



Трансформация арктического морского льда по данным спутниковых наблюдений и климатических моделей

Леонид Бобылёв ¹⁾
Ола М. Йоханнесен ²⁾
Светлана Кузмина ¹⁾

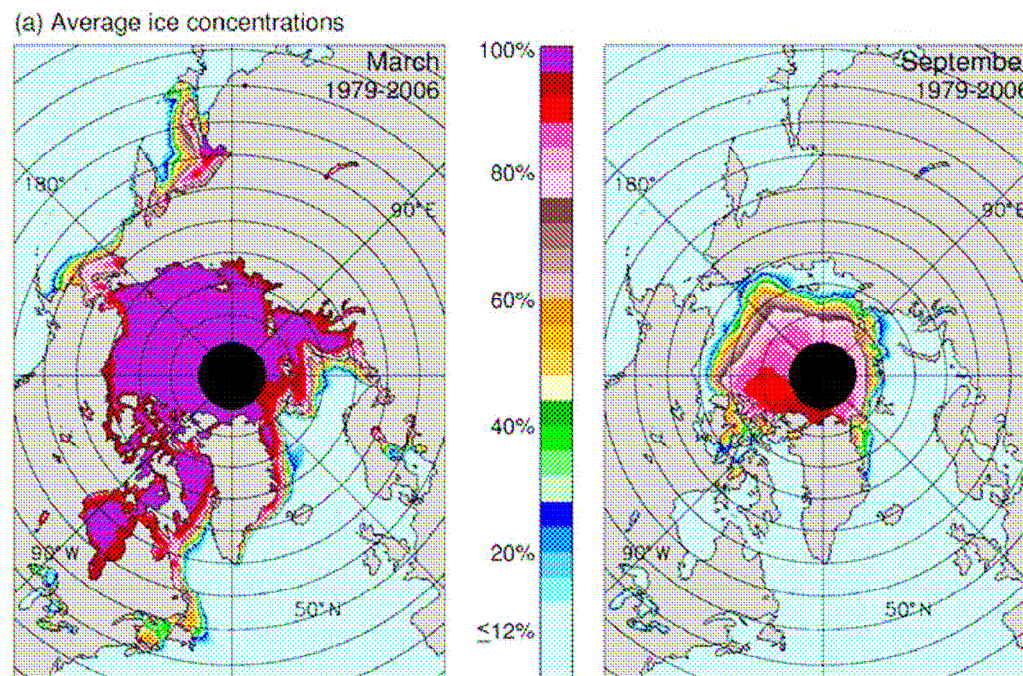
¹⁾ Нансен-центр, С.-Петербург, Россия

²⁾ Нансен-центр, Берген, Норвегия

Морской лёд – важный компонент окружающей среды и климата Арктики

- ❑ Покрывает приблизительно 15 миллионов км² Северного Ледовитого Океана в зимнее время и 5÷7 миллионов км² летом
- ❑ Постоянно воздействует на своё окружение, ограничивая обмен между океаном и атмосферой и отражая большую часть падающей солнечной радиации
- ❑ Воздействует на термохалинную циркуляцию океана. При формировании или таянии льда солёность морской воды соответственно увеличивается или уменьшается, так как лёд имеет меньшую солёность, чем морская вода
- ❑ Влияет на температуру поверхности океана при перемещении своих холодных масс

Арктический морской лёд по спутниковым пассивным микроволновым наблюдениям



Parkinson and Cavalieri, 2008

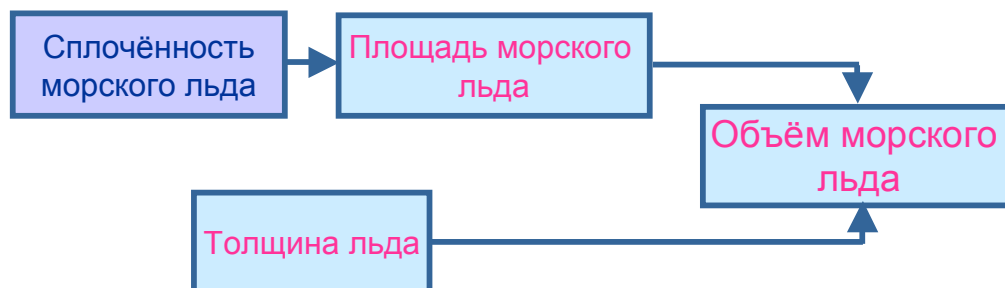
Следовательно, изменения в морском ледяном покрове имеют обширные потенциальные климатические последствия



Содержание доклада



- ❑ Изменчивость и тренды арктического морского льда в 20-ом и 21-ом столетиях, полученные по спутниковым данным (1975-2009)
- ❑ Сравнение результатов наблюдений и моделирования арктического морского льда
- ❑ Проекции морского льда в Арктике на 21-ое столетие





Определение сплочённости морского льда по данным спутниковых пассивных микроволновых измерений

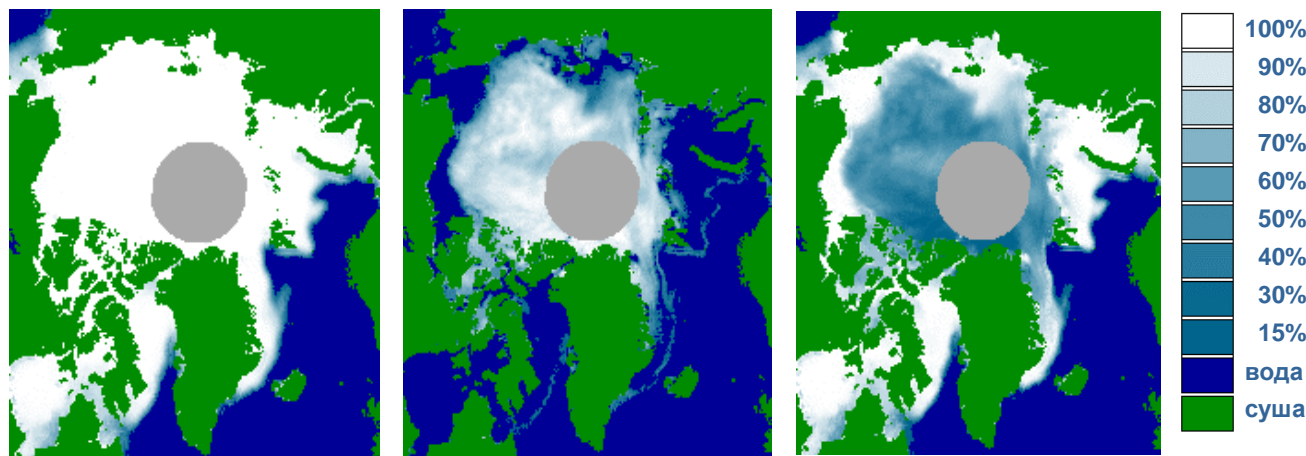


Спутниковое пассивное микроволновое зондирование – одно из наиболее важных и эффективных средств мониторинга изменений ледового покрова Северного Ледовитого Океана

Два параметра ледяного покрова:

- **площадь льда** – сумма площадей пикселей, умноженных на сплочённость льда для каждого пикселя при сплочённости не менее 15%
- **протяжённость льда** – кумулятивная площадь всех пикселей, имеющих сплочённость льда не менее 15%

Johannessen et al, 2004



Ледяной покров = Многолетний лёд + Однолетний лёд

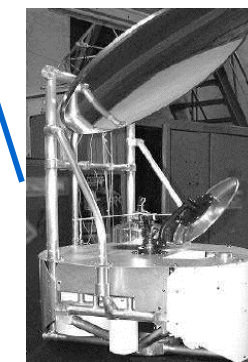
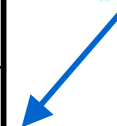
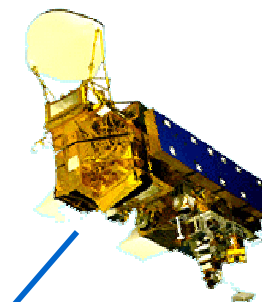
$$\text{NORSEX: } C_{MY}, C_{FY}, C_{OW} = f_i(T_{bv}(19\text{GHz}), T_{bv}(37\text{GHz}))$$



Основные спутниковые микроволновые радиометры



Спутник	Радиометр	Период функционирования	Каналы (ГГц)	Разрешение (км)
Nimbus-7 США	Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR)	1978-1987	6.6, 10.7, 18.0, 21.0, 37.0 (В,Г)	18÷150
Defense Meteorological Satellite Programme (DMSP) - США	Special Sensor Microwave Imager (SSM/I)	1987-настоящее время	19.35, 37.0, 85.5 (В,Г) 22.24 (В)	15 ÷70
Aqua США	Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth Observing System (AMSR-E)	2002 -настоящее время	6.93, 10.65, 18.7, 23.8, 36.5, 89.0 (В,Г)	5÷56
КА «Метеор-М» №1 РОССИЯ	Микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ	17 сентября 2009	10.6, 18.7, 23.8, 31.5, 36.7, 42, 48 (В,Г) 52.80÷55.63 (В) 57.29 (Г) 91.655 (В,Г) 183.31 (В)	16÷198
Global Change Observation Mission – Water (GCOM-W) ЯПОНИЯ	Advanced Microwave Scanning Radiometer AMSR 2	планируется к запуску в 2011	6.93, 10.65, 18.7, 23.8, 36.5, 89.0 (В,Г)	



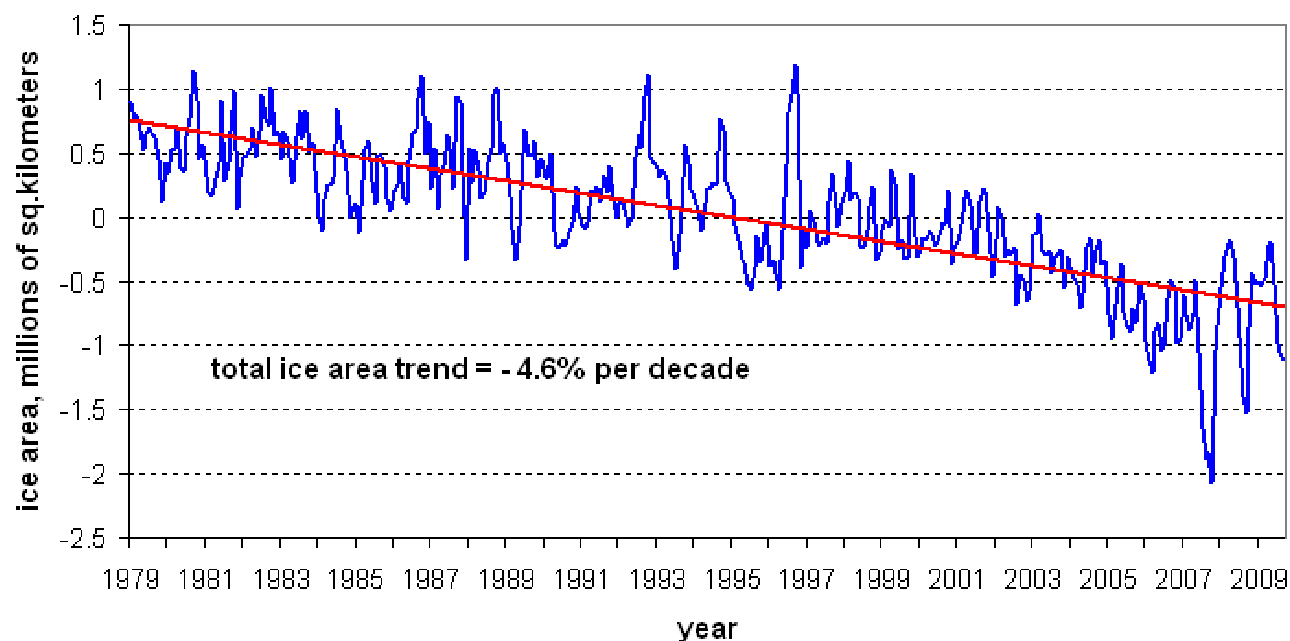


Общая площадь арктического морского льда по спутниковым наблюдениям за период 1979-2009



31-летний временной ряд по данным SMMR and SSM/I

sea ice area anomalies, 1979-14.09.2009



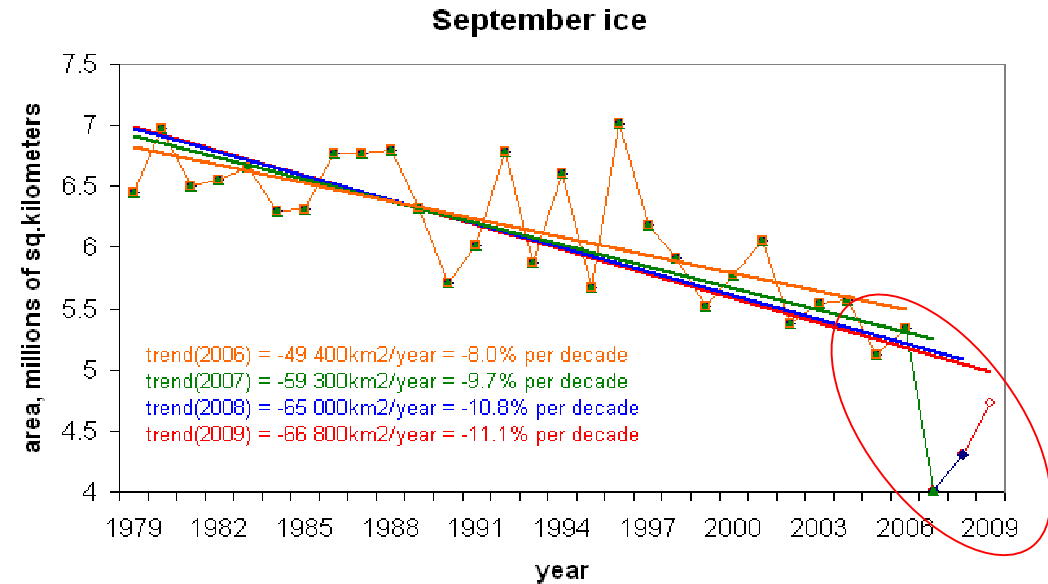
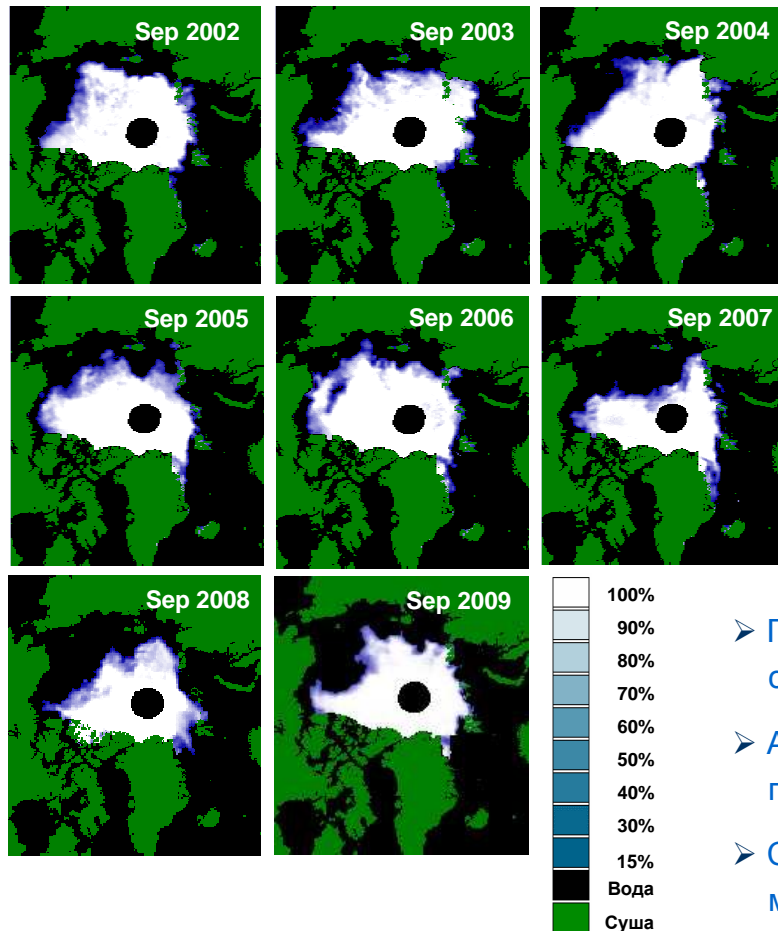
NORSEX: Общая площадь морского льда уменьшалась на $47\,430 \pm 1\,990$ км² в год

Общее уменьшение за 31 год составило ~14.2%

Источник данных:

National Snow and Ice Data Center (NSIDC), Boulder, Colorado, USA
(Радиояркостные температуры в полярной стереографической проекции)

Площадь летнего арктического морского льда в сентябре по данным спутниковых наблюдений за период 1979-2009



- Площадь морского льда в сентябре 2002 была меньше площади в сентябре 1979 на 1.07 миллионов км²
- Арктика потеряла 1.2 миллионов км² морского льда с сентября 2002 по сентябрь 2007
- С 2007 по 2009 площадь льда в сентябре вновь возросла на 0.7 миллионов км², но при этом в 2008 и 2009 зафиксированы 2-ой и 3-ий минимумы морского ледяного покрова за период спутниковых наблюдений

Ледяной покров в сентябре уменьшается в 2.4 раза быстрее, чем общая площадь льда



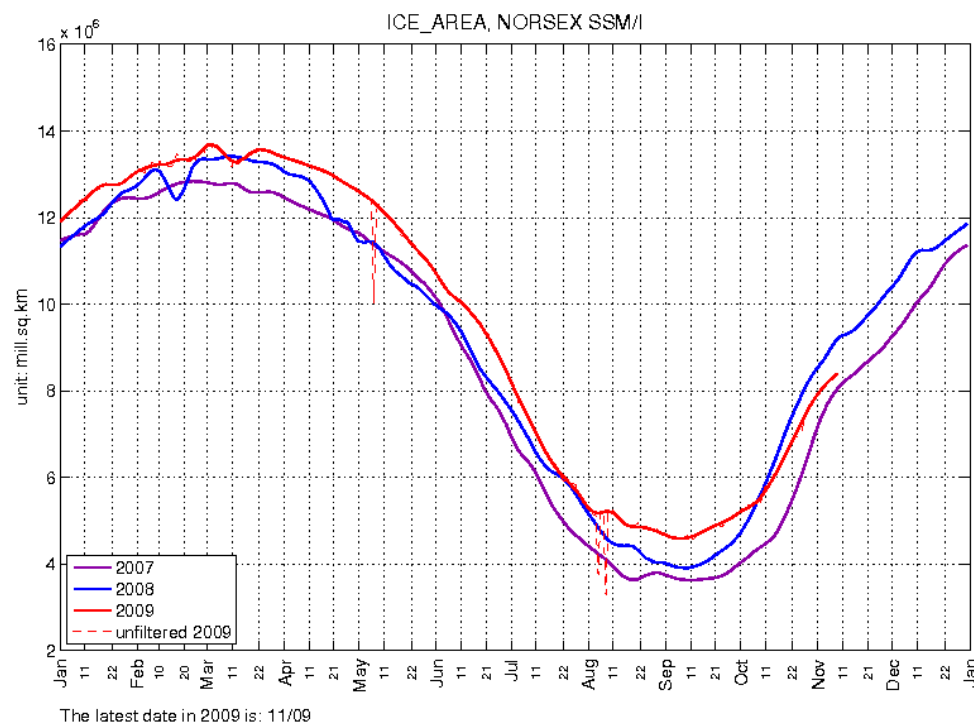
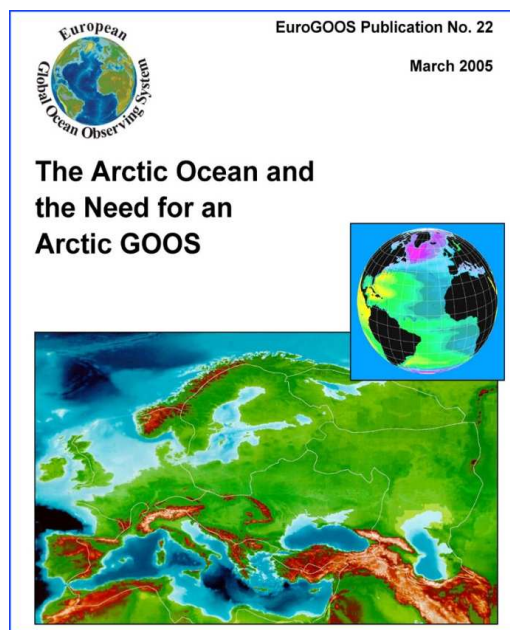
Arctic Regional Ocean Observing System (Arctic ROOS)



Ассоциация 15 институтов
из 9 европейских стран с
целью
интенсифицировать
развитие арктического
компонента Global Ocean
Observing System

Arctic ROOS была создана в декабре 2007 на
учредительном собрании в Лулео, Швеция

Стейн Сандвен из Нансен-центра в Бергене,
Норвегия, избран председателем и содержит
секретариат Arctic ROOS



<http://arctic-roos.org/>



Площадь многолетнего льда по данным спутниковых наблюдений за период 2000-2008

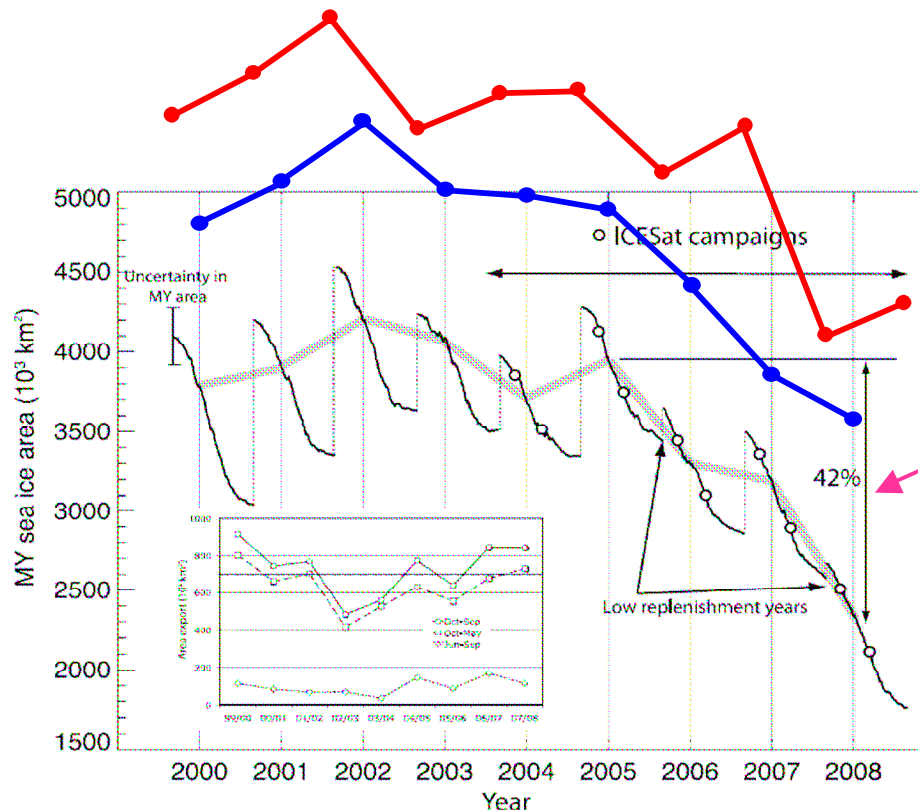


Красный – сентябрьский минимум морского льда по данным SSM/I (NORSEX)

Синий – многолетний лёд в январе по данным SSM/I (NORSEX)

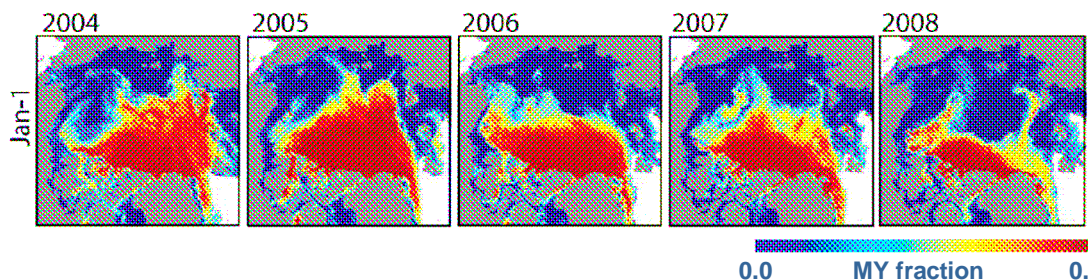
Чёрный – многолетний лёд по данным QuikSCAT и экспорта льда через пролив Фрама (Kwok et al, 2009)

Серый – многолетний лёд в январе (Kwok et al, 2009)



Заштрихованная зона $\sim 7.2 \times 10^6$ km²

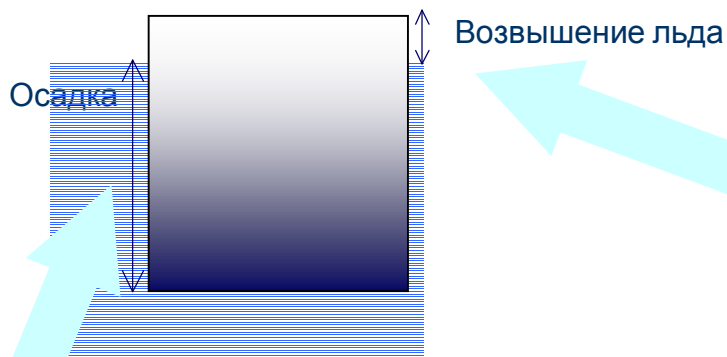
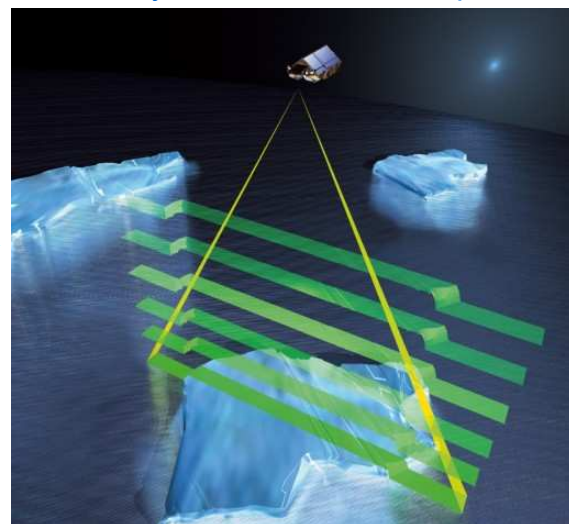
Площади многолетнего и однолетнего льда разграничены, используя 50%-изоплету сплочённости многолетнего льда



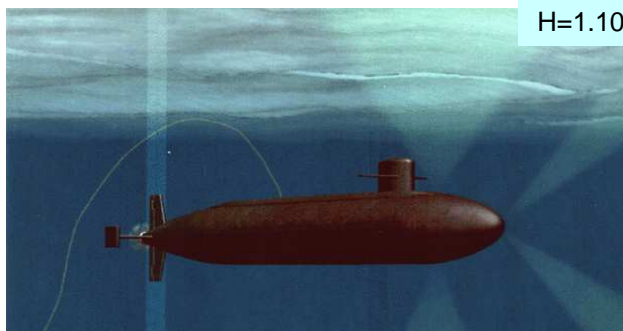
MY/FY coverage – QuikSCAT (Kwok)

Определение толщины морского льда по данным спутниковых альтиметров и сонаров с подводных лодок

Спутниковые альтиметры



Сонары подводных лодок

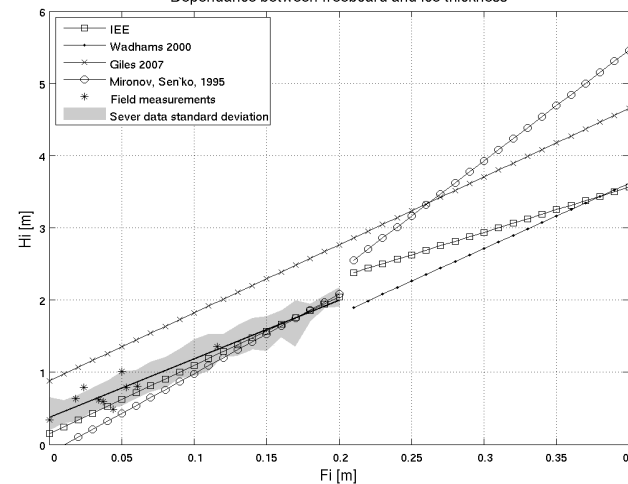


Миронов, Сенько (АНИИ):

$$H=1.070d+4.6 \text{ – мног. лёд, дек.-май}$$

$$H=1.100d+1.2 \text{ – однол. лёд, окт.-май}$$

Dependence between freeboard and ice thickness



Основные спутниковые альтиметры (1)

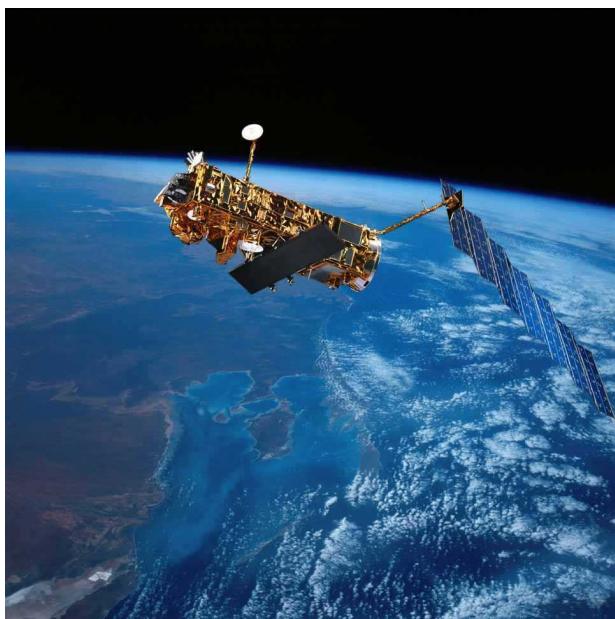
European Remote-Sensing Satellites (ЕКА)

ERS-1 25 июля 1991 – 10 марта 2000

ERS-2 20 апреля 1995 – настоящее время
(радиоальтиметр не работает с 2003 года)

RA – Radar altimeter (Ku-band, 13.8 ГГц)

Разрешение 16÷20 км



Envisat (ЕКА)

1 марта 2002 – настоящее время

RA-2 – Radar altimeter 2, двухчастотный (Ku-band, 13.575 ГГц, и S-band, 3.2 ГГц)

Разрешение 16÷20 км



Основные спутниковые альтиметры (2)

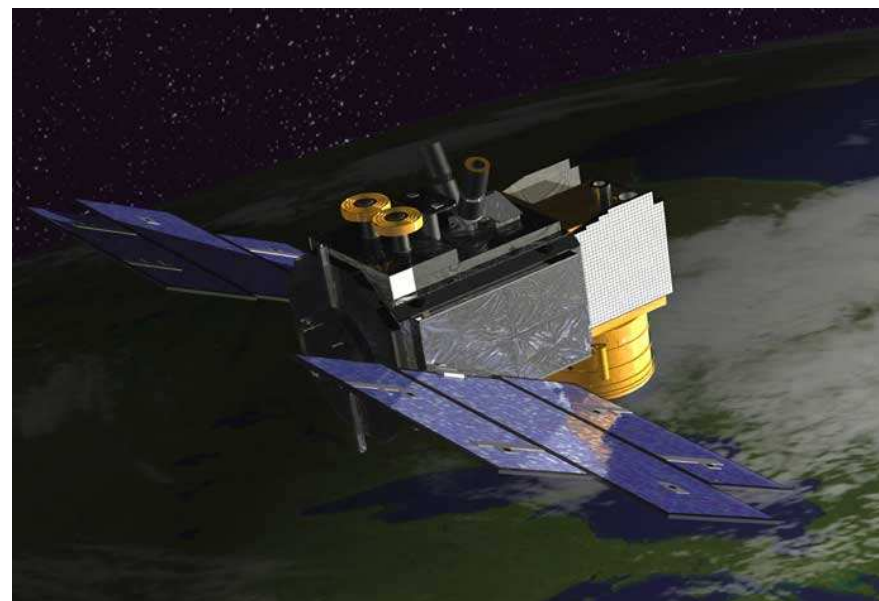
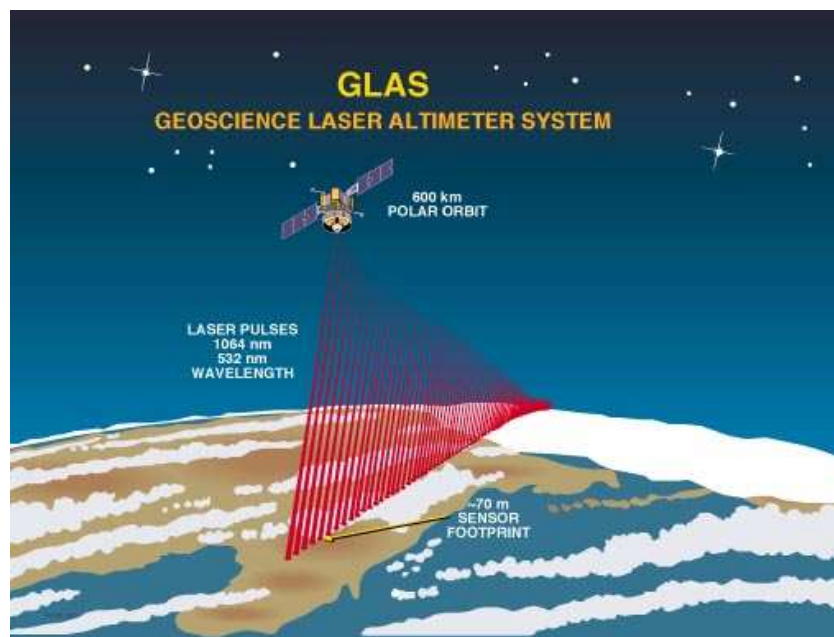


Ice, Cloud, and land Elevation Satellite (США)

ICESat 12 января 2003 – настоящее время

GLAS – Geoscience Laser Altimeter System (532 и 1064 нм)

Разрешение 70 м





Основные спутниковые альтиметры (3)



Cryosat 2 (ЕКА)

Запуск на орбиту – начало 2010

SIRAL – SAR/Interferometric Radar Altimeter (13.6 ГГц)

Разрешение 250 x 7 000 м



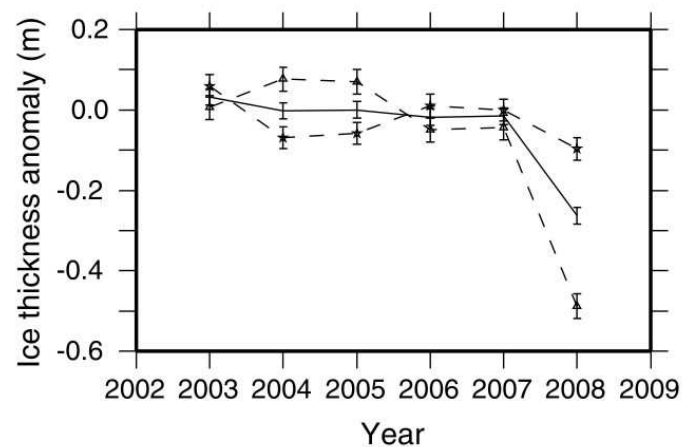
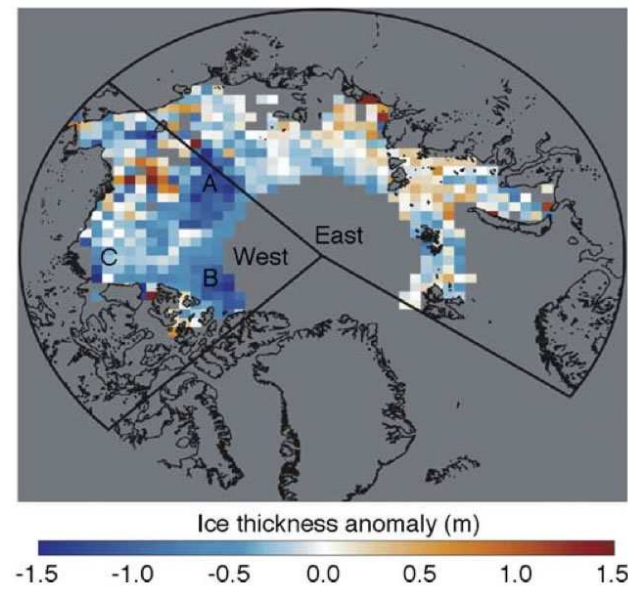
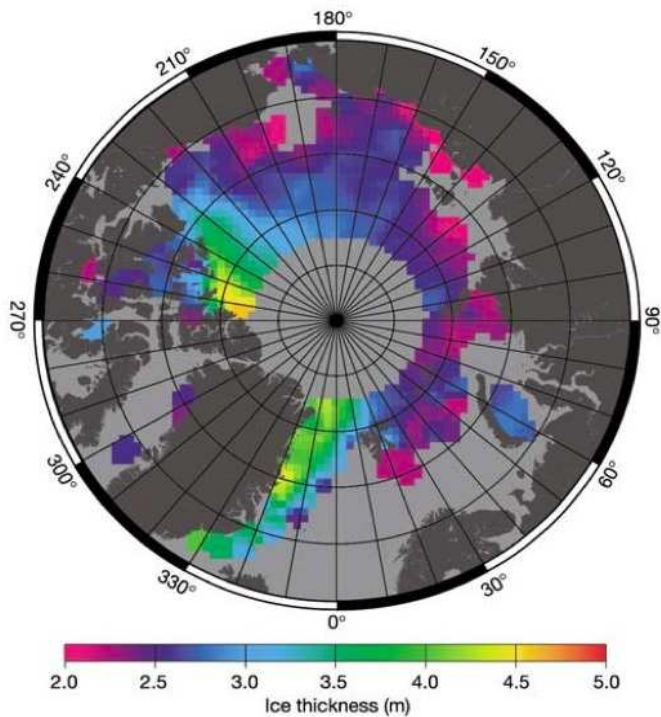


Зимняя толщина морского льда



Envisat RA 2, 2003-2008
Ниже 81.5N
Giles, et al 2008

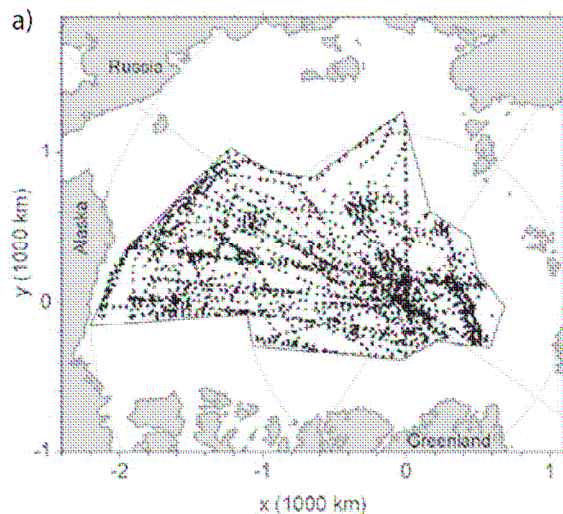
ERS-1/2 RA, 1993-2001
Laxon et al., 2003



Изменение толщины арктического морского льда за период 1975-2008

Data Release Area

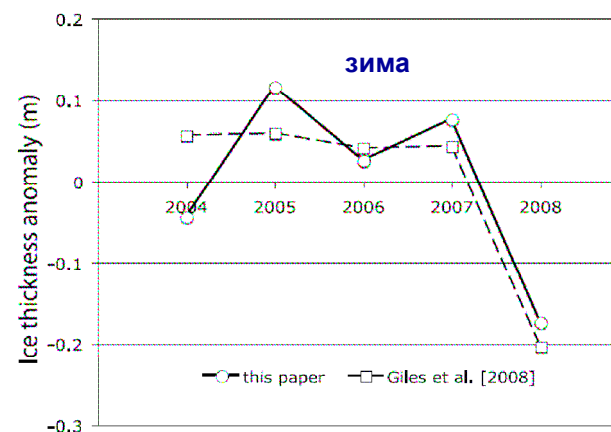
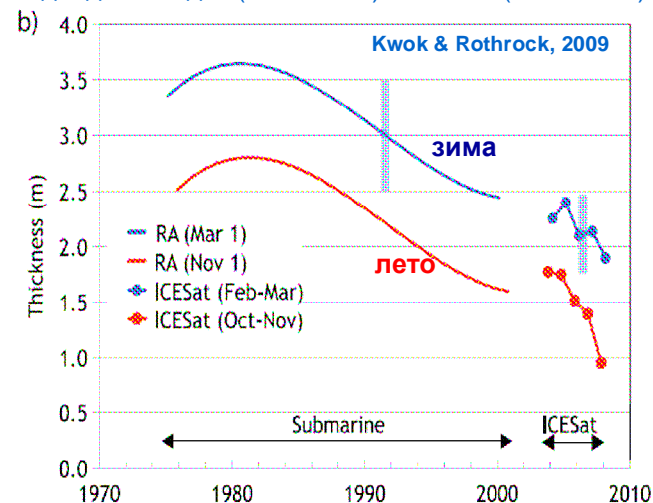
Точки – районы измерений с американских подводных лодок



Kwok & Rothrock:

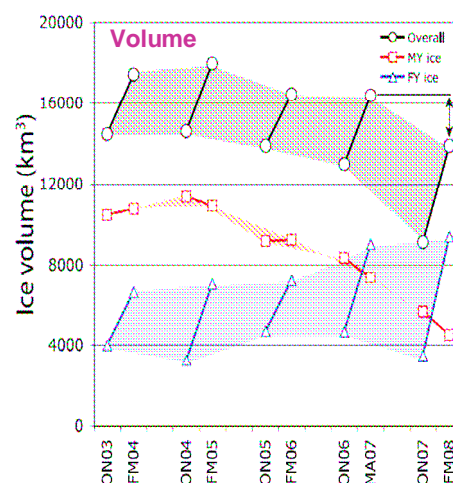
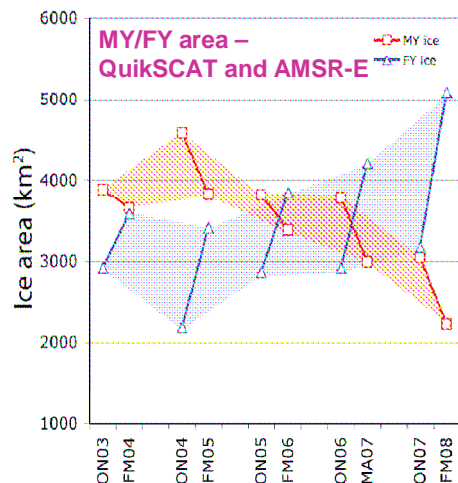
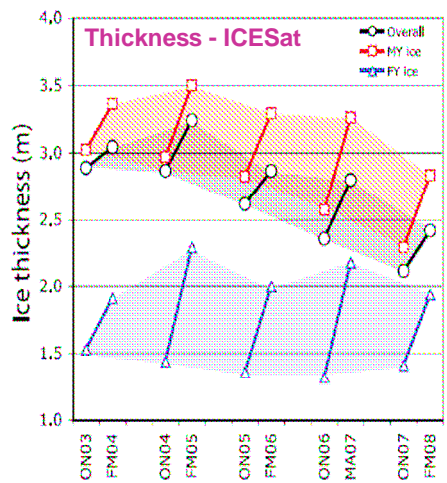
1. За 1975-2008 гг. средняя толщина льда зимой уменьшилась с 3.64 м в 1980 г. до 1.89 м в 2008 г.: уменьшение на 1.75 м
2. Летняя толщина уменьшилась с 2.80 м в 1980 г. до 1.15 м в 2007 г.: уменьшение на 1.65 м
3. Зимний/летний тренды толщины льда за 5-летний период наблюдений ICESat составили -0.10/-0.20 м/год, что является более значительным уменьшением, чем наибольшее уменьшение в прежние годы, составившее -0.08 м/год в 1990 г.
4. Оценки K&R аномалий толщины льда (ниже 81.5N) замечательно согласуются с аналогичными оценками, полученными по данным Envisat (Giles et al., 2008). Они различаются лишь на 0.1 м. Более того, те и другие оценки показывают то же самое драматическое уменьшение толщины льда между 2007 и 2008 годами

Межгодовые изменения средней толщины льда по данным подводных лодок (1975-2000) и ICESat (2003-2008)





Изменения толщины и объёма арктического морского льда по данным ICESat за период 2003–2008 (Kwok et al, 2009)



42% - уменьшение площади МЛ между 2003 и 2008

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

Средняя толщина ОЛ осталась приблизительно без изменений за период 2003-2008

Средние значения и тренды (в скобках) площади, толщины и объёма морского льда для осени и зимы по данным ICESat



Заштрихованная зона ~7.2 x 10⁶ km²

Параметр	Общий лёд	Однол-ий лёд	Многол-ий лёд
Площадь (10 ³ км ²)			
1 января	7 204 (- 0.1 % г ⁻¹)	3 870 (+ 8.2 % г ⁻¹)	3 334 (- 9.7 % г ⁻¹)
Толщина (м)			
Осень	2.6 (- 7.7 % г ⁻¹)	1.4 (- 2.9 % г ⁻¹)	2.7 (- 7.0 % г ⁻¹)
Зима	2.9 (- 5.9 % г ⁻¹)	2.1 (- 0.5 % г ⁻¹)	3.2 (- 4.1 % г ⁻¹)
Объём (км ³)			
Осень	13 021 (- 9.5 % г ⁻¹)	4 014 (+ 0.8 % г ⁻¹)	9 006 (- 14.1 % г ⁻¹)
Зима	16 420 (- 5.2 % г ⁻¹)	7 863 (+ 9.6 % г ⁻¹)	8 557 (- 7.2 % г ⁻¹)

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

В 2008 площадь и объём МЛ зимой стали меньше, чем у ОЛ

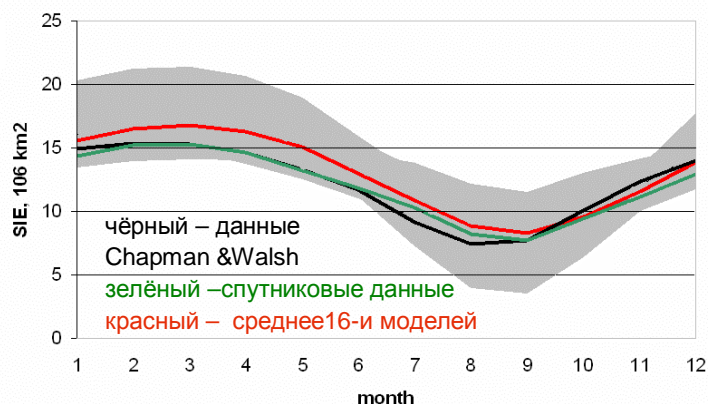
Сезонный лёд зимой 2008 стал доминирующим типом льда в Арктике



Сравнение протяжённости морского льда по данным наблюдений и моделирования (IPCC AR4, сценарий A2) за период 1958-1999

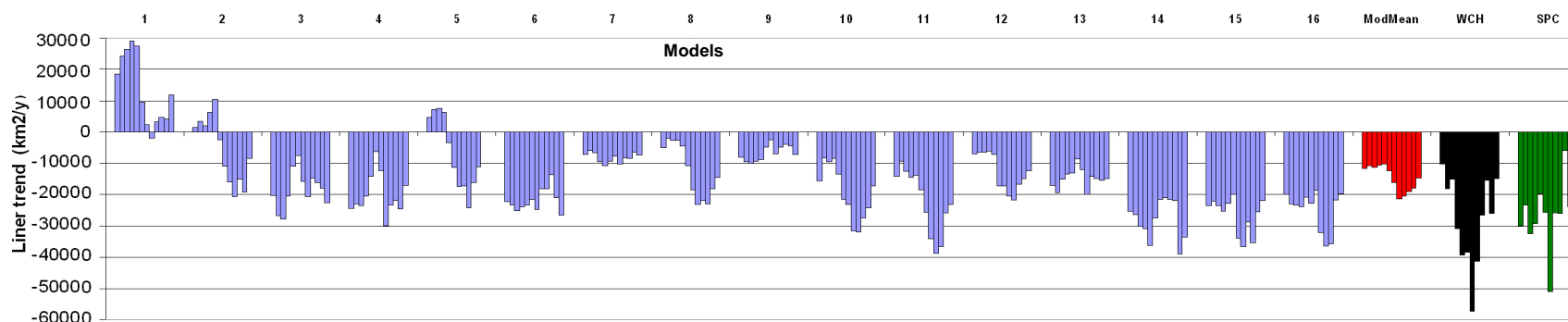


Годовой цикл протяжённости морского льда по данным моделей и наблюдений



- ❑ Модели переоценивают ПМЛ, особенно в первую половину года
- ❑ Наблюдаемая ПМЛ уменьшается быстрее, чем предсказываемая моделями

Годовой цикл линейных трендов ПМЛ по данным моделей и наблюдений



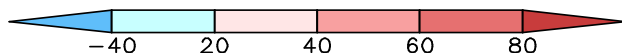
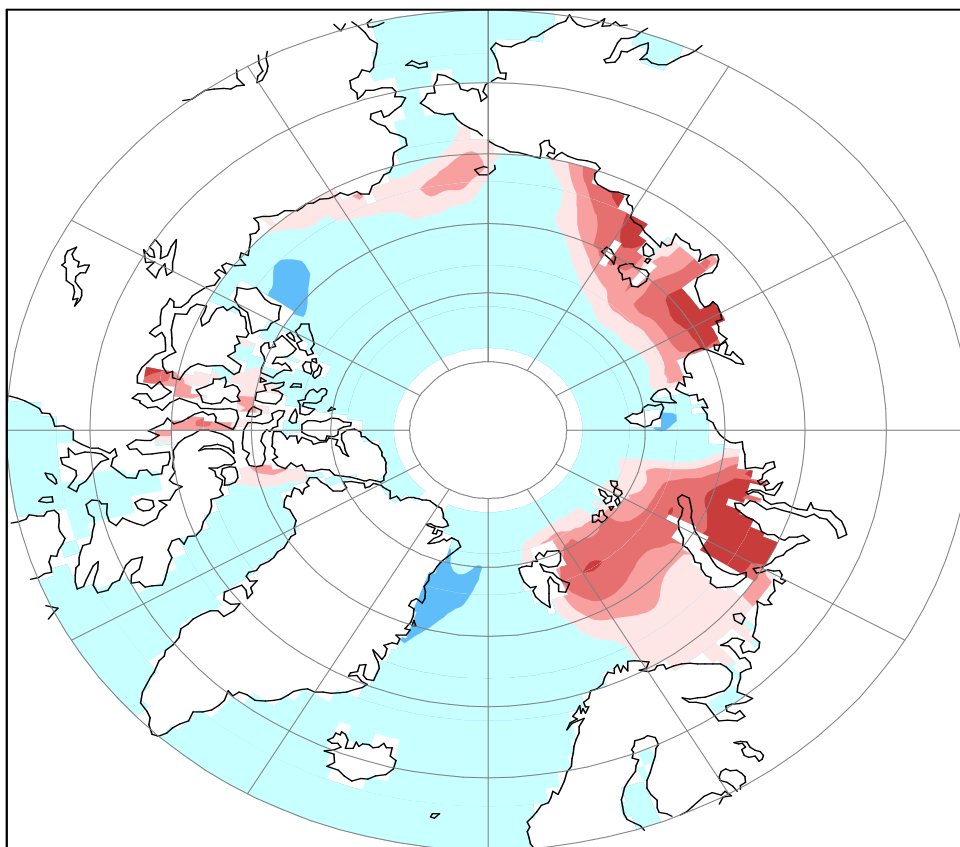
Модель: 1 -BCCR-BCM 2.0.; 2 -CCSM3; 3 -CGCM3.1 (T47); 4 -CGCM3.1 (T63); 5 -CNRM-CM3; 6 -CSIRO-MK3.0; 7 -ECHAM5/MPI-OM; 8 -GISS-AOM; 9 -GISS-ER; 10 -IPSL-CM4; 11 -MIROC3.2 (hires); 12 -MIROC3.2 (medres); 13 -MRI-CGCM2.3.2; 14 -PCM; 15 -UKMO-HadCM3; 16 -UKMO-HadGEM1



Средняя разность в значениях сплочённости льда по данным наблюдений и моделей (1979-1999)



Разница в сплочённости льда (среднемодельная – спутниковая), %

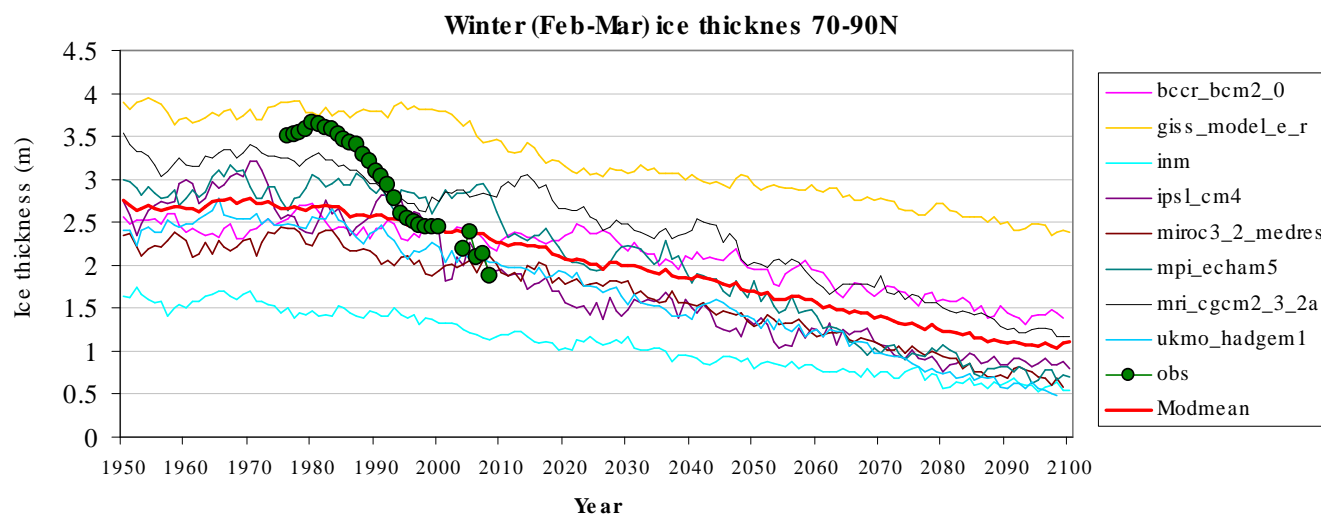


Наибольшая разница между среднемодельными и спутниковыми значениями сплочённости морского льда наблюдается в Баренцевом, Карском, Восточно-Сибирском морях и море Лаптевых

Смещение в сплочённости льда превышает 80% в Карском, Восточно-Сибирском морях и море Лаптевых



Сравнение толщины морского льда в Арктике по данным наблюдений и моделей (IPCC AR4, сценарий A2) за период 1975-2008



8 AR4 моделей:

1950-1999 - 20CM twenty century experiment (реальный форсинг)

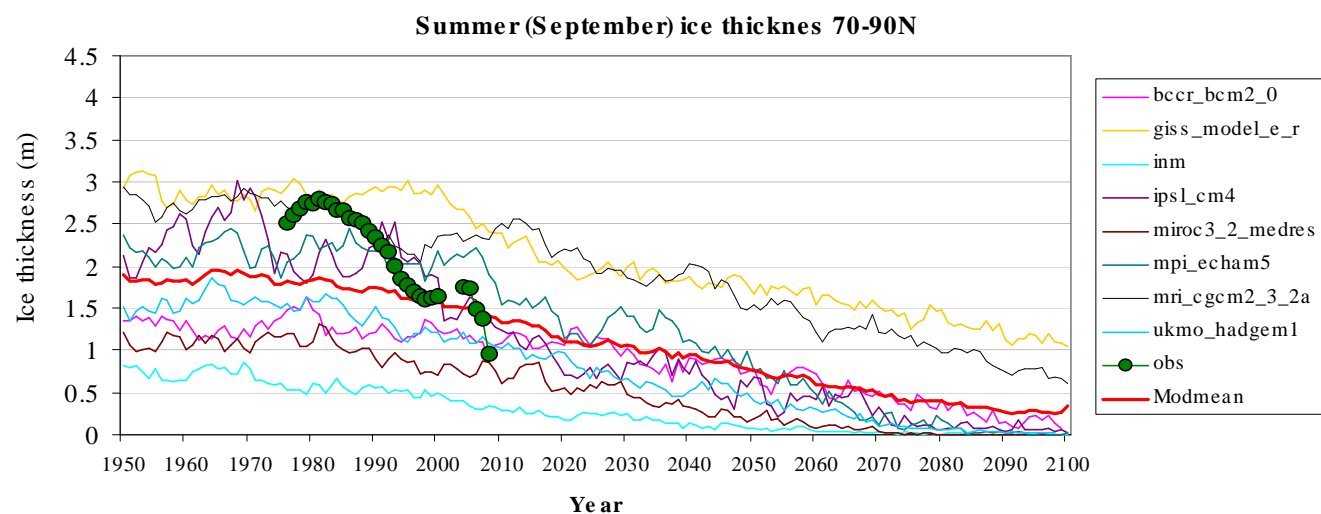
совмещен с

2000-2100 – первая реализация, сценарий A2

Наблюдения (Kwok & Rothrock, 2009):

1975-2000 – подводные лодки

2003-2005 – ICESat





Свободная от морского льда Арктика в 21-м веке?



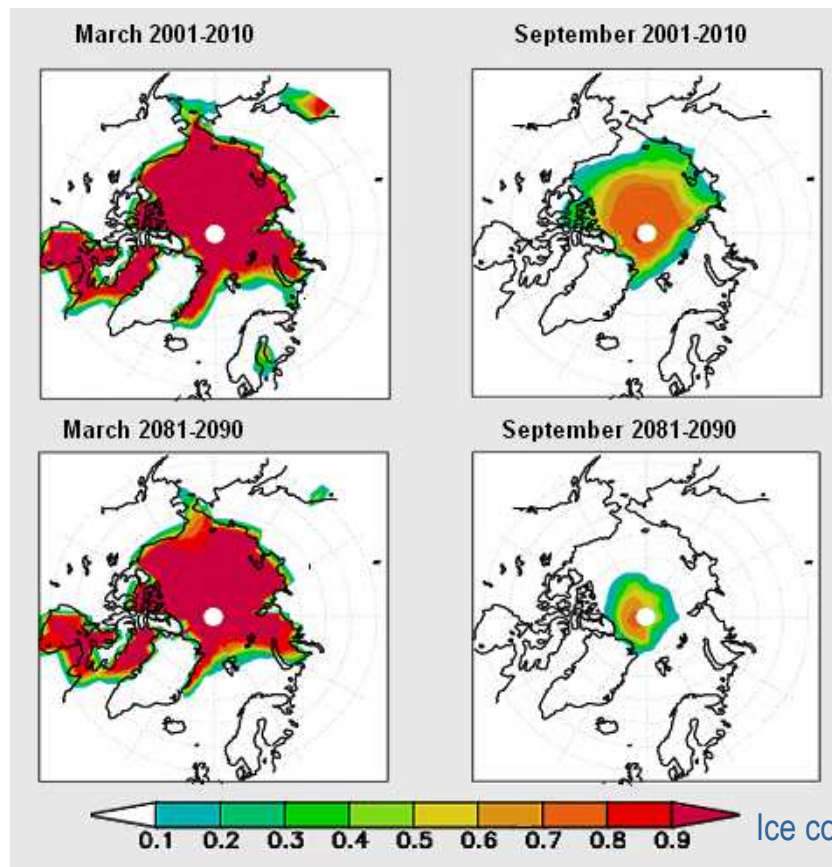
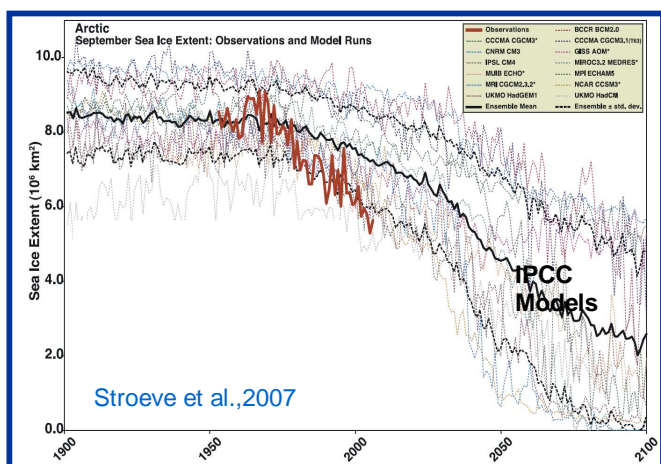
Модель климата (ECHAM 4):
 моделирование изменений
 сплочённости льда при
 удвоении концентрации CO₂
 в атмосфере

Зима

Лето

20%
уменьшение

80%
уменьшение



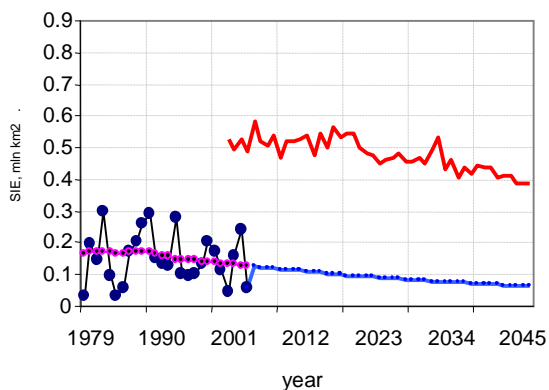
Johannessen et al, 2004



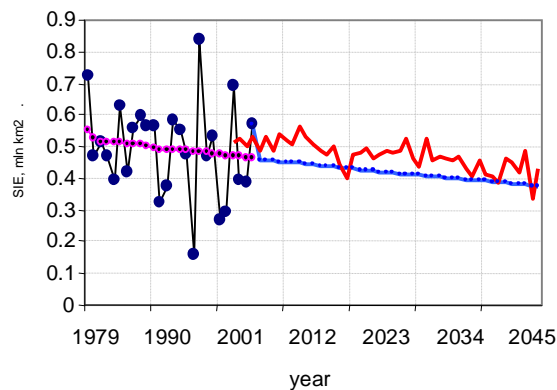
Протяженность льда в сентябре в различных морях в 21-м веке по моделям и экстраполированным данным спутниковых наблюдений



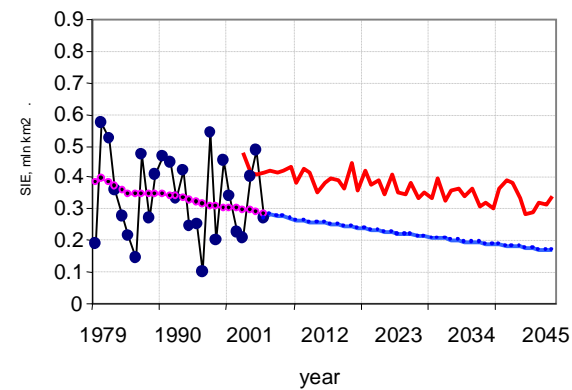
Баренцево



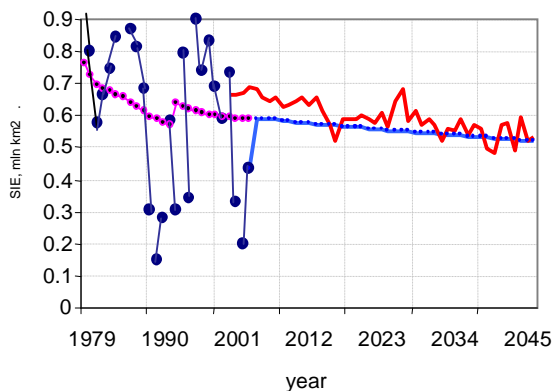
Лаптевых



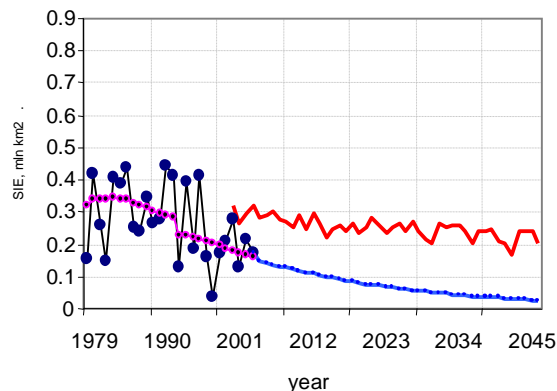
Карское



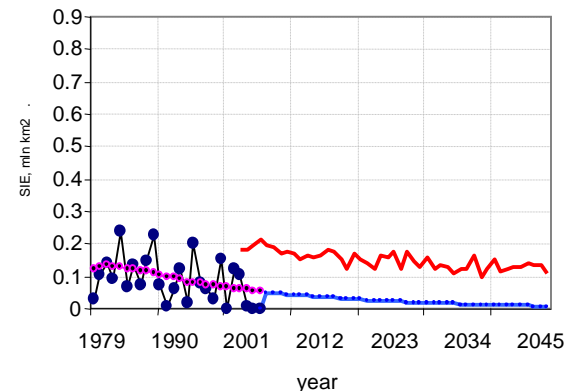
Восточно-Сибирское



Бофорта



Чукотское



- Спутниковые данные
- Экстраполированные данные
- База для экстраполяции
- Среднемодельный прогноз

11 моделей AR4, сценарий A2



Возможные последствия сокращения морского ледяного покрова в Арктике



- Увеличение стока CO² в Северном Ледовитом Океане
- Ослабление формирования глубинных вод за счёт увеличения притока пресной воды с потенциальным ослаблением Гольфстрима в северной Атлантике
- Изменения в биоразнообразии и рыбных запасах
- Негативное воздействие на широкий круг арктических диких животных, включая белого медведя, который зависит ото льда, как платформы для ОХОТЫ
- Более лёгкая ледовая обстановка для транспорта
- Более лёгкая ледовая обстановка для разведки и добычи нефти и газа на шельфе арктических морей
- Интенсификация активности в Арктике, ужесточение международной конкуренции, обострение политических вопросов



Благодарю за внимание!



Andy Armstrong/National Oceanic and Atmospheric Administration