преимущество
использования данных
измерений с разными
поляризациями

1: **HH** поляризация
подчеркивает разницу в
типах льда

2: **HV** поляризация помогает
выявить границу ледяного
покрытия

CASE STUDIES: ENHANCING SEA-ICE MONITORING WITH
RADARSAT - 2



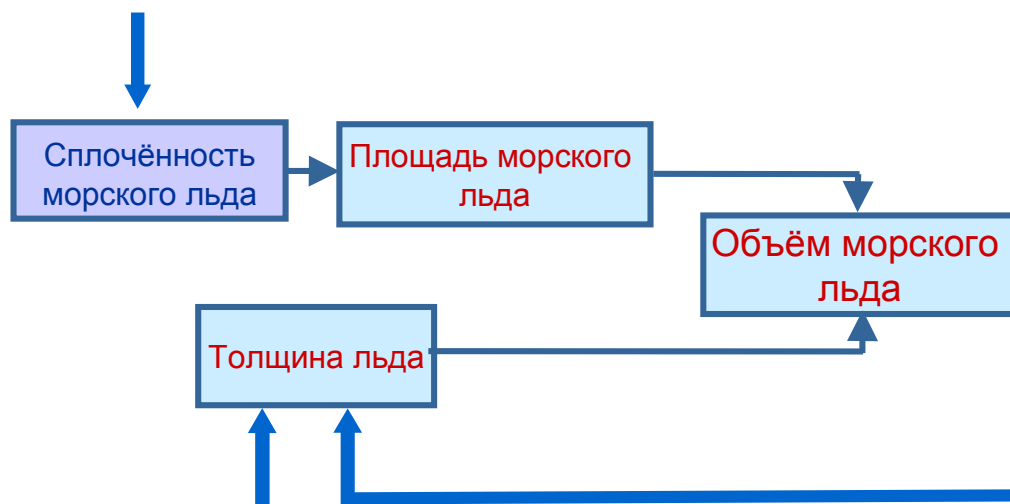
Данные дистанционного зондирования дополняющие друг друга при исследовании арктического морского льда

Спутниковые микроволновые радиометры:

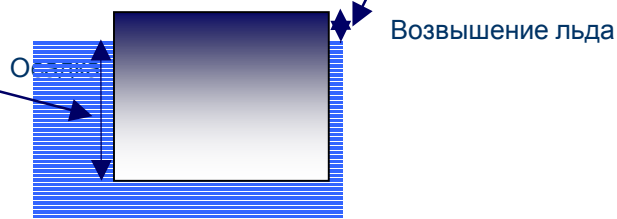
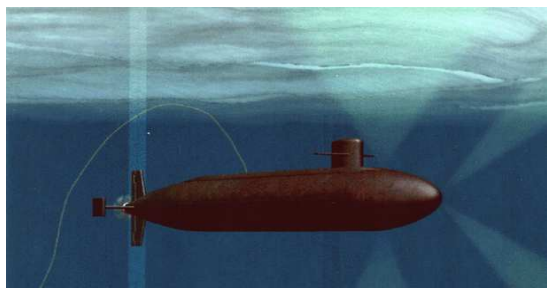
SMMR/Nimbus-7 (US) 1978-1987

SSM/I/DMSP (US) 1987-настоящее время

AMSR-E/Aqua (US) 2002-настоящее время



Подводные лодки США - сонар



Спутниковые альтиметры:

Радиоальтиметры

RA/ERS-1 (EU) 1991-2000

RA/ERS-2 (EU) 1995-наст.
время

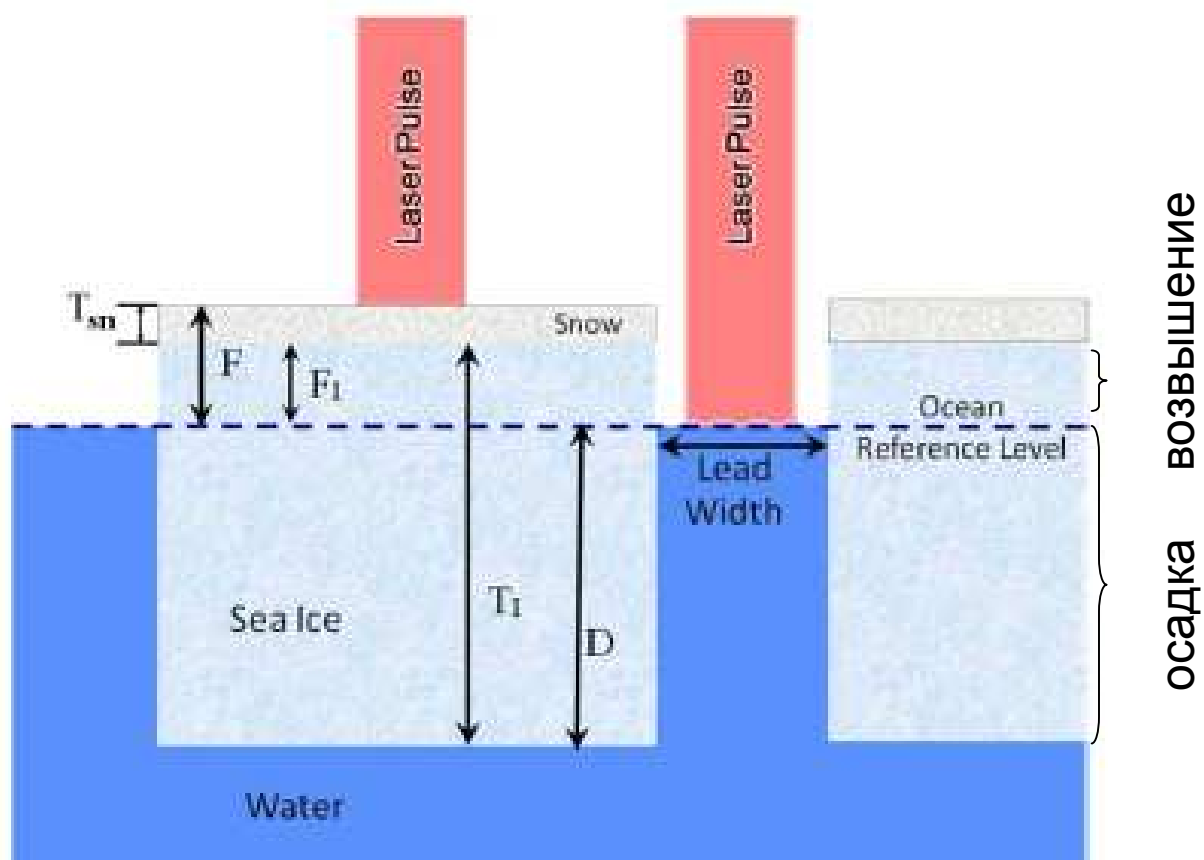
RA-2/Envisat (EU) 2002-
настоящее время

SIRAL/Cryosat-2 в процессе
калибровки

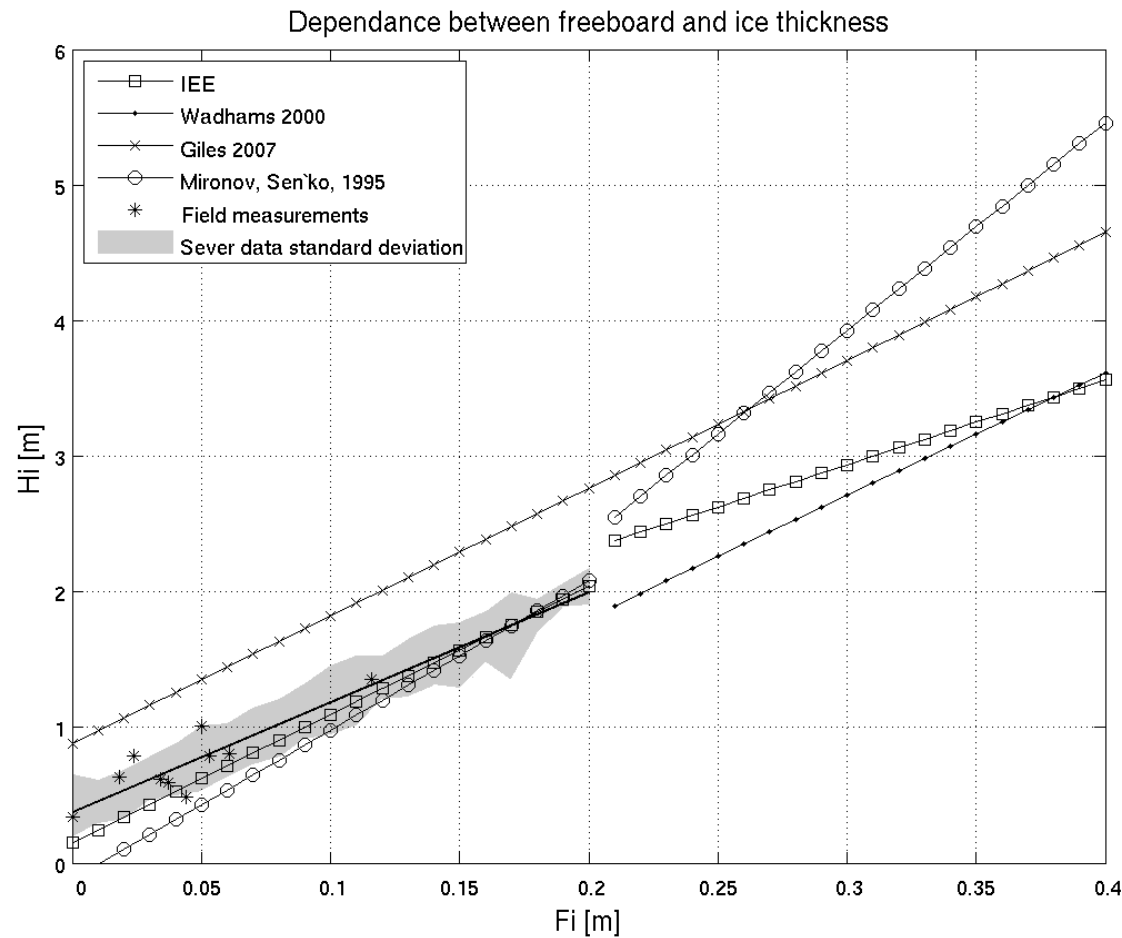
Лазерные альтиметры

GLAS/ICESat (US) 2003-
настоящее время

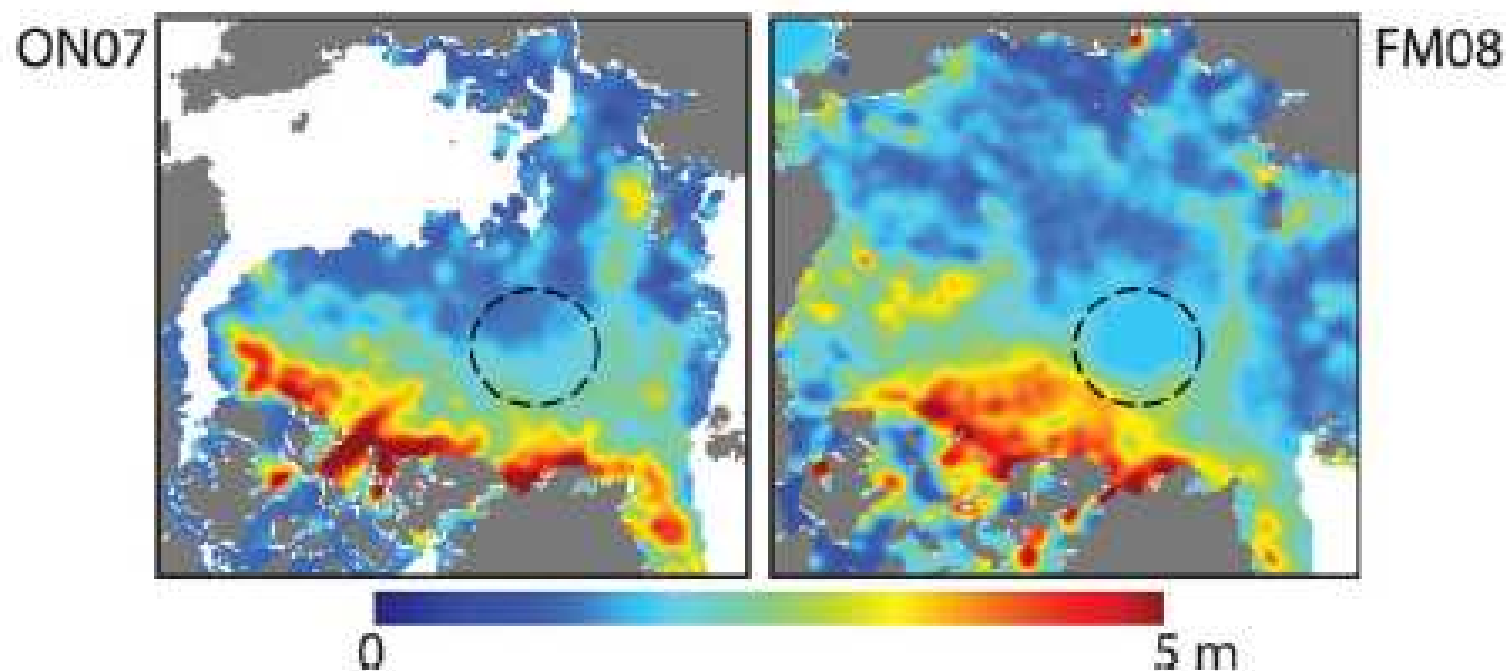
Определение толщины льда по данным спутниковых альтиметров



Определение толщины льда по данным спутниковых альтиметров



Определение толщины льда по данным спутниковых альтиметров



Толщина льда, восстановленная по данным альтиметра ICESat.
Слева – данные для осени 2007 года, справа – данные для конца зимы 2008 года.

Суммарные данные о толщине льда по измерениям ICESat за период 2003-2008 гг.

42% - уменьшение площади многолетних льдов между 2003 и 2008 годом

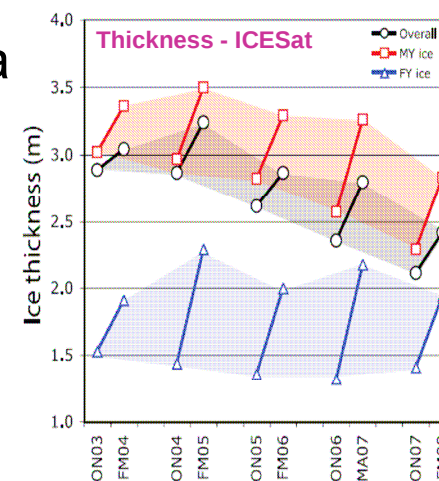
~0.6 м - среднее истончение наиболее старого льда с 2003 по 2008 год

Средняя толщина однолетнего льда осталась приблизительно без изменений за период 2003-2008 гг.

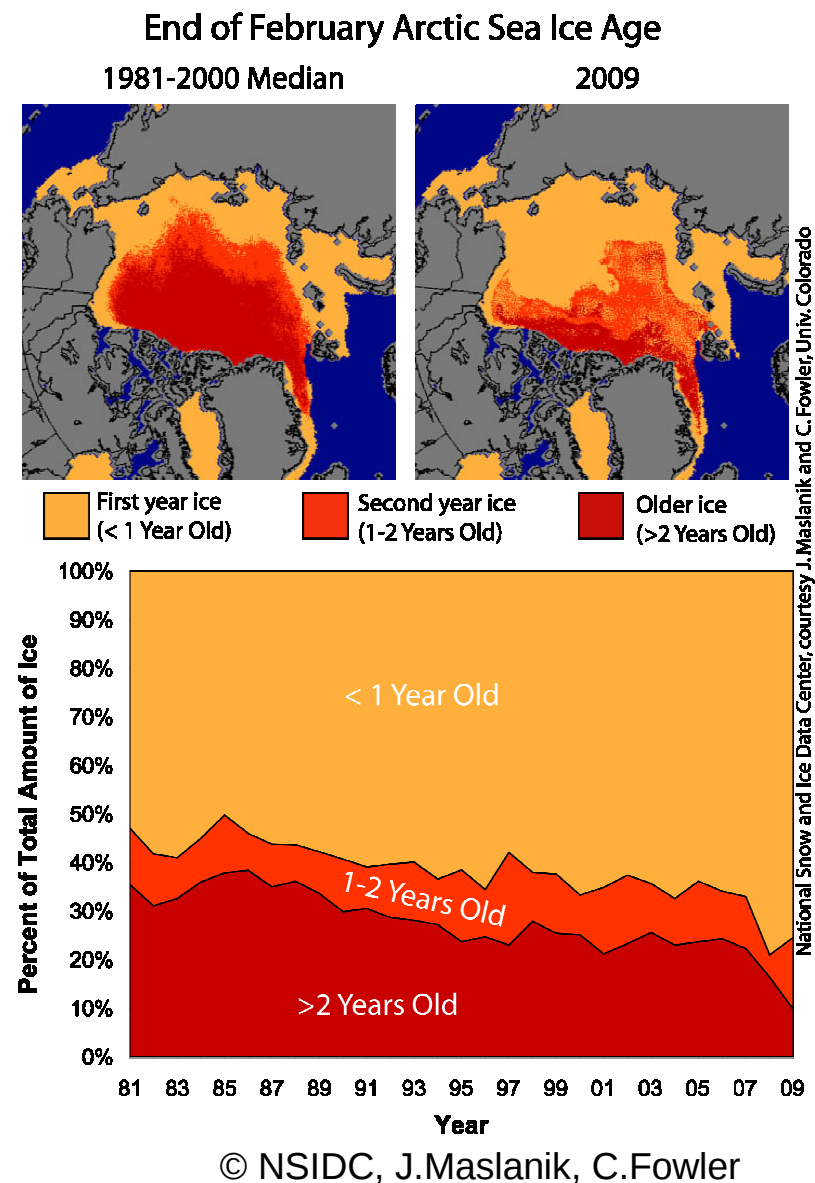
42% для осени и 21% для зимы – потери общего объёма льда за 2003-2008 гг.

В 2008 году площадь и объём многолетнего льда зимой стали меньше, чем у однолетнего льда

Сезонный лёд зимой 2008 г. стал доминирующим типом льда в Арктике



Оценка изменения возраста арктического ледяного покрова с начала 80-х по настоящее время



Получение карт температуры поверхности льда по данным MODIS

Используя измерения в 4-ом и 6-ом каналах прибора MODIS (0.55 μm и 1.6 μm), вычисляется $\text{NSDI} = (\text{band4} - \text{band6}) / (\text{band4} + \text{band6})$

Проверка:

$\text{NSDI} \geq 0.4$

Band 2 reflectance > 0.11

Band 1 reflectance > 0.10

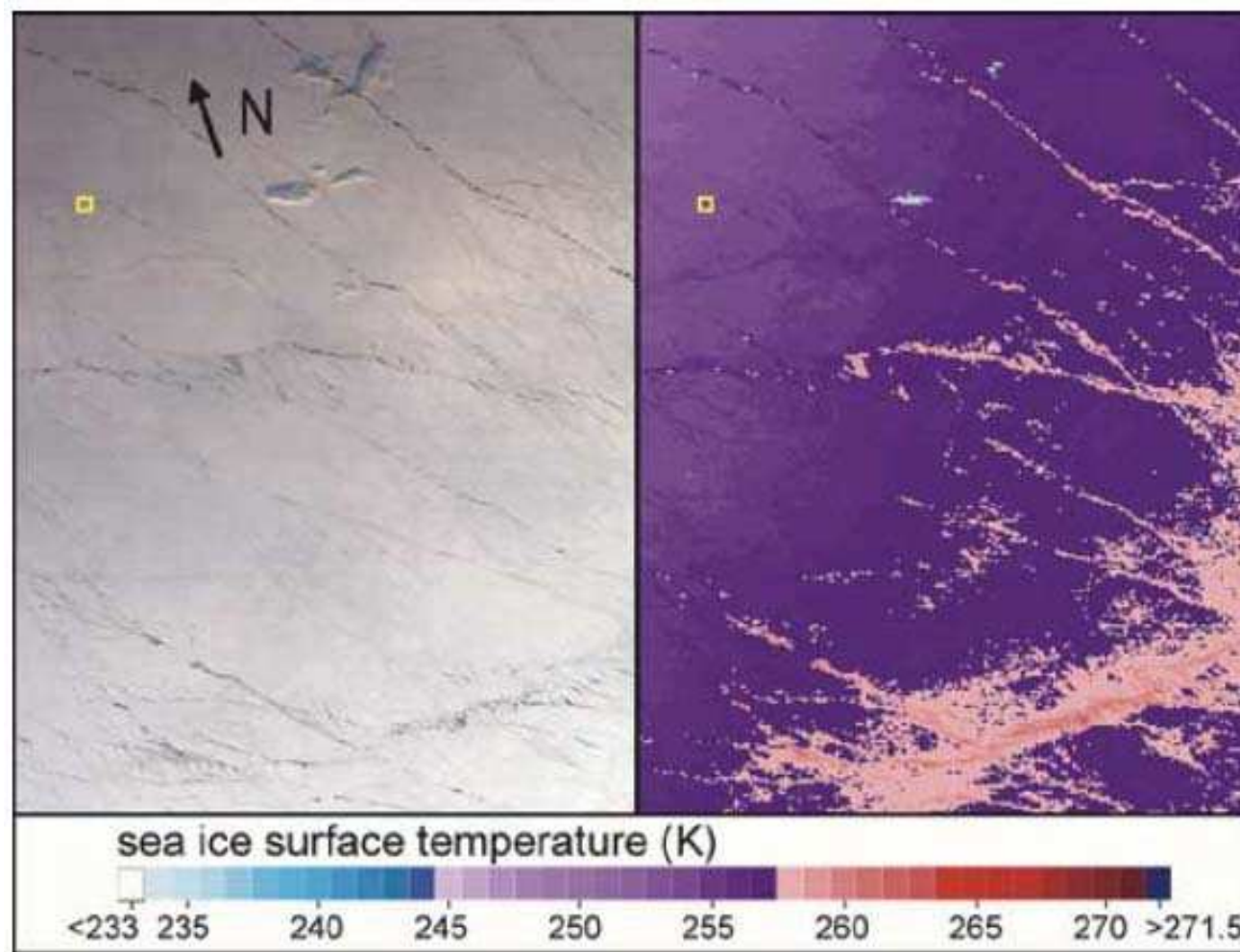
Пиксель не закрыт облачностью

NSDI – normalized snow difference index
IST – ice surface temperature

$\text{IST} = a + bT_{11} + c(T_{11} - T_{12}) + d[(T_{11} - T_{12})(\sec\theta - 1)]$,

где a, b, c, d — эмпирически определяемые коэффициенты, а T_{11} и T_{12} - MODIS band 31 и 32

Получение карт температуры поверхности льда по данным MODIS

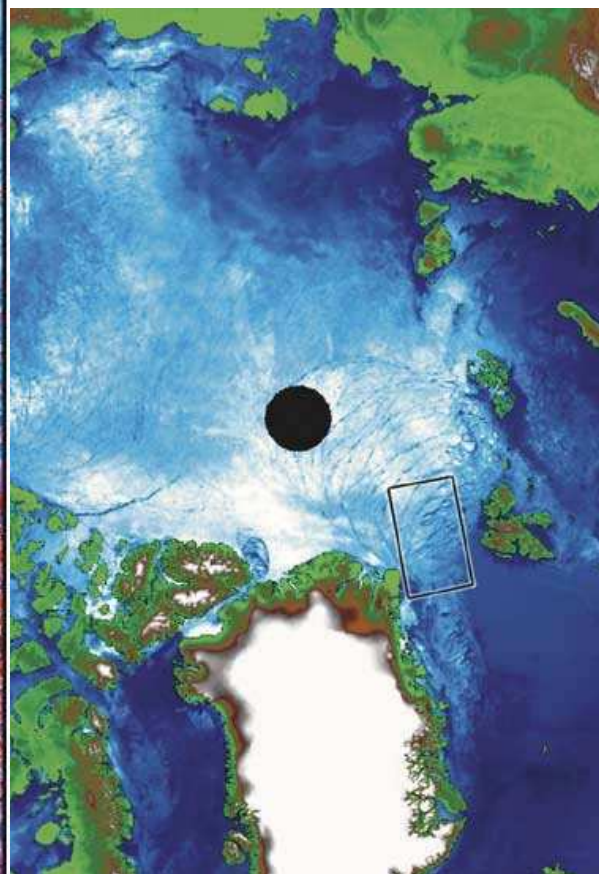
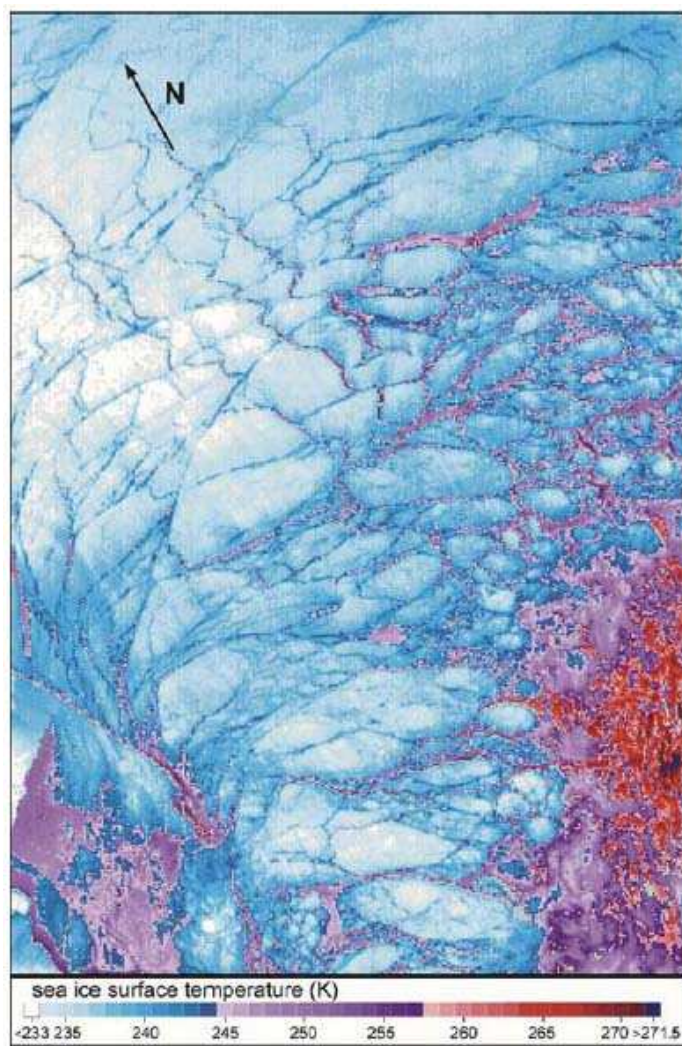


6 марта 2003 г.

Ледяное покрытие
к северу от Аляски.

Слева – данные
MODIS в видимом
диапазоне, справа
– температура
поверхности льда

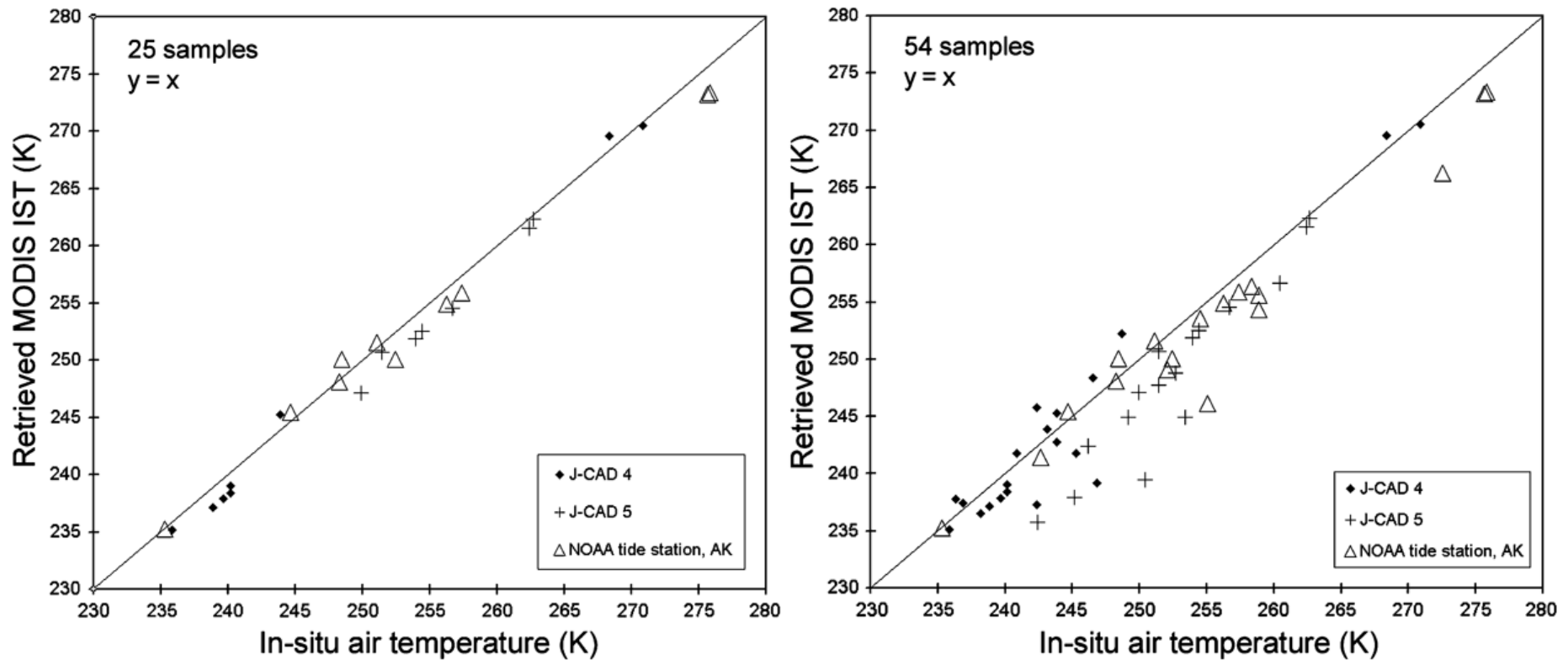
Получение карт температуры поверхности льда по данным MODIS



12 марта 2003 г.

Справа –
изображение
AMSR-E 89 ГГц,
осредненное для
нескольких полос
захвата, участок,
соответствующий
карте справа
выделен
прямоугольником,
слева –
температура
поверхности льда
по данным MODIS

Сравнение карт температуры поверхности льда по данным MODIS и данных in situ измерений

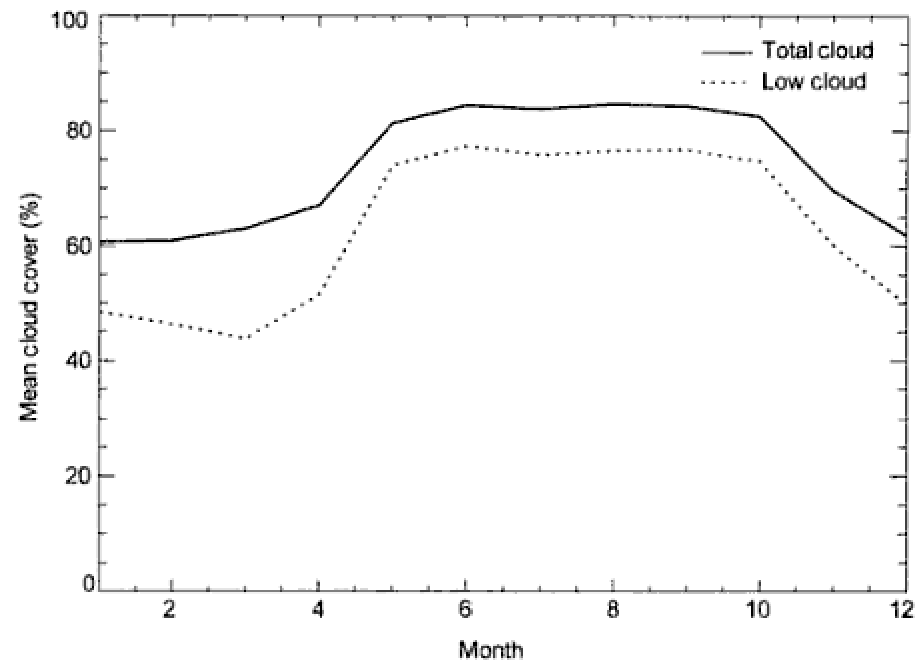


Температура поверхности льда по данным MODIS в сравнении с данными буёв (J-CAD 4 и J-CAD 5) и приливной станции. На левом графике безоблачные случаи на спутниковых данных выбраны экспертами, на правом – с использованием стандартной маски облачности MODIS.

Облачность – главный мешающий фактор при использовании данных видимого и ИК диапазонов

Данные из книги
«The Arctic climate system»

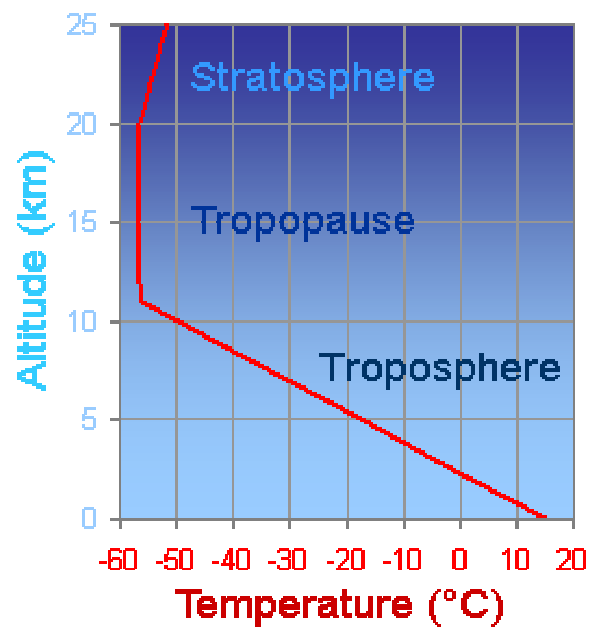
Авторы: Mark C. Serreze и Roger Graham Barry



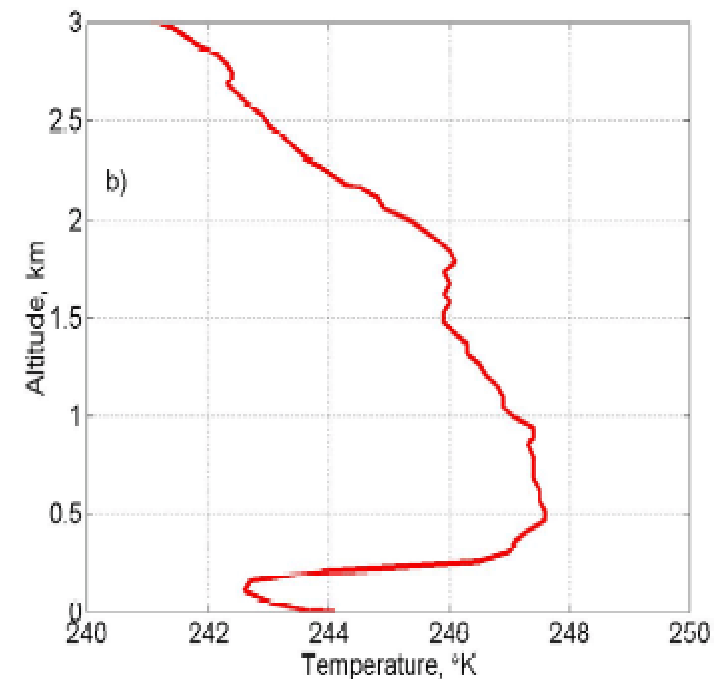
Облачность в Арктике – средние данные. Показано распределение по месяцам. Пунктиром представлена облачность в нижних слоях атмосферы.

Профиль (вертикальный) температуры

Средний для тропосферы:



Измерения в Арктике:

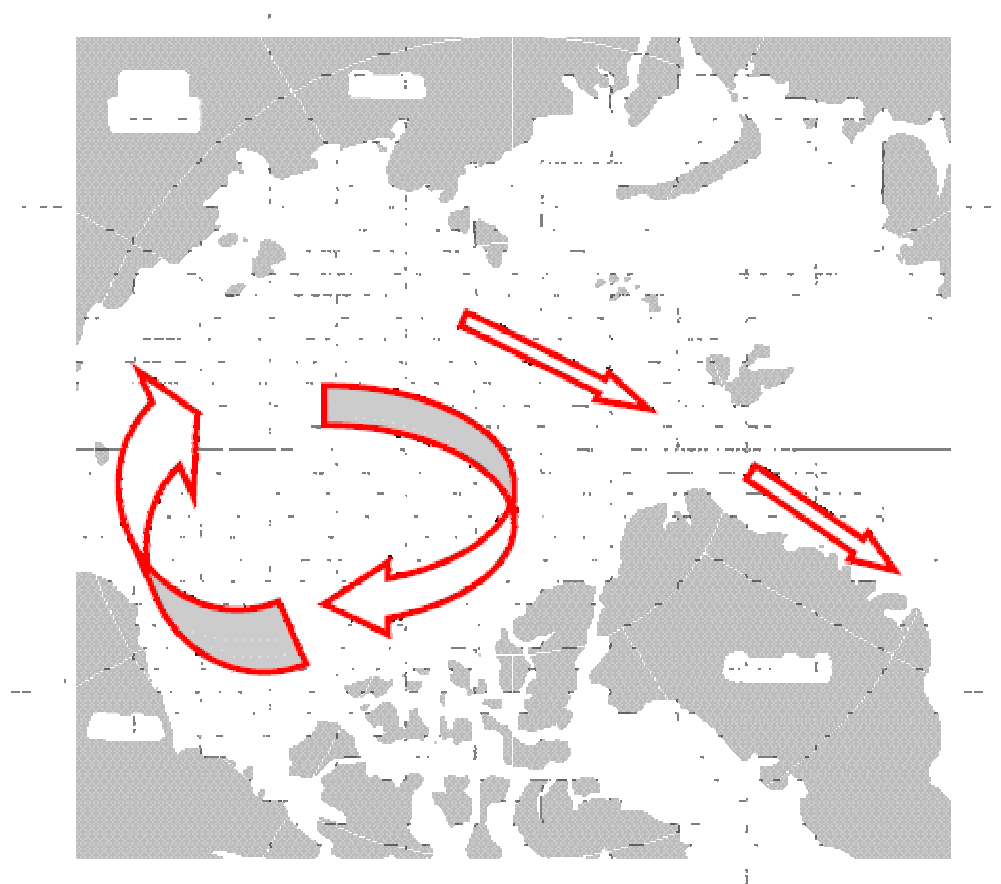


Использование карт температуры поверхности льда по данным MODIS

Помимо температуры поверхности льда измерения MODIS в ИК диапазоне позволяют очертить границу ледяного покрова: все пиксели, температура которых менее 271.5 К, следует отнести к ледяному покрову, а оставшиеся пиксели, температура которых более 271.5 К, следует признать пикселями, занятыми открытой водой.

Данные о температуре поверхности ледяного покрова позволяют оценить толщину (возраст) льда

Как движется лёд?



Получение карт дрейфа льда по спутниковым данным

Какие данные используют?

- ☐ Данные пассивных микроволновых измерений (SSM/I, AMSR-E);
- ☐ Данные скаттерометров (SeaWinds/QuikScat)
- ☐ Данные локаторов с синтезированной апертурой (SAR)
- ☐ А также их комбинации

Получение карт дрейфа льда по спутниковым данным

Два основных метода, которые используются для восстановления перемещений ледяного покрова:

- Кросскорреляционный анализ

$$r = \frac{\sum_i [(x(i) - m_x) * (y(i-d) - m_y)]}{\sqrt{\sum_i (x(i) - m_x)^2} \sqrt{\sum_i (y(i-d) - m_y)^2}}$$

Сравниваются две серии данных - x и y . d – временной интервал между ними. Анализ состоит в поиске максимума функции r .

- Вейвлет анализ

Вейвлет преобразование:

$$W_s(a, \underline{b}) = \frac{1}{a} \int s(\underline{r}) w^* \left(\frac{\underline{r} - \underline{b}}{a} \right) d\underline{r}$$

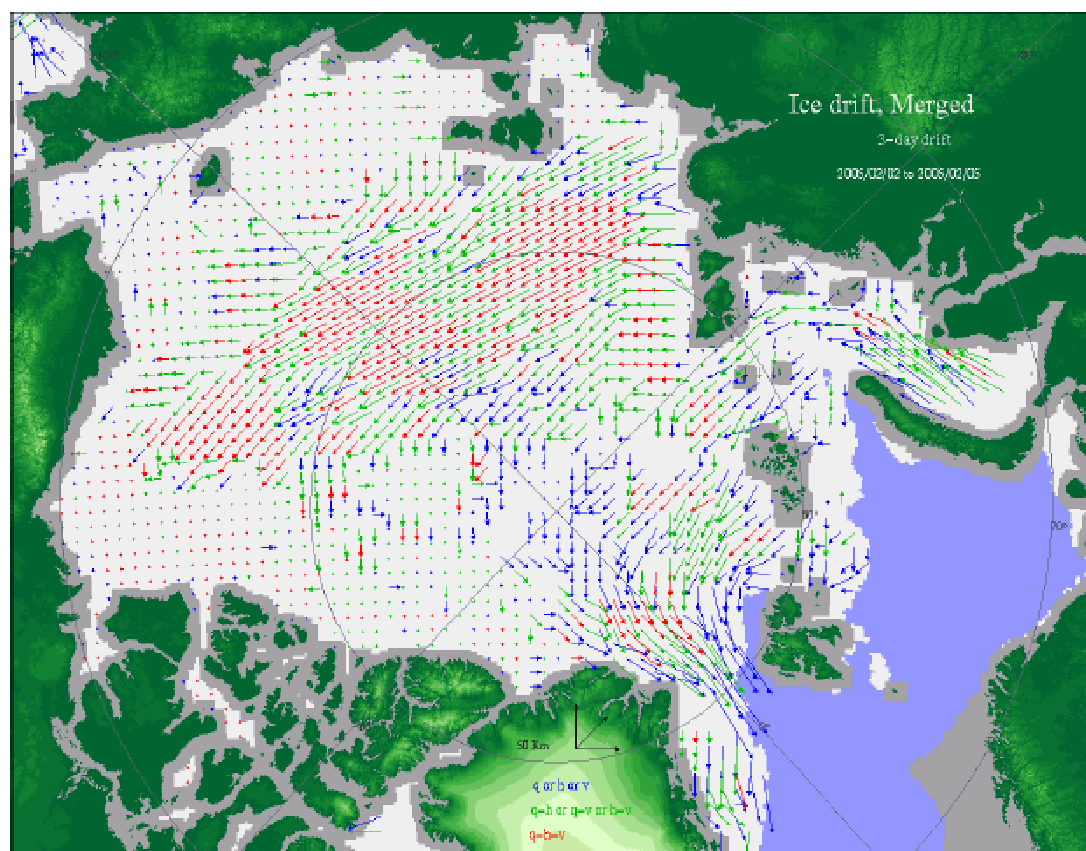
где a определяет размер вейвлета и называется *масштабом*, а b задаёт временную локализацию вейвлета и называется *сдвигом*, $r = (x, y)$, w – *вейвлет*

$$w(x, y) = (2 - (x^2 + y^2)) \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2}\right).$$

- Вейвлет *Mexican hat*” используется при анализе дрейфа льда

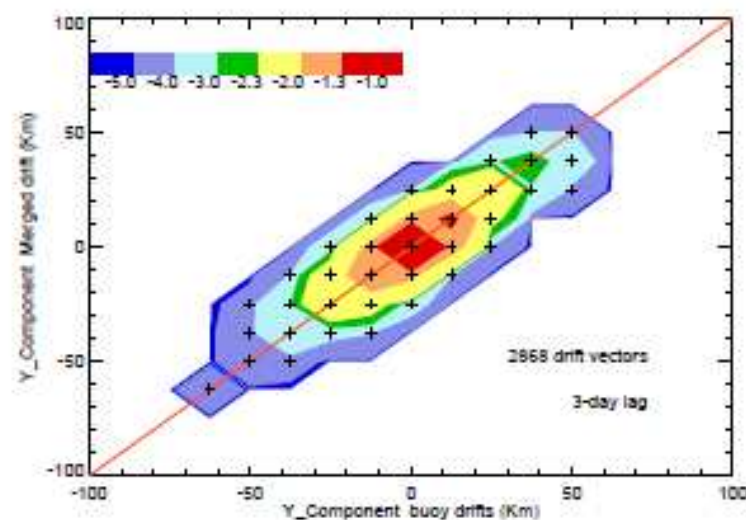
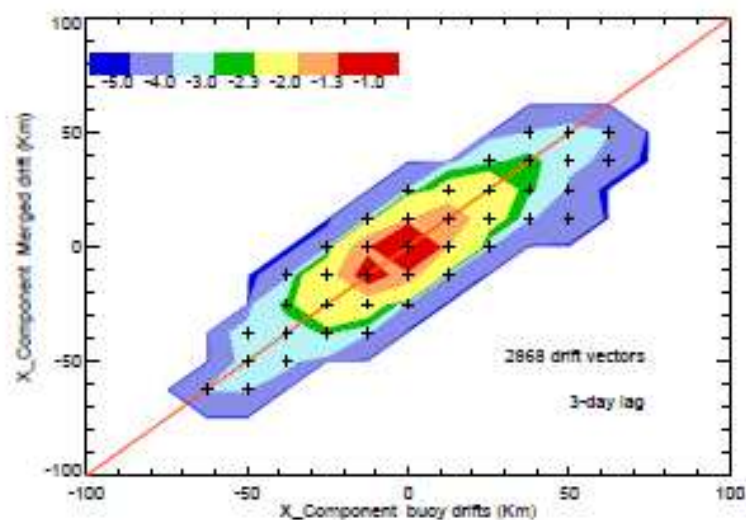
Получение карт дрейфа льда по спутниковым данным

R.Ezraty: Сравнение карт, полученных по SSM/I, QuikScat и по их комбинации, лаг = 3 дням. Разрешение данных = 12,5 км, разрешение карты = 62,5 км.



Красным цветом показаны вектора, получившиеся одинаковыми при применении всех трёх методов;
Зеленым – вектора, получившиеся одинаковыми для двух методов;
Синим – все три подхода дали разные результаты (показан вектор, полученный по комбинации данных)

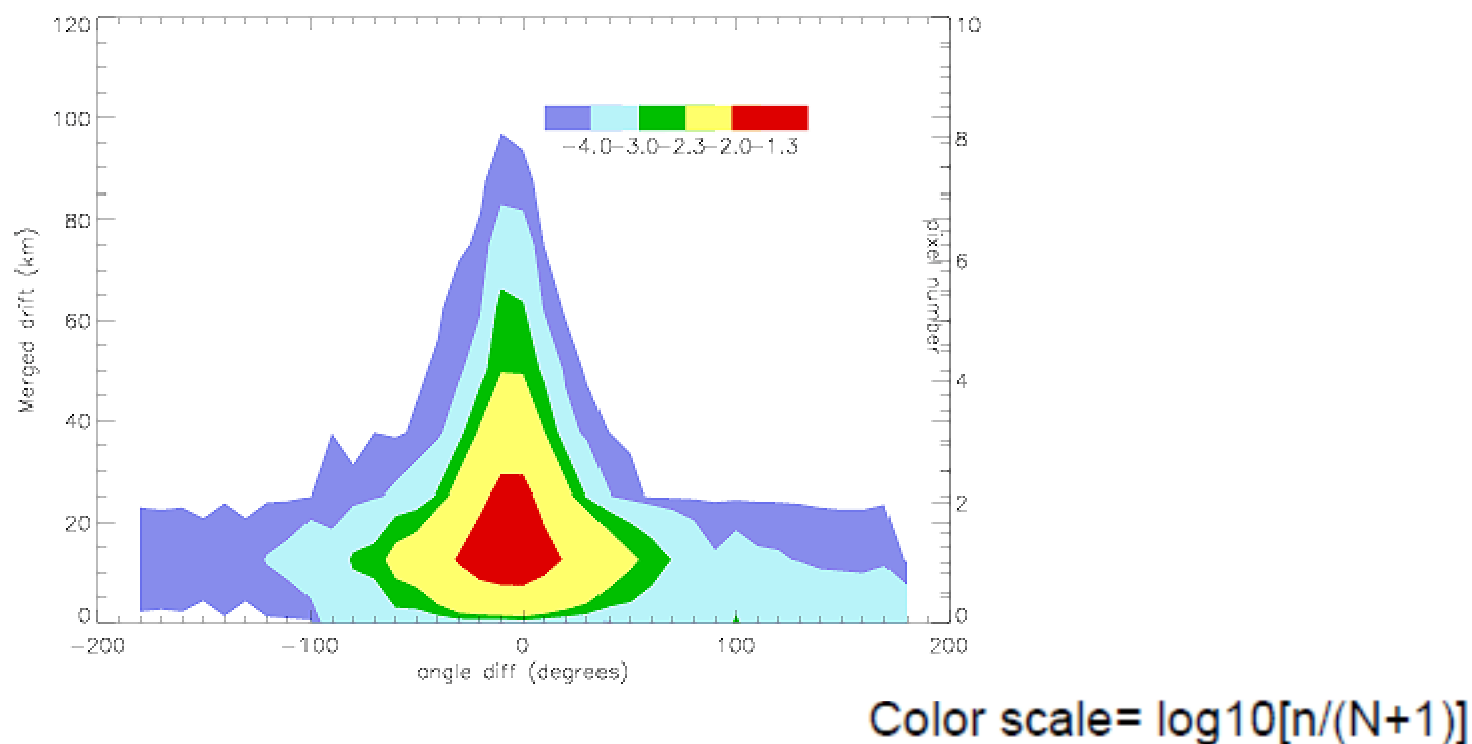
Сравнение восстановленных данных по дрейфу с измерениями буёв



Color scale = $\log_{10}[n/(N+1)]$

Сравнение величин составляющих вектора дрейфа (x, y)

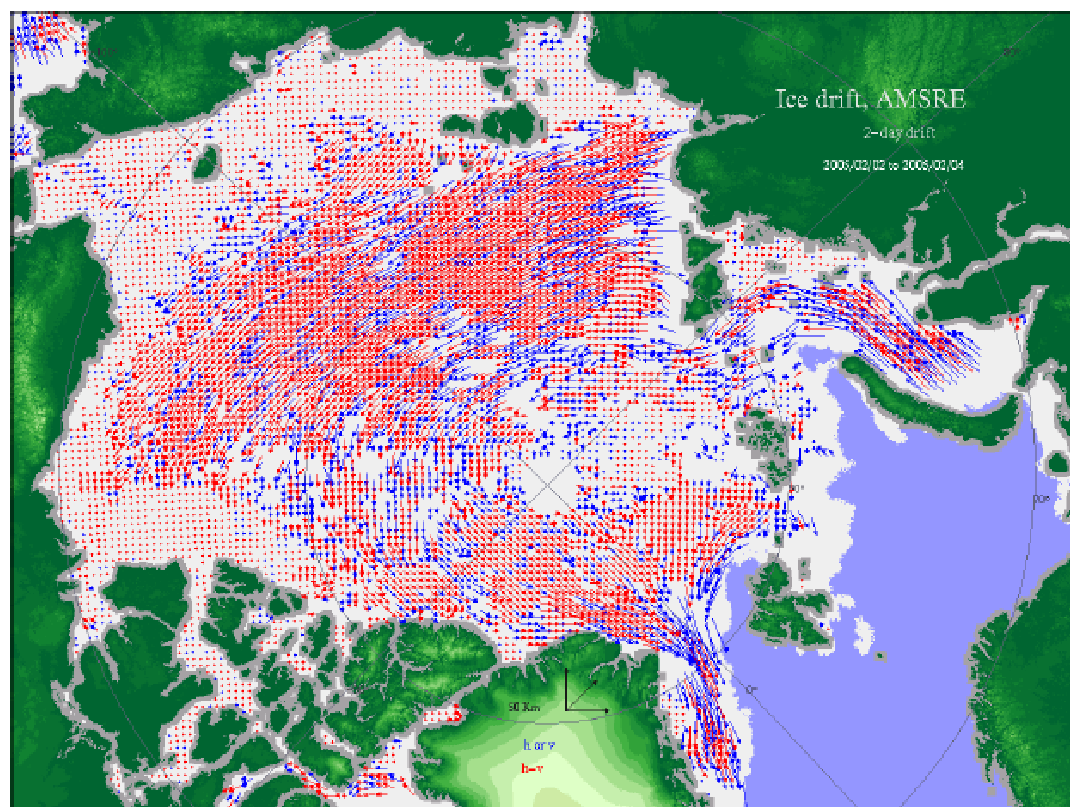
Сравнение восстановленных данных по дрейфу с измерениями буёв



Сравнение: разница в направлении вектора дрейфа (от -180 град. до 180 град.) как функция от величины вектора дрейфа

Получение карт дрейфа льда по спутниковым данным

R.Ezraty: Карта, полученная по данным AMSR_E, лаг = 3 дням.
Разрешение данных = 6,25 км (89ГГц), разрешение карты = 31,25 км.



Красным цветом показаны вектора, получившиеся одинаковыми при использовании вертикальной и горизонтальной поляризаций;
Синим – вектора, когда результаты по разным поляризациям получились разными.



**Спасибо за
внимание!**

ИКИ, Москва, 16 ноября 2010 г.