



Изменение ледовых условий в Арктике согласно спутниковым наблюдениям

Е.Шалина, Л.Бобылёв

Центр по окружающей среде и дистанционному зондированию им.
Нансена

Санкт-Петербургский государственный университет,
Институт наук о Земле

Пятнадцатая Всероссийская конференция “Современные проблемы
дистанционного зондирования Земли из космоса”, 13-16 ноября 2017

Содержание

- Данные
- Сокращение протяжённости / площади ледяного покрова
- Изменение сроков начала таяния и замерзания
- Изменение соотношения возрастных градаций арктических льдов
- Сокращение толщины арктических льдов

Данные

1. Данные пассивного дистанционного зондирования

Измерения микроволновых радиометров

SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer)

октябрь 1978 г. – август 1987 г.

SSM/I (Special Sensor Microwave / Imager)

июль 1987 г. - ... не рекомендовано использовать данные,
полученные после августа 2006 г.

SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder)

октябрь 2003 – по настоящее время

SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity), с ноября 2009 г.

Данные

2. Данные активного дистанционного зондирования

Измерения альтиметров

ICESat / GLAS, лазерный альтиметр

13 января 2003 – февраль 2010

CryoSat / SIRAL, радар-альтиметр

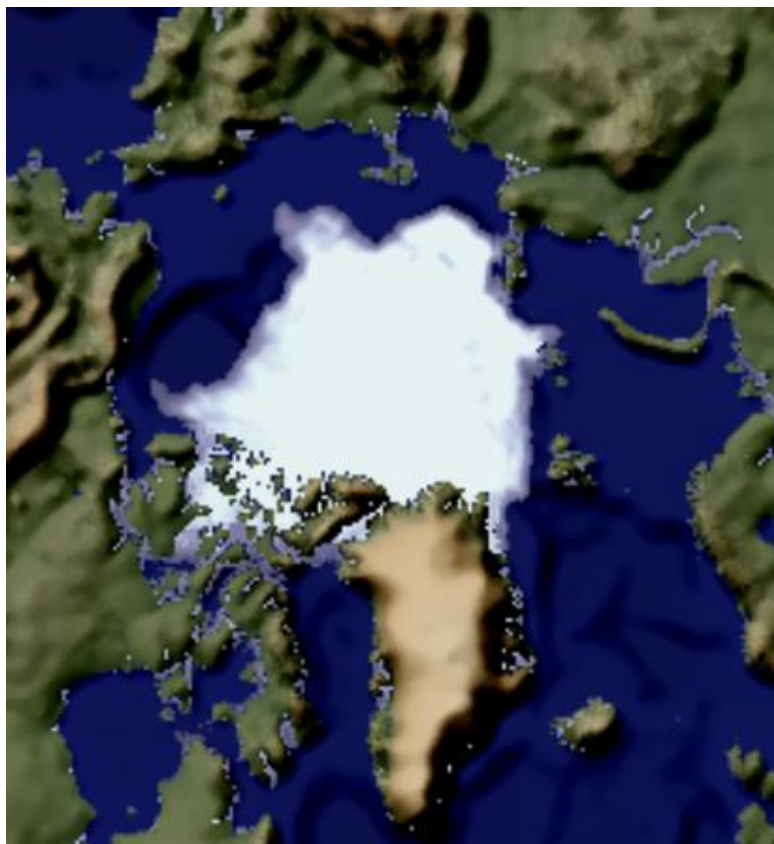
8 апреля 2010 – по настоящее время

Данные скаттерометров

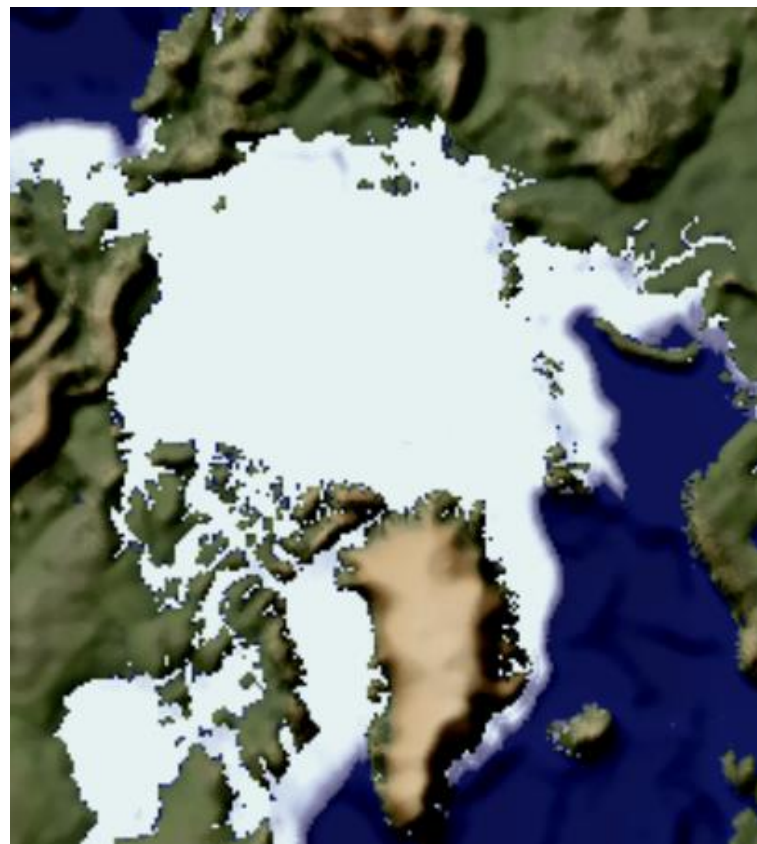
SeaWinds / QuikSCAT, июль 1999 г. – ноябрь 2009 г.

ASCAT / Metop-A, октябрь 2006 г. – по настоящее время

Лёд в Арктике



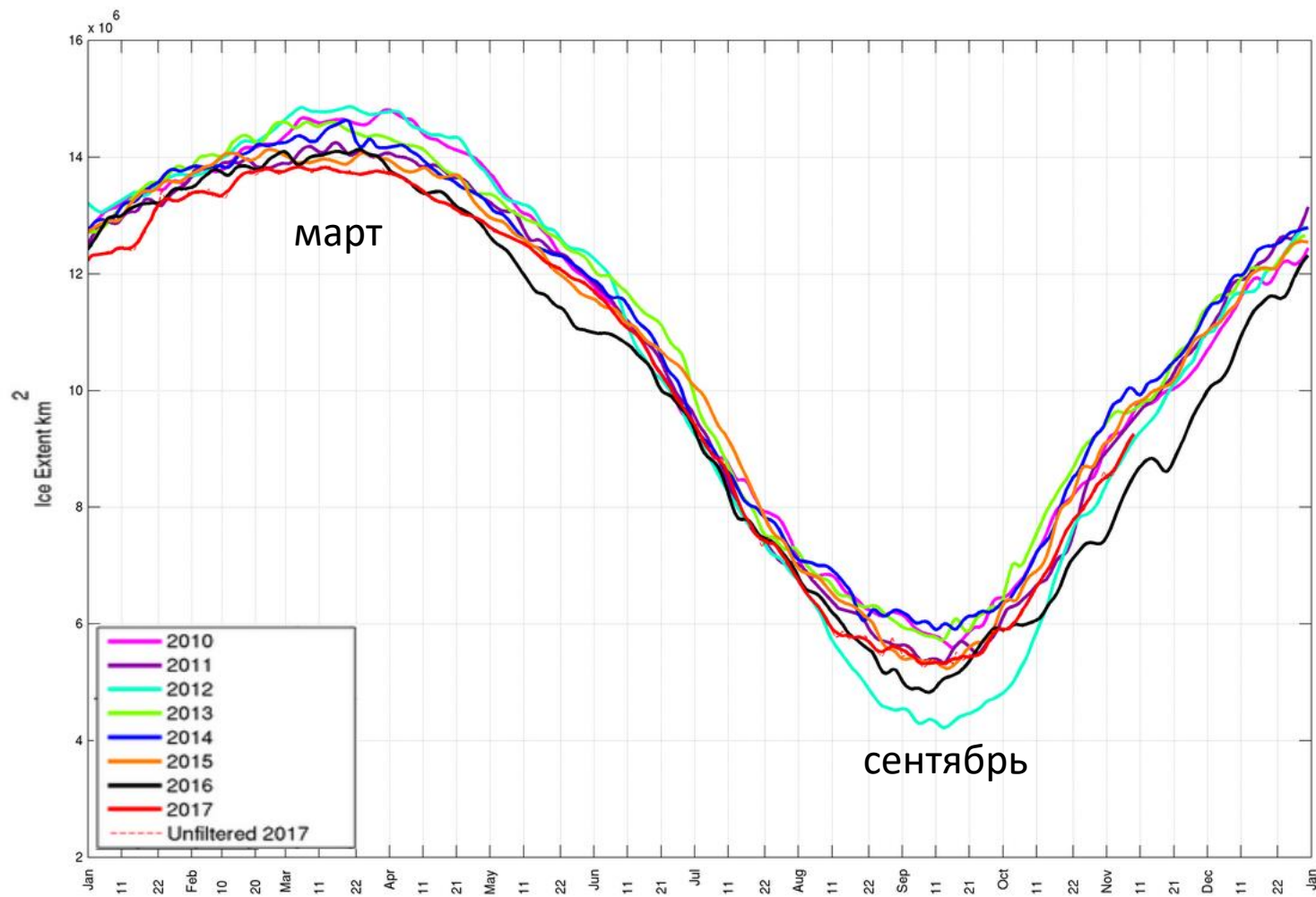
20 сентября 2017



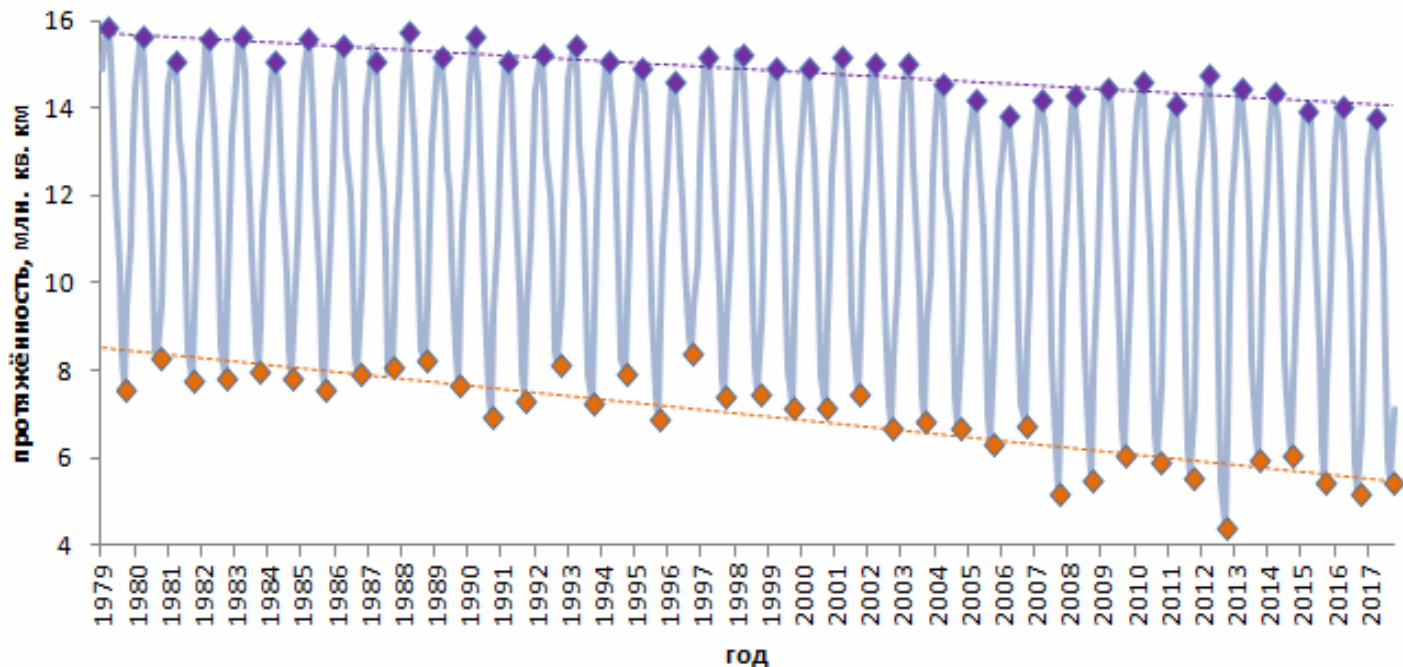
20 марта 2017

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

Лёд в Арктике



Протяжённость / площадь ледяного покрова

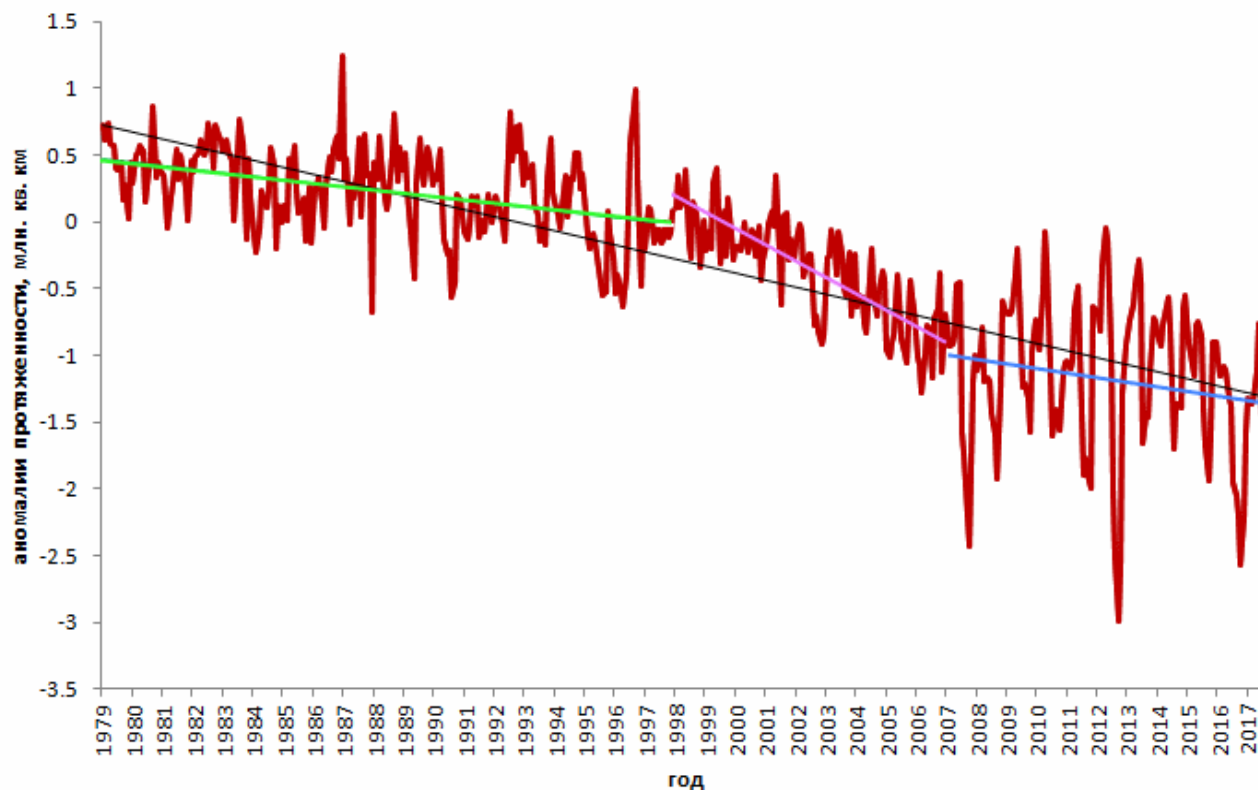


Среднее сокращение: **56 900** км² в год или **4,5%** за декаду (по отношению к среднему за весь период наблюдений).

Март: **-2,9%** за декаду или **-43 400 ± 4 200** км² в год

Сентябрь: **-11,3%** за декаду или **-78 700 ± 7 500** км² в год

Изменчивость площади ледяного покрова



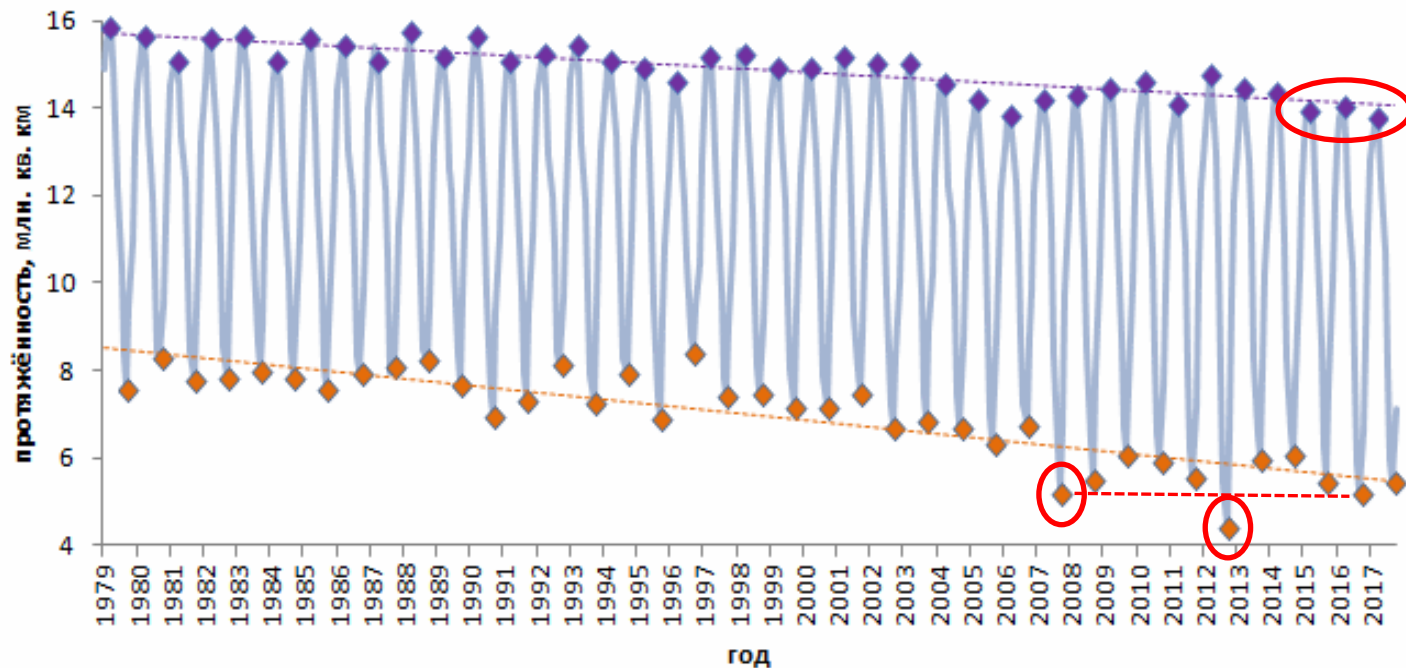
Аномалии (отклонения от средних) протяженности ледяного покрова, с января 1979 г. по октябрь 2017 г.

До конца 1997 г.: **-2,1%** за декаду,

с 1998 по 2006 г. : **-10 %** за декаду (↑ в 4,8 раза),

с 2007 по 2017 г.: примерно **-4 %** за декаду

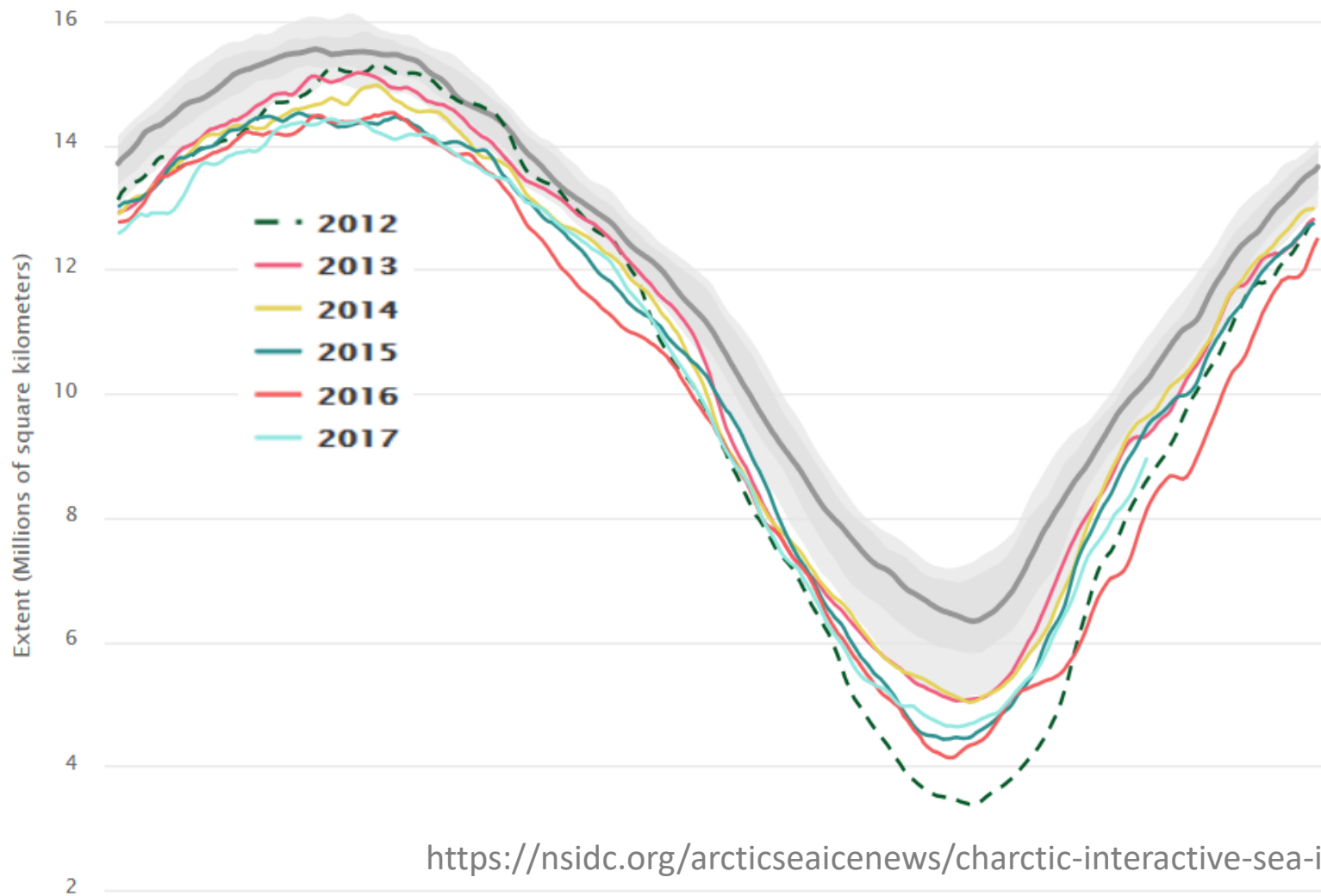
Что происходит с ледяным покровом в последние годы?



Март: -2.9% за декаду или -43400 ± 4200 км² в год

Сентябрь: -11,3% за декаду или -78700 ± 7500 км² в год

Что происходит с ледяным покровом в последние годы?



Что происходит с ледяным покровом в последние годы?

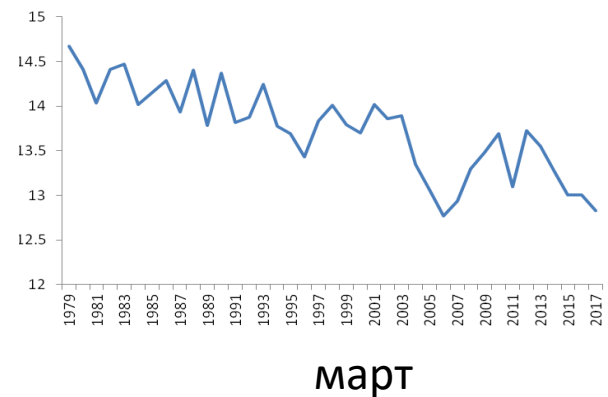
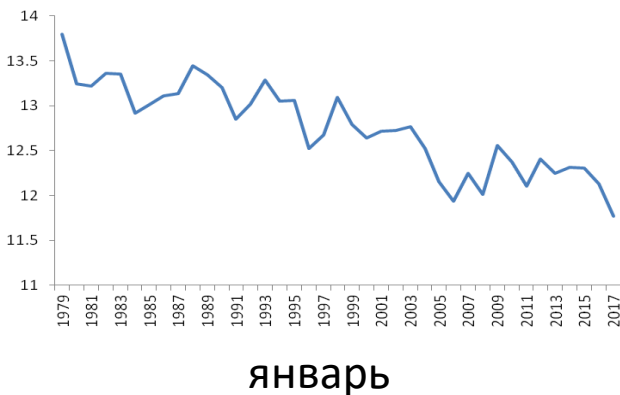
2017 год

За весь период спутниковых наблюдений *среднемесячное* значение площади ледяного покрова Арктики 2017 года было

январь **минимальное**

февраль **минимальное**, примерно совпадает с **минимумом** 2006 г.

март **минимальное**, примерно совпадает с **минимумом** 2006 г.



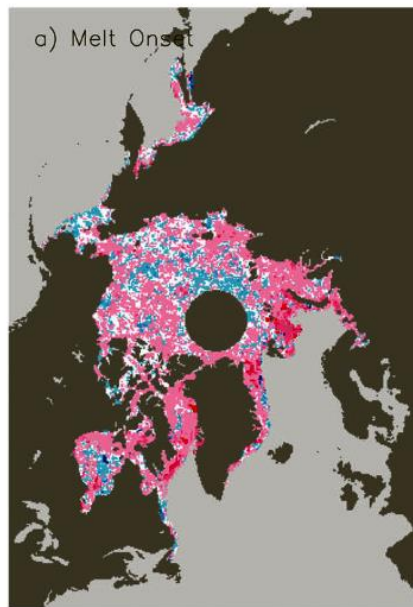
Сокращение площади ледяного покрова имеет следующие последствия

- увеличивается площадь открытой воды, уменьшается альbedo океанической поверхности → увеличивается количество поглощённого солнечного излучения → возникают условия для ускорения таяния льда,
- освобождаются значительные площади ото льда → улучшаются условия для судоходства,
- осложняется жизнь морских животных,
- улучшаются условия для работ на шельфе,
- расширяются возможности туризма в Арктике.

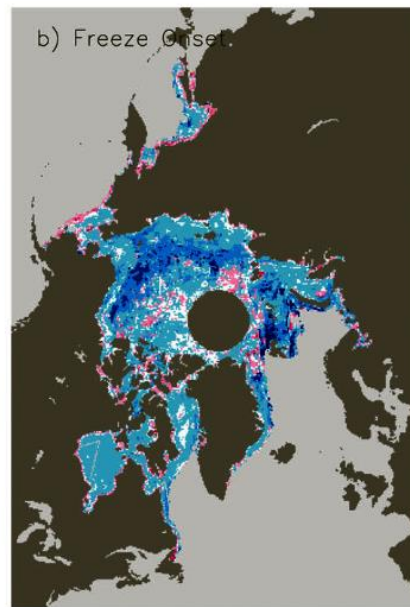
Сокращение площади льдов Арктики является наиболее явным проявлением современного потепления, являясь в то же время одной из главных движущих сил арктического усиления

Изменение сроков начала таяния и замерзания

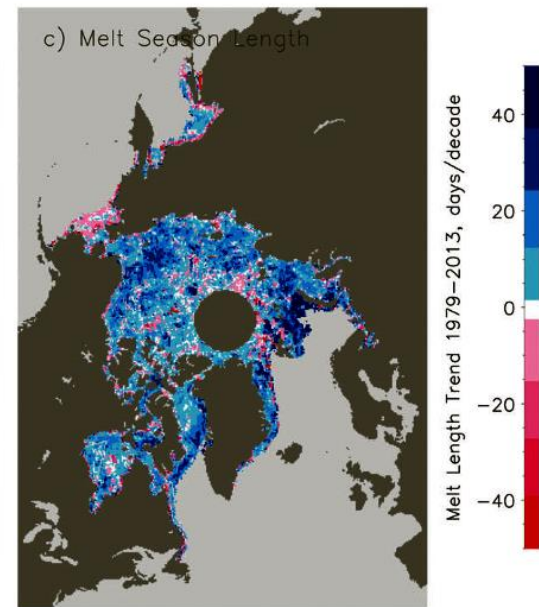
Обработка данных пассивных микроволновых спутниковых наблюдений показала: наблюдается более раннее таяние и более позднее замерзание.



таяние



замерзание



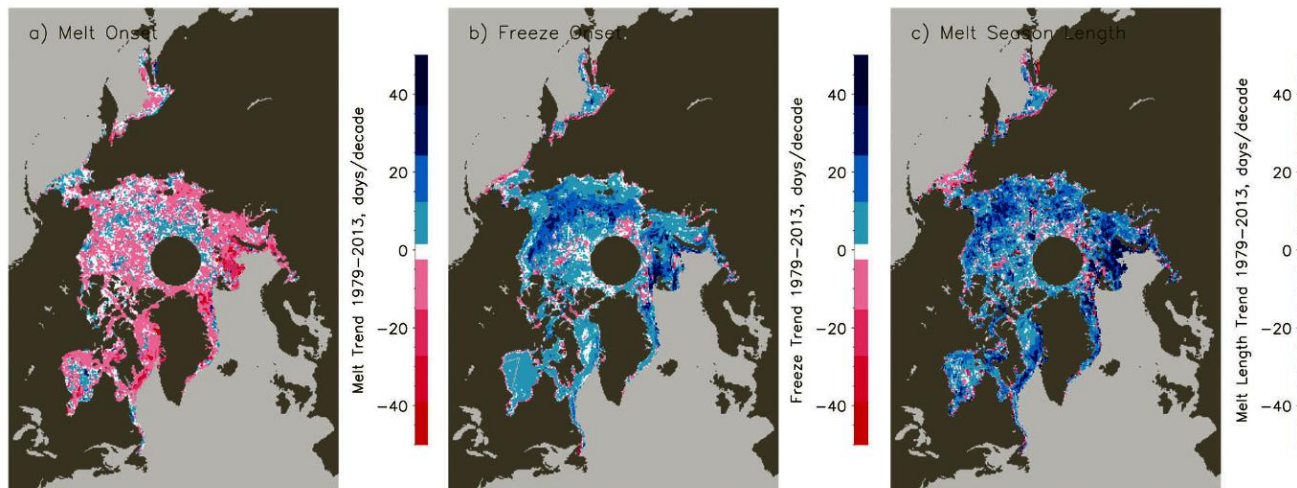
период между таянием и
замерзанием

Изменение сроков начала таяния и замерзания

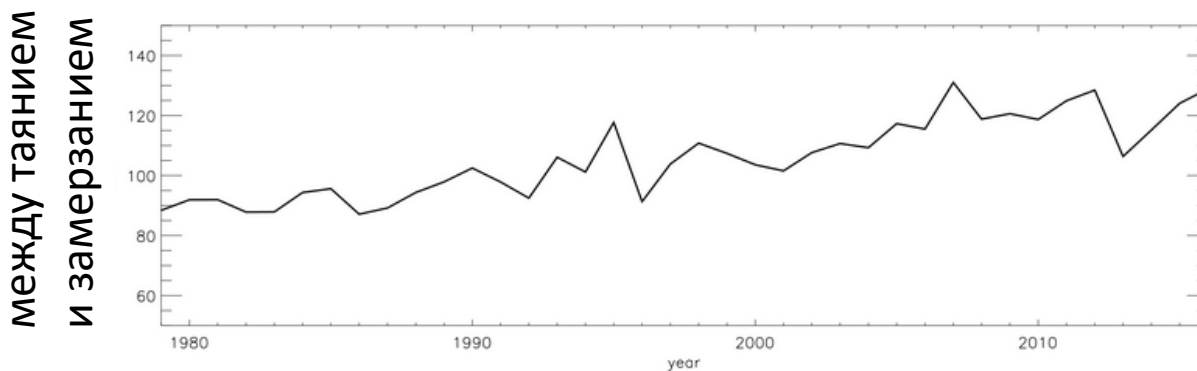
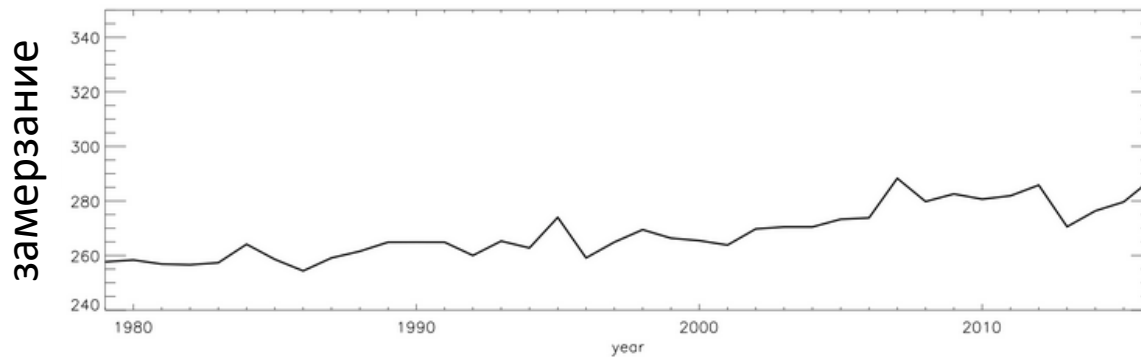
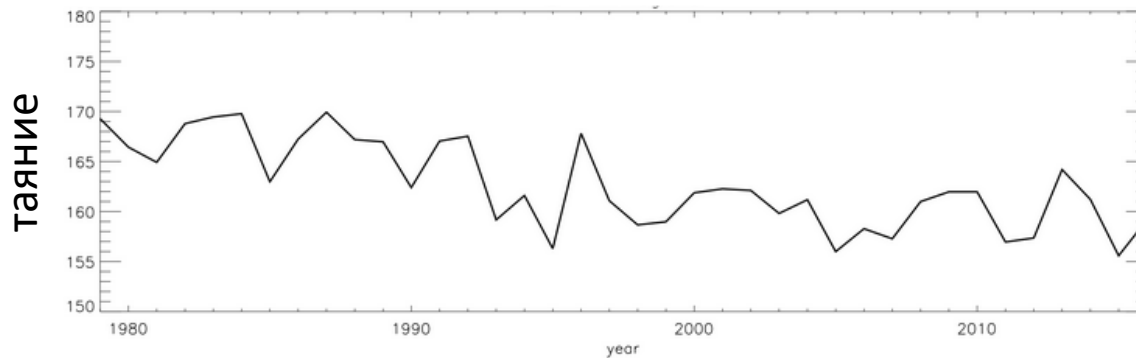
Сезон между началом таяния и началом замерзания удлинился в среднем на **5** дней/декаду (за период спутниковых наблюдений).

Доминирующую роль в удлинении этого сезона играет более позднее замерзание: сроки замерзания сдвинулись на **6-11** дней/декаду в морях Карском, Лаптевых, Восточно-Сибирском, Чукотском и Бофорта.

Тренды, описывающие более раннее таяние меньше, но дополнительный приток тепла, поглощённый океаном, обеспечивает дополнительное повышение температуры поверхностного слоя воды, что усиливает таяние льда в летний сезон и отсрочивает начало замерзания осенью.



Изменение сроков начала таяния и замерзания

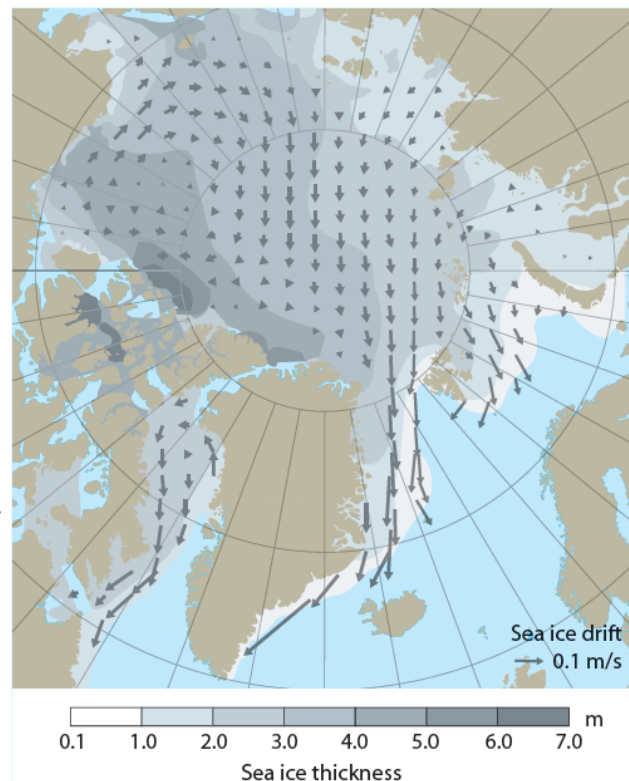


По данным SMMR,
SSM/I, SSMIS.
1979 – 2016 гг.

Возраст и толщина арктических льдов

Распределение льдов по **возрасту** и **толщине** в значительной степени обусловлено особенностями их **дрейфа**, а именно антициклоническим дрейфом льдов в районе моря Бофорта и Трансарктическим дрейфом.

Льды, вовлеченные в антициклонический круговорот, могут находиться в нем достаточно долго, вследствие чего частная сплоченность многолетних льдов в приполюсном и канадско-гренландском районах наибольшая. Толщина дрейфующего льда формируется в результате термодинамических процессов, а также в результате торошения, при взаимодействии льдин друг с другом. Многолетний лёд (просуществовавший два и более годовых циклов нарастания и таяния) имеет наибольшую толщину.

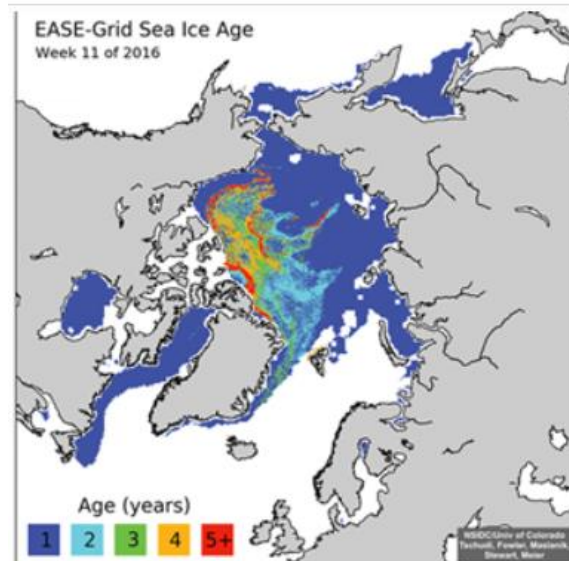
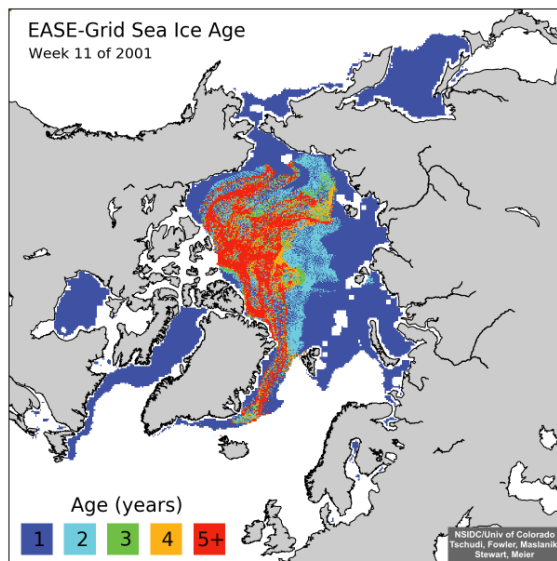
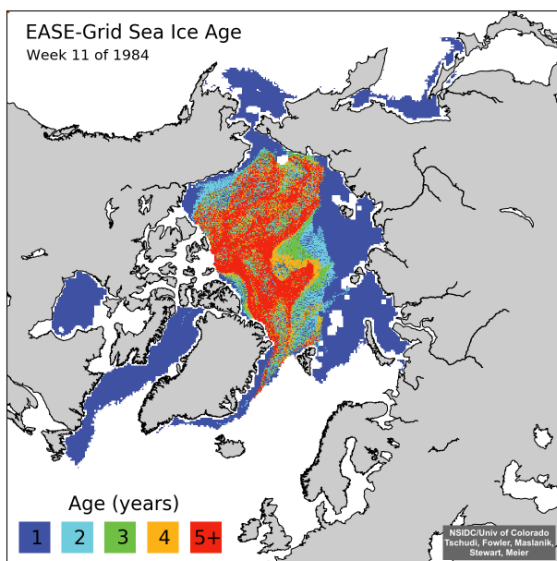


Возраст арктических льдов

Мониторинг возраста льда, а также изменений в соотношении классов льда, определяемых возрастом, можно вести, используя расчёты по модели, отслеживающей появление льда, его движение и исчезновение (Fowler et al, 2004) **на основе спутниковых измерений.**

Расчёты позволили получить набор недельных карт возраста льда для градаций возраста от 5-ти лет и меньше за время спутниковых наблюдений.

https://daacdata.apps.nsidc.org/pub/DATASETS/nsidc0611_seaice_age_v3/

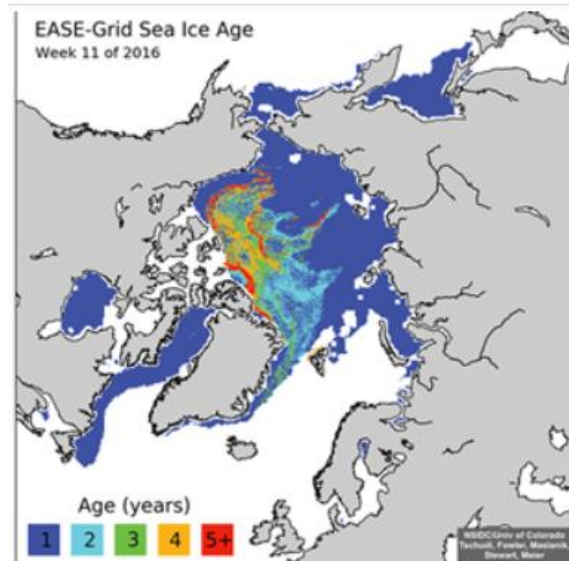
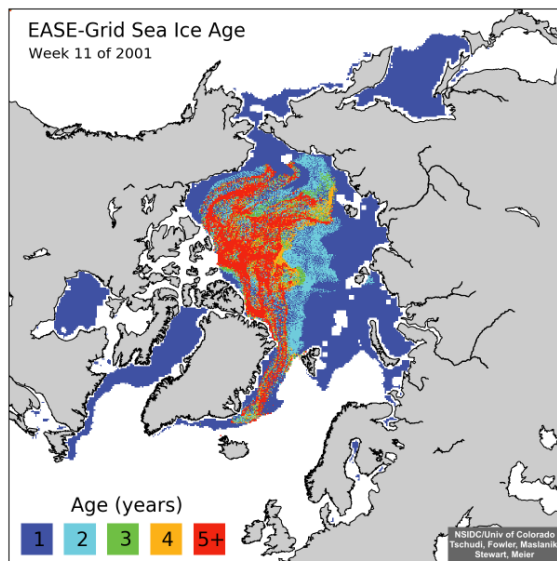
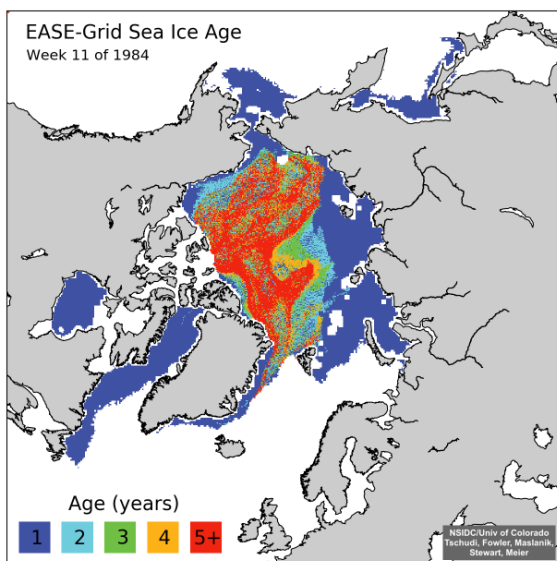


Возраст арктических льдов

Количество **многолетнего льда** в Арктике **существенно сократилось** за период спутниковых наблюдений.

Оценки процентного соотношения старых льдов (старше 5-ти лет) и остальных возрастных групп на момент максимального распространения льдов (в марте) показывают, что в **1984 г. 16%** площади ледяного покрова занимали старые льды, а к **2016 г.** их площадь сократилась до **1,2%**.

Однолетний лёд стал **доминирующей возрастной категорией (78% в марте 2016 г.)**.

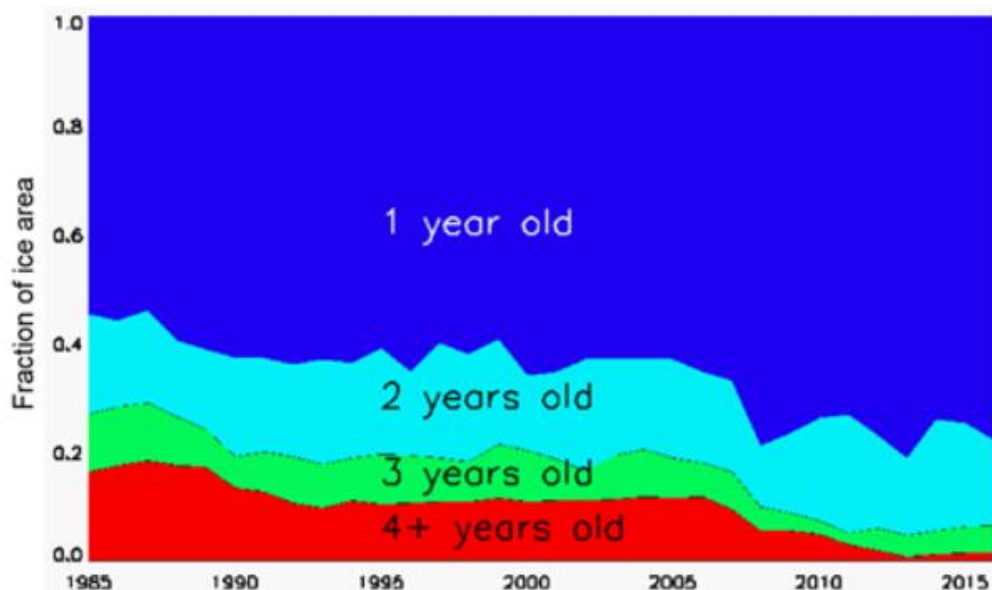


Возраст арктических льдов

Количество **многолетнего** льда в Арктике **существенно сократилось** за период спутниковых наблюдений.

Оценки процентного соотношения старых льдов (старше 4-х лет) и остальных возрастных групп на момент максимального распространения льдов (в марте) показывают, что в **1984 г. 16%** площади ледяного покрова занимали старые льды, а к **2016 г.** их площадь сократилась до **1,2%**.

Однолетний лёд стал **доминирующей** возрастной категорией (**78%** в марте 2016 г.).

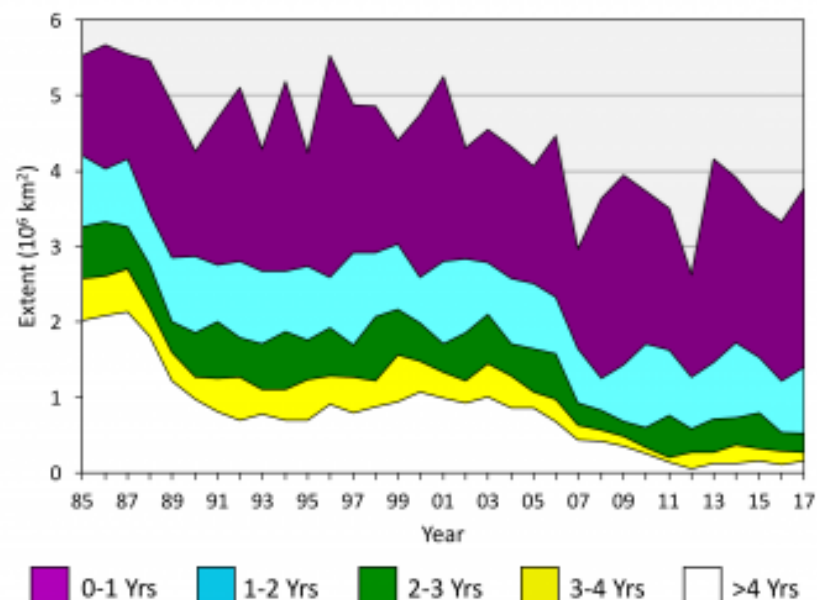
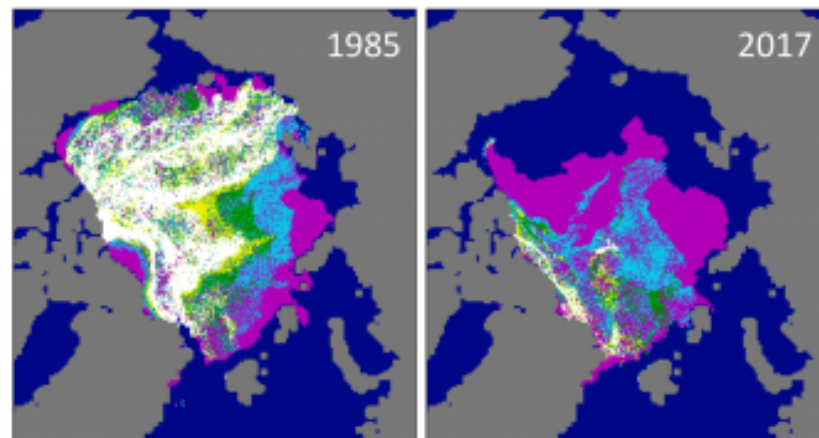


Возраст арктических льдов

Анализ возрастных соотношений на момент минимального ледяного покрытия в 2017 году.

- Небольшое нарастание однолетних и двулетних льдов;
- Более старые фракции – без изменения;
- Старые льды (старше 4-х лет) занимают в 2017 году площадь чуть более 150 000 км², а в середине 1980-х они занимали около 2 млн. км².

Возраст льда

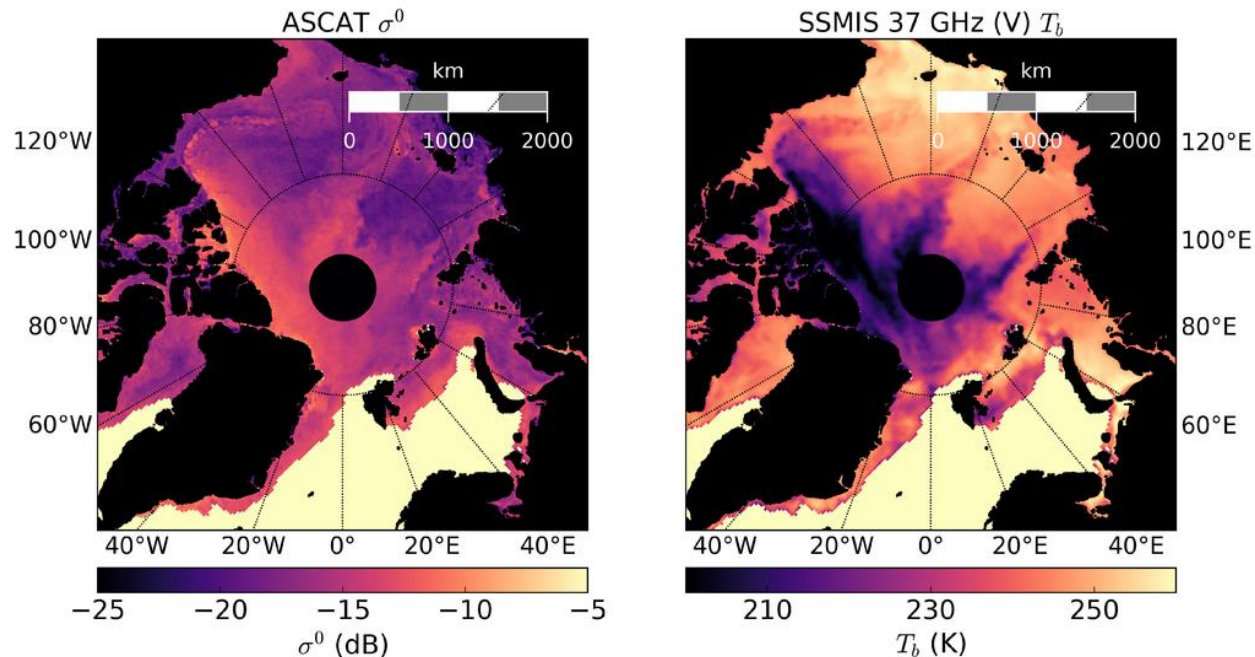


Возраст арктических льдов

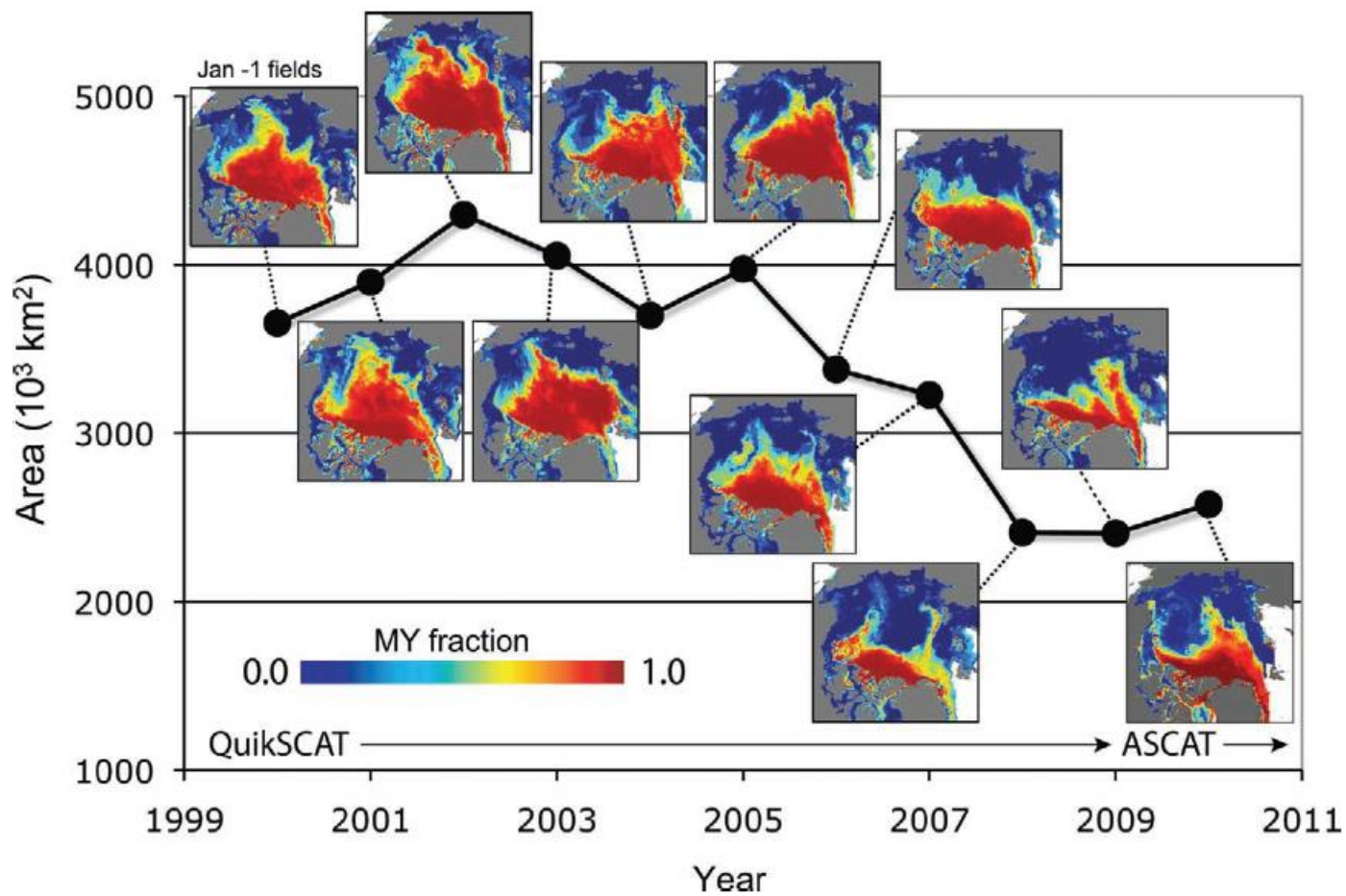
Другие способы получения данных о возрасте льда (правда, только разделение на две градации: однолетний/многолетний) – это

- обработка микроволновых спутниковых данных пассивного дистанционного зондирования с помощью алгоритмов, использующих различия в излучательной способности однолетних и многолетних льдов;
- обработка данных скаттерметров;
- совместная обработка упомянутых данных.

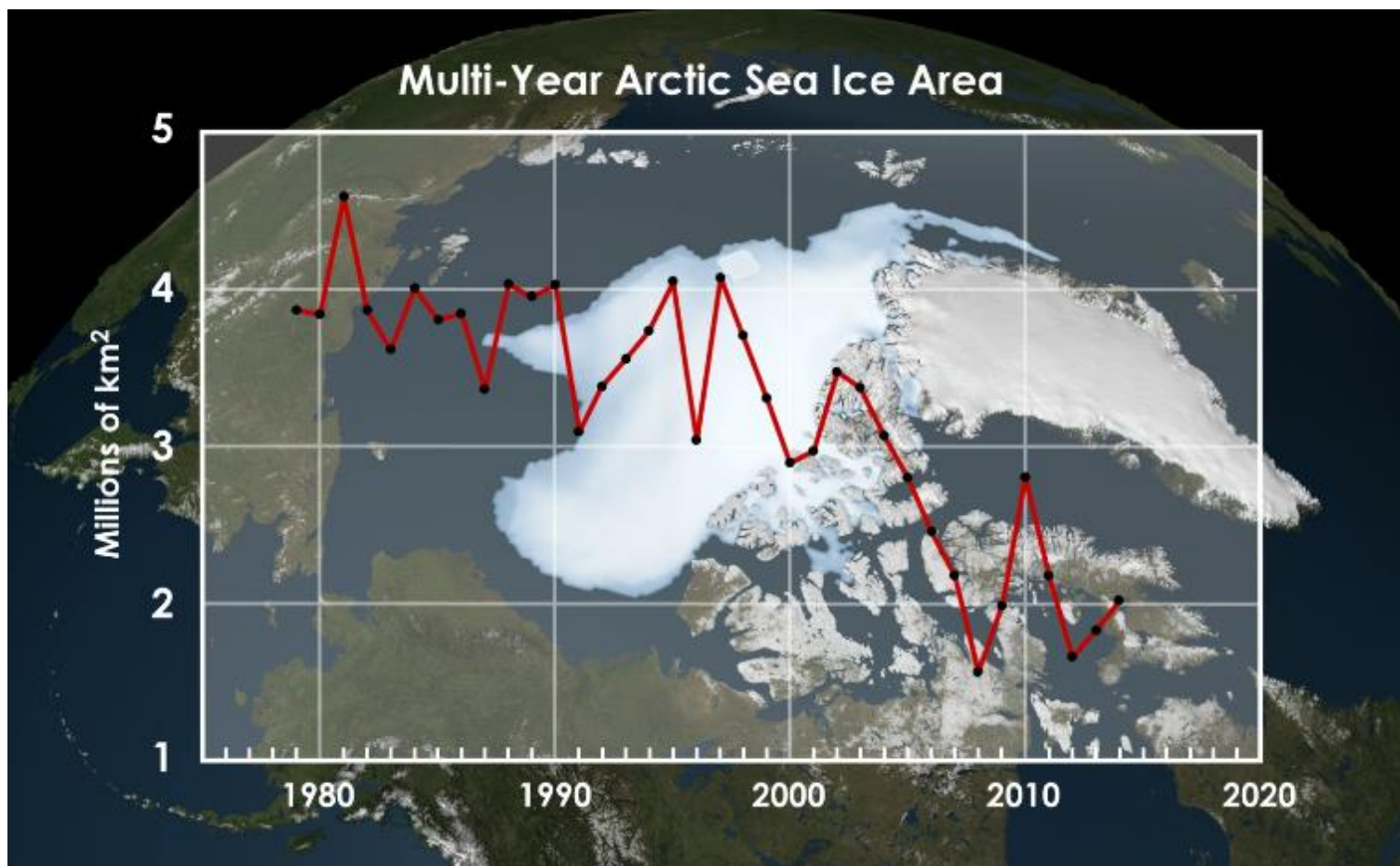
На рисунке показаны данные скаттерметра ASCAT и радиометра SSMIS, 3.03.2011.



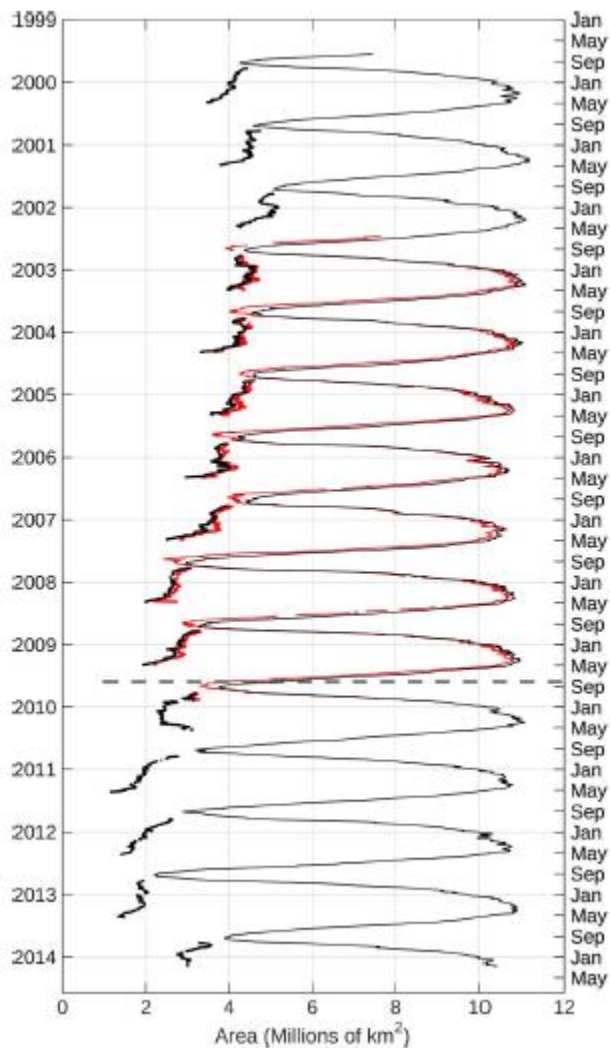
Возраст арктических льдов



Возраст арктических льдов

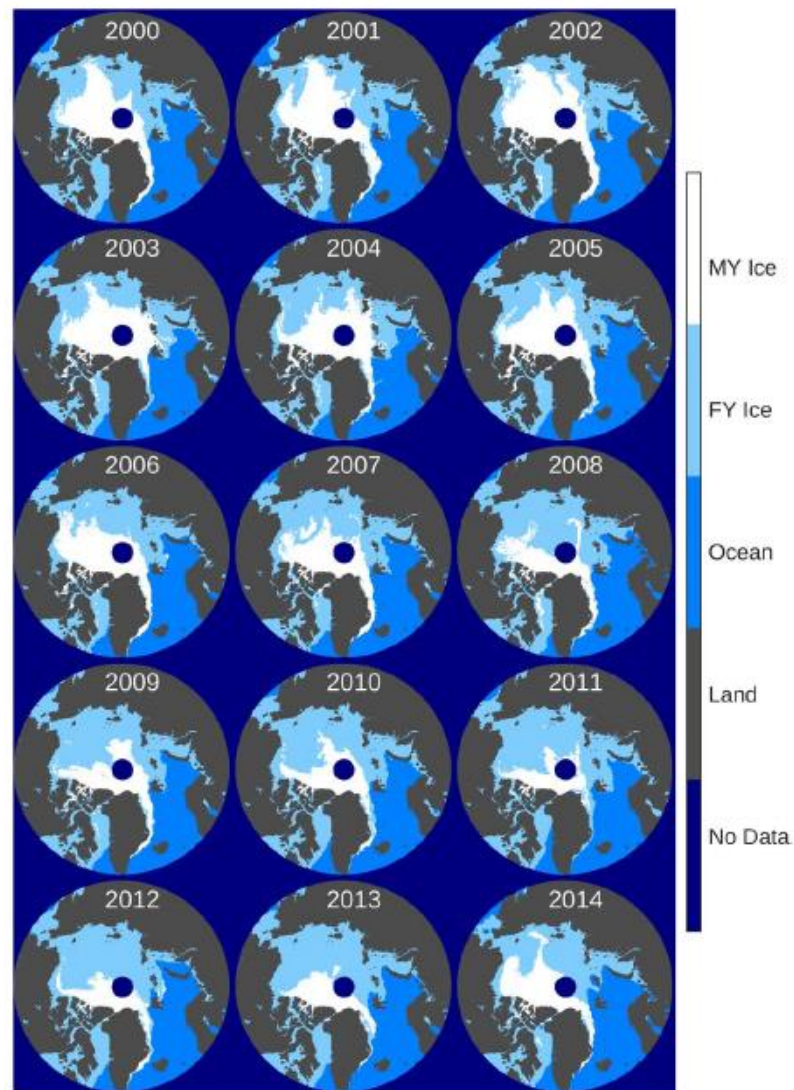


Возраст арктических льдов

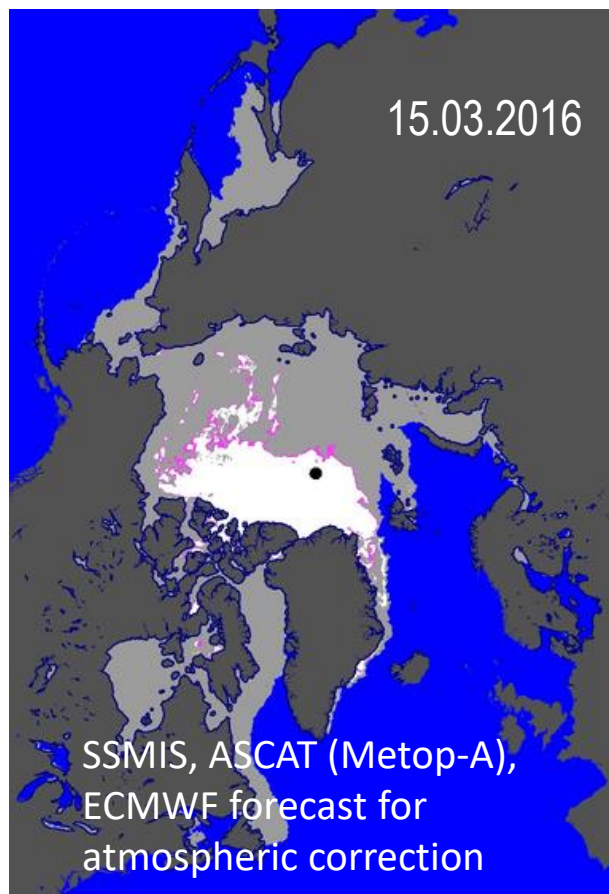


Результаты совместной обработки данных SSMI/SSMIS и скаттерометров OSCAT (Индия) и SeaWinds/QuikScat. Карты соответствуют распределению однолетних и многолетних льдов на середину марта.

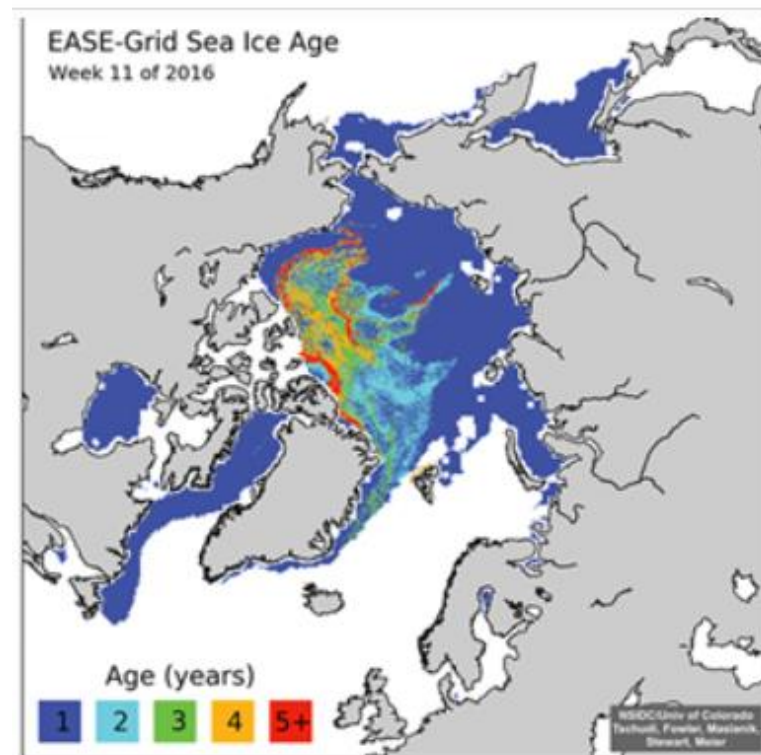
Lindell, Long, 2016



Возраст арктических льдов



OSI SAF: Ocean and Sea Ice Satellite
Application Facilities, <http://osisaf.met.no>



NSIDC, [nsidc0611_seaice_age_v3](#)

Толщина арктических льдов

Спутниковые измерения толщины льда включают на данный момент данные **лидара-альтиметра** на спутнике **ICESat**, который проводил измерения с 2003 г. по 2009 г., данные **радара-альтиметра** на спутнике **CryoSat-2** (запущен в 2010 г.), а также данные со спутника SMOS (запущен в 2010 г., данные используются только для определения толщины *тонкого* льда).

Получить более полную картину изменения толщины льда, в частности за более длительный период наблюдений позволяют другие данные:

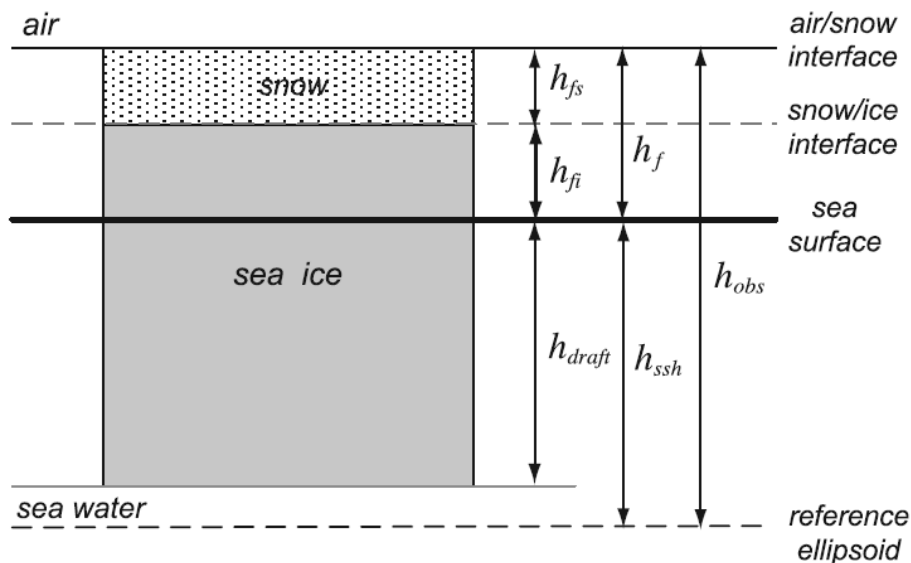
- Измерения, проводившиеся на подводных лодках,
- Электромагнитные измерения с самолётов,
- Измерения, проводимые на буях и помощью сонаров,
- Измерения, проводимые в рамках кампании IceBridge,
- Данные бурения в рамках различных специализированных экспедиций.

Перечисленные данные также используются для построения алгоритмов обработки спутниковых данных и для верификации результатов спутниковых измерений.

Толщина арктических льдов

По данным альтиметров:

Толщина льда оценивается по измеренному возвышению.

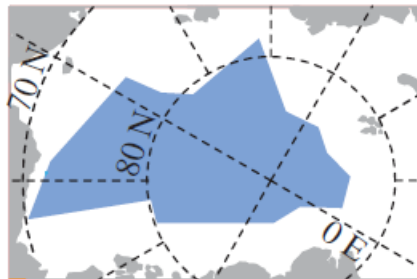


По данным SMOS:

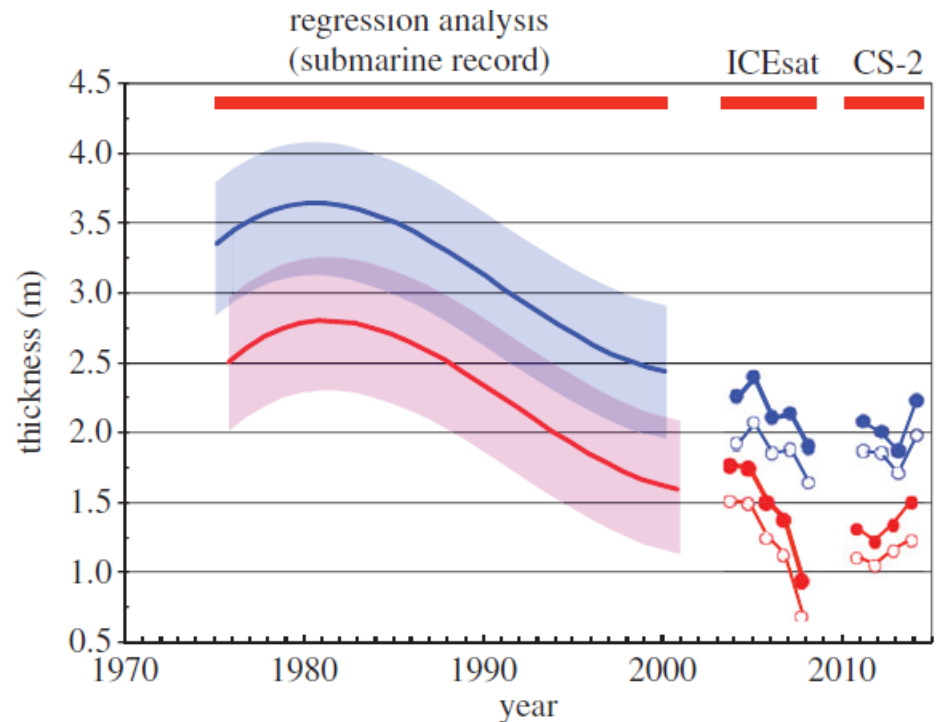
Толщина льда оценивается по измеренной яркостной температуре с использованием эмпирических формул, связывающих её с солёностью, температурой и излучательной способностью льда.

Толщина арктических льдов

Kwok &
Cunningham,
Phil. Trans. R. Soc.
2015



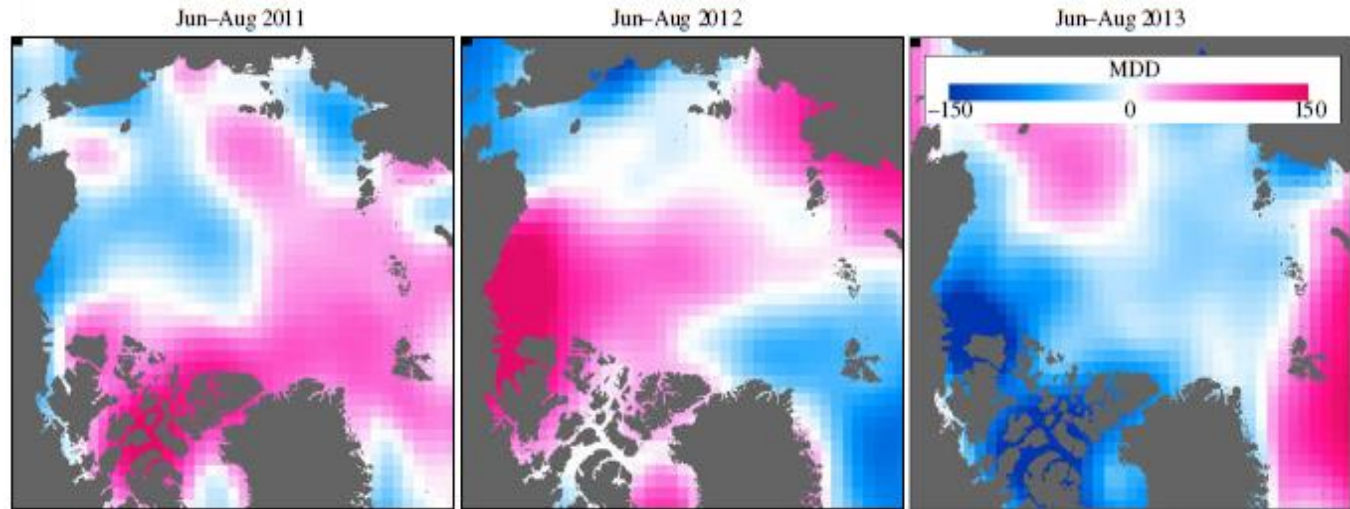
- Feb–Mar ($1\rho_i$)
- Feb–Mar ($2\rho_i$)
- Oct–Nov ($1\rho_i$)
- Oct–Nov ($2\rho_i$)
- Feb–Mar (RA)
- Oct–Nov (RA)



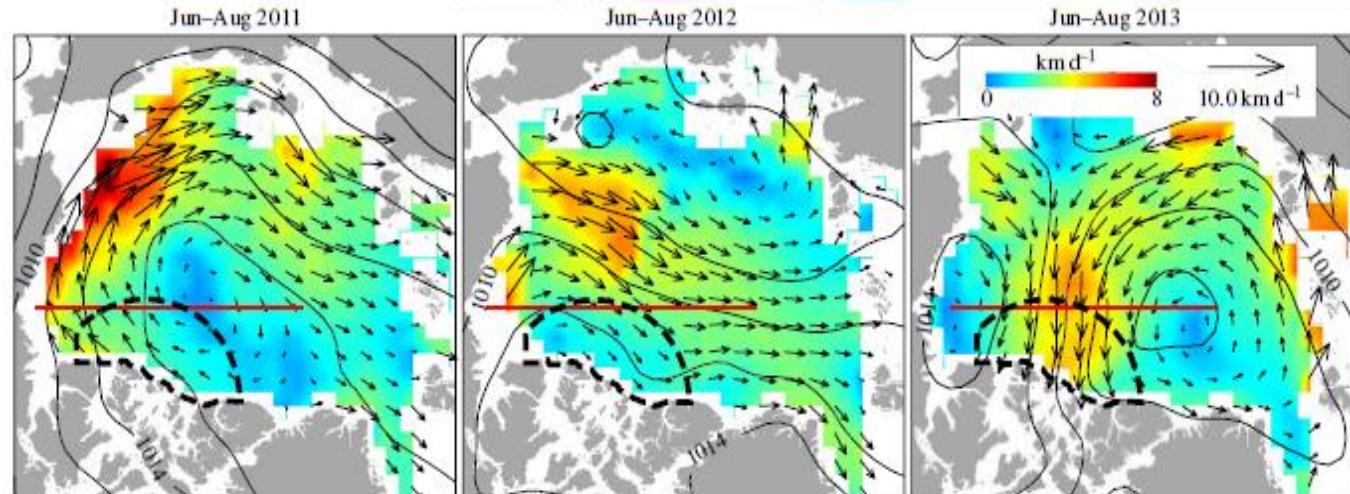
Изменение толщины арктических льдов **по данным альтиметров** со спутников **ICESat** и **CryoSat**, сопоставленное с измерениями, проведёнными **с подводных лодок** в предыдущие годы. Объединение рядов данных проведено для области, показанной слева, для которой существует обширный набор данных, полученных с подводных лодок. Красные линии показывают толщину в октябре-ноябре, синие – в феврале-марте.

Ситуация летом 2013 г., сравнение с 2011 и 2012 гг.

градусо-дни с
отрицательными
температурами,
аномалии

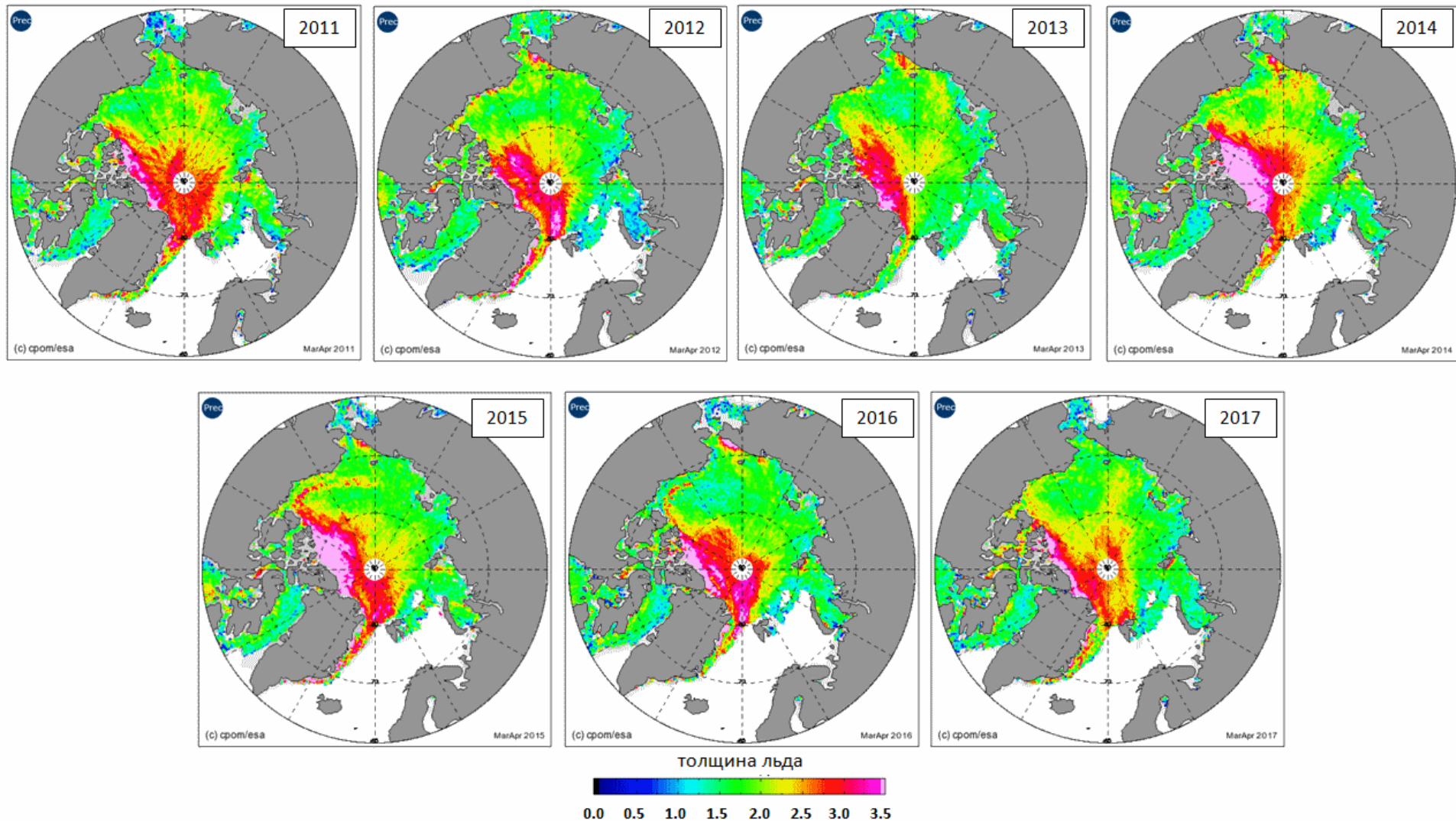


карты
дрейфа льда



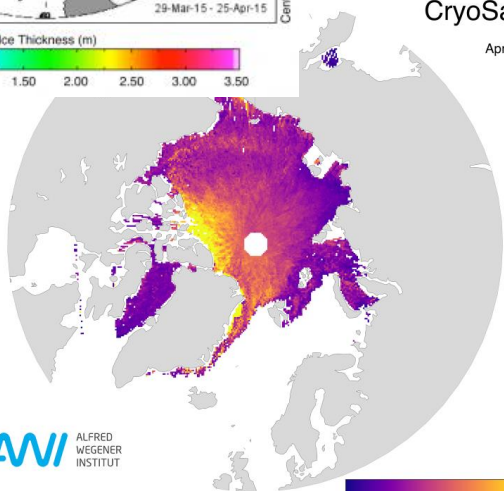
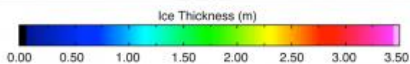
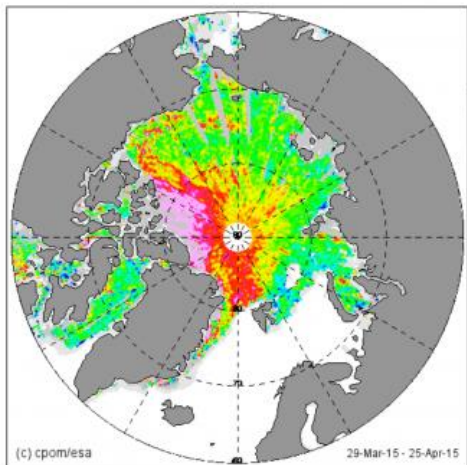
Холодное лето + аномально интенсивная адвекция льда в Канадские воды.

Толщина арктических льдов, измерения CryoSat, <http://www.crom.ucl.ac.uk>



Толщина арктических льдов

Arctic Sea Ice Thickness

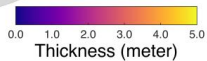


CryoSat-2

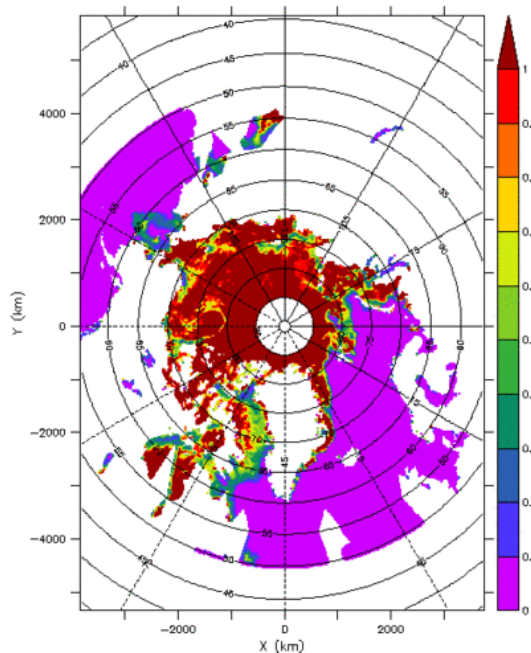
April 2015



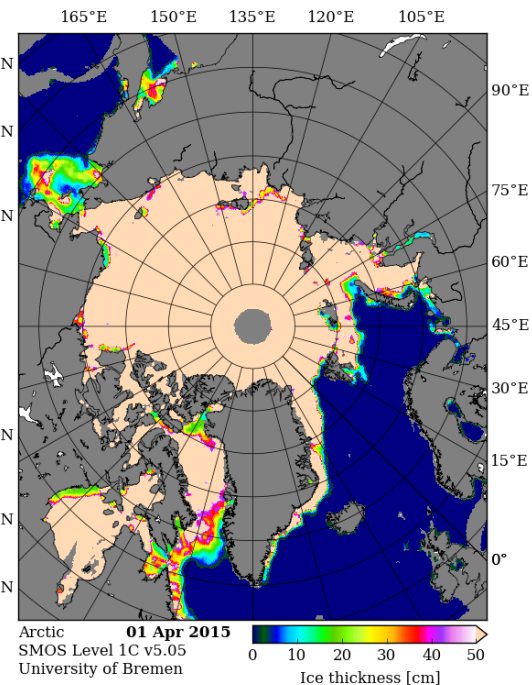
meereisportal.de
seaisportal.de



LAS 7+, ICDC Klimacampus Hamburg 29-Apr-15 10:57:00
DOOS URL: <http://tdc.smov.de/thredds/fileServer/>
TIME: 01-APR-2015 12:00 DATA SET: smos_icethickness_2015



SMOS sea ice thickness (m)



глобальные данные

тонкий лёд (< 1 м)

Сокращение толщины ледяного покрова имеет следующие последствия

Сокращение толщины ледяного покрова запускает второй процесс, вносящий вклад в арктическое усиление и связанный с параметрами ледяного покрова, - это ослабление теплоизоляционной способности льда в осенне-зимний период. Лёд, становясь тоньше, слабее изолирует более тёплые воды океана от холодной атмосферы, способствуя повышению температуры воздуха и далее увеличению концентрации водяного пара и облачности, что, в свою очередь, ведёт к увеличению приходящего на поверхность длинноволнового излучения и способствует замедлению нарастания толщины льда.

Заключение

- Протяжённость / площадь арктических льдов сокращается. Наибольшая скорость сокращения наблюдается в сентябре, в конце сезона таяния. В последние годы увеличилась изменчивость протяжённости ледяного покрова.
- Удлинился период между началом таяния и началом замерзания, в основном – за счёт более позднего замерзания.
- Однолетний лёд стал доминирующим в Арктическом бассейне. Площадь наиболее старых льдов (старше 5-ти лет) сократилась с 16% до 1,2% (на момент максимального распространения ледяного покрова).
- Толщина льдов (а также объём) сокращается.

Финансовая поддержка

Работа выполнена в рамках проекта «Суда и волны в полярных регионах», являющегося частью Федеральной Целевой Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы», Соглашение № 14.618.21.0005 от 18 ноября 2015 г.
Уникальный идентификатор проекта: RFMEFI61815X0005.