

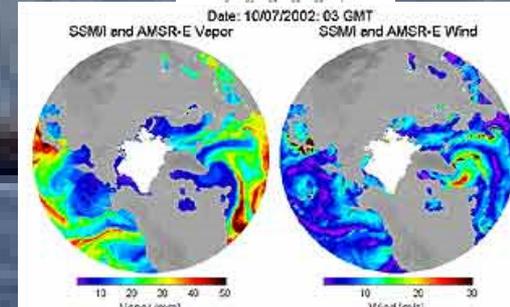
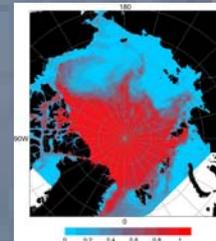


# Спутниковые методы исследования ледяного покрова

**Ирина Репина**

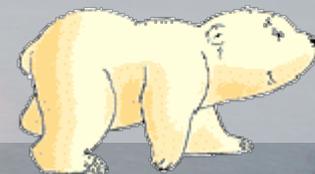
*Институт космических исследований РАН*

*Институт физики атмосферы РАН*

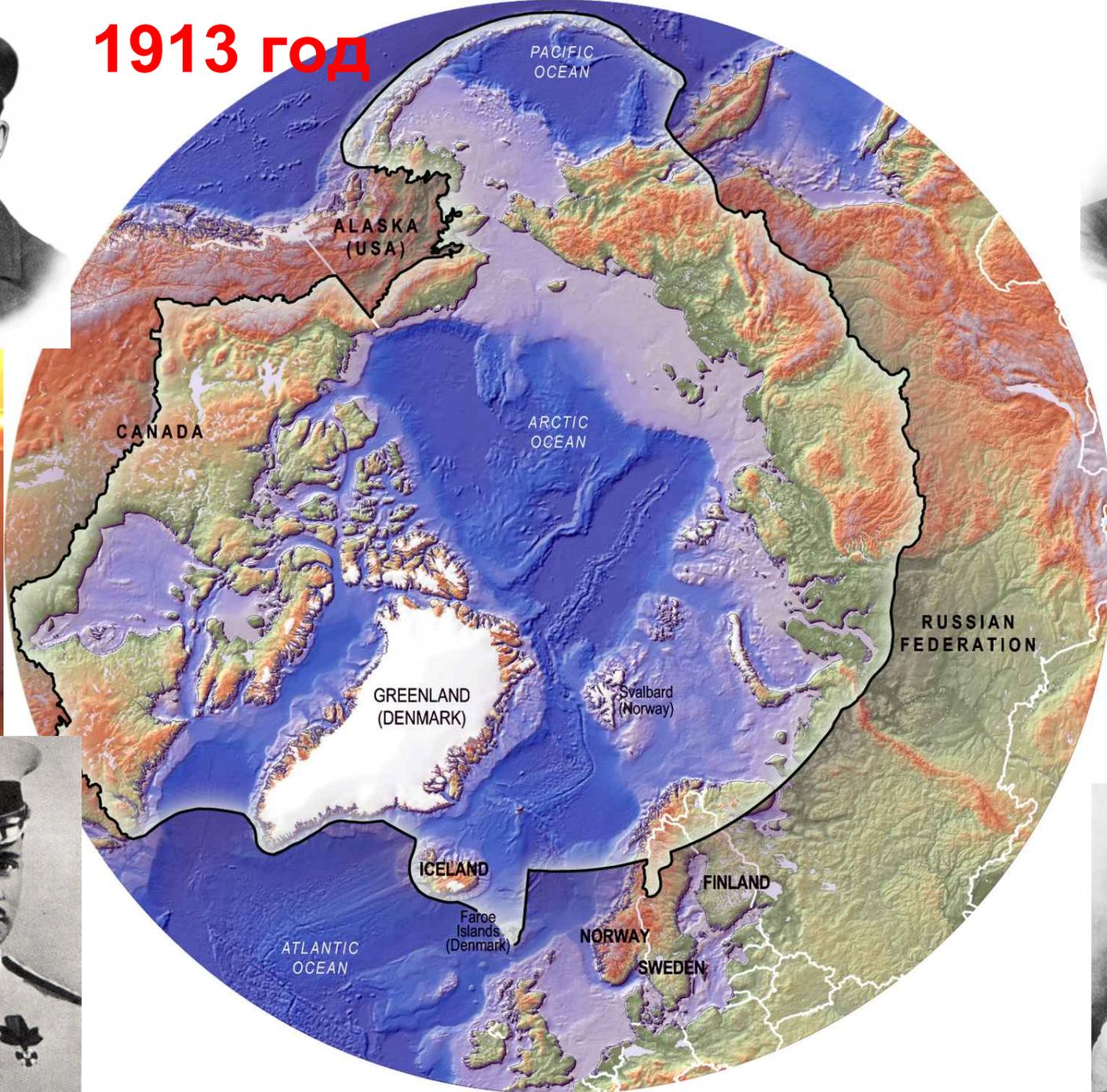


Четвертая выездная Школа-семинар «Спутниковые методы и системы исследования Земли» Таруса, 19-25 февраля 2013 г.

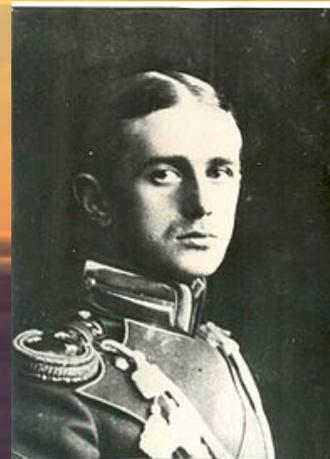
- Классификация морских льдов
- Доспутниковые методы исследования льда
- Определение толщины и сплоченности льда
- Картирование морского льда
- Архивы спутниковых данных



# 1913 год



9 августа (22 августа) 1914 года – начало дистанционного зондирования морских льдов с целью их мониторинга



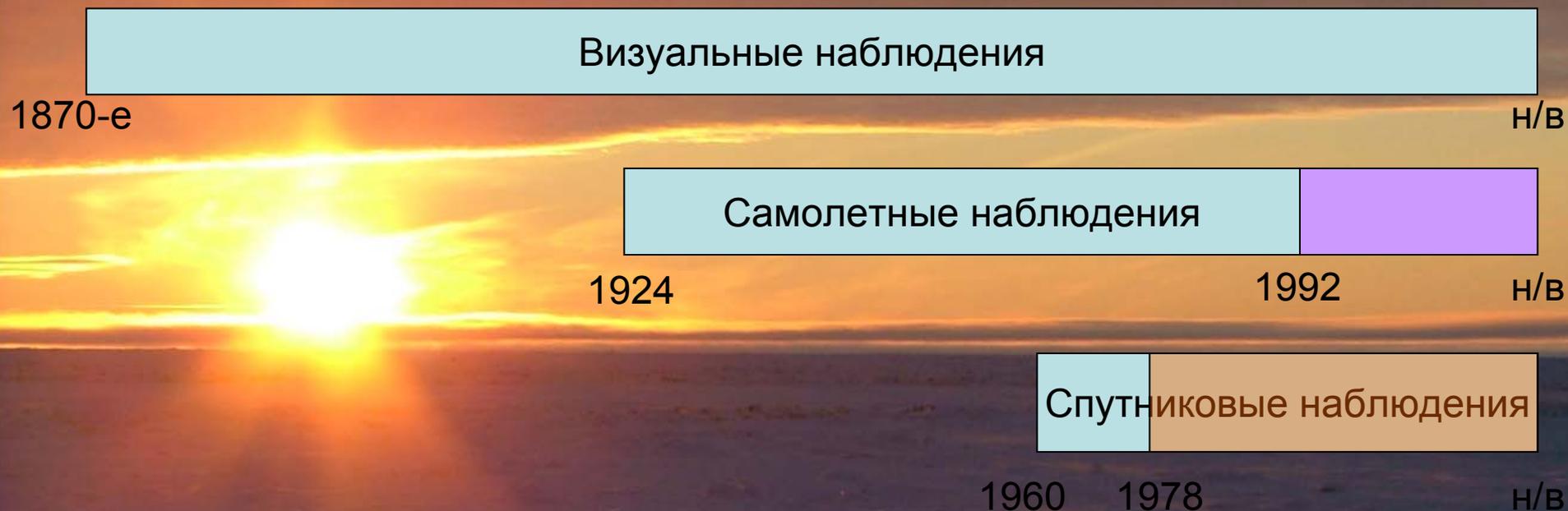
Лётчик Ян Нагурский на гидросамолёте «Фарман МФ-11» исследовал с воздуха льды и побережье Новой Земли на протяжении около 1060 км

**1924 год – начало регулярных ледовых разведок**



В ходе обеспечения работы Карской морской экспедиции лётчик Б.Г. Чухновский на самолете палубного базирования изучал ледовую обстановку по маршруту движения судов экспедиции

## Методы получения информации о морском льде

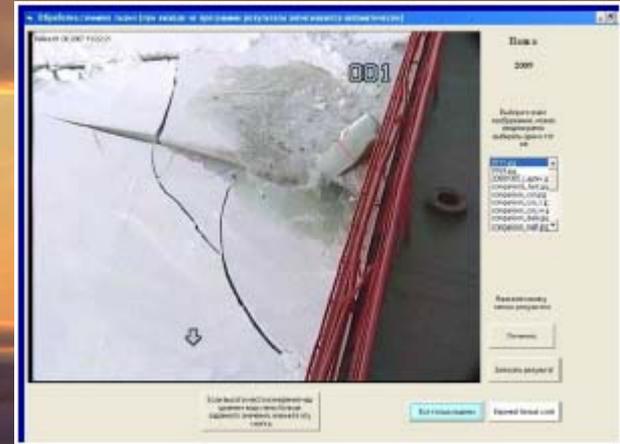


В 1992 году самолетные исследования в России были прекращены.

В США и Канаде широко используются до сих пор для изучения ледовой обстановки и оценки точности новой спутниковой аппаратуры (например, подспутниковый эксперимент для оценки точности данных Cryosat-2).

# Визуальные судовые наблюдения:

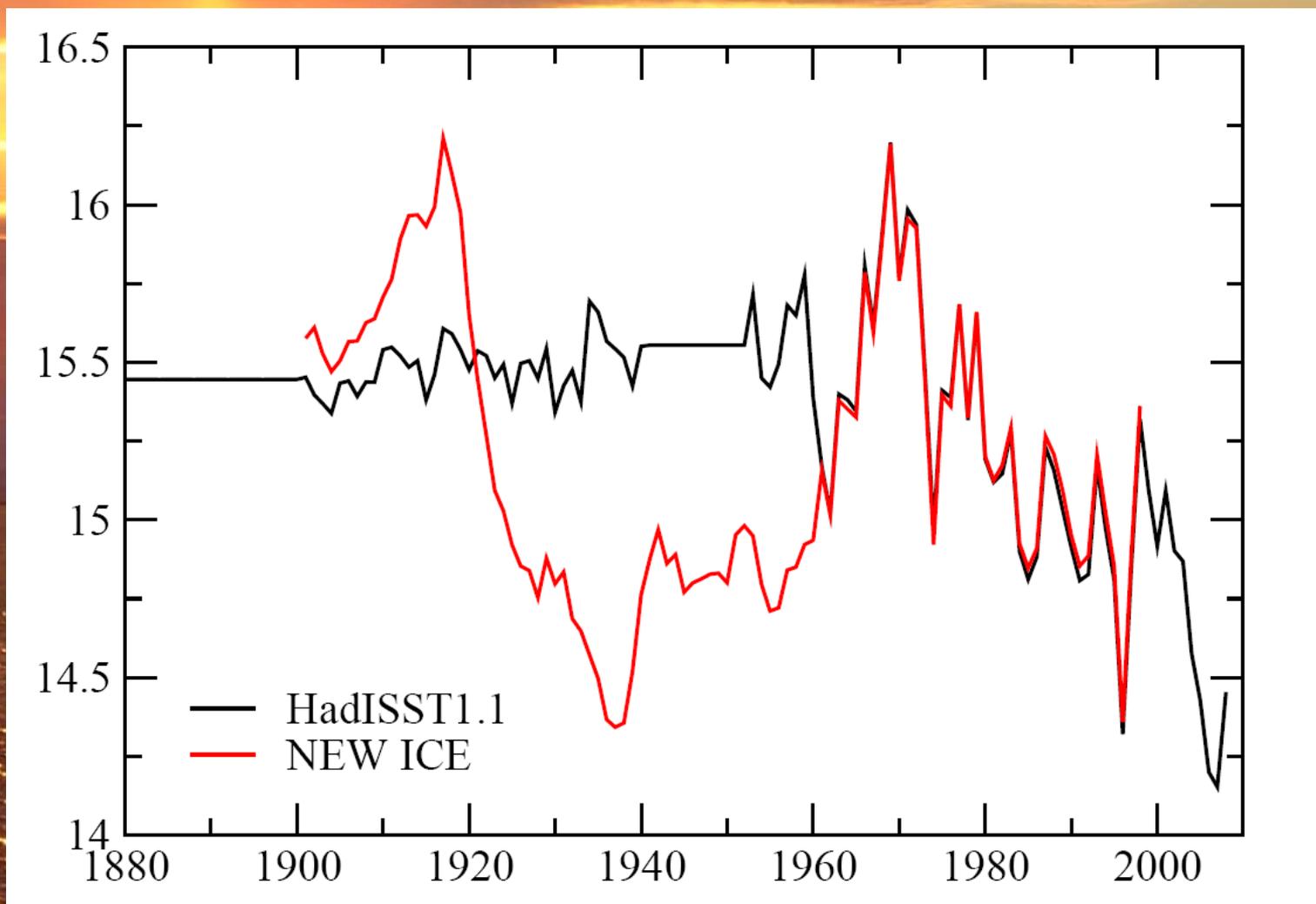
1. Общая сплоченность
2. Толщина льда
3. Возраст
4. Торосистость
5. Размер ледяных полей
6. Высота снега
7. Разрушенность
8. Трещины, разводья
9. Загрязненность, айсберги..



## Основные архивы данных:

1. Архив Арктического и Антарктического научно-исследовательского института
2. Архив Национального центра данных по льду и снежному покрову в США
3. Сеточный архив данных по границам морского льда HadISST1.1, включающий распределение льда Арктики и Антарктики с разрешением 1 градус за период с 1870 года по настоящее время  
*[http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk\\_\\_ATOM\\_\\_dataent\\_hadiss](http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk__ATOM__dataent_hadiss)*.
4. Массив данных по распространению ледового покрова в Гренландском, Исландском, Норвежском, Баренцевом и западной части Карского моря (Норвегия)

**Площадь ледового покрова (млн. км<sup>2</sup>) в Северном полушарии в зимний период по данным HadISST1.1 (черная кривая) и по данным ААНИИ (красная кривая)**



# Спутниковая археология (техноархеология)

- Надежные спутниковые данные по морскому льду существуют с 1978 года
- Метеорологические спутники (NIMBUS) летали с 60-х годов.
- Возможно ли восстановить информацию?
- Предпринята первая попытка.  
Обработано 1300 снимков за 1964 год.  
<http://nsidc.org/monthlyhighlights>

# Лед Северного ледовитого океана

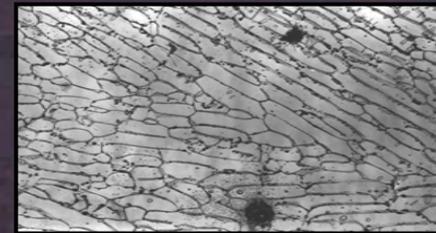


- Замерзающий океан
- 5-10 мил. кв. км.
- Движущиеся льды
- Толщина – несколько метров
- Возраст – несколько лет
- Высокая отражающая способность
- Сильная изменчивость



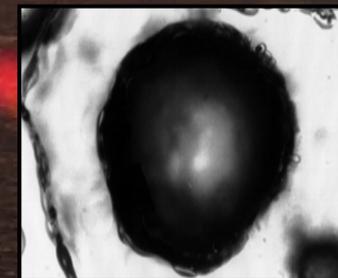
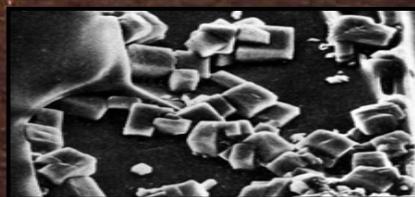
0.0001 м

0.01 м



0.001 м

0.00001 м

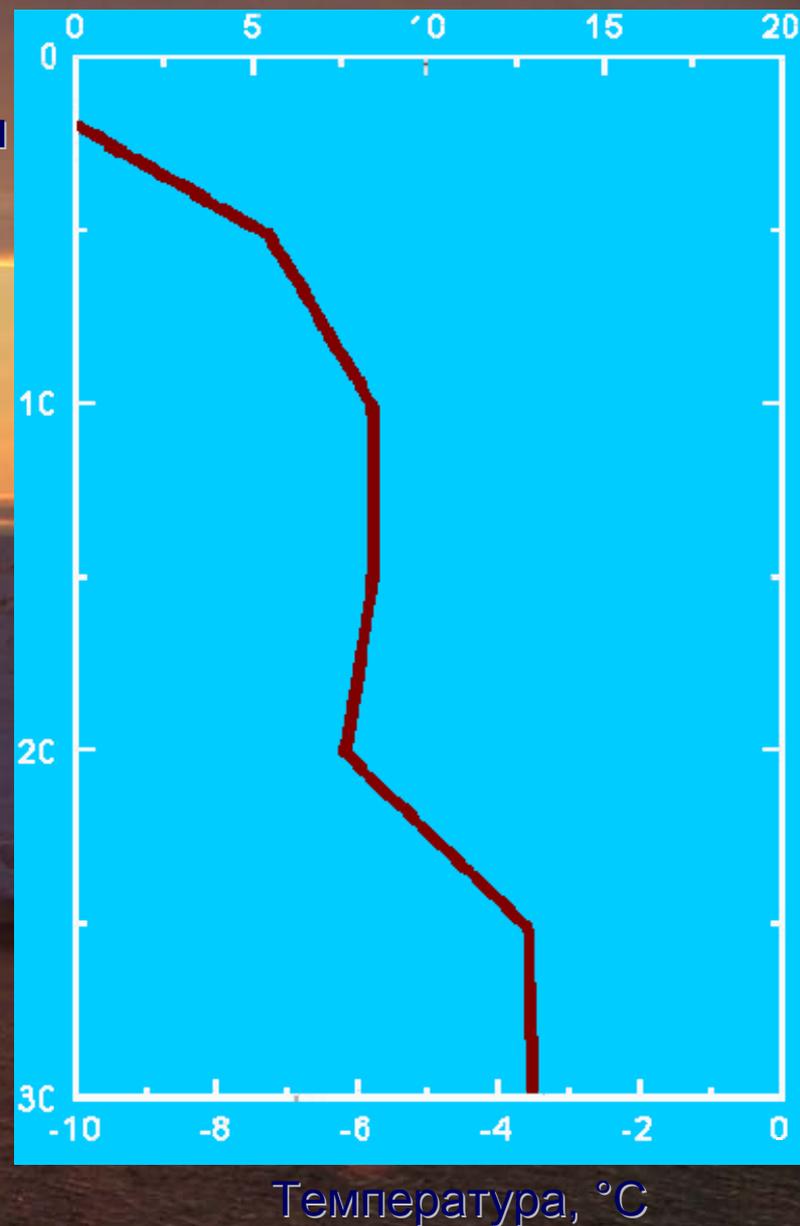
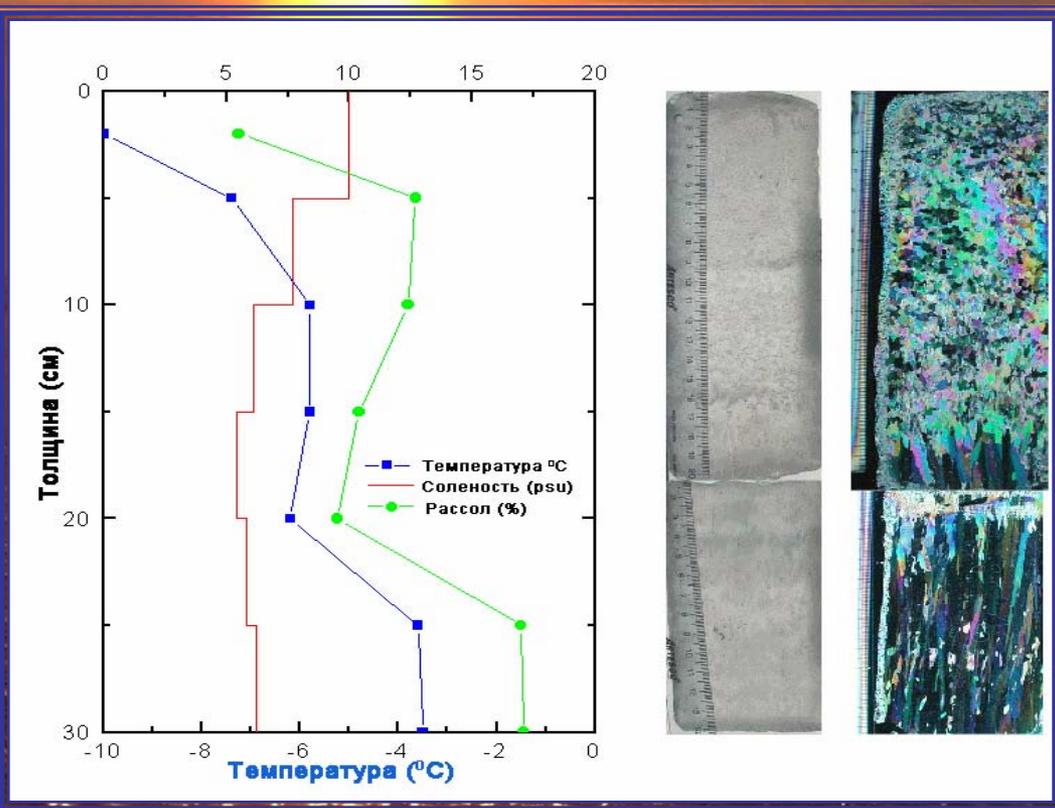


## Состав льда:

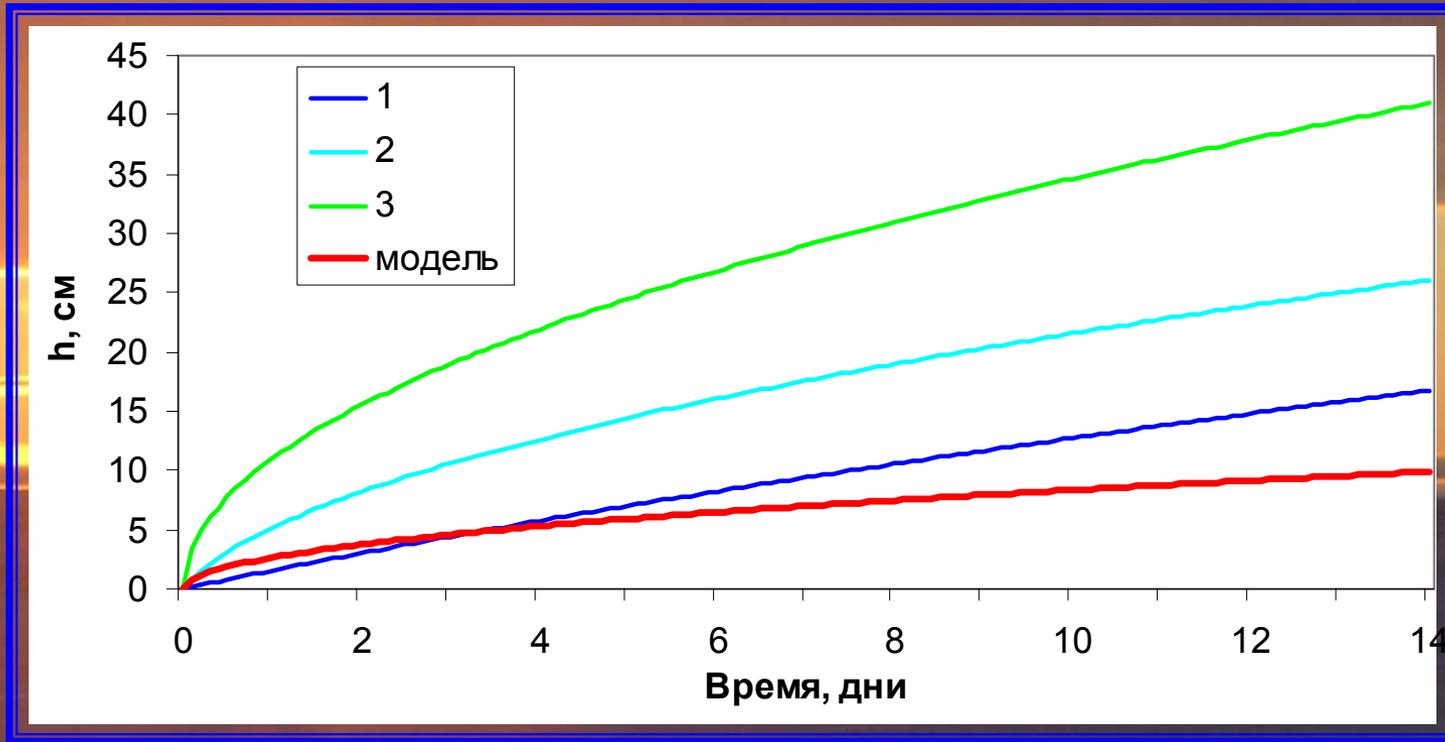
- кристаллы пресного льда
- жидкая фаза
- соли в твердом и растворенном состоянии
- пузырьки воздуха
- мелкие примеси

Так как потоки тепла зависят и от толщины льда, то профиль температуры во льду по вертикали отличается от линейного

$$c_{\rho} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} + I \right), 0 \leq z \leq H(t)$$



# Наращение льда со свободной поверхности моря



$$T_b = -10^{\circ}$$

$$T_{\infty} = -1.67$$

## Параметризации:

1. Зубова (Зубов Н.Н., Льды Арктики, М., из-во Главсевморпути, 1945)

$$h_i^2 + 50h_i = 8\Sigma(-T_a)$$

2. Гаврило и Сухорукова (Гаврило В.П., Сухоруков К.К., Труды ААНИИ, 1980, т. 374, с. 85-96)

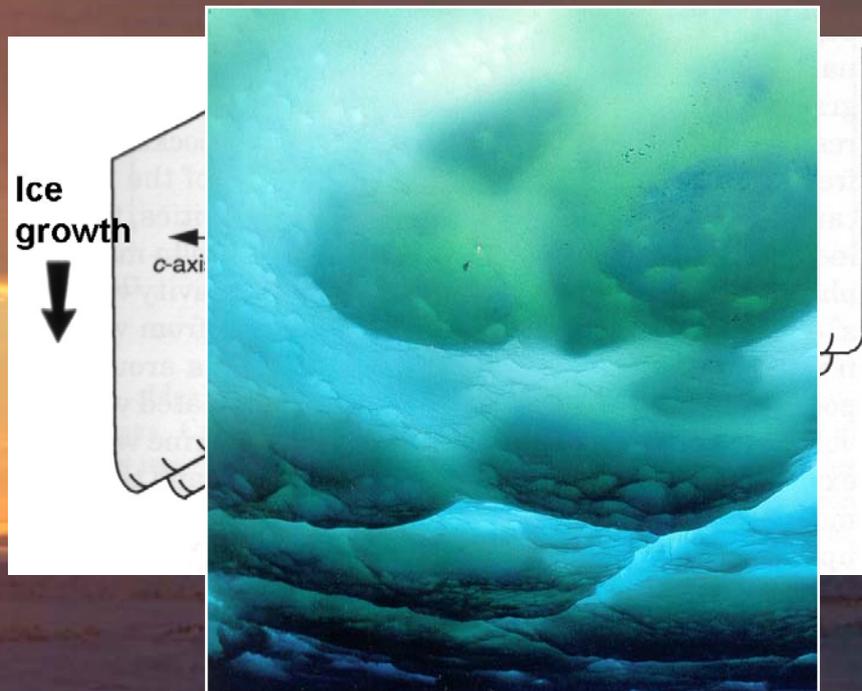
$$h_i^2 + 6,7h_i = 6,1\Sigma(-T_a)$$

3. Доронина (Доронин Ю.П., Проблемы Арктики и Антарктики, 1959, вып. 1, с. 73-83)

$$h_i = \sqrt{h_{i0}^2 + 12\Sigma(-T_a)} \quad \Sigma(-T_a) - \text{Сумма градусо-дней мороза}$$

## *Однолетний лед*

- Умеренная соленость
- Не очень низкая температура
- Большой объем рассола
- Столбчатое строение льда



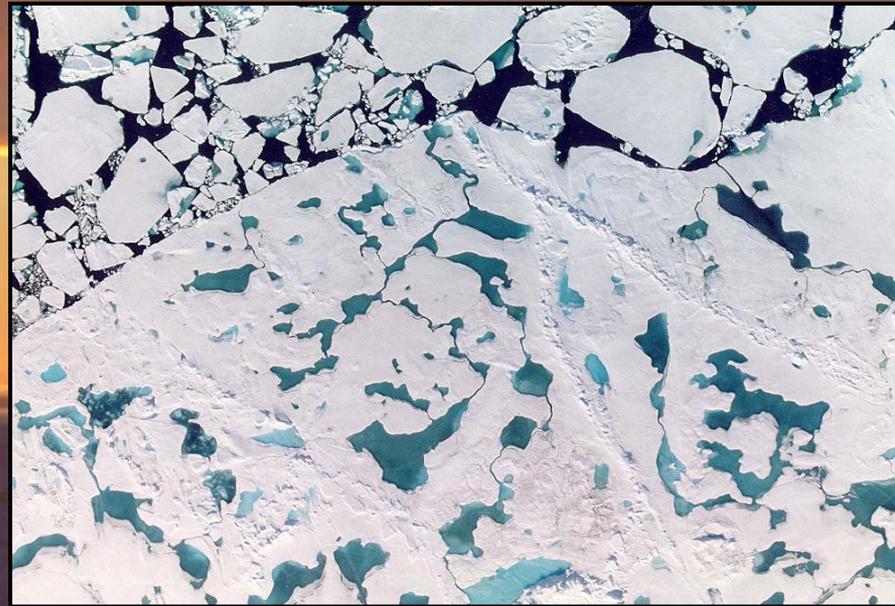
## *Многолетний лед*

- Низкая соленость
- Низкая температура
- Незначительное количество рассола
- Сухая поверхность



# Изменчивость льда

- Характерные черты ледяного покрова
- Горизонтальная изменчивость
  - мелкомасштабная (м, км)
  - крупномасштабная (регионы)
- Вертикальная изменчивость
- Временная изменчивость
- Пространственная неоднородность

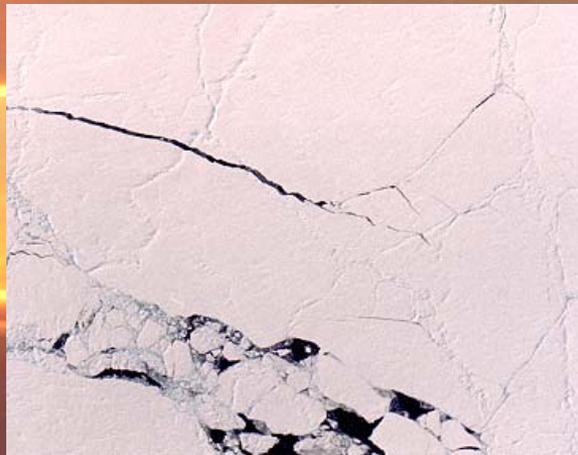


# Сезонная эволюция

Апрель



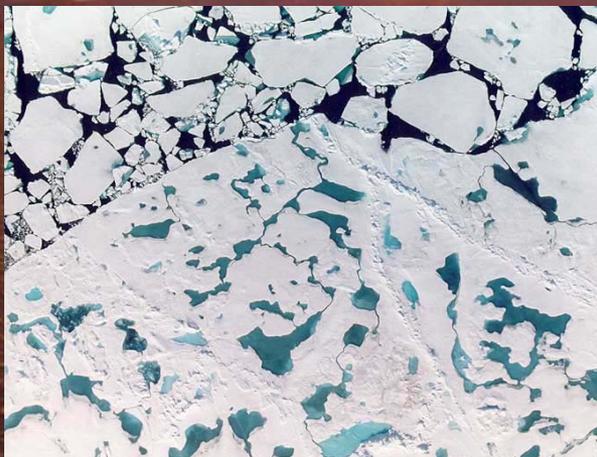
Май



Июнь



Июль



Август



Сентябрь



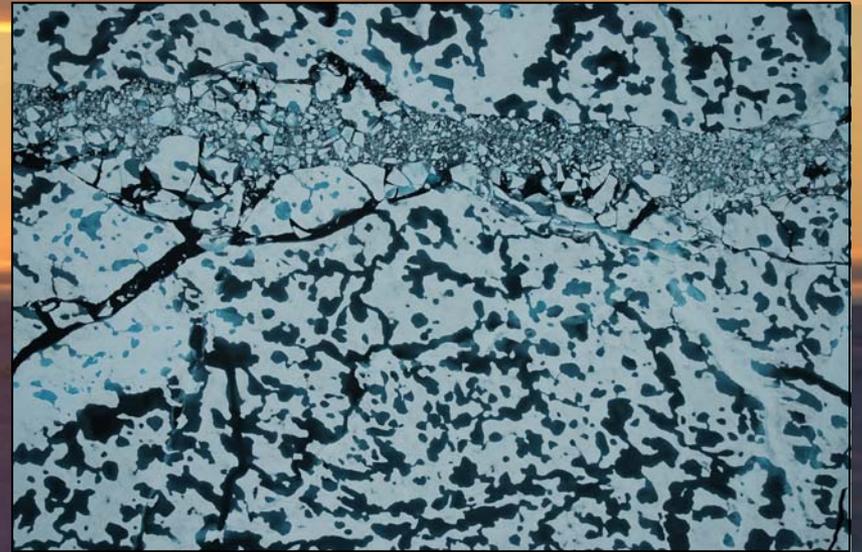
# Торосы



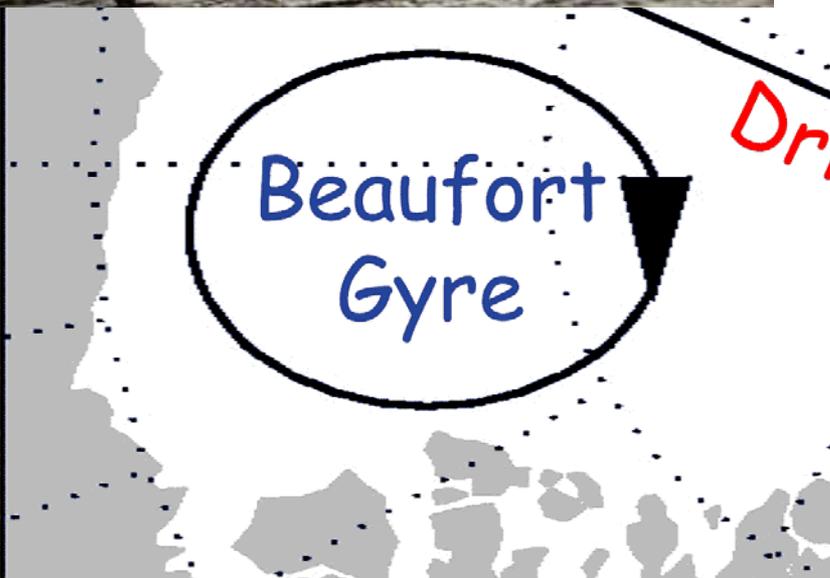
# Трещины



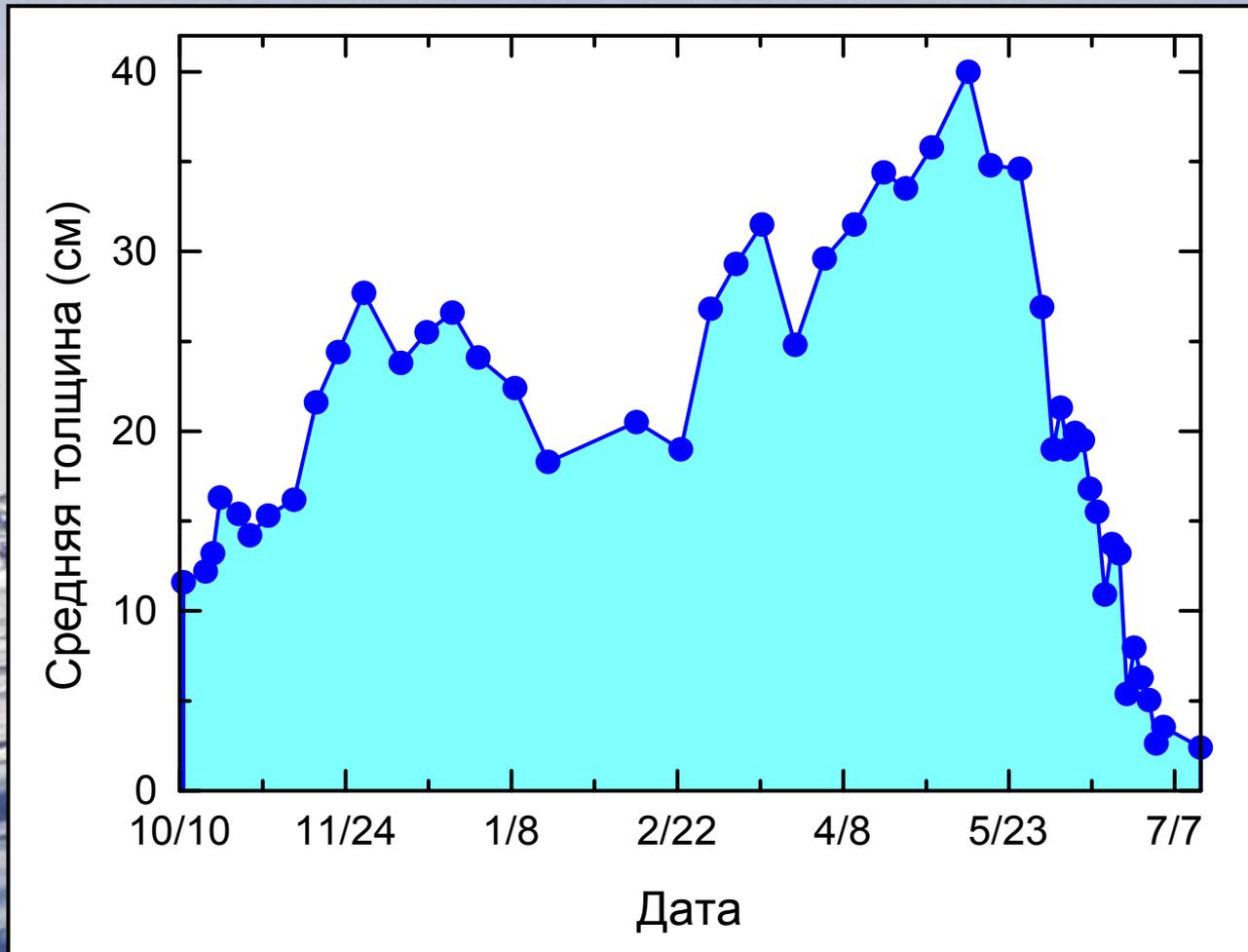
# Снежницы



# Починице льда

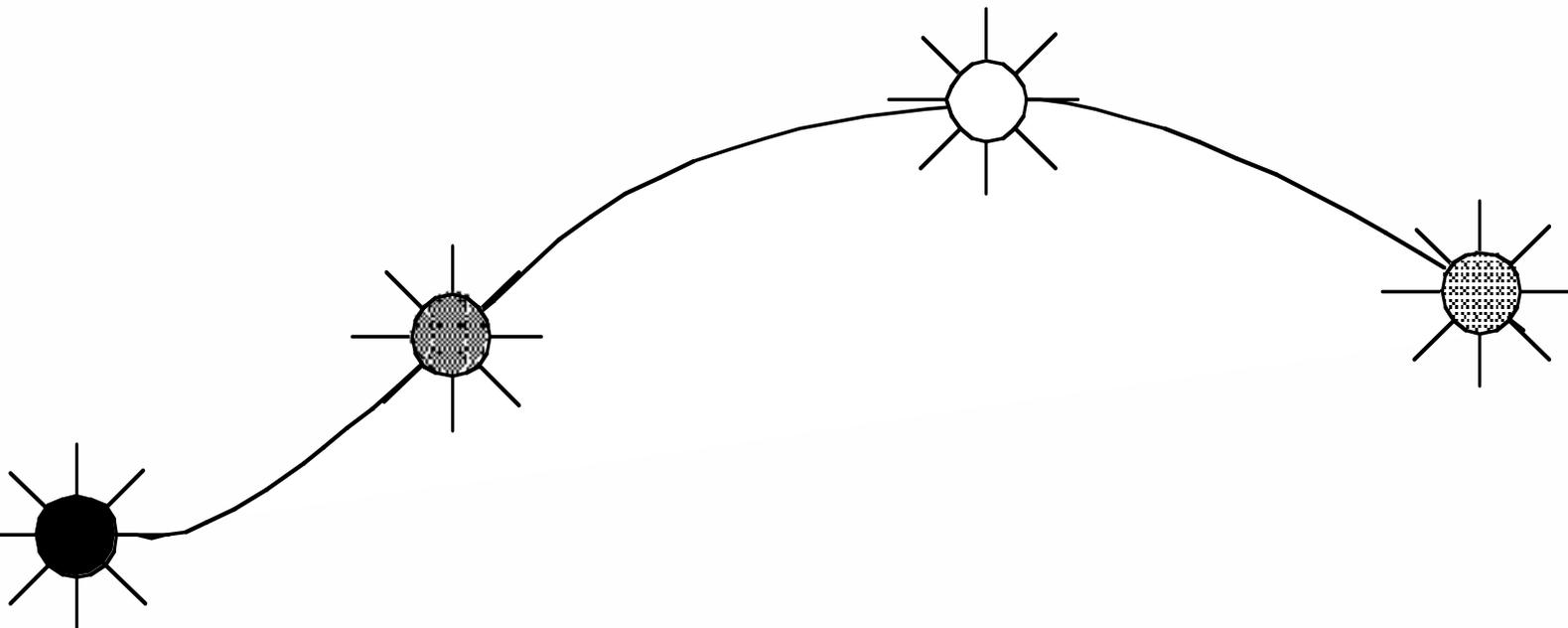


# Снежный покров



Коротковолновая радиация, Вт/м<sup>2</sup>

400  
200  
0

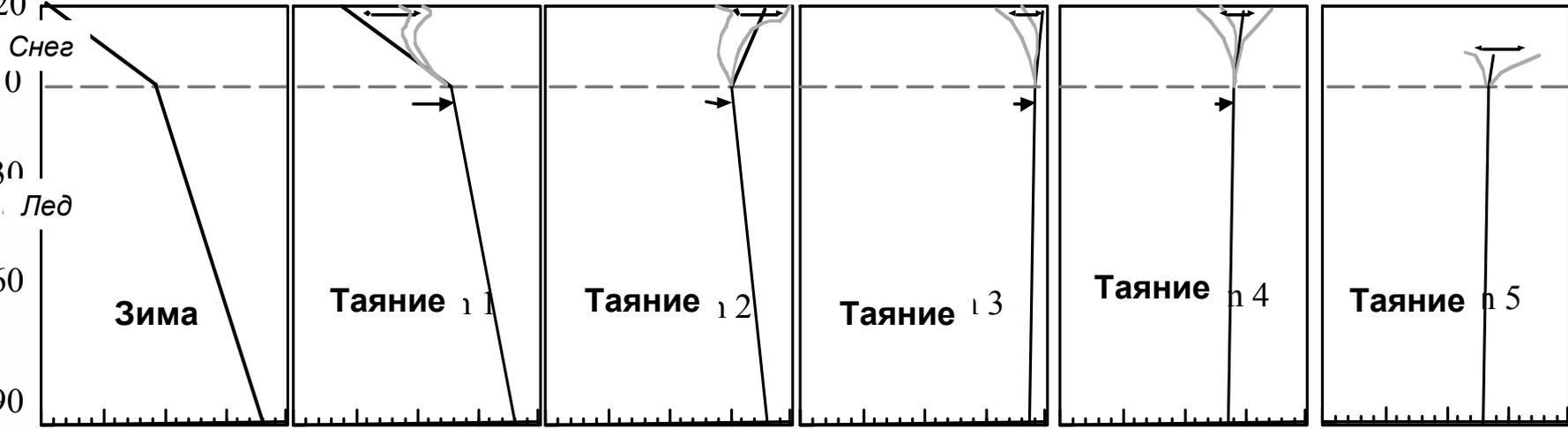


Толщина, см

20  
0  
30  
60  
90

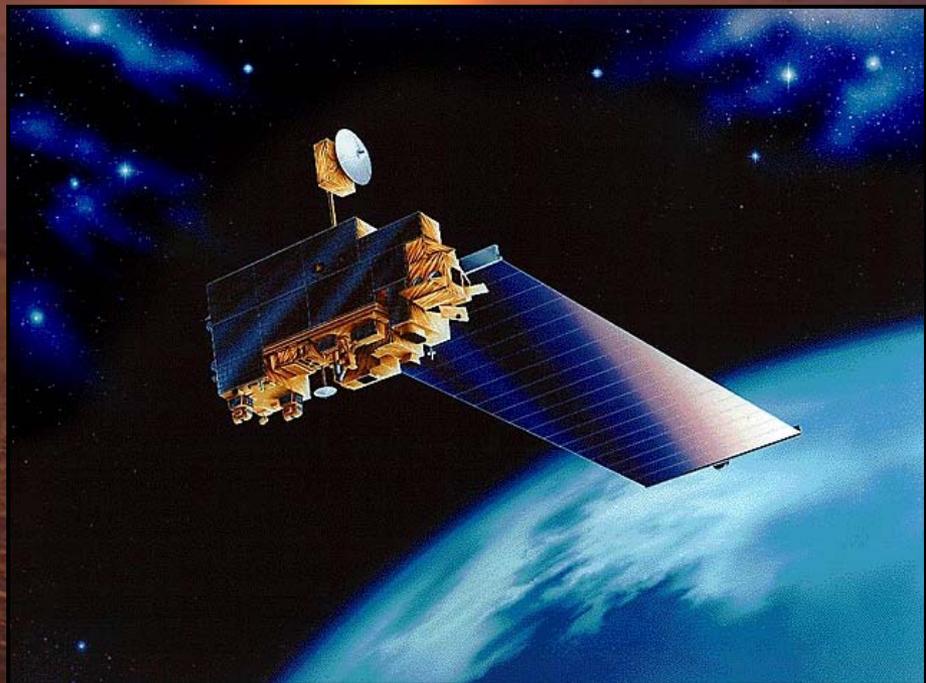
-20 -15 -10 -5 -20 -15 -10 -5 -20 -15 -10 -5 -15 -10 -5 0 -15 -10 -5 0 5

Температура, °С )



# Диагностика площади льда

- Спутниковые исследования начались с 70-х
- Видимые и инфракрасные изображения
- СВЧ-зондирование (день, ночь, любая погода)



**Отраженное солнечное излучение**

Используемые комплексы – AVHRR, SeaWiFS, MODIS, GOES Imager, Landsat, ASTER, MERIS, (VIIRS...)

Площадь покрытия снега и льда

**Тепловое излучение**

Используемые комплексы – AVHRR, MODIS, SSM/I, TMI, AMSR-E

Температура поверхности – площадь покрытия льда

**Шероховатость поверхности**

Используемые комплексы – Скатерометры, Альтиметры, РСА

Подвижки льда, таяние льда

**Расстояние между приборами и поверхностью**

Используемые комплексы – альтиметры, лидары

Толщина льда

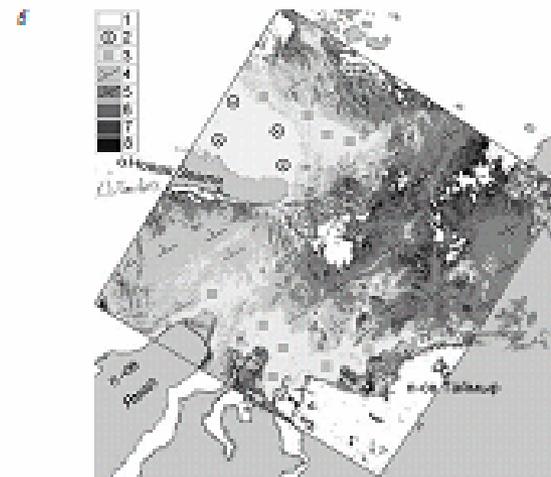
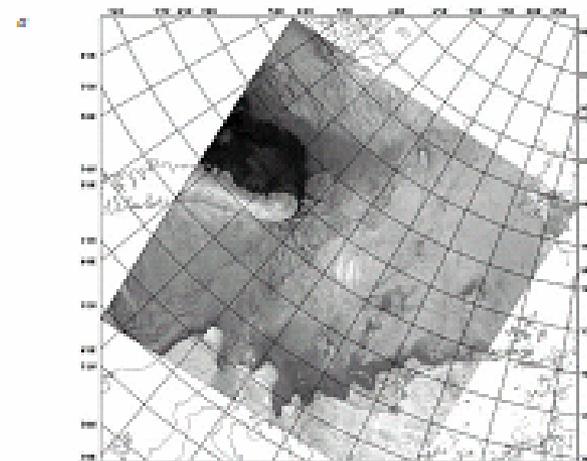
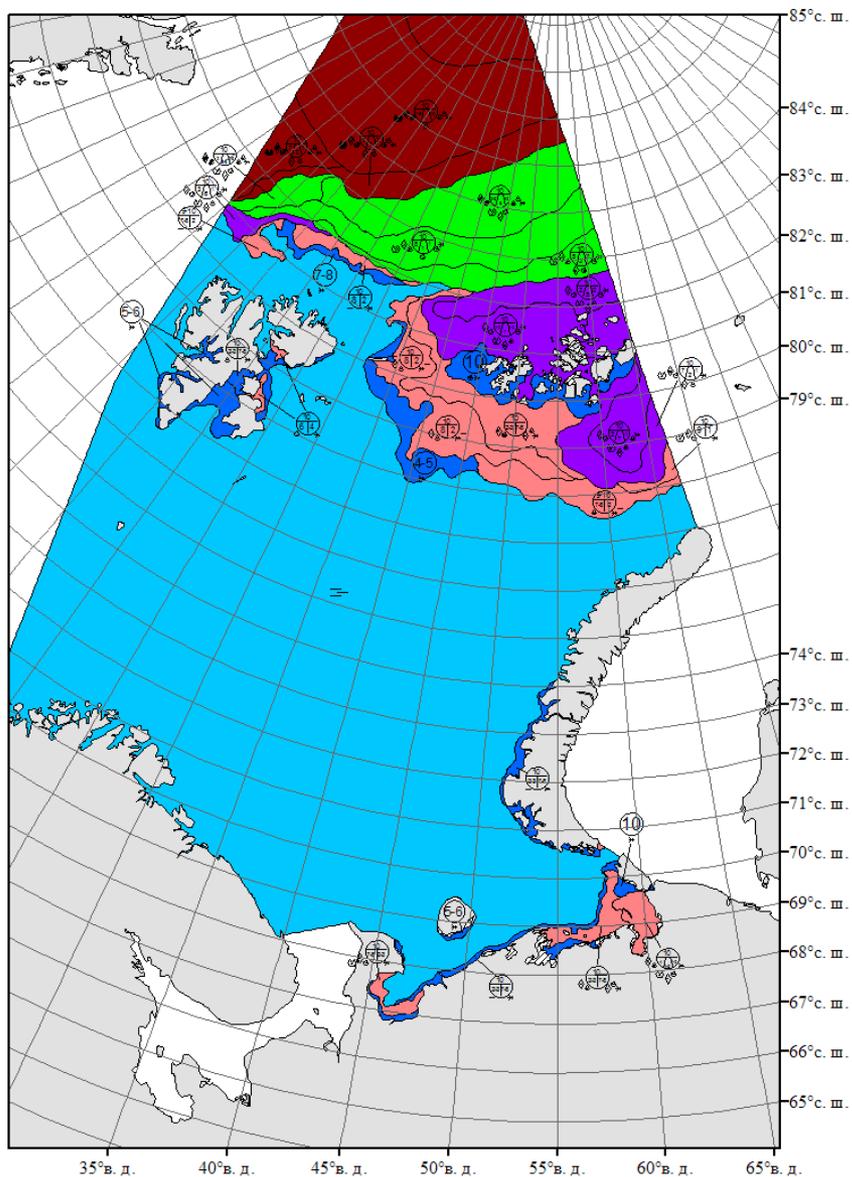
Оперативное ледовое картирование практически полностью базируется на информации ИСЗ видимого и инфракрасного диапазонов с разрешением 250—1000 м.

Для повышения качества интерпретации используется принцип синергетического дополнения многоспектральной спутниковой информации. Съёмки в видимом диапазоне и спутниковые радары применяют совместно с микроволновыми радиометрами .

Из сопоставления различных данных возможно определение сплочённости, положения кромки, дрейфа и возраста льдов. Для оперативных наблюдений за ледовым покровом арктических морей применяют спектрорадиометры высокого и среднего разрешения (MODIS на спутниках Terra и Aqua), а также радиолокаторы с синтезированной апертурой PCA на спутниках ERS-2, Envisat и Radarsat.

Наиболее обеспеченные архивы ледового картирования находятся в ААНИИ (Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт), Национальном ледовом центре США и Канадской ледовой службе.

# Региональные ледовые карты (www.aagi.ru)



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

# Сплоченность морского льда

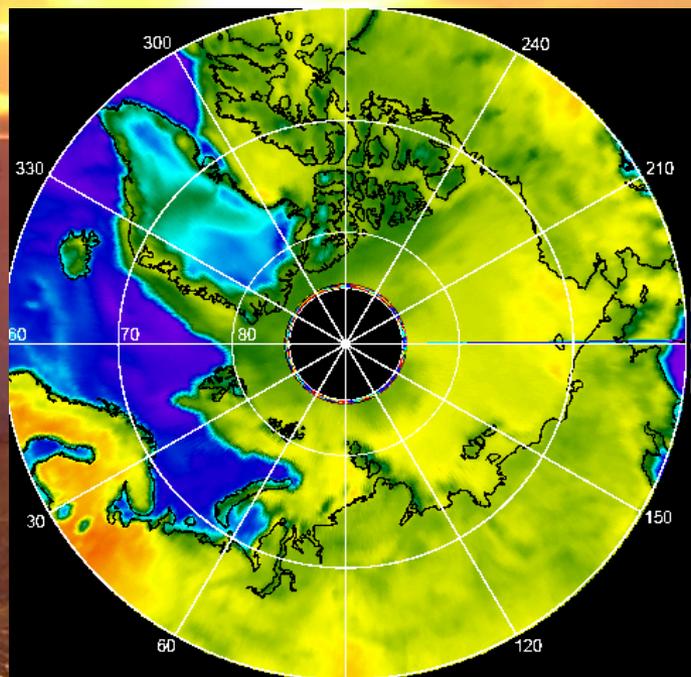


Максимальное (голубой цвет) и минимальное (розовый цвет) летнее распространение льда в СЛО осредненные за период 1979-2000 гг. (а), в 2007 г. (б) и в 2012 г. (в)

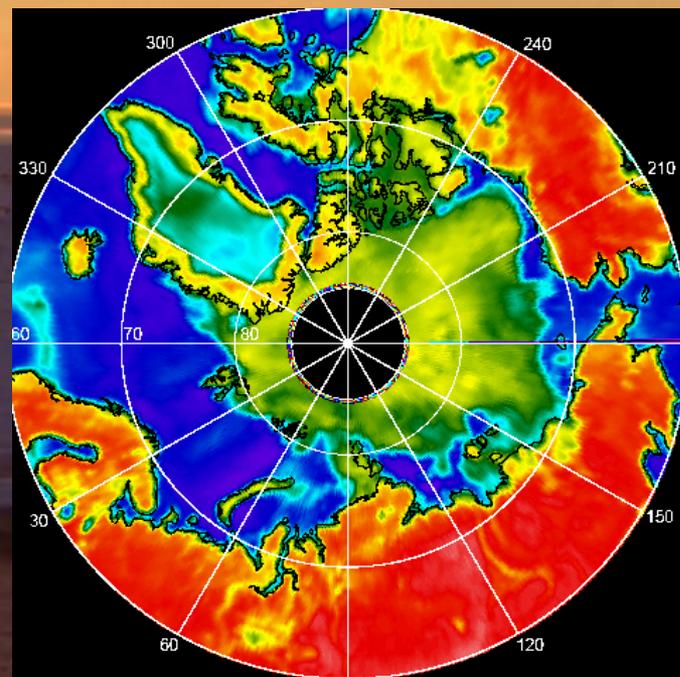
<i>Спутник</i>	<i>Прибор</i>	<i>Период работы</i>	<i>Каналы</i>	<i>Разрешение</i>
Nimbus-5	Electrically Scanning Microwave Radiometer (ESMR)	1972-1977	19 ГГц, горизонтальная поляризация	25 км
Nimbus-7	Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR)	1978-1987	6, 10, 18, 21, 37 ГГц (горизонтальная и вертикальная поляризации)	25 км
Defense Meteorological Satellite Programme (DMSP)	Special Sensor Microwave Imager (SSM/I), Special Sensor Microwave (Imager/Sounder SSMIS)	1987-по настоящее время	19, 37, 85 ГГц (горизонтальная и вертикальная поляризации), 22 ГГц – вертикальная поляризация	12-25 км
Aqua	Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth Observing System (AMSR-E)	2002-4 октября 2011	6, 10, 18, 23, 36, 89 ГГц (горизонтальная и вертикальная поляризации)	6 км
Coriolis	Polarimetric microwave radiometer WindSat	2003 – по настоящее время	6.8, 10.7, 18.7, 23.8 и 37.0 ГГц (6.8 и 37 ГГц - горизонтальная и вертикальная поляризации)	8-70 км

Наиболее полные карты полей распределения построены на основе автоматической обработки информации пассивного микроволнового зондирования прибора SSMR IC3 США "Nimbus-7" и прибора SSM/I IC3 серии "DMSP" (F8, F11, F13, F15, F17). (двухдневных (за период с 26 октября 1978 г. по 9 июля 1987 г.) и ежедневных (за период с 9 июля 1987 г. по настоящее время) данных по общей сплоченности морского льда по сетке 25 Ч 25 км.)

Данные семиканальных четырехчастотных СВЧ-радиометрических комплексов SSM/I (Special Sensor Microwave / Imager) на частотах 19,35; 22,24; 37,00 и 85,5 ГГц. (радиотепловые поля) в полярной проекции.



12 января 2009 г., 19 ГГц  
(Максимальный ледяной покров)

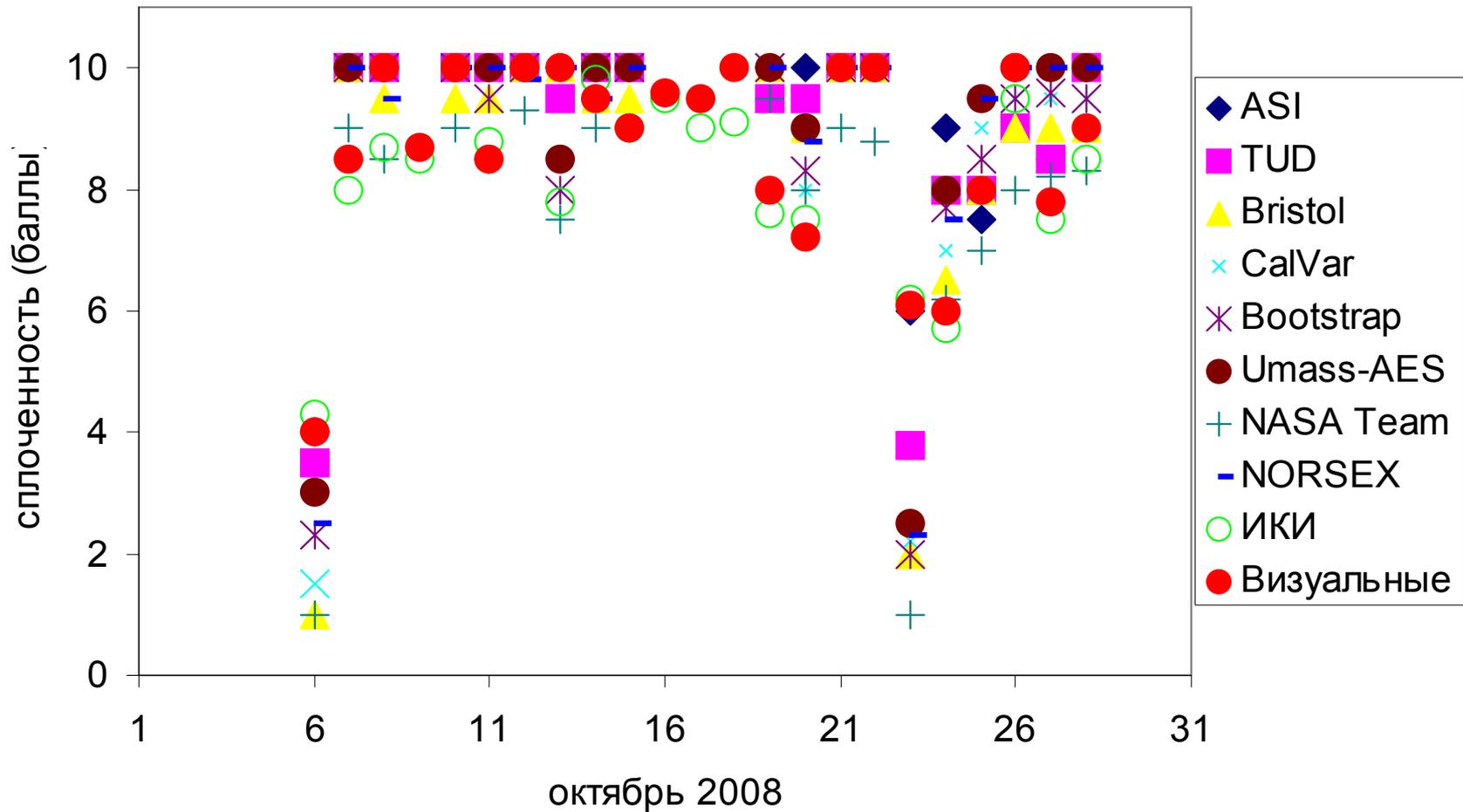


20 августа 2009 г., 19 ГГц  
(Минимальный ледяной покров)

База данных SSM/I изображений полярных районов **POLE-RT-Fields**

## Причины ошибок определения сплоченности льда по данным SSM/I

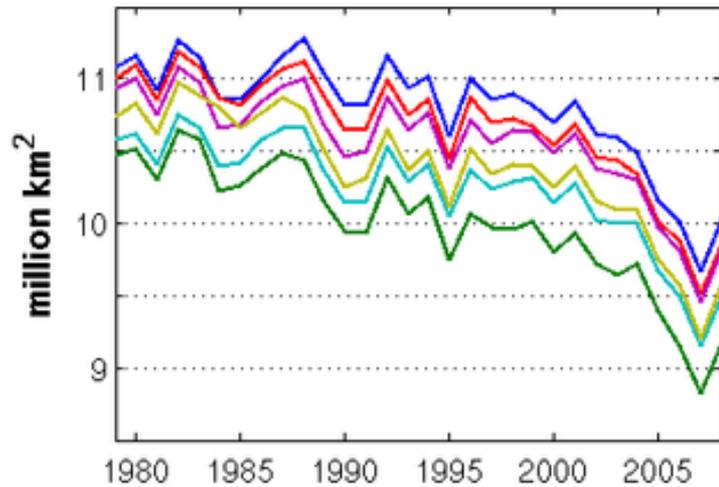
- методические ограничения алгоритмов (включая NASATEAM и Bootstrap), связанные с использованием фиксированных соотношений радиояркостных температур и физико-химических параметров морского льда для характерных районов Арктики и Антарктики, с влиянием погодных эффектов, а также со сложностью (и даже невозможностью в настоящий момент) учета слоя воды (в летний период) и снега на поверхности морского льда;
- недостаточная интеркалибровка измерений ИСЗ, использованных при формировании массива (“Nimbus-7”, F8—F17);
- технические ограничения приборов SSMR и SSM/I, связанные с пространственным разрешением каналов SSM/I (изменяющимся от ~25 км для канала 37 ГГц до ~50 км для канала 19 ГГц) и ведущие к исчезновению или неправильному проявлению структур морского льда с подсеточным разрешением (полосы, пятна, кромка, прибрежные районы).



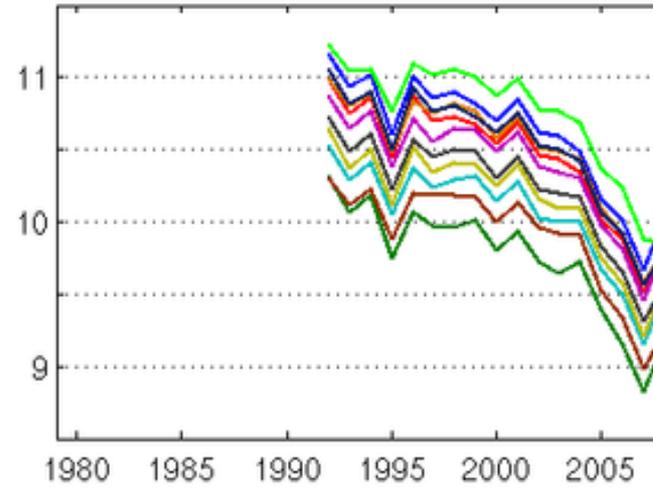
Сравнение различных алгоритмов расчета сплоченности льда по данным SSM/I с визуальными наблюдениями во время рейса на ледоколе «Капитан Драницын»

# Сравнение алгоритмов

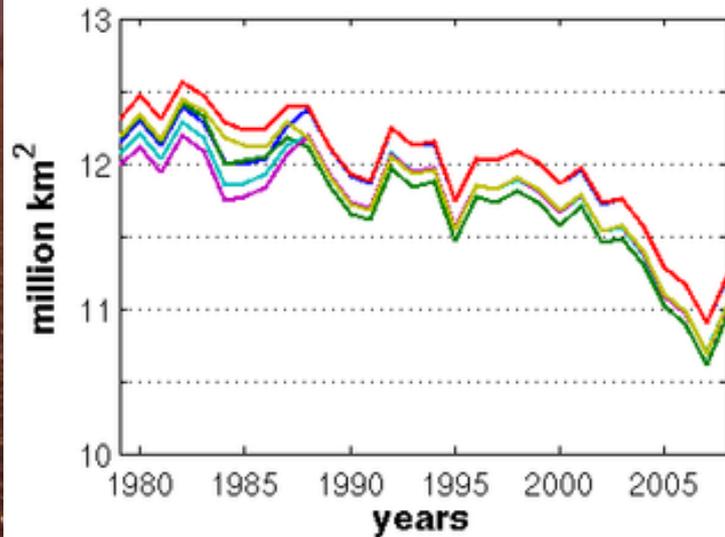
Yearly area 1979 - 2008



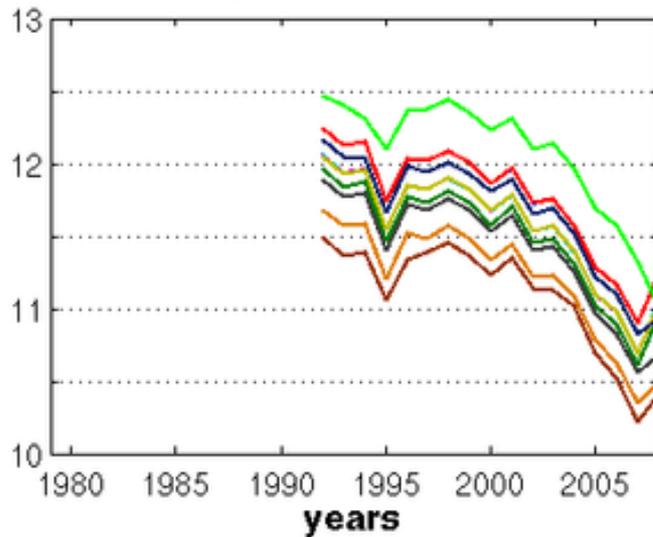
Yearly area 1992 - 2008



Yearly extent 1979 - 2008

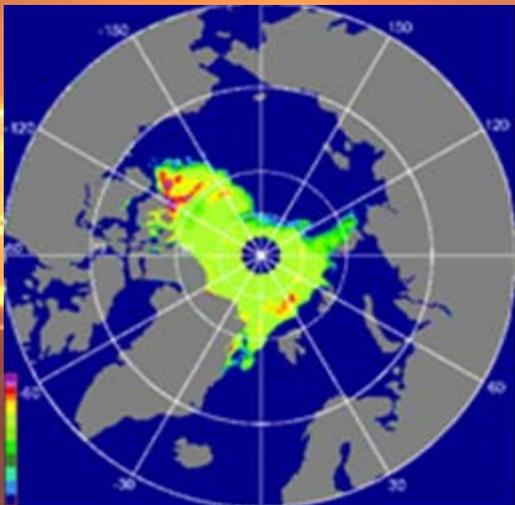


Yearly extent 1992 - 2008

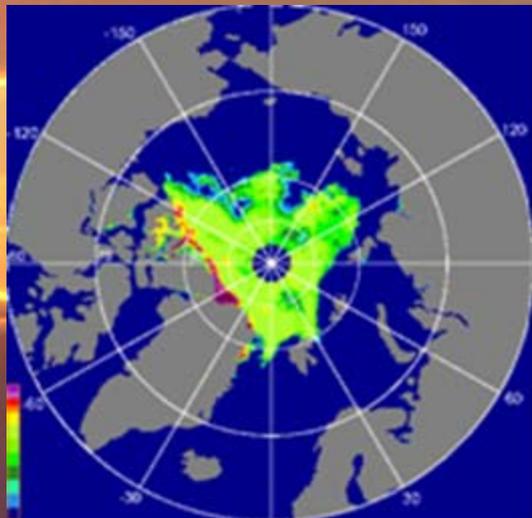


- NORSEX
- NASA Team
- UMass-AES
- Bootstrap
- CaVal
- Bristol
- TUD
- ASI
- NORSEX85H
- Near90GHz
- NASA Team2

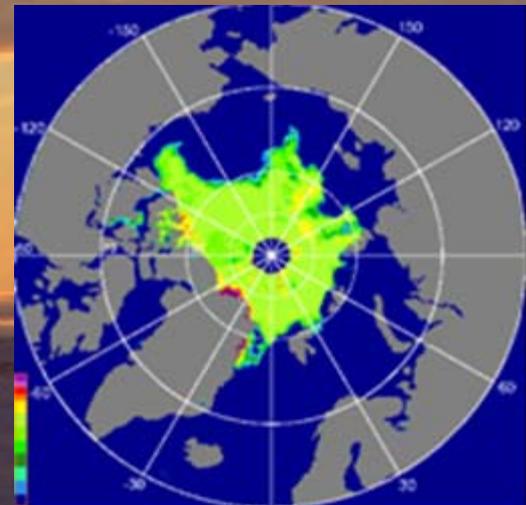
# Проблема снежниц



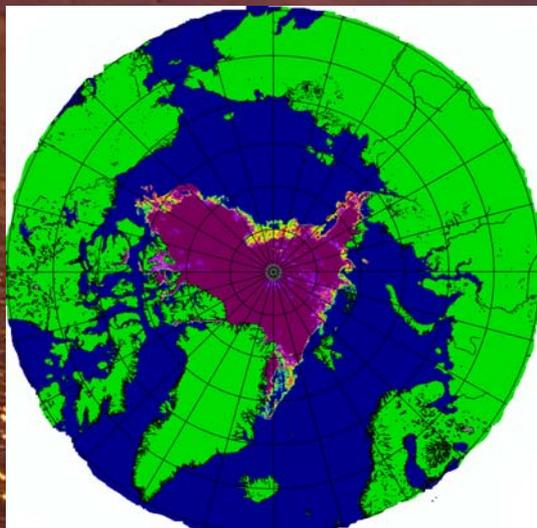
2007



2008

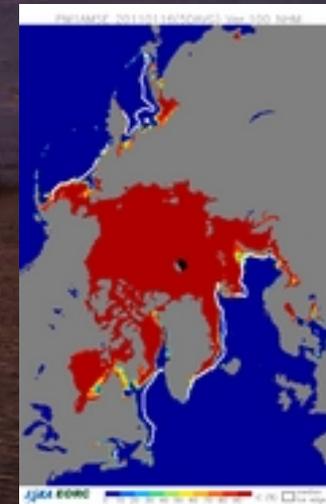
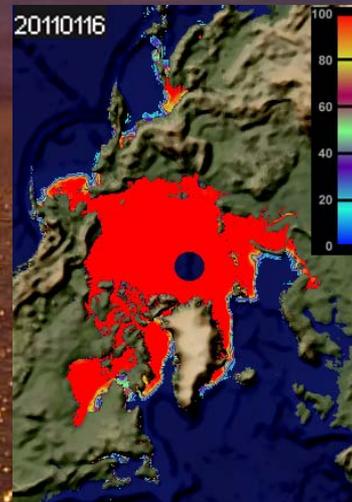
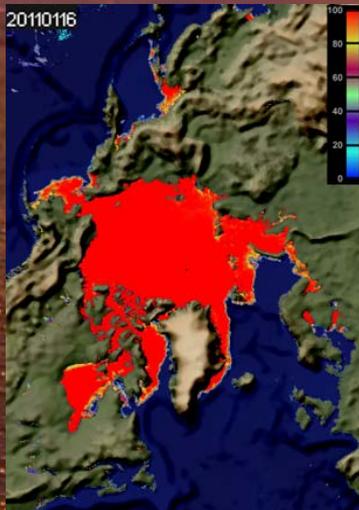
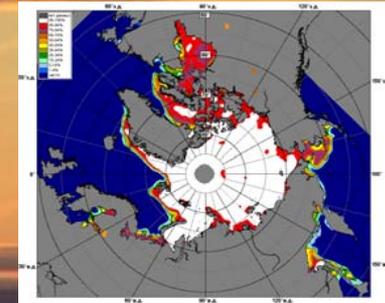
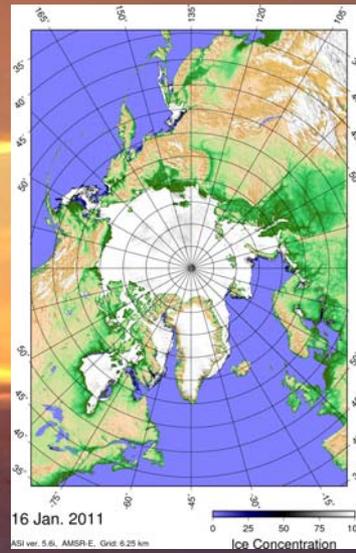
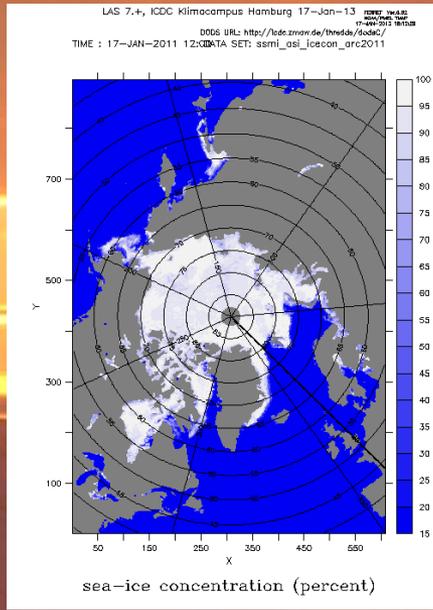


2009



Источник	Владелец ресурса	Радиометр	Период наблюдений	Алгоритм
<a href="http://www.iup.uni-bremen.de:8084/amsr/">http://www.iup.uni-bremen.de:8084/amsr/</a>	Университет Бремена, Германия	AMSR-E	Январь 2003 - октябрь 2011	ARTIST Sea Ice (ASI)
<a href="http://www.iup.uni-bremen.de:8084/ssmi/">http://www.iup.uni-bremen.de:8084/ssmi/</a>	Университет Бремена, Германия	SSM/I, SSMIS	Сентябрь 2008 по н.в.	ARTIST Sea Ice (ASI)
<a href="http://www.aari.ru">http://www.aari.ru</a>	Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Россия	AMSR-E	Сентябрь 2003 – декабрь 2009	NASA TEAM
		SSMR, SSM/I, SSMIS	Октябрь 1978 - апрель 2012	NASA TEAM
<a href="http://arctic-roos.org/observations/satellite-data/sea-ice/Arctic-ice-concentration-maps-from-SSMI-and-AMSRE">http://arctic-roos.org/observations/satellite-data/sea-ice/Arctic-ice-concentration-maps-from-SSMI-and-AMSRE</a>	Международный центр по исследованию окружающей среды и дистанционному зондированию им. Нансена, Норвегия	AMSR-E	Октябрь 2008 – октябрь 2011	NORSEX
		SSM/I, SSMIS	Октябрь 2008 – по н.в.	NORSEX
<a href="http://www.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/jasmes/climate/jasmes_climate_map_v2.cgi?lang=en">http://www.eorc.jaxa.jp/cgi-bin/jasmes/climate/jasmes_climate_map_v2.cgi?lang=en</a>	Японское аэрокосмическое агентство, Япония	AMSR-E	июль 2002 – октябрь 2011	Bootstrap
		SSMR SSM/I	Ноябрь 1978 – июнь 2002	Bootstrap
		WindSat	Октябрь 2011- по н.в.	Bootstrap
<a href="http://arctic.atmos.uiuc.edu/cryosphere/">http://arctic.atmos.uiuc.edu/cryosphere/</a>	Университет Иллинойса, США	SSMR, SSM/I, SSMIS	Ноябрь 1978 – по н.в.	NASA TEAM
<a href="http://polar.ncep.noaa.gov/seaice/Analyses.html">http://polar.ncep.noaa.gov/seaice/Analyses.html</a>	Национальное агентство по океану и атмосфере, США	Комбинированные AMSR-E SSM/I Изображения	Октябрь 1995 – по н.в.	NASA TEAM II
<a href="http://www.ifm.zmaw.de/en/research/remote-sensing-assimilation/sea-ice/amsr-e-sea-ice-concentration/">http://www.ifm.zmaw.de/en/research/remote-sensing-assimilation/sea-ice/amsr-e-sea-ice-concentration/</a>	Институт океанологии Университета Гамбурга, Германия	AMSR-E	июль 2002 – октябрь 2011	ARTIST Sea Ice (ASI)
<a href="http://www.icdc.zmaw.de/las/getUI.do">http://www.icdc.zmaw.de/las/getUI.do</a>	Центр климатических данных Университета Гамбурга, Германия	SSM/I, SSMIS	Декабрь 1991 по н.в.	ARTIST Sea Ice (ASI)

# Примеры карт сплоченности льда из различных архивов. 16 января 2007



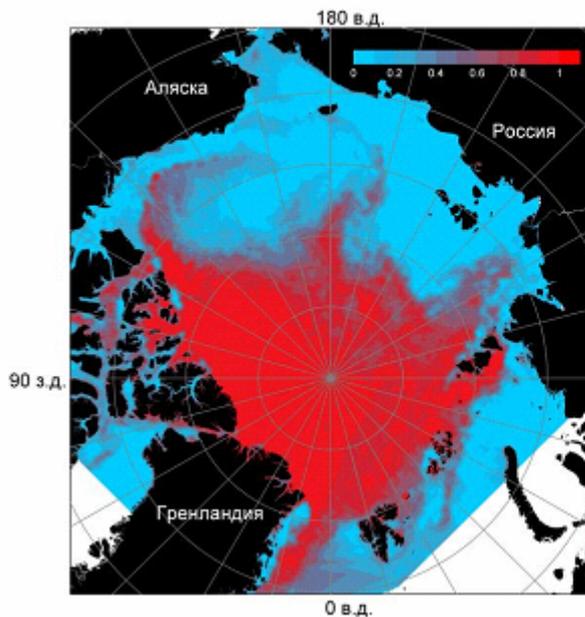
# Толщина льда

1. ИК-радиометр. По разнице температуры льдов различной толщины.
2. СВЧ-радиометр. По разнице структуры льда.
3. Радиолокационный альтиметр. Измеряет возвышение льда.
4. Лазерный альтиметр (лидар) – общее возвышение поверхности льда и снега.

# Толщина льда

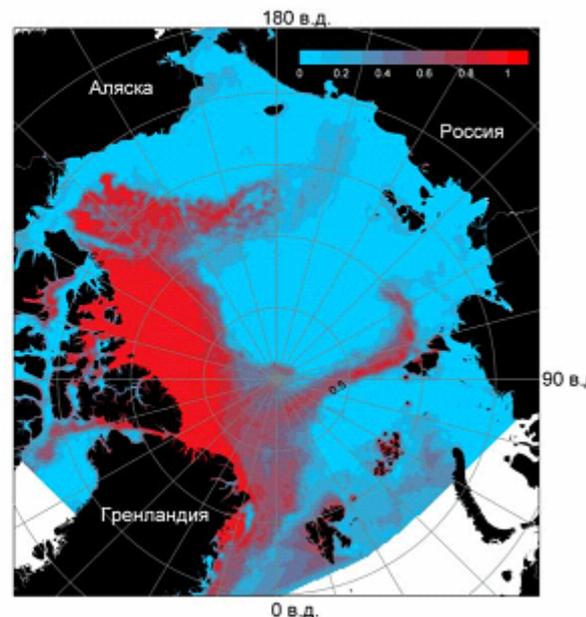
2004

(б)



2008

(в)



Распределение «возраста» льда в Северном ледовитом океане (красная заливка соответствует преобладанию многолетнего льда, а голубая – преобладанию однолетнего льда)

[www.rkwok.jpl.nasa.gov/icesat/download.html](http://www.rkwok.jpl.nasa.gov/icesat/download.html)

1. IceSat - лидар GLAS
2. CryoSat-2 - Interferometric Radar Altimeter (SIRAL)

Спасибо за внимание!

