



Опасные явления в Арктике

Репина И.А.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова

Основные проблемы климатических исследований в Арктике

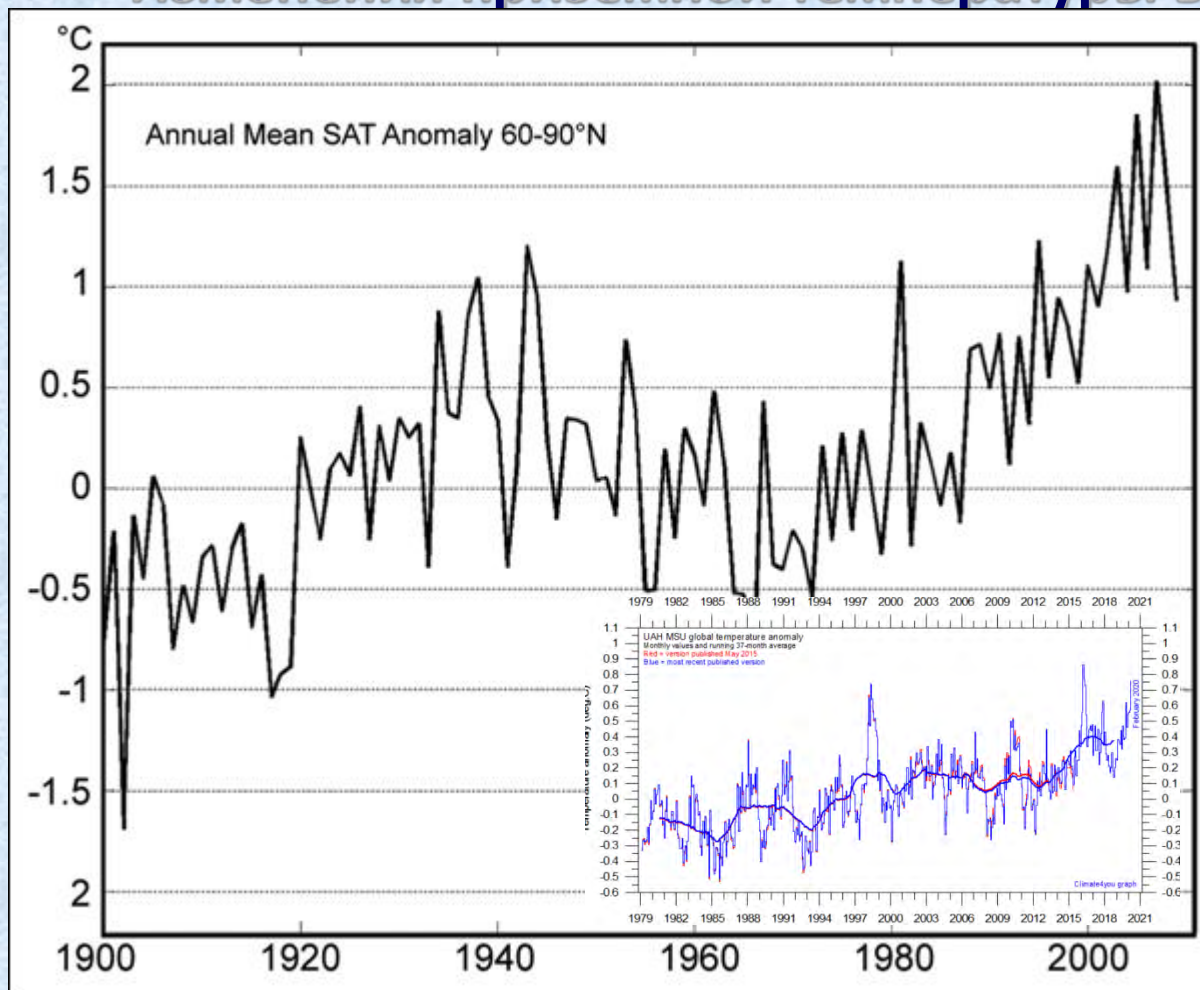
- Полярное усиление (потепление в Арктике происходит быстрее, чем где-либо на планете)
- Уменьшение площади ледяного покрова
- Влияние изменений, происходящих в Арктике, на климат северного полушария
- Использование Северного морского пути
- Экологические проблемы (загрязнение льда, метановая проблема)



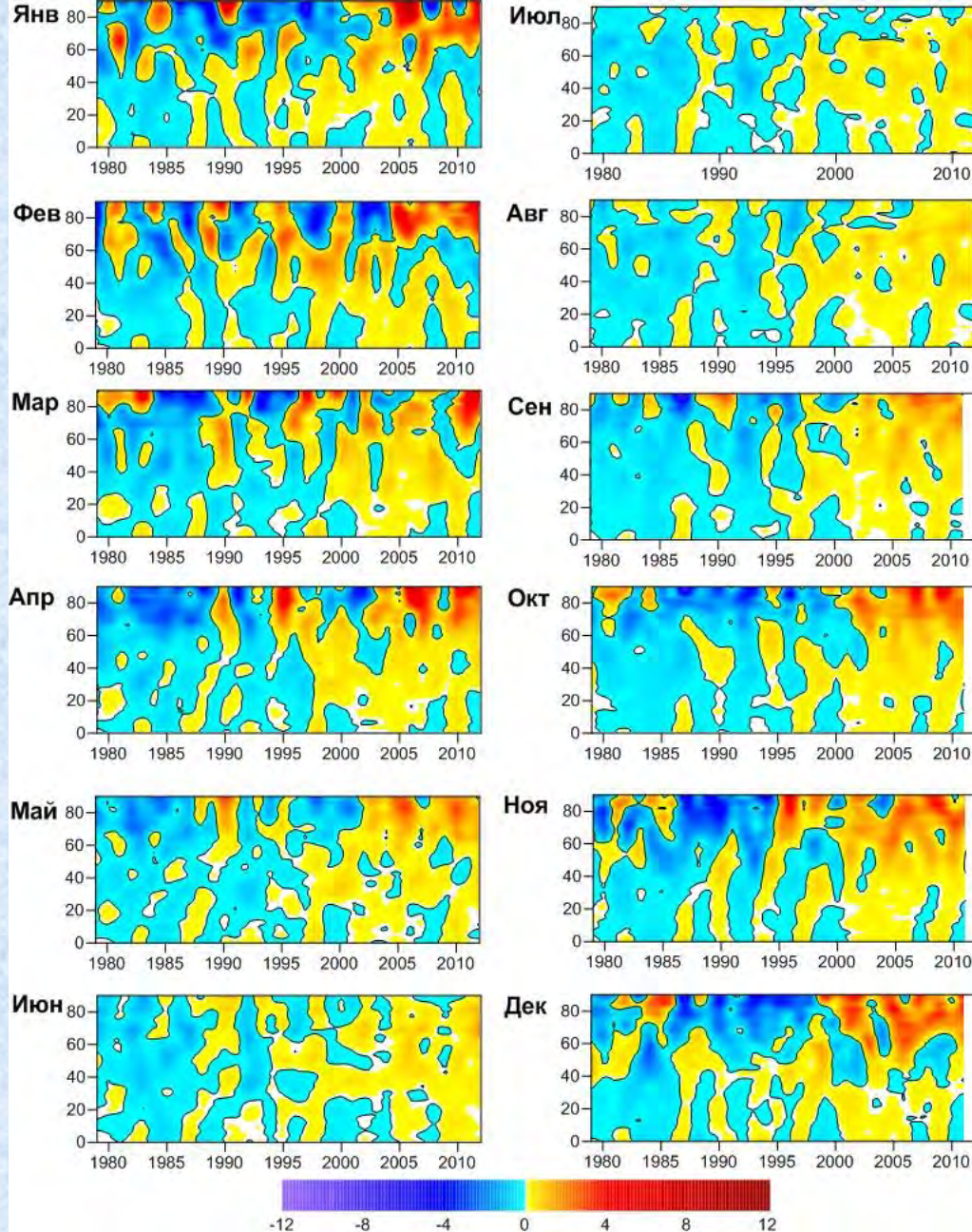
Мотивация

- ❖ Прибрежная зона арктических морей становится объектом приоритетного внимания в связи с необходимостью создания промышленной инфраструктуры для добычи, хранения и транспортировки полезных ископаемых, прежде всего углеводородов.
- ❖ Климатические изменения в Арктике являются наиболее значительными на планете.
- ❖ Но уменьшение ледяного покрова арктических морей не только открывает новые возможности, в частности, повысить эффективность навигации по Северному морскому пути, но и создает новые проблемы.
- ❖ Экстремальные штормовые явления и сильные циклоны могут оказать значительное влияние на инфраструктуру, сельское хозяйство, экосистемы и судоходство. Штормы, полярные мезоциклоны и морской лед представляют опасность для судоходства, рыбной ловли и объектов на шельфе морей.
- ❖ В докладе будет рассмотрено изменение штормовой и ветровой активности в арктическом регионе в связи с современными климатическими изменениями

Изменения приземной температуры воздуха в Арктике



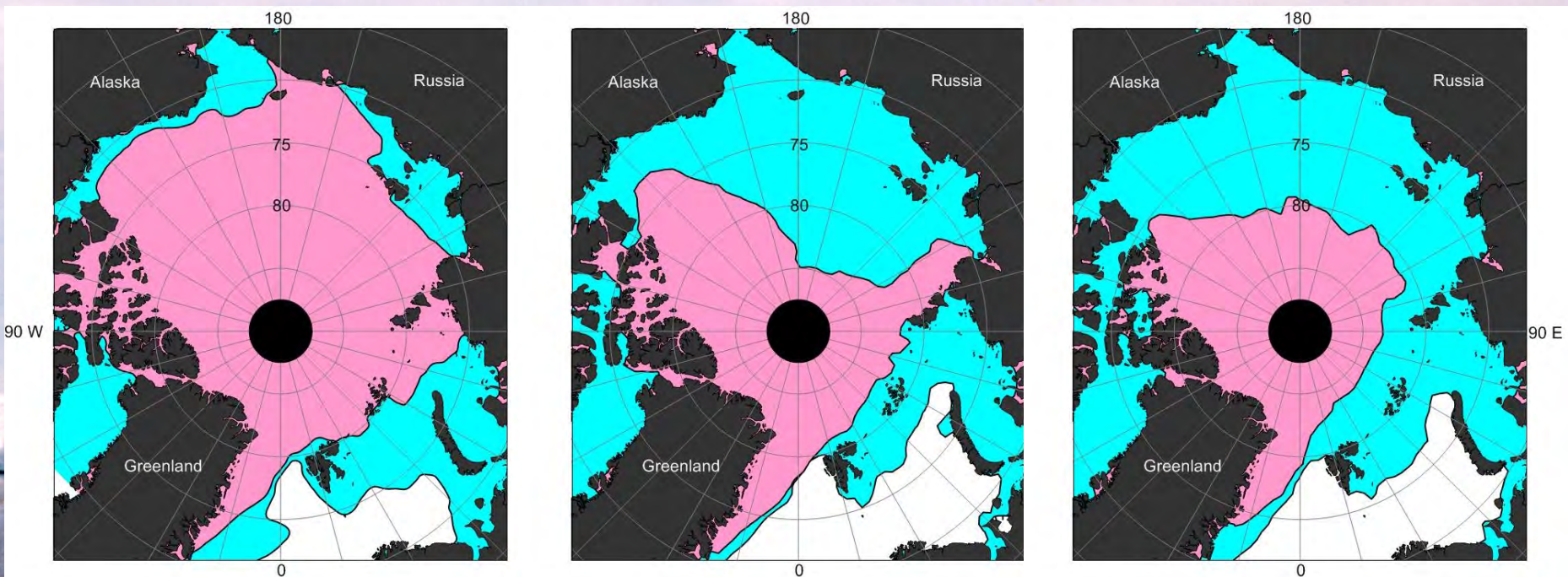
Аномалии среднегодовой приземной температуры воздуха к северу от 60 град. с.ш. относительно средней температуры за период 1961-1990
[www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/]



Более интенсивное (по сравнению с умеренными широтами) повышение приземной температуры воздуха Арктике в 2000-е годы («полярное усиление»)

Временное распределение аномалий приземной температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$), осредненных вдоль широтных кругов северного полушария

Сезонное изменение площади ледяного покрова

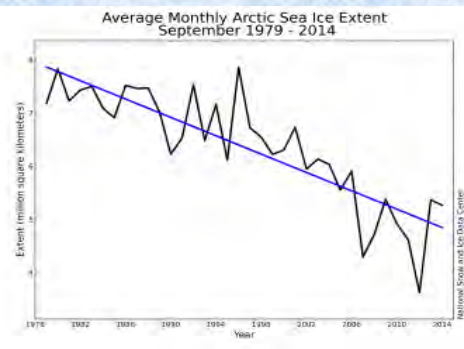
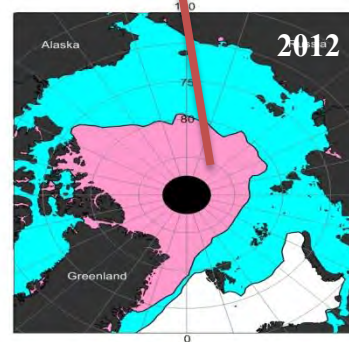
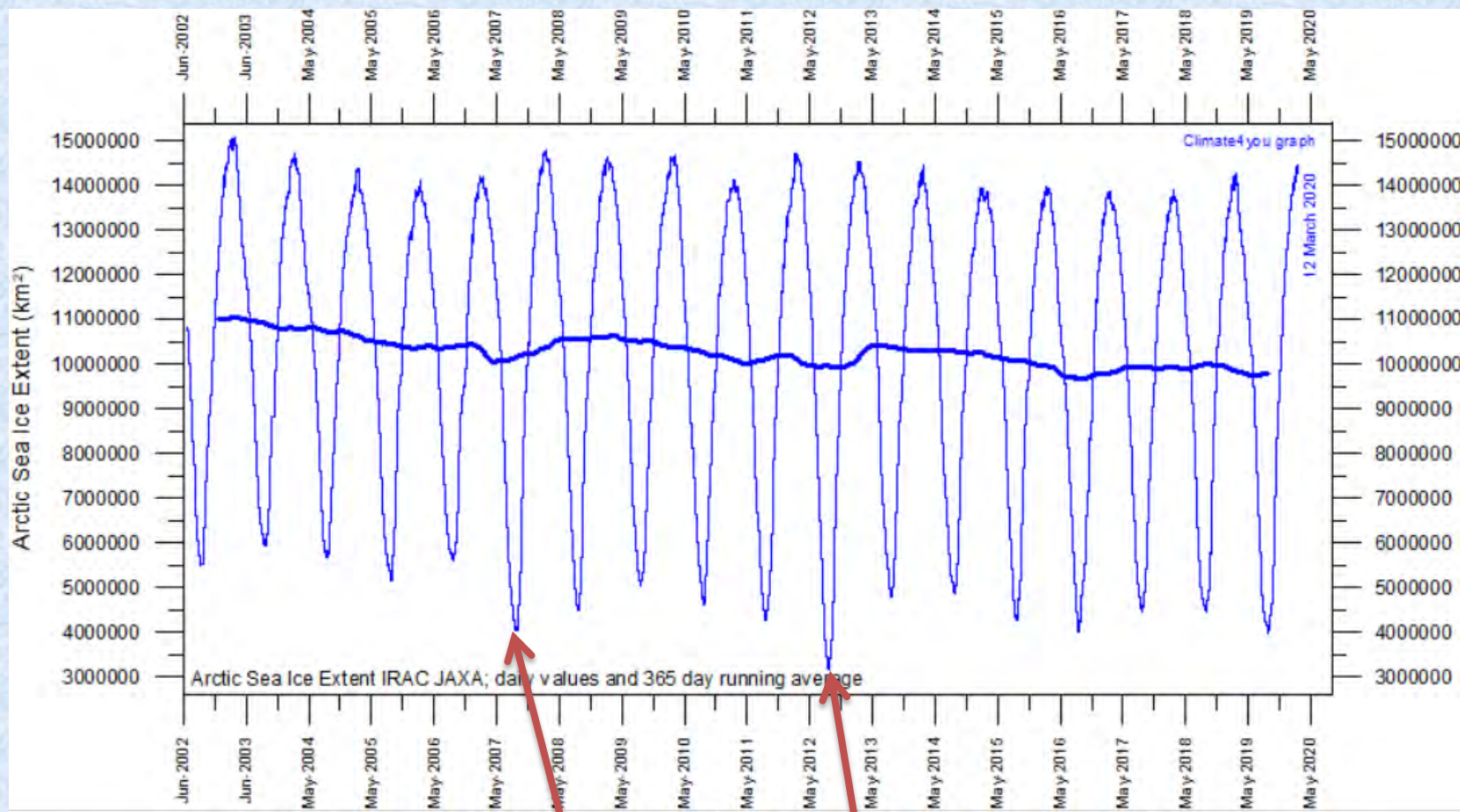


Среднее 1978-2000

2007

2012

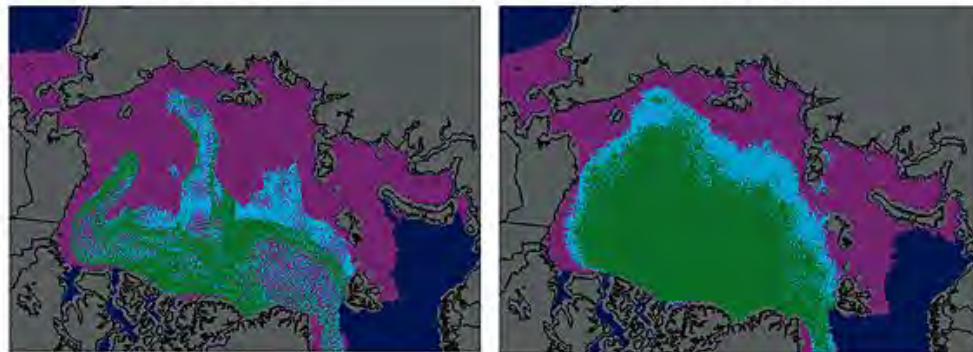
Площадь ледяного покрова Март и в Сентябре



Arctic sea ice age at the end of winter

Ice age
March 2011

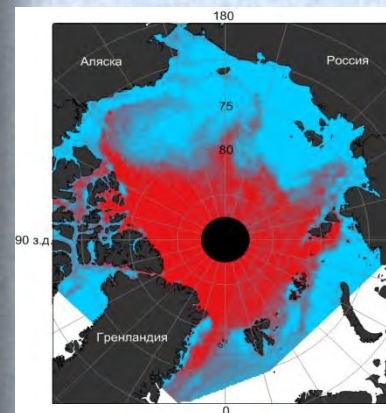
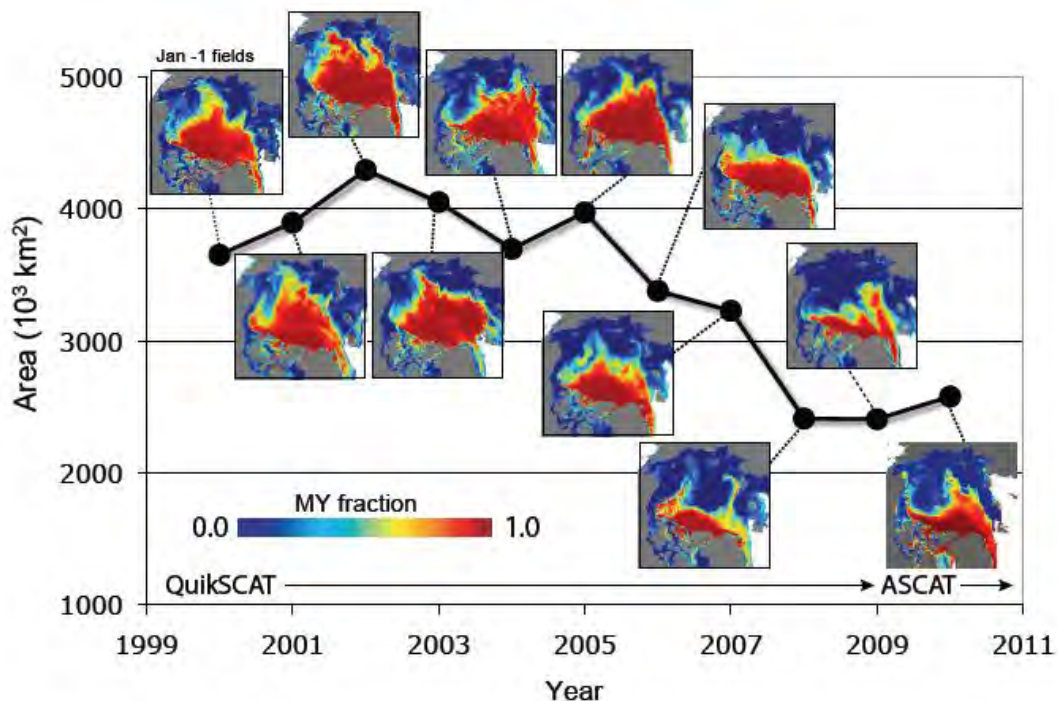
Median ice age
March 1979-2000



First-year ice (<1 year old) Second-year ice (1-2 years old) Multiyear ice (>2 years old)

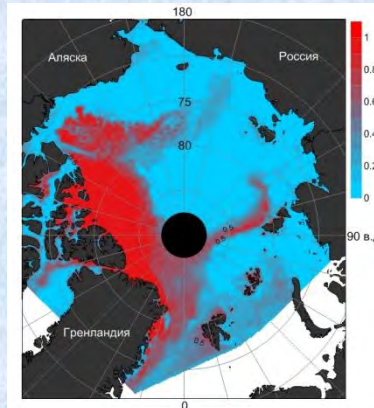
Изменение возраста морского льда

Резкое изменение баланса однолетнего и многолетнего льда произошло после 2007 года.

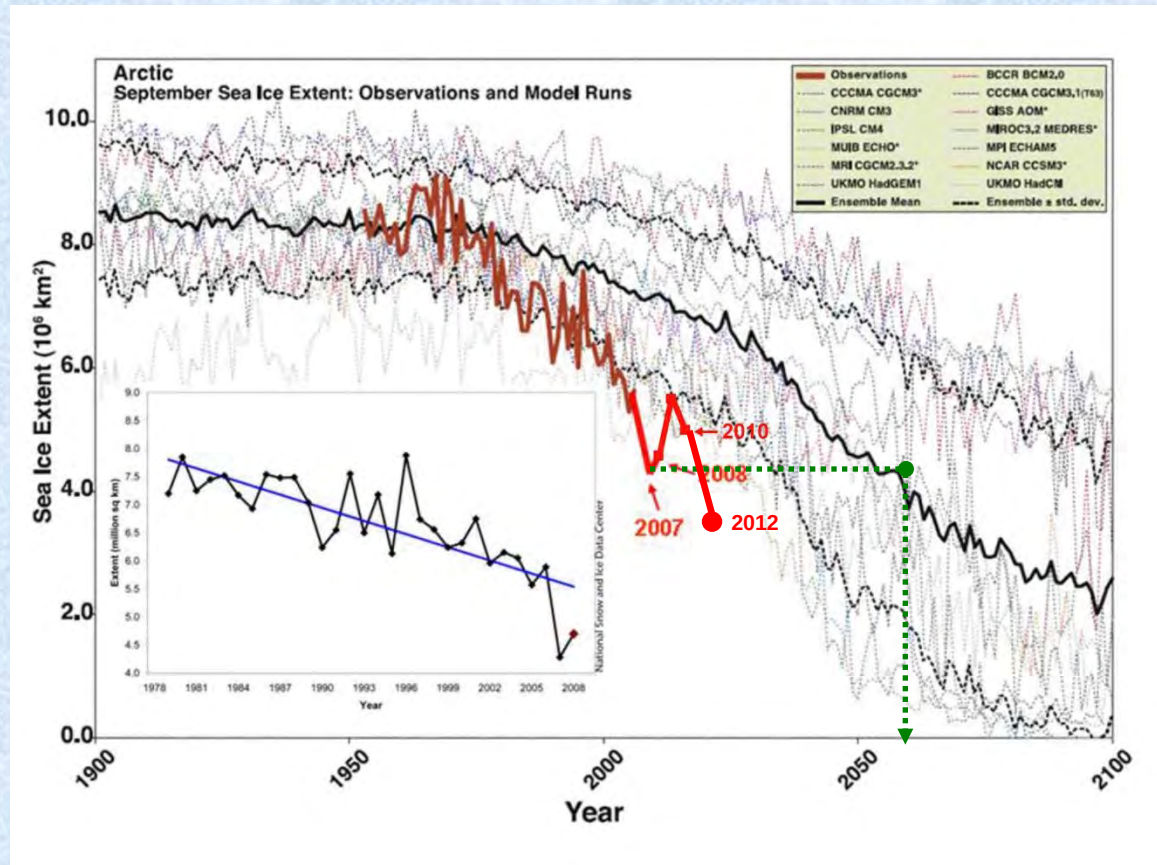
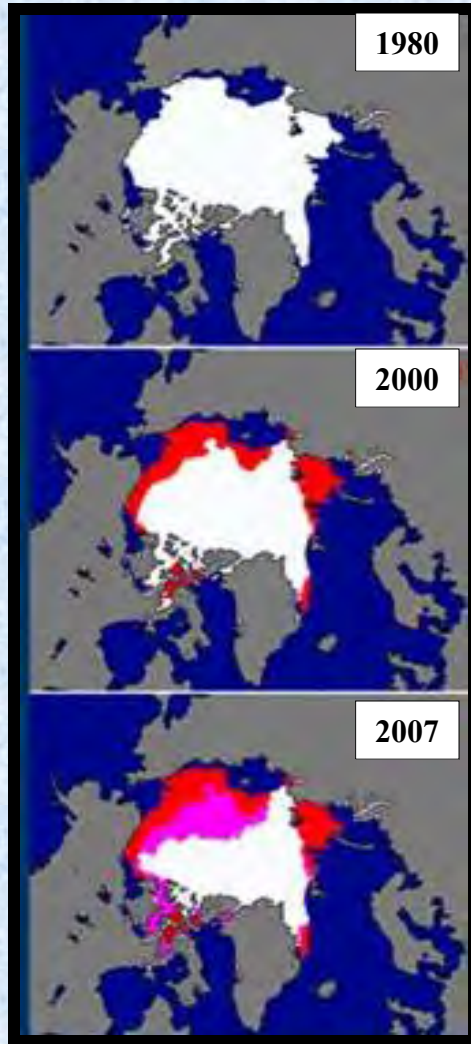


2004

2008



The actual area of ice cover in 2007 corresponded to the average over the ensemble of GCM forecast for 2055

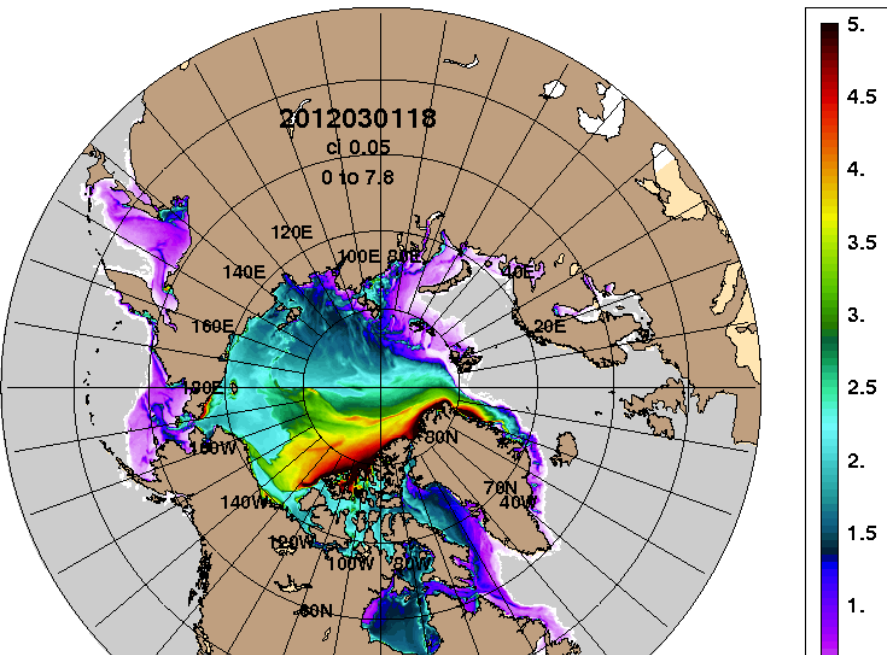


(from Serreze (by Perovich))

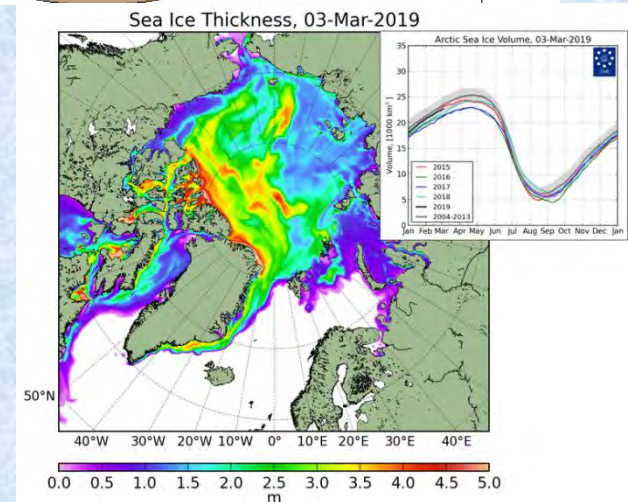
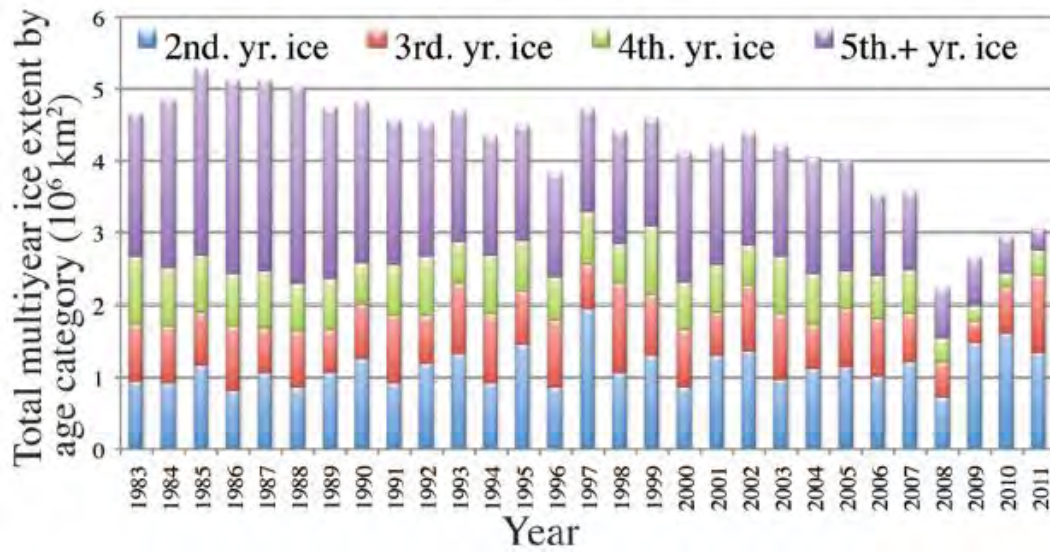
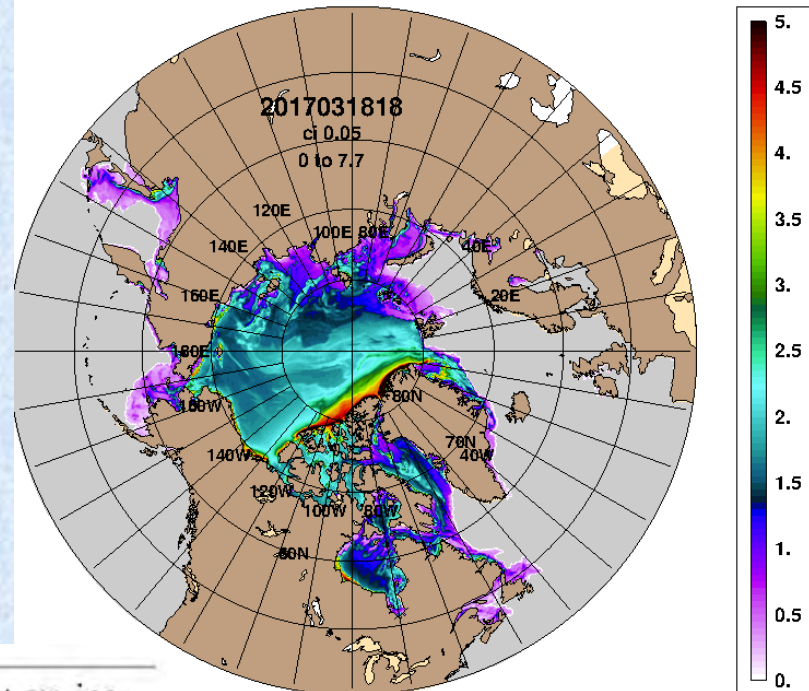
Adapted from Stroeve et al. 2007 GRL

Толщина морского льда в марте 2012 и 2017 года

ARCc0.08-03.5 Ice Thickness: 20120302



ARCc0.08-04.6 Ice Thickness (m): 20170316



Обратная связь: альбедный механизм

- ❖ Альбедный механизм обратной связи связан с более высокой поглощающей способностью льда и снега, чем других поверхностей.
- ❖ Эта положительная обратная связь является одним из возможных объяснений того, как можно было поддерживать ледниковый период.



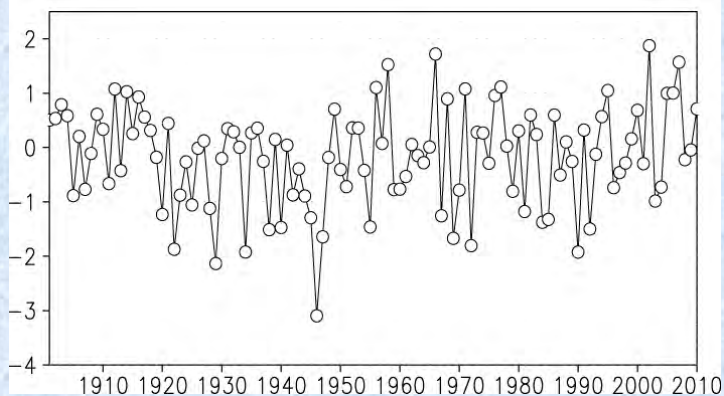
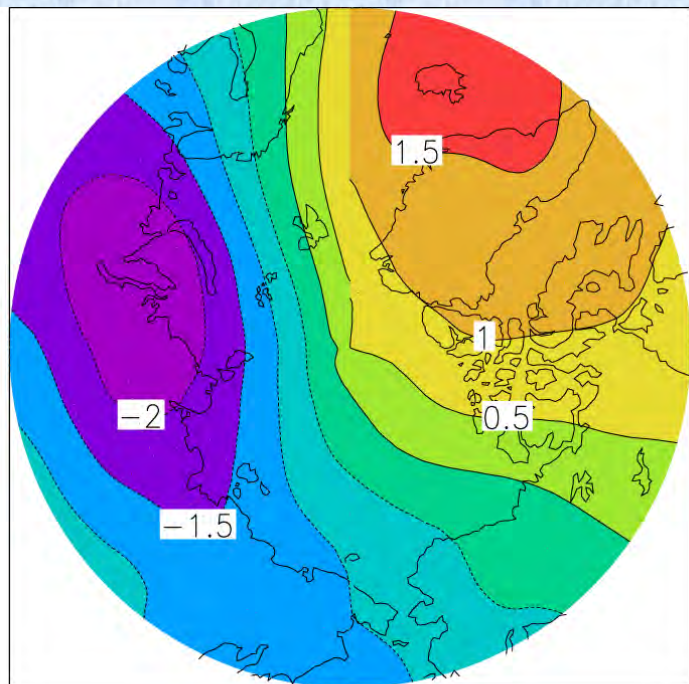
Типичное альбедо

- ✓ Свежий снег/лёд: 80-90%
- ✓ Таящий снег: 40-70%
- ✓ Облака: 40-90%
- ✓ Песок пустыни: 30-50%
- ✓ Почва: 5-30%
- ✓ Тундра: 15-35%
- ✓ Зеленый лес: 18-25%
- ✓ Зимний лес: 5-20%
- ✓ Вода: 5-10%

Основная положительная обратная связь в полярном регионе!

Схема положительной обратной связи в системе «океан-лед-атмосфера»

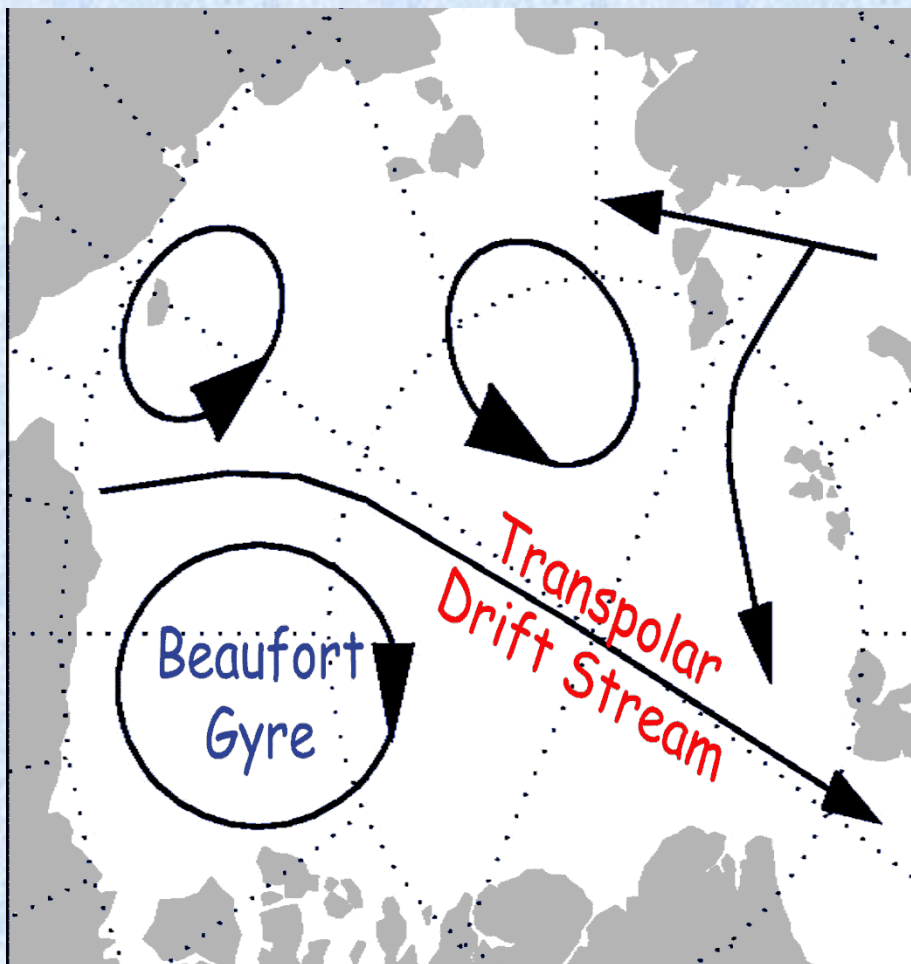




Существование над СЛО устойчивой структуры барического поля, обеспечивающей Трансдрифт - перенос льда в генеральном направлении к проливу Фрама. Эта структура характеризуется положительной аномалией давления над американской частью Арктики и отрицательной над Сибирью.

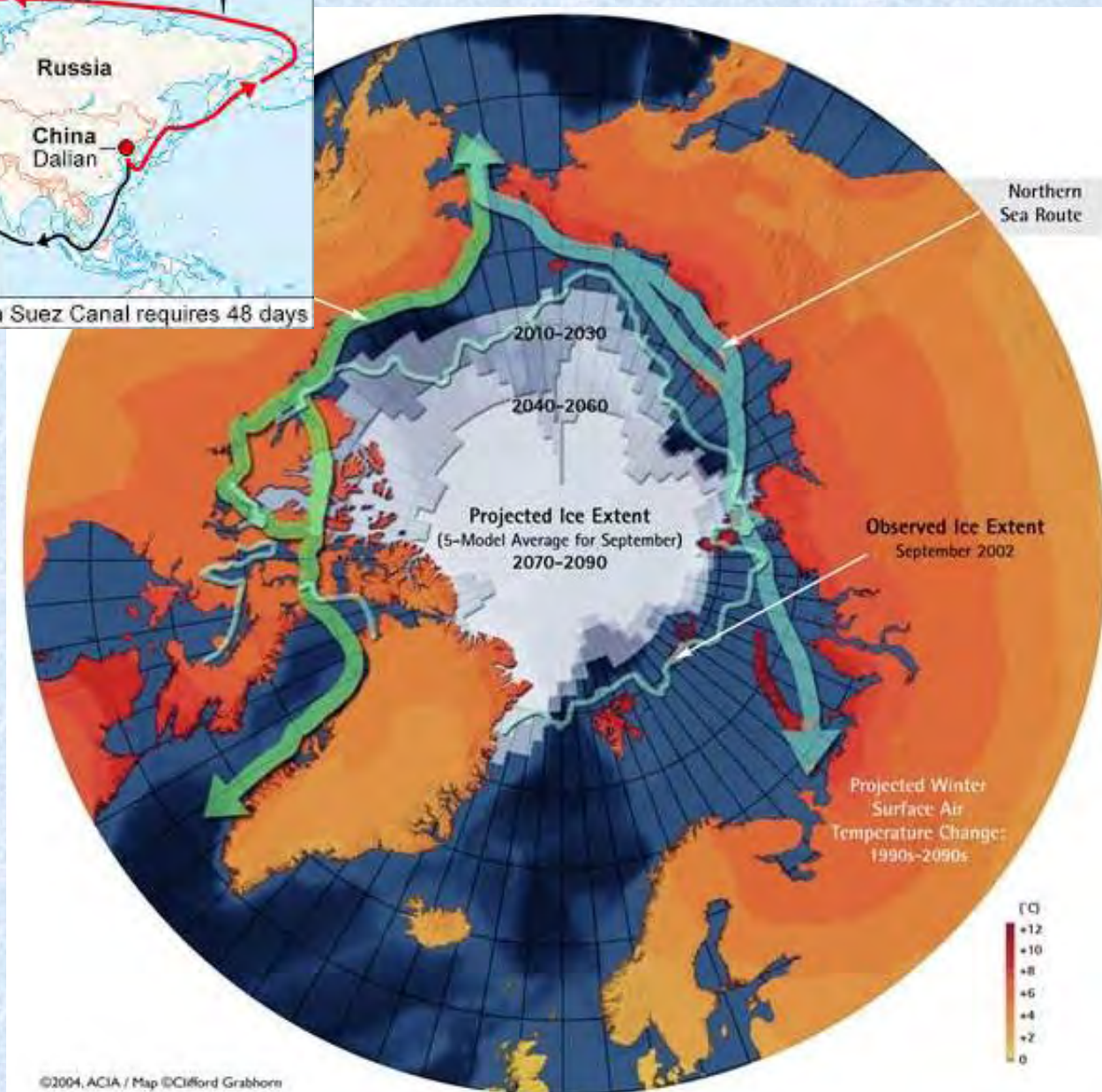
Распределение аномалий приземного давления, соответствующих моде, обеспечивающей усиление Трансдрифта (сверху), и временной ряд коэффициента Фурье этой моды с 1900 года (снизу).

Возрастание скорости дрейфа льда

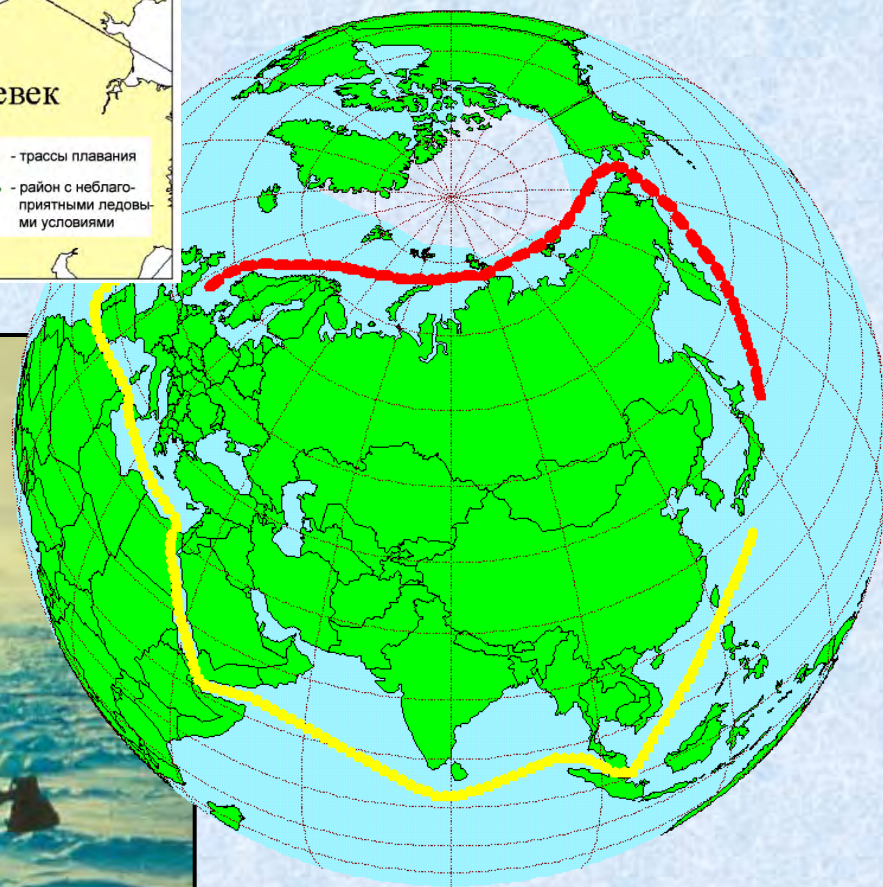
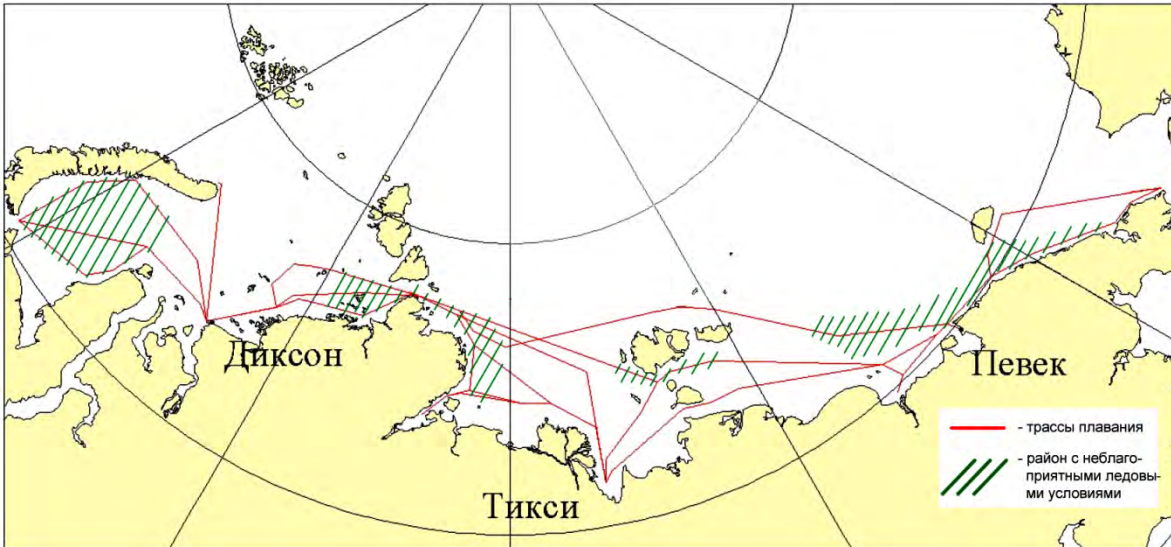


Northern Sea route and current route

Northern Sea route requires 35 days

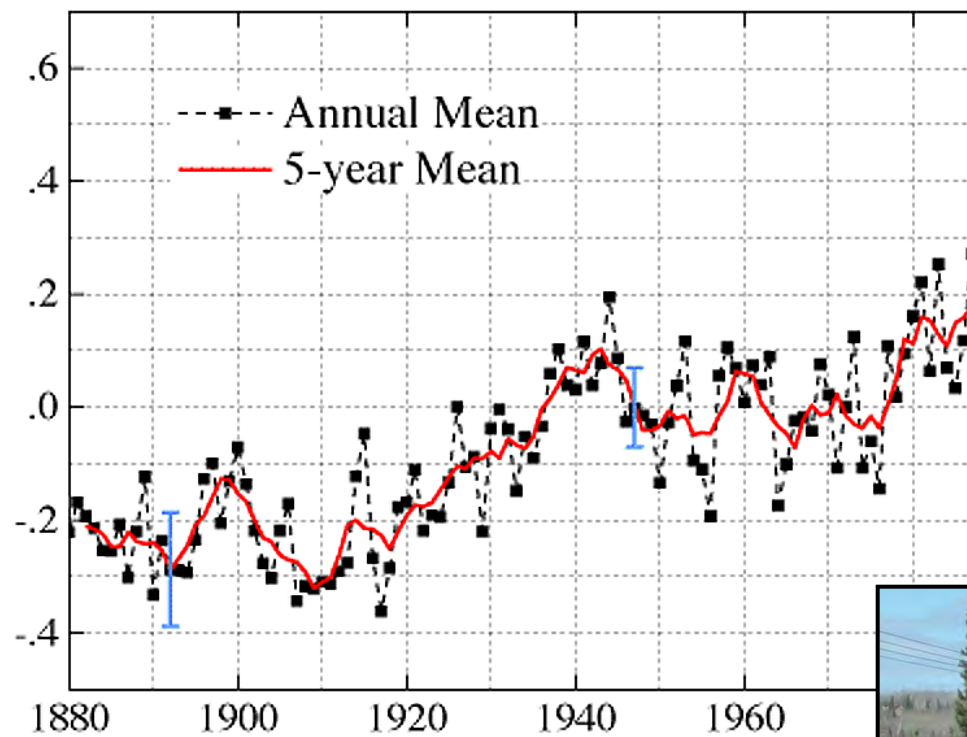


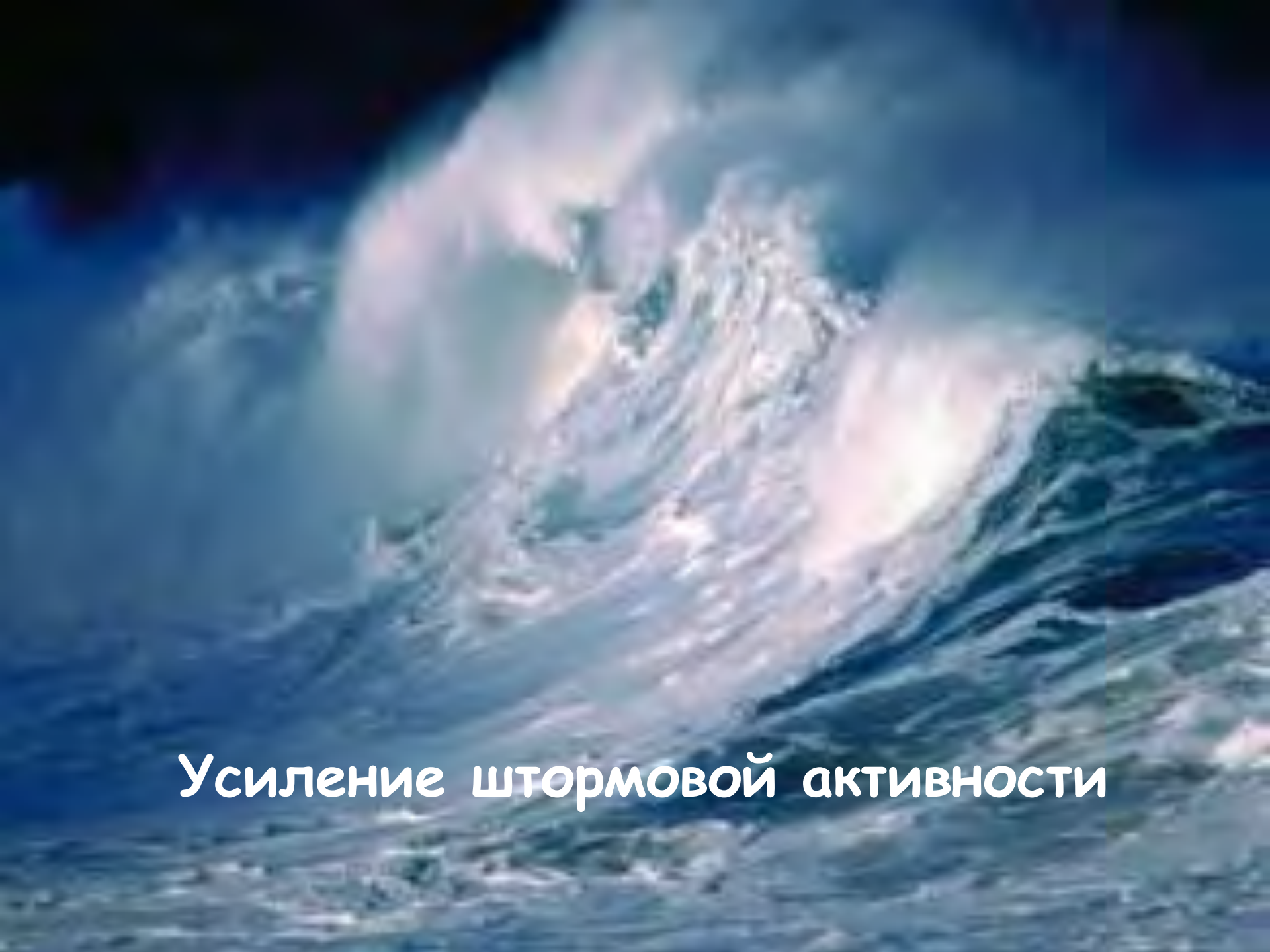




- Арктическая навигация
- Доступ к полезным ископаемым
- Теплые зимы

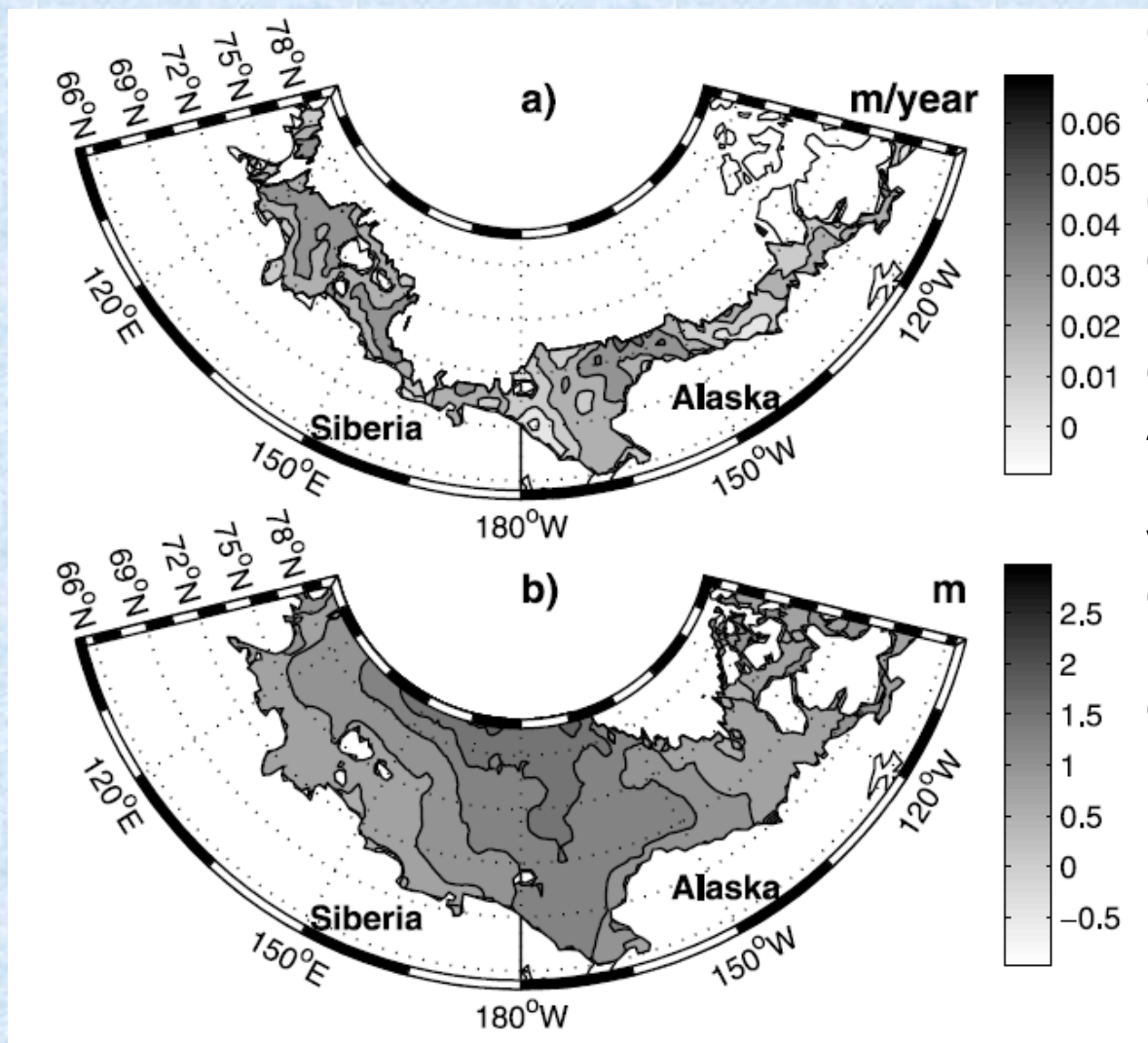
(a) Global-Mean Surface Temperature Anom



An aerial photograph capturing a catastrophic event, likely a tsunami or a massive storm surge. A towering wall of water, appearing as a massive, white, and turbulent mass, is crashing down upon a coastal region. The water's surface is highly textured with white foam and deep, dark blue-green channels. The surrounding ocean is a deep, dark blue, contrasting sharply with the white foam of the surge. The land visible at the base of the wave appears to be a mix of dark and light patches, possibly vegetation and buildings, now being overwhelmed by the water. The overall scene conveys a sense of immense power and destruction.

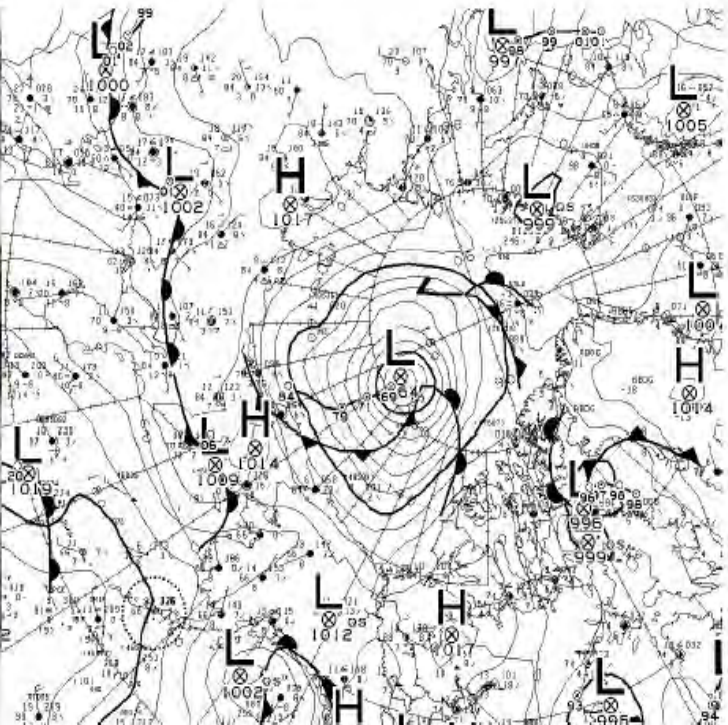
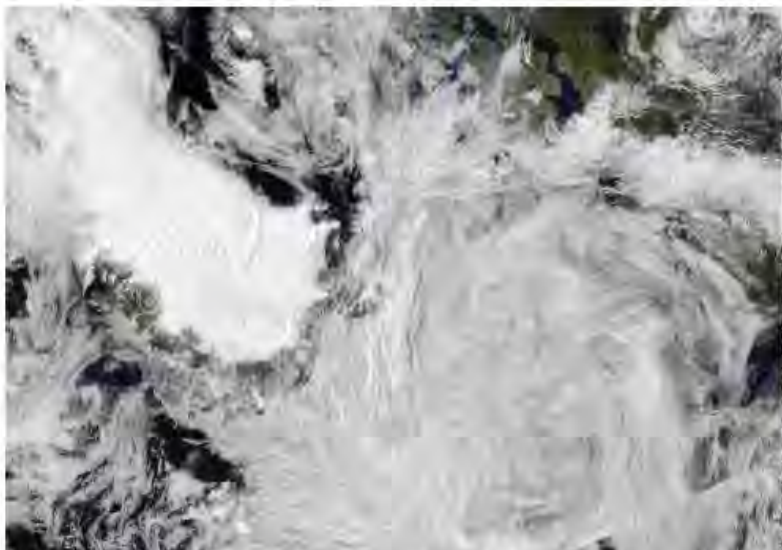
Усиление штормовой активности

Изменение высоты значимых волн и средняя высота волн в восточной Арктике за период 1996-2018

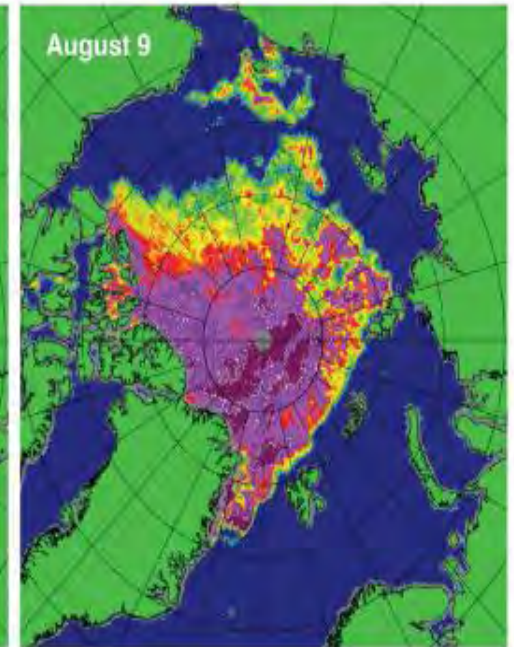
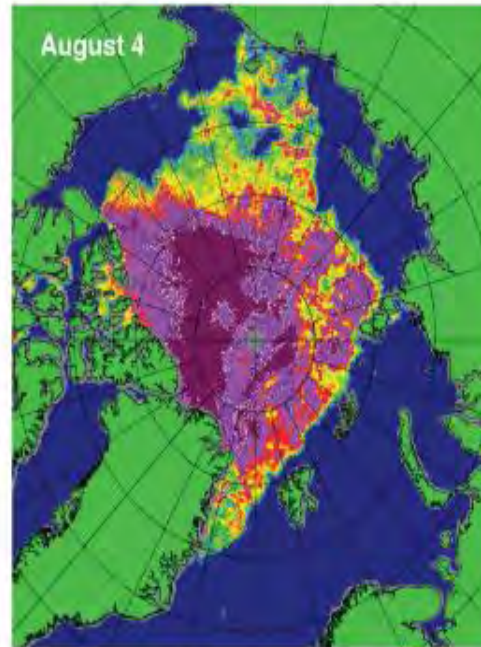
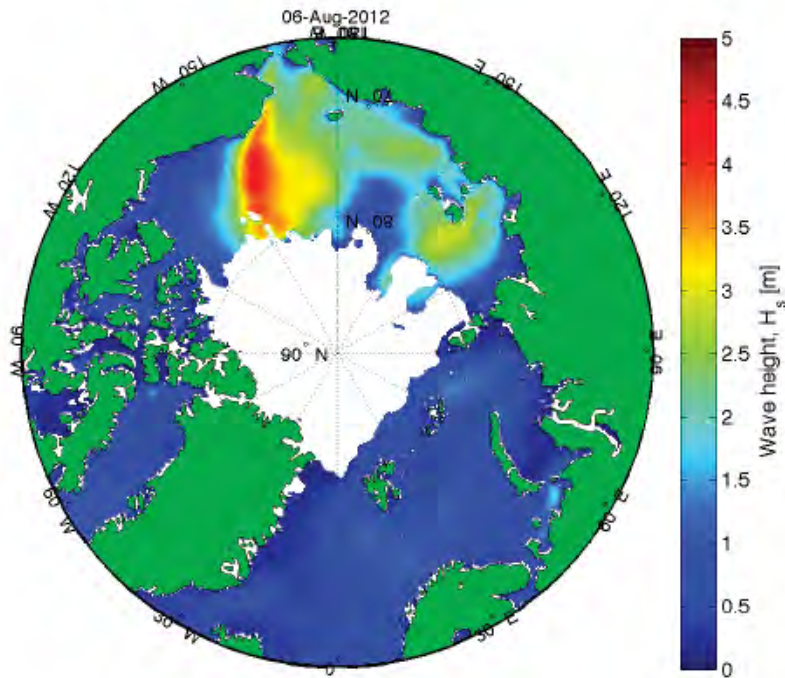


Среднегодовая высота волн значительно увеличилась почти во всех частях Северного Ледовитого океана. (а) Самый высокий рост наблюдается вблизи северного побережья Аляски, (б) в период с 1993 по 2010 год средний уровень высоты волн составляет 1,5 м. В течение последних двух десятилетий средняя высота волн в регионе удвоилось.

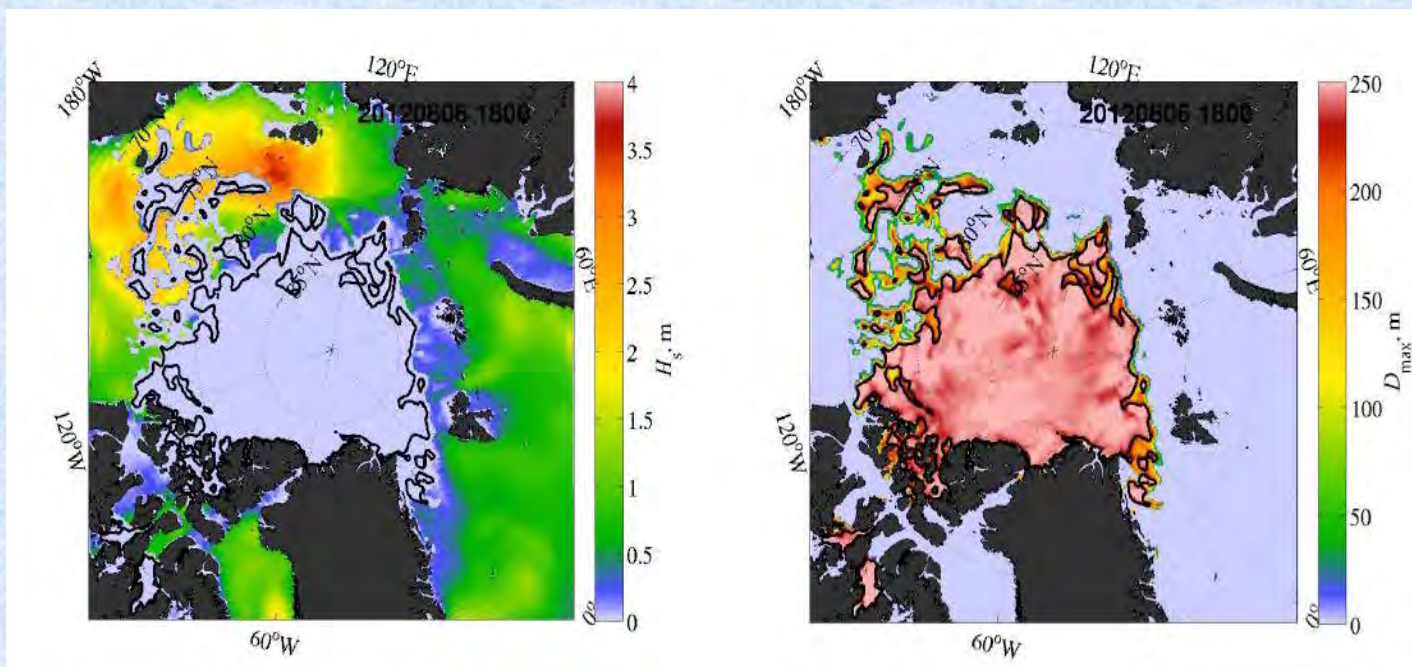
Большой Арктический циклон 2012



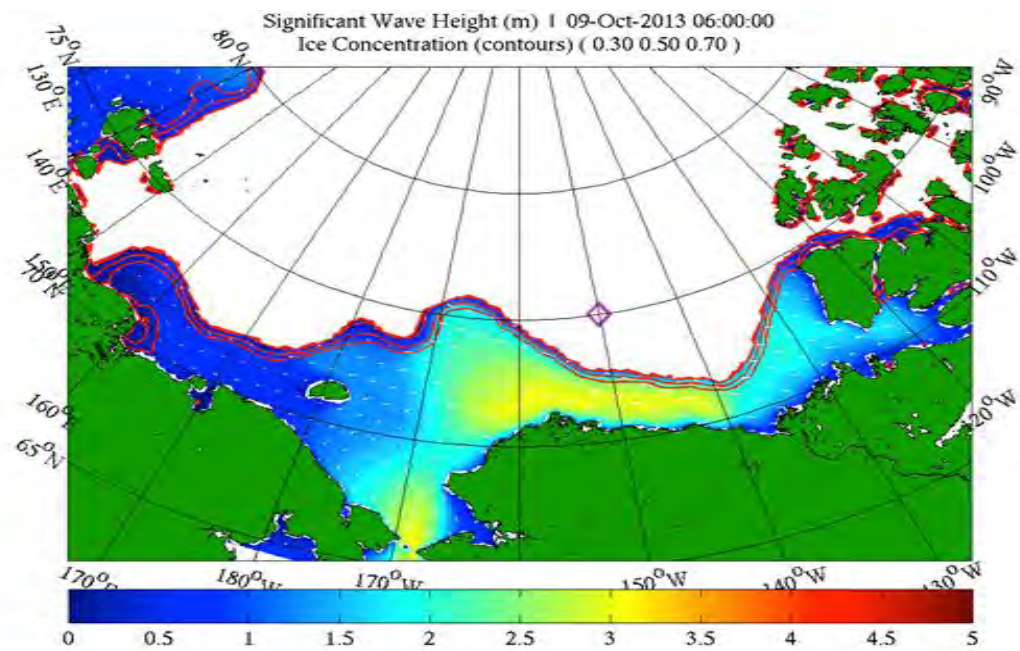
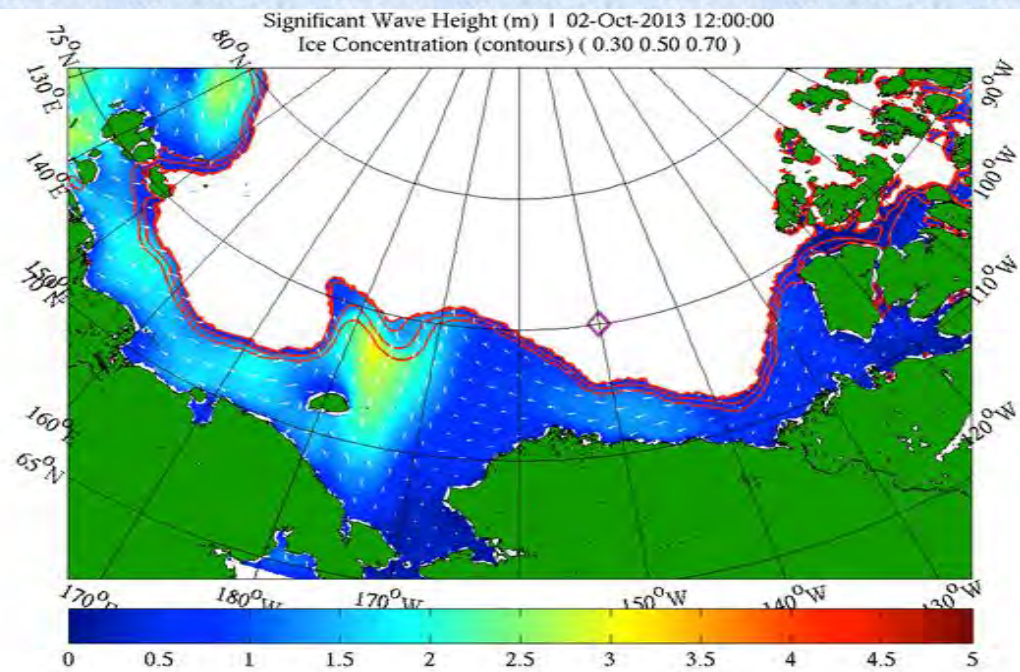
Ледовые карты, Август 2012

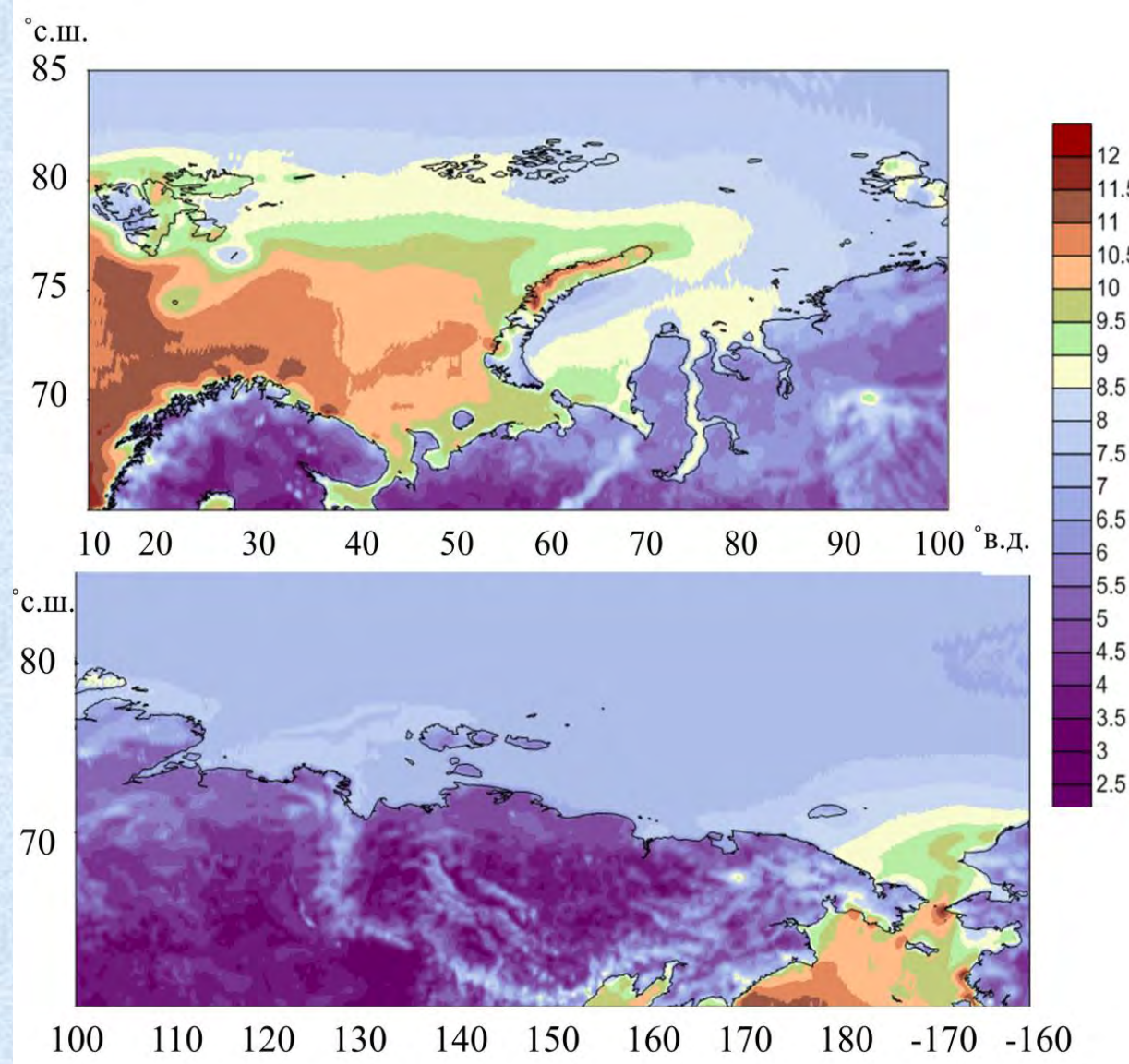


Результаты моделирования с использованием
Arctic Cap Nowcast/Forecast System (ACNFS)

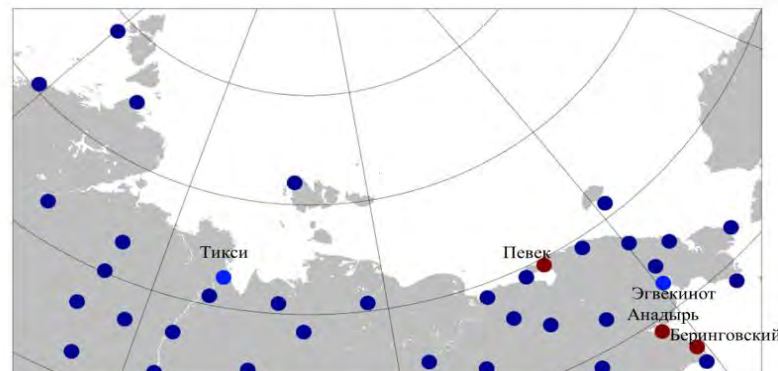
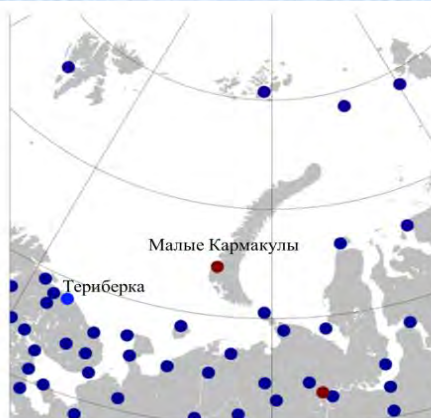


Результат летнего шторма 2012 г. из прогностической системы TOPAZ. Прогноз волнения был выполнен из модели Global WAVEWATCH III. Левый рисунок показывает предсказанную значимую высоту волн, сплошная линия показывает границу сплошного льда. Правый рисунок показывает прогноз максимальных размеров ледяных полей, образовавшихся в результате разрушения льда волнами. Сплошная линия та же, что и на левом рисунке и обозначает границу льдин больших 250 м. Наибольшее количество разрушенных льдин наблюдается в тихоокеанском секторе.





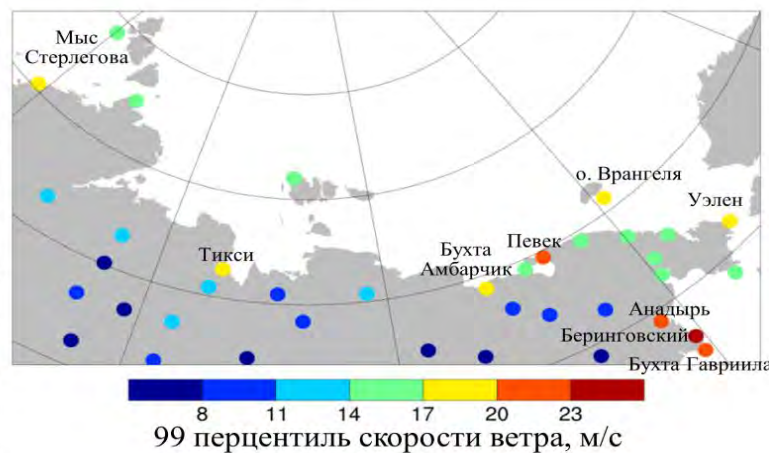
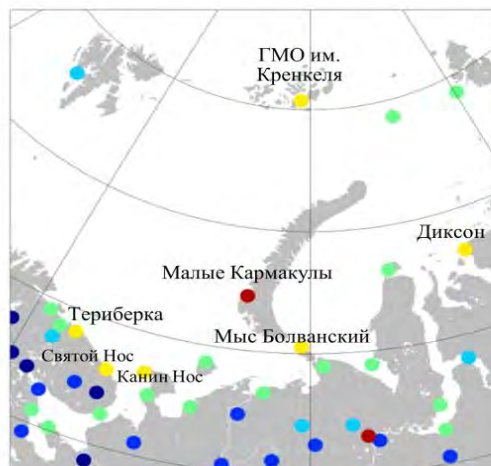
Средний суточный максимум скорости ветра (м/с, цветом) по данным реанализа ASR за 2000-2018 гг.



Повторяемость сроков со скоростью ветра >30 м/с

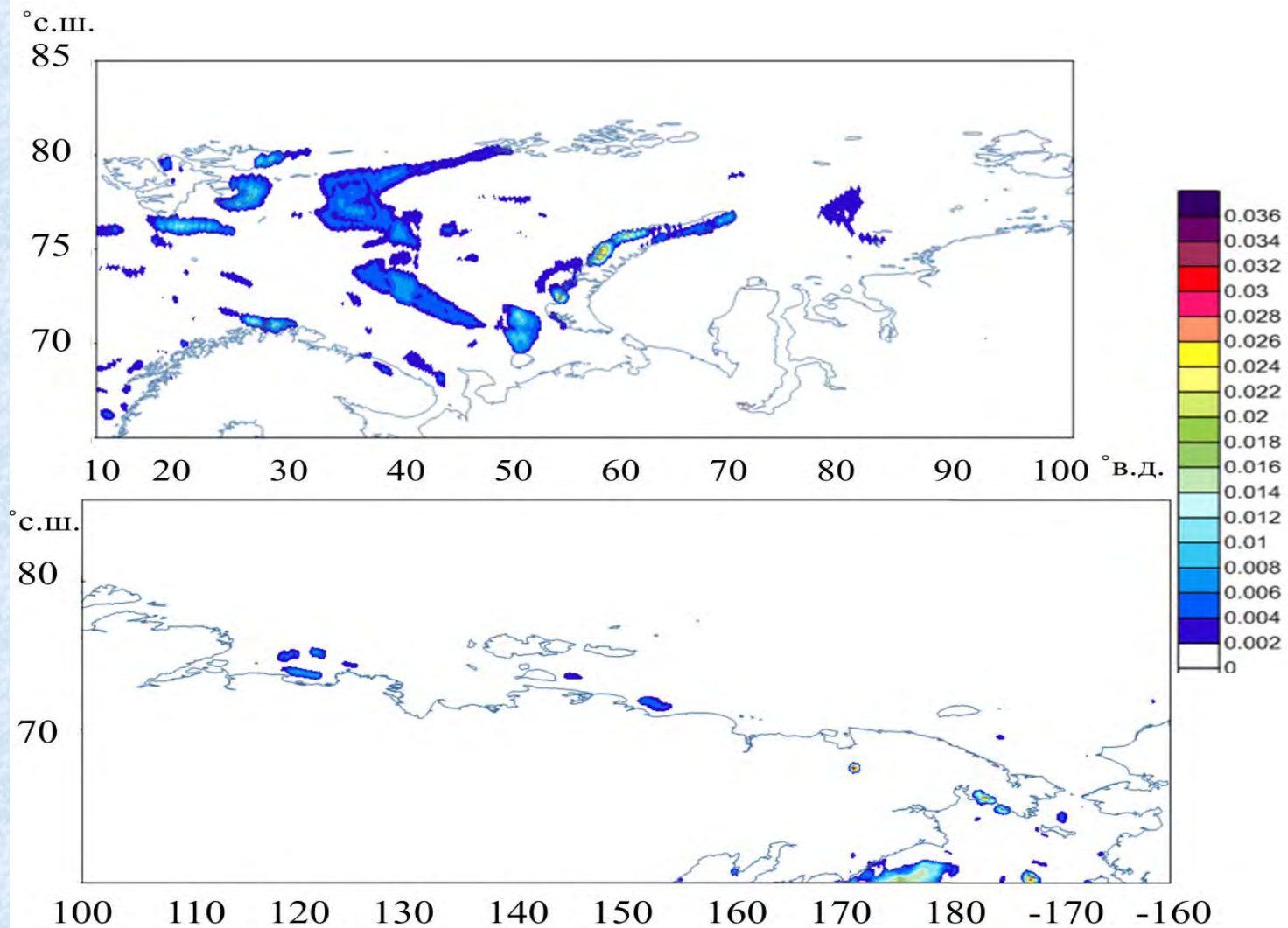


Раз за: 3.5 1.7 1.2 0.9 0.7 0.5 0.3 года



99 перцентиль скорости ветра, м/с

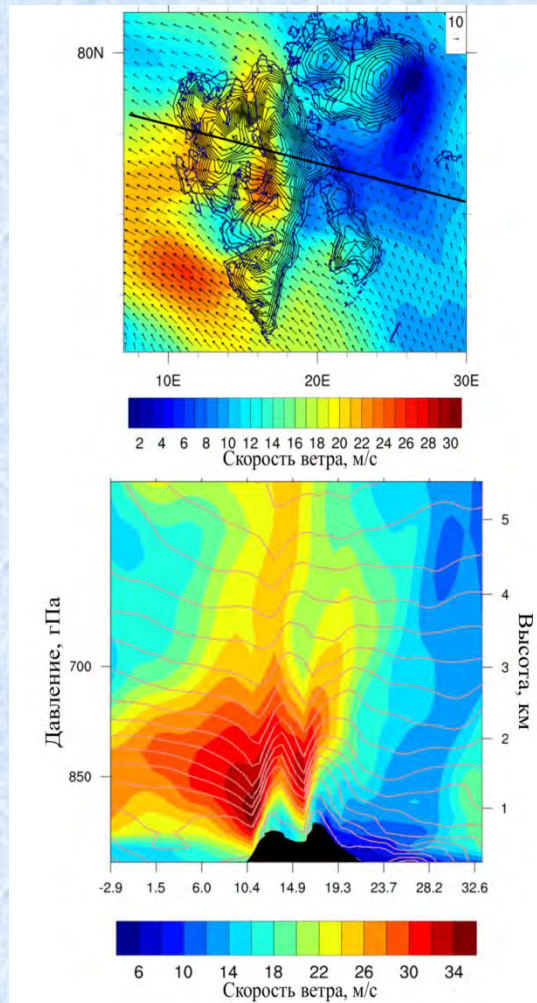
Повторяемость (% от всей выборки) скорости ветра более 30 м/с (вверху) и 99 перцентиль скорости ветра (внизу) на станциях Российской Арктики. Для расчетов статистики использовался период 1979-2017 гг.



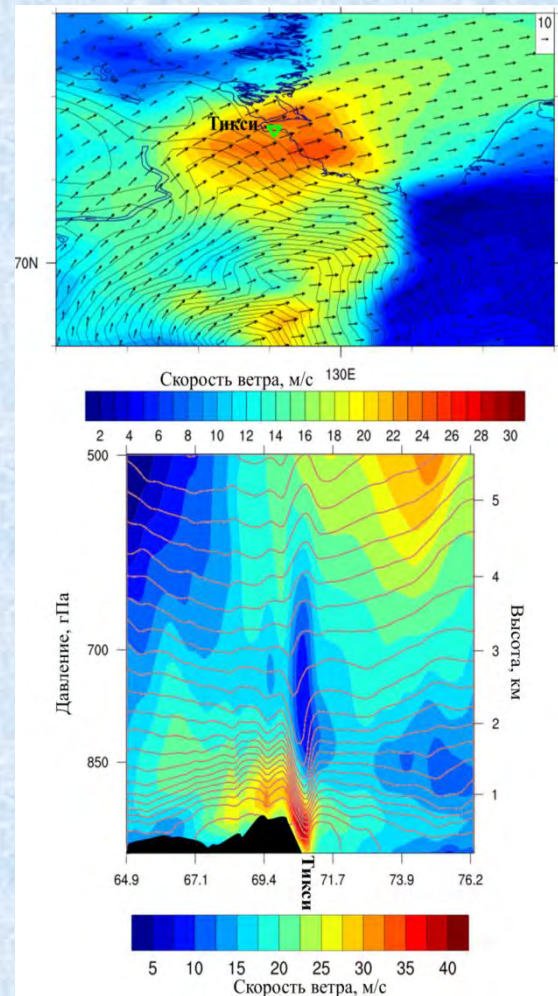
Повторяемость сроков со скоростью ветра более 30 м/с (в %, цветом), рассчитанная по данным реанализа ASR за 2000-2016 гг.

Сильные кatabатические ветра в прибрежной зоне Арктики

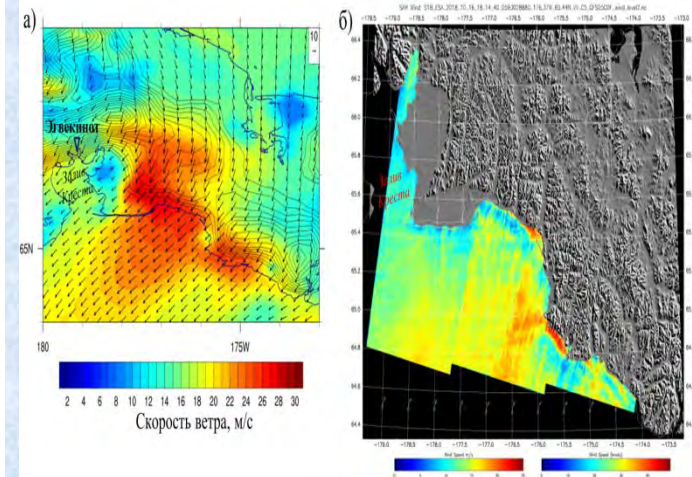
Шпицберген



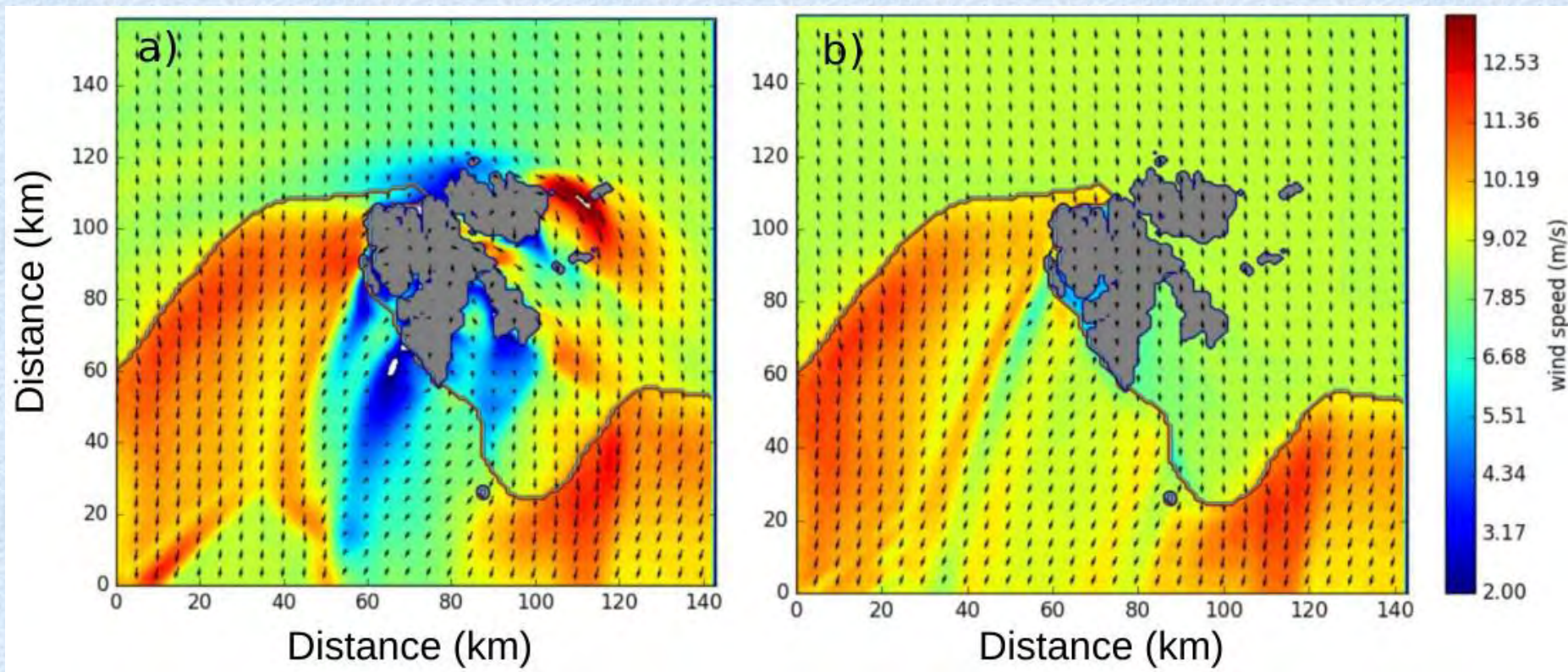
Тикси



Бухта providения



Карта скорости и направления ветра по данным реанализа ASR (вверху) и вертикальный разрез (внизу) скорости ветра (цветом, ветер у земли направлен справа налево) и потенциальной температуры (изолиниями, через 2 К)



Скорость ветра на высоте 10 м по результатам численных экспериментов с моделью NH3D с заданием реалистичной концентрации льда и орографии Шпицбергена (а) и в отсутствие орографии (б)

Полярные циклоны

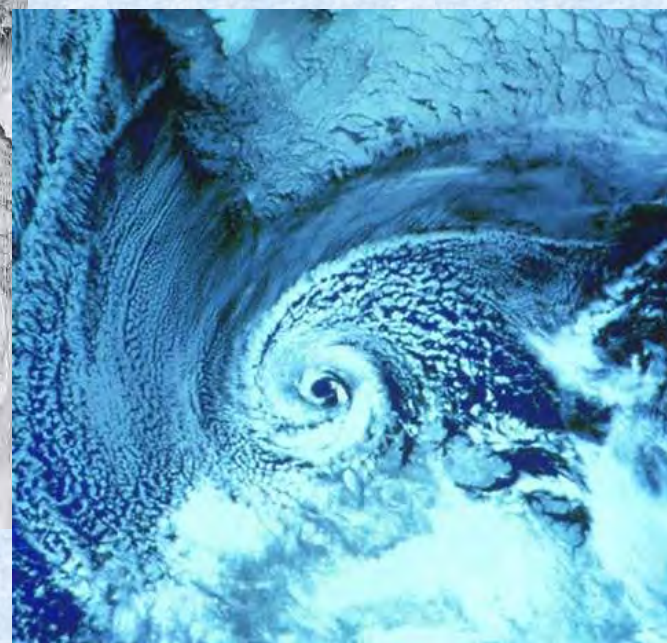
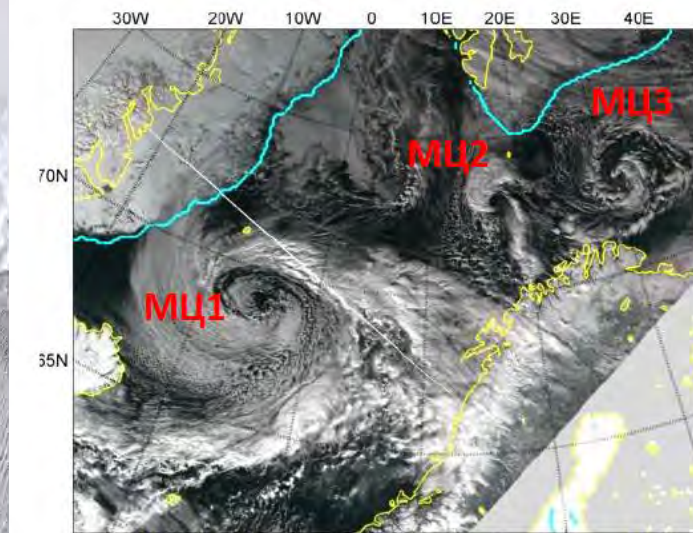


Aqua MODIS 02:15 Гр. 13 января 2007 г.

- В холодное полугодие над морями высоких широт на спутниковых изображениях часто фиксируются интенсивные мезомасштабные конвективные циклоны (МЦ) размером от 100 до 1000 км с облачной системой в форме запятой или спирали. Жизненный цикл МЦ обычно от 0.5 до 3 суток. Наиболее интенсивные МЦ называют полярными циклонами или полярными ураганами, а из-за взрывного характера формирования – полярными бомбами.
- МЦ зарождаются преимущественно над морской поверхностью в пограничном слое атмосферы на фоне холодного

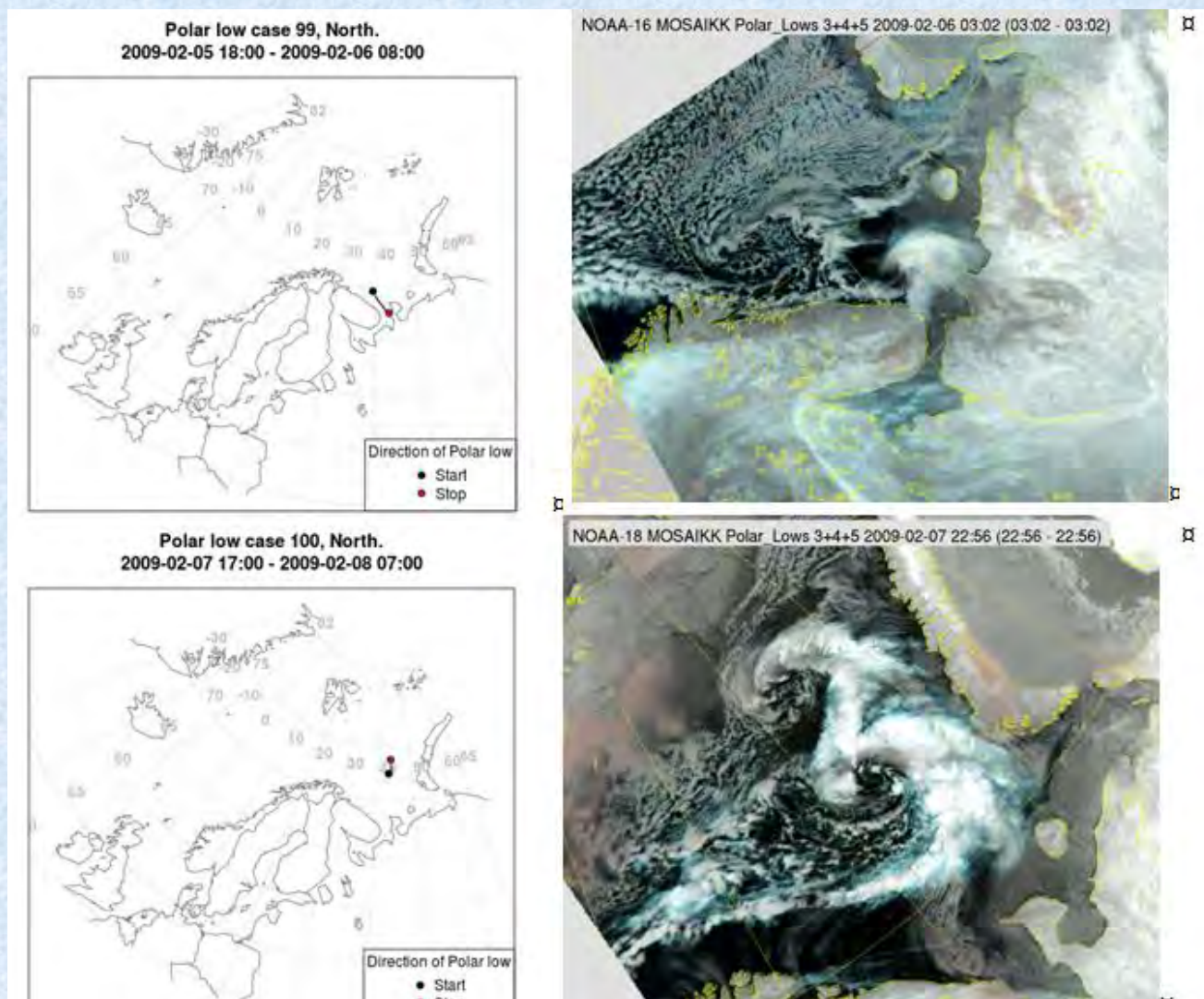
вторжения к северу, северо-западу от основного тропосферного фронта.

• Безоблачный «глаз» в центре, окружающая его облачная стена и теплое ядро придают им сходство с тропическими циклонами. Общим между МЦ и ТЦ является и то, что те и другие обычно формируются из слияния конвективных облаков в течение начальной стадии развития (S. Businger, B. Walter. Comma cloud development and associated rapid cyclogenesis over the Gulf of Alaska: A case study using aircraft and operational data. *Monthly Weather Review*, V. 116, p. 1103-1123, 1988).



Формирование полярного мезоциклона в результате холодного вторжения. Data MODIS, March 7, 2013.

Траектории движения мезоциклонов (слева); облачные системы мезоциклонов на инфракрасных спутниковых снимках (справа). Данные из каталога мезоциклонов Норвежского метеорологического института (<http://polarlow.met.no>).





Статистика появления мезоциклонов в Баренцевом море

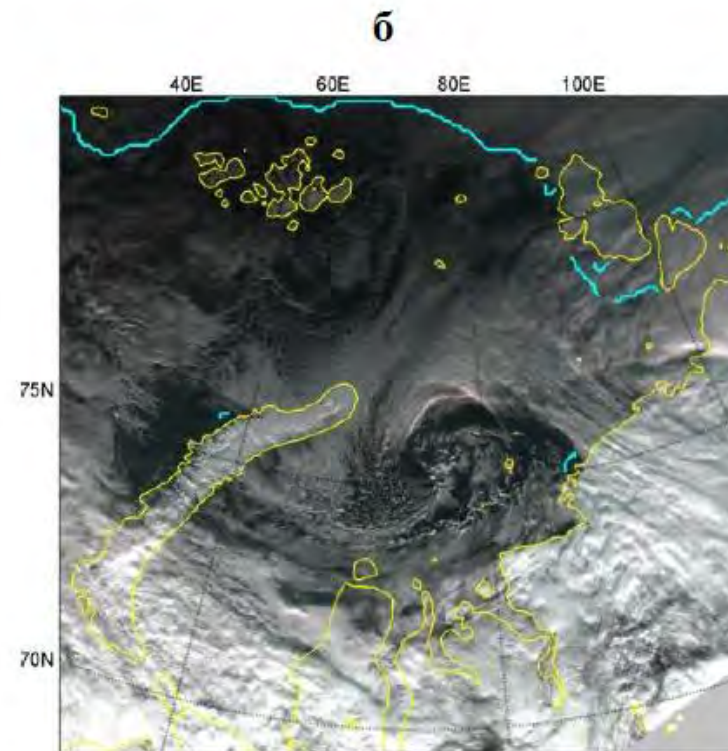
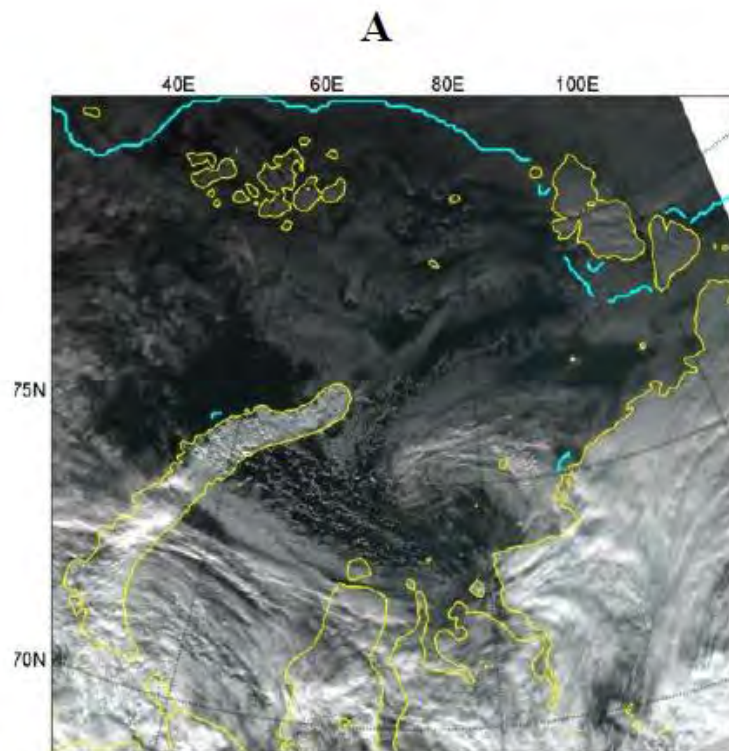
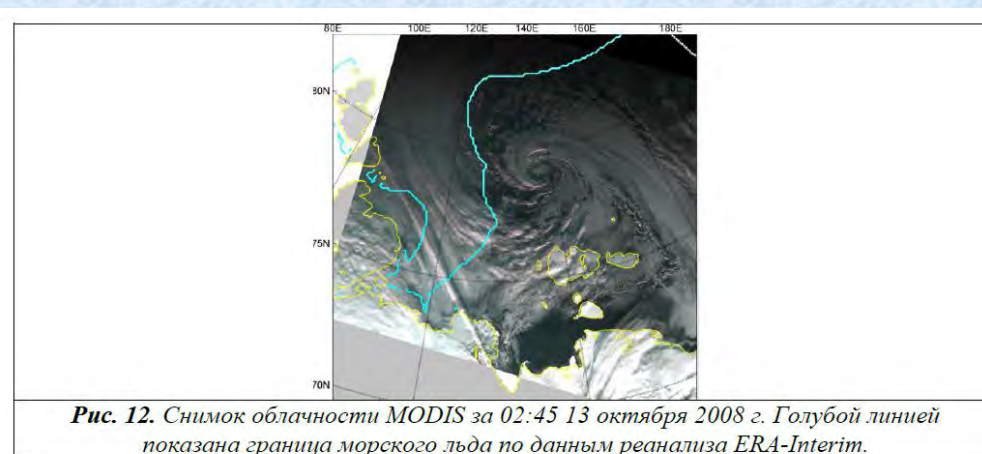
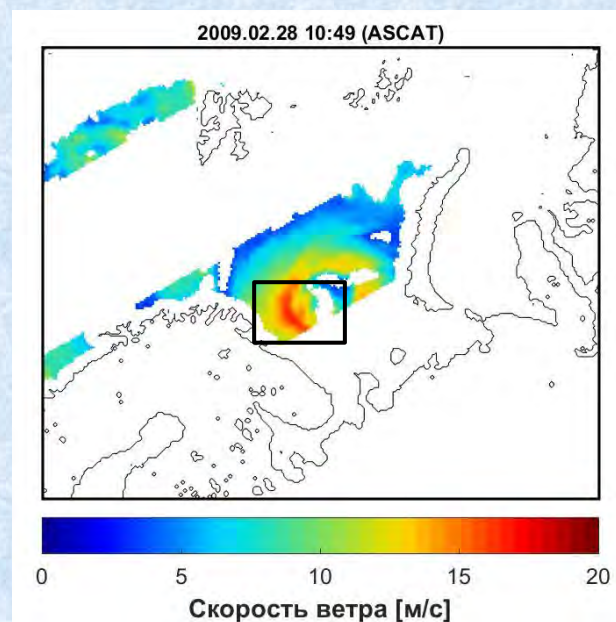
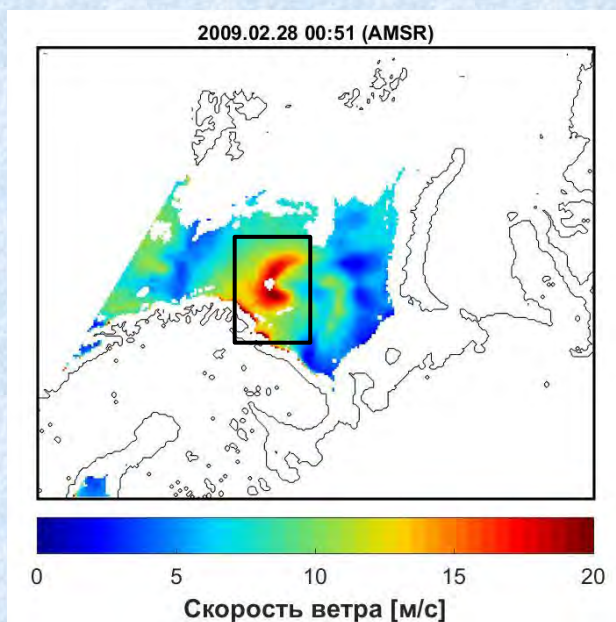
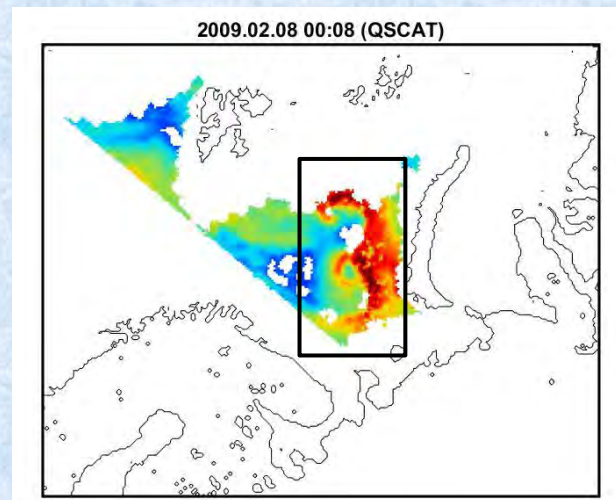
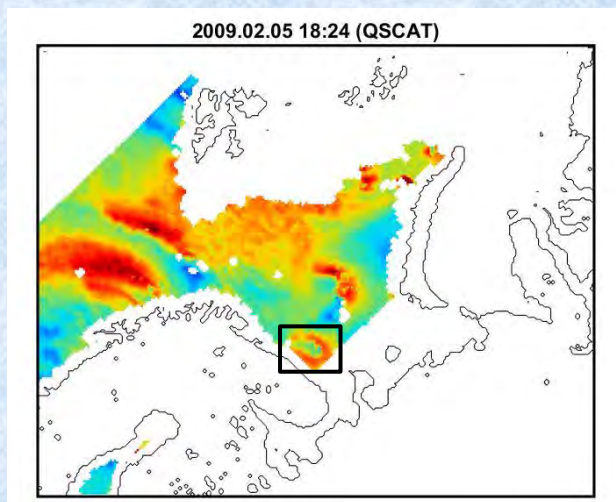


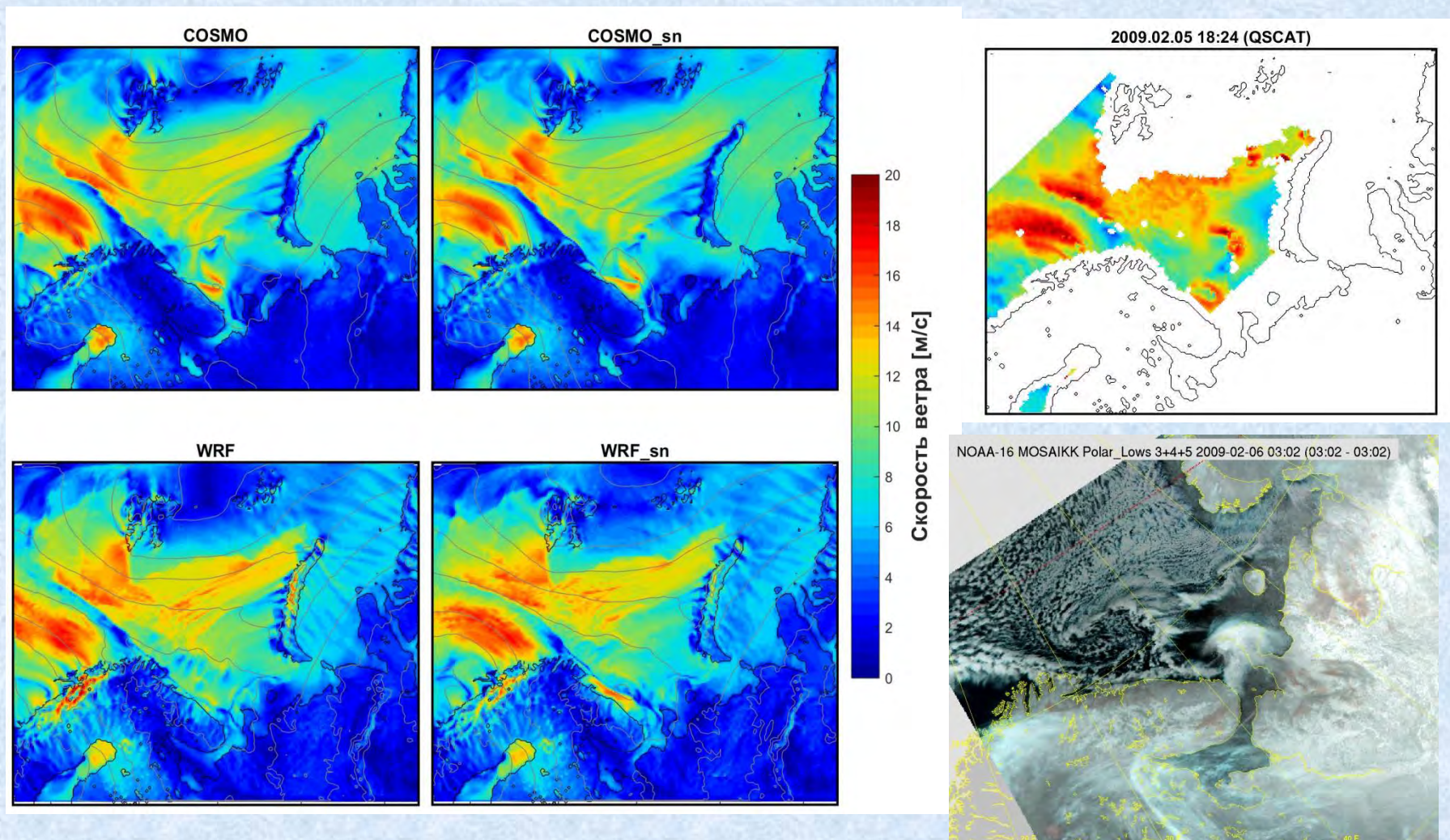
Рис. 9. Снимки облачности MODIS за 07:10 30 октября (а) и 06:15 1 октября 2008 г. (б) Голубой линией показана граница морского льда по данным реанализа ERA-Interim.





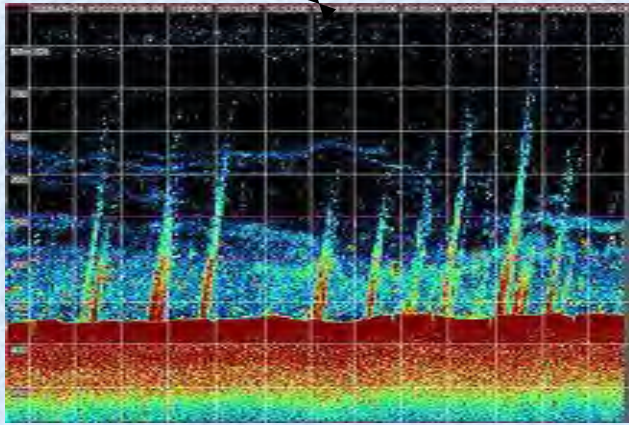
Поле скорости приводного ветра по данным дистанционного зондирования в моменты времени, когда наблюдались рассматриваемые мезоциконы. Соответствующие области выделены черными прямоугольниками.

Поле скорости ветра по данным расчетов моделей COSMO и WRF



результаты численного моделирования и проведенного анализа не позволяют сделать однозначных выводов о том, какая из моделей лучше воспроизводит полярные мезоциклоны. Даже при реалистичном крупномасштабном форсинге воспроизведение (и, как следствие, прогноз) таких явлений в рамках региональных моделей атмосферы остается существенной проблемой.

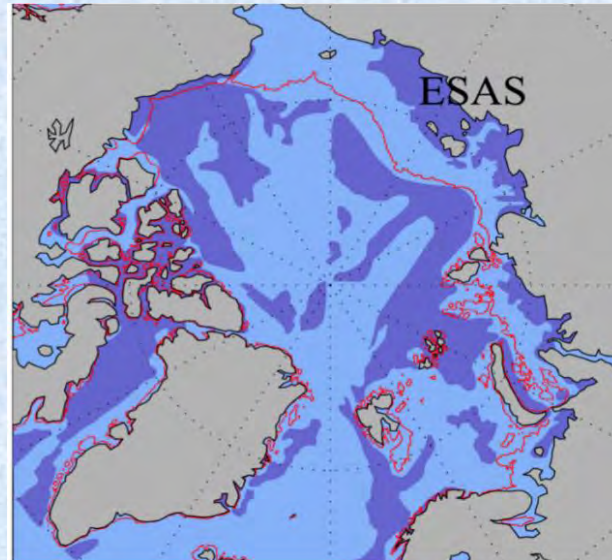
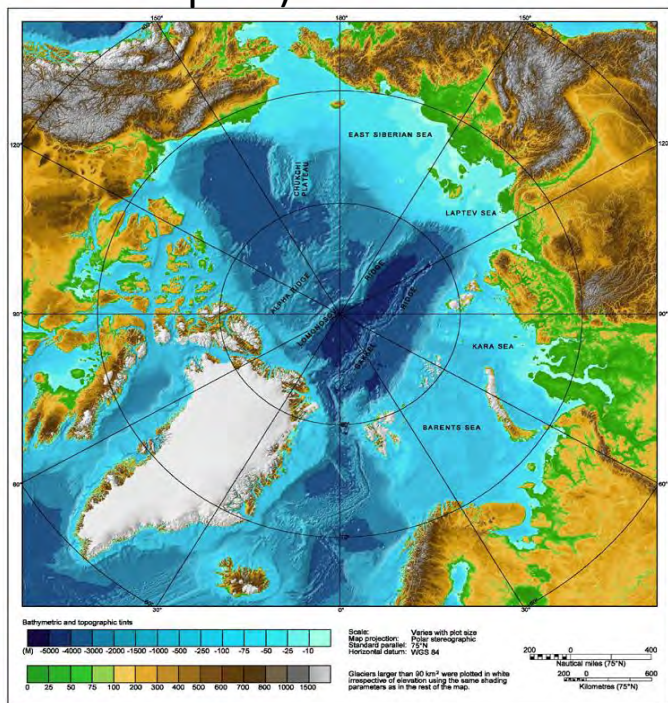
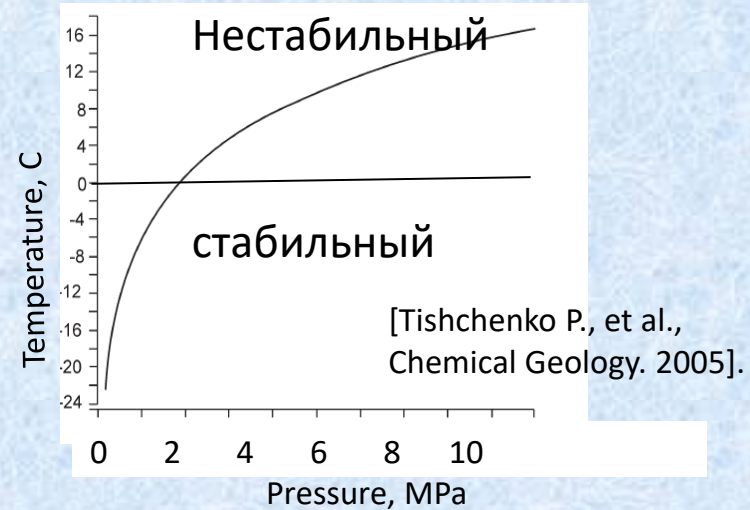
Метаногидраты



Пузырьки метана со дна океана около Шпицбергена (Источник: National Oceanography Centre, Southampton)



Фазовая диаграмма метаногидратов

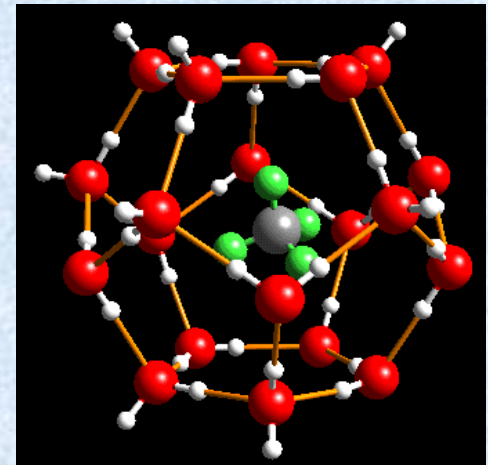


Положение метаногидратов по расчетам Соловьева и др., 1987

Разрушение метаногидратов может привести к выбросу **2000 Pg CH₄**:
в глобальной атмосфере ~ **5 Pg CH₄**

Метаногидраты

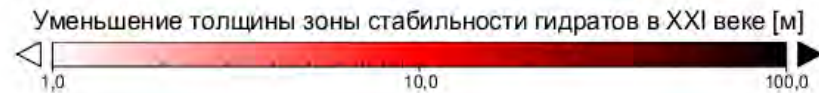
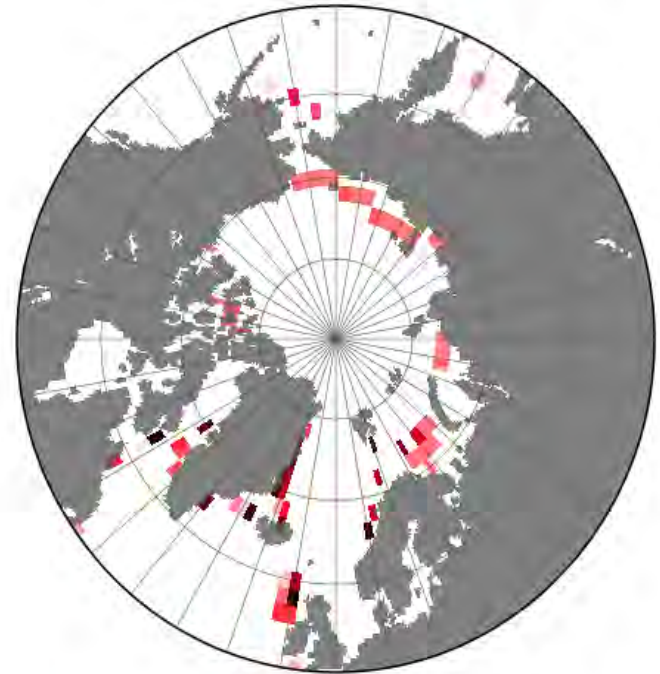
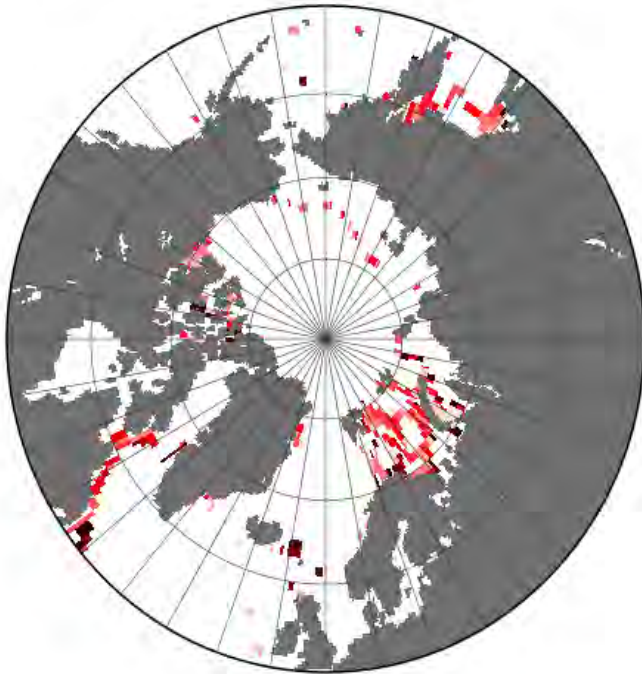
- ❑ Кристаллическая структура формируется молекулами воды, внутри каркаса которой находится молекула метана (обычно 1 моль CH_4 приходится на 5.75 молей H_2O)
- ❑ Устойчив при высоких давлениях и низких температурах
- ❑ При падении давления или росте температуры распадается на метан и воду, но может существовать и в метастабильном состоянии (при температурах, превышающих температуру таяния)
- ❑ Плотность около 900 кг/м^3

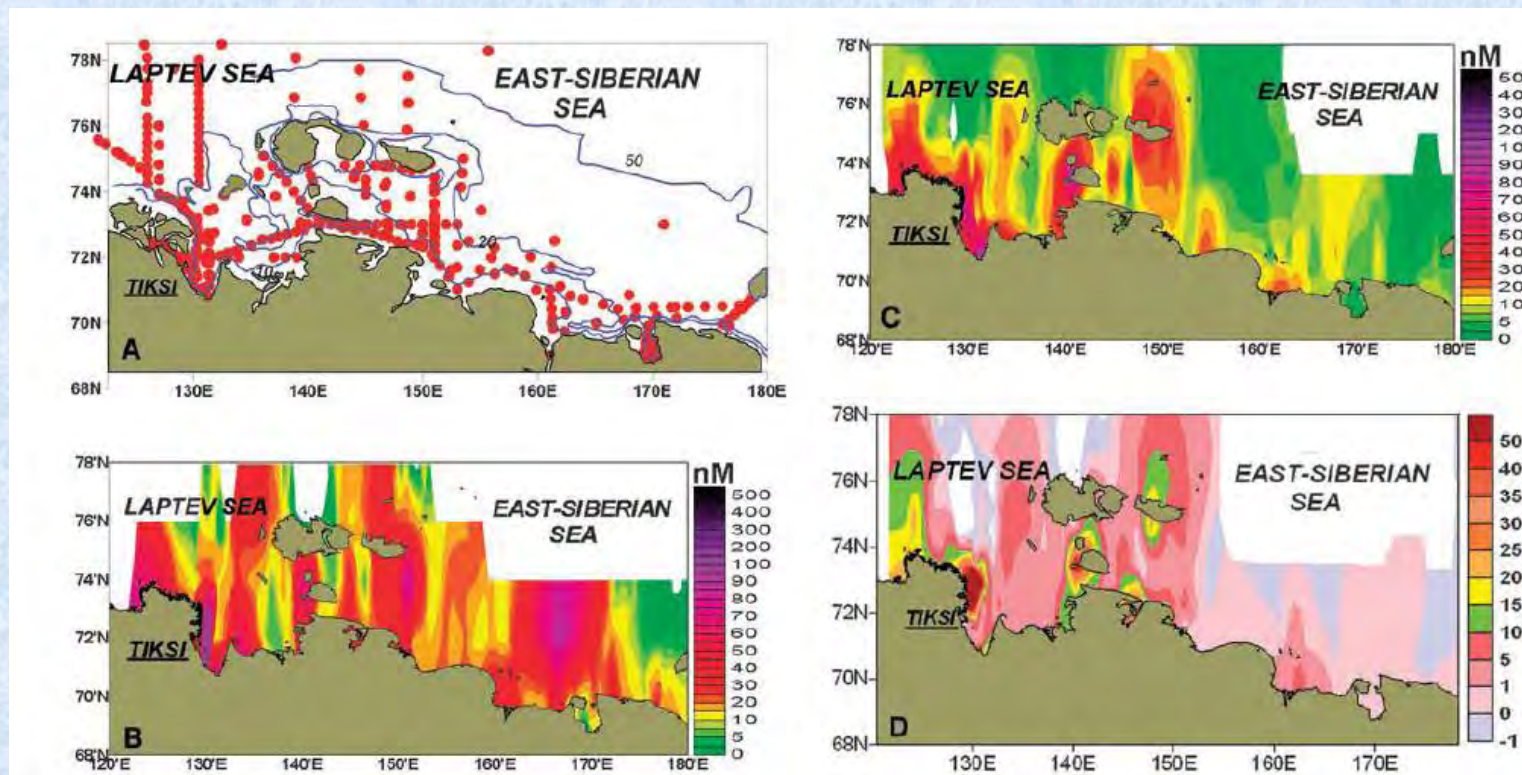


Оценки стабильности запасов субаквальных гидратов

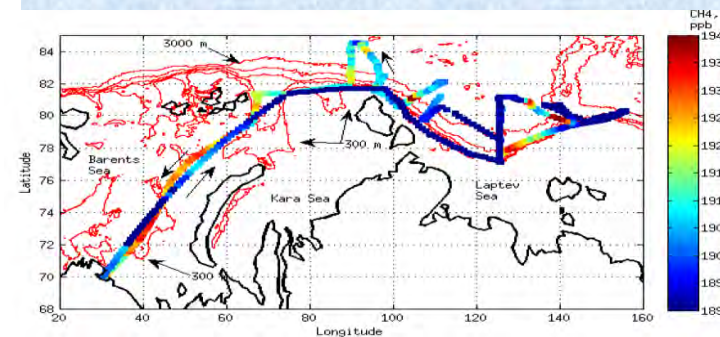
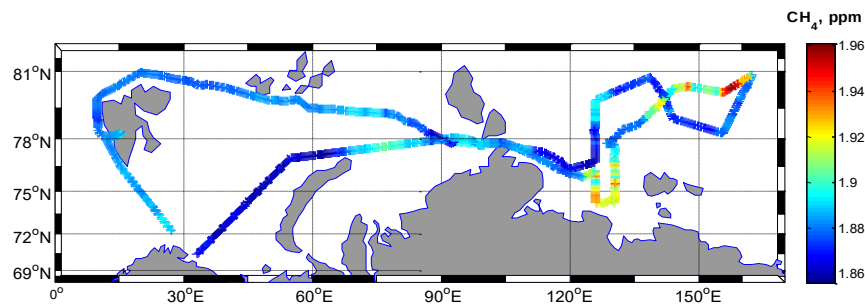
климатическая модель GFDL / модель донных отложений ИФА РАН
сценарий антропогенного воздействия SPRES A2

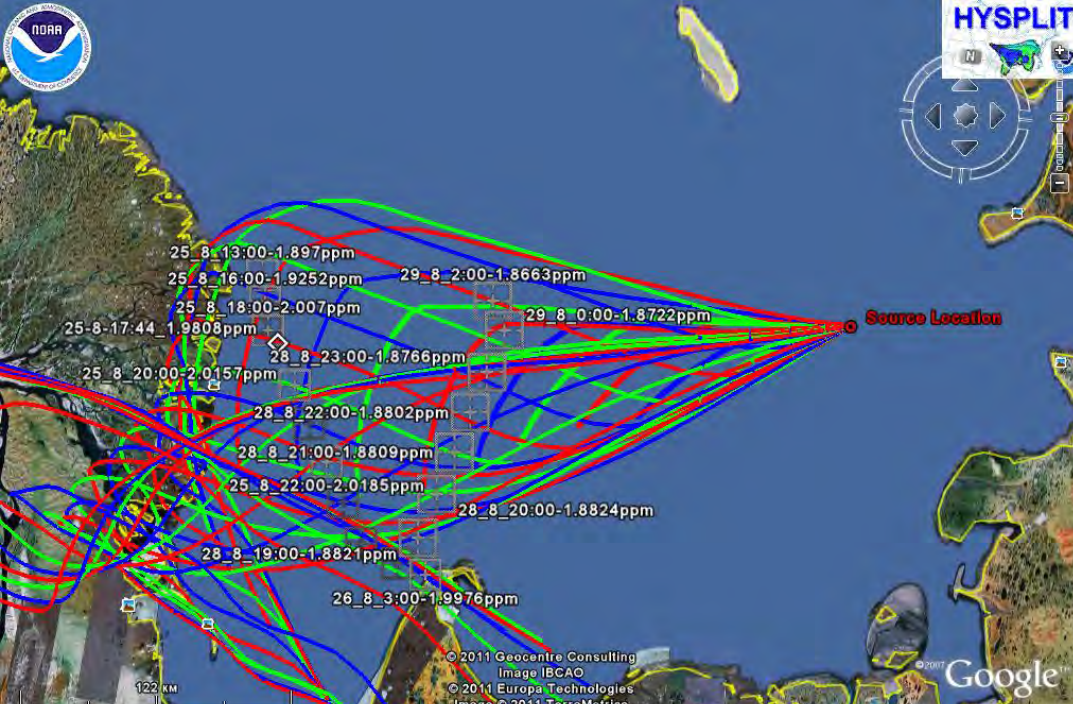
климатическая модель IBM PAN / модель донных отложений ИФА РАН
сценарий антропогенного воздействия SPRES A2



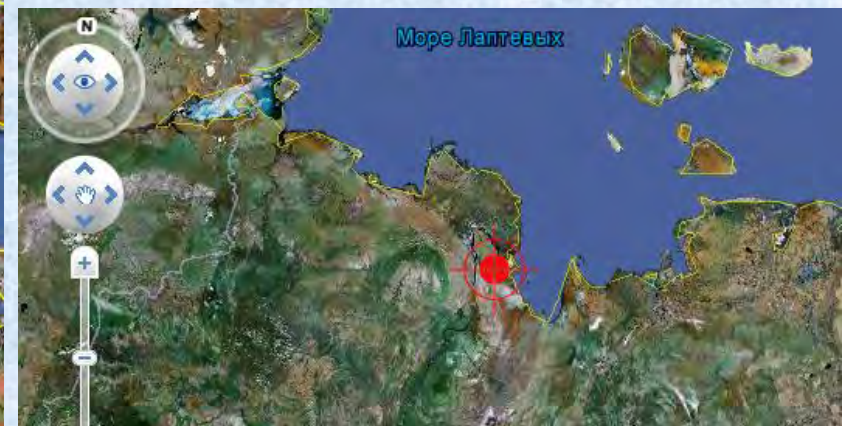
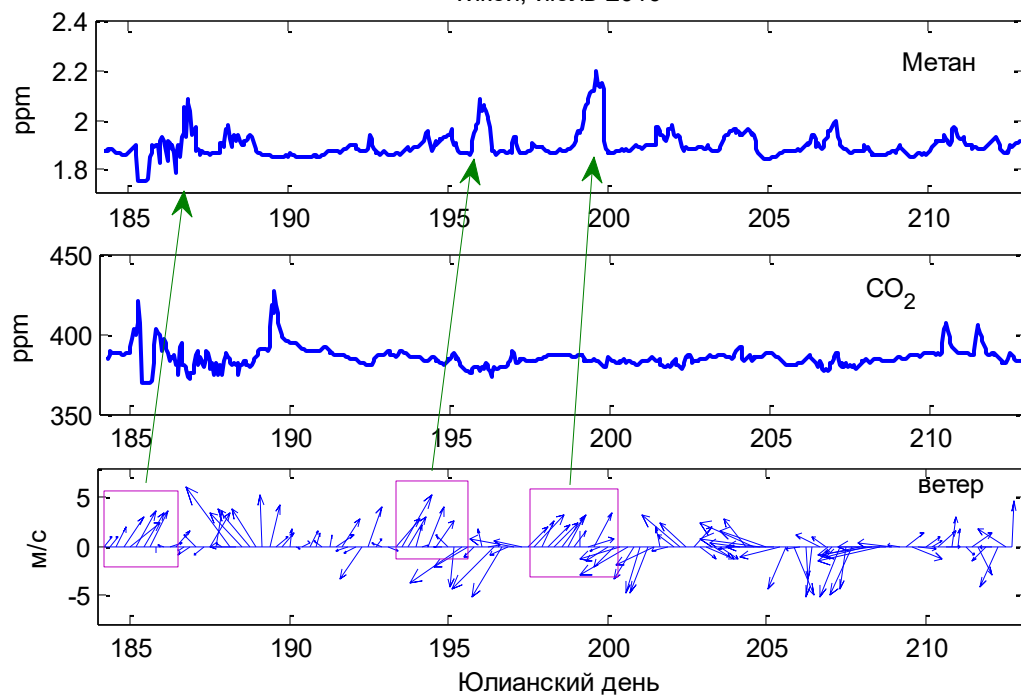


Shakhova et al, 2010





Тикси, июль 2010



Обнаружено увеличение концентраций метана при ветре, направленном со стороны моря. По данным судовых наблюдений было рассчитано вероятное расположение источника метана в море Лаптевых. Наблюдалось регулярное увеличение концентраций метана при направлении ветра со стороны предполагаемого источника. Предполагаемая рассчитанная мощность источника 170 – 380 мг/м²/сут.

Перенос метана к поверхности воды

- При пузырьковом выделении метана, пузырьки достигают поверхности воды только на шельфах, в районах глубин несколько десятков метров, из-за газообмена с окружающей водой
- При механическом воздействии куски метаногидрата могут отрываться от дна и достигать поверхности воды (Brewer et al. 2002)
- Турбулентная диффузия растворенного метана — эффективный механизм переноса, поскольку окисление метана в океане характеризуется временем жизни 50 лет (Rehder et al. 1999)

Аргументы «против»

- Метаногидраты залегают (если залегают!) на глубине 200 м под шельфом, и потепление климата такой глубины достигнет очень нескоро (не в ближайшие ~100 лет) – это показывают данные моделирования
- Выделение метана также приурочено к устьям великих Сибирских рек, так что метан может происходить из разложения выносимого ими материала
- Очень мало данных о ФАКТИЧЕСКОМ распределении метана под океаном

Заключение

Проведенный анализ показывает большую вероятность возрастания частоты повторяемости опасных гидрометеорологических явлений в Арктике при современных изменениях климата. В особенности, при уменьшении площади ледяного покрова. Согласно модельным оценкам, при антропогенных сценариях отступление морского льда в Арктике будет продолжаться и дальше, что может существенно продлить сезон морской навигации и приблизить перспективу использования новых высокоширотных маршрутов для судоходства. При этом климатические изменения несут в себе как негативное, так и позитивное влияние — важен учет и оценка рисков.

Спасибо за внимание!

