



**Экстремальный полярный мезоциклон  
над Чукотским морем  
19-20 октября 2017 г.:  
исследование на основе мультисенсорных  
спутниковых измерений и  
моделирования**

*И.А. Гурвич<sup>1</sup>, М.К. Пичугин<sup>1</sup>, К.С. Хворостовский<sup>2</sup>, К.И. Ярусов<sup>2</sup>*

*(1) Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН  
Владивосток, Россия, [gurvich@poi.dvo.ru](mailto:gurvich@poi.dvo.ru), [pichugin@poi.dvo.ru](mailto:pichugin@poi.dvo.ru)*

*(2) Российский Государственный Гидрометеорологический Университет,  
Санкт--Петербург, Россия, [kirill@rshu.ru](mailto:kirill@rshu.ru), [yarusov.kirill@yandex.ru](mailto:yarusov.kirill@yandex.ru)*

- ❑ **Полярные мезоциклоны (ПМЦ)** – мезомасштабные нефронтальные конвективные вихри, которые возникают в холодном воздухе над относительно теплой морской поверхностью на фоне холодных вторжений в тылу циклонов синоптического масштаба. Типичные горизонтальные размеры ПМЦ 200-600 км, жизненный цикл от нескольких ч до 3 сут, облачная система имеет форму запятой или спирали.
- ❑ ПМЦ в ВЕА менее интенсивны, чем в атлантическом секторе, где ТПО выше из-за отепляющего влияния Гольфстрима. Скорость ветра в них редко превышает 20 м/с. Над морями Чукотским и Бофорта наблюдались ПМЦ со скоростью ветра  $\geq 25$  м/с. Однако из-за отсутствия систематических исследований нет ясного понимания, влияет ли изменение климата Арктики на частоту появления ПМЦ со штормовыми и ураганными ветрами в ее восточном регионе.
- ❑ Синергетический подход, который базируется на комплексном анализе данных мультисенсорных спутниковых измерений, реанализов высокого разрешения и моделирования в сочетании с анализом синоптического процесса. позволяет компенсировать слабую освещенность восточного сектора Арктики стандартными гидрометеорологическими измерениями.

Достоверность статистических оценок частоты появления экстремальных ПМЦ в восточном секторе Евразийской Арктики зависит от точности их идентификации, определения положения центра и адекватного воспроизведения высоких скоростей ветра ( $\geq 25$  м/с).

Решение перечисленных задач является основной целью и первым этапом исследования, которое направлено на дальнейшее получение статистических оценок частоты появления экстремальных ПМЦ.

### Задачи:

идентификация, эволюция и определение центра ПМЦ;

сравнительный анализ оценок высоких скоростей ветра ( $\geq 25$  м/с).

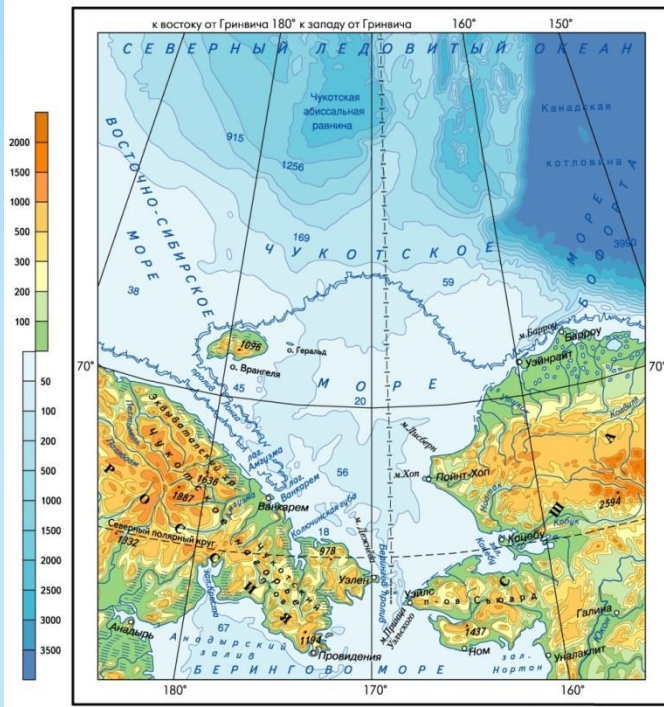
Для решения поставленных задач использовались данные мультисенсорных спутниковых измерений, реанализ ERA5, оперативная прогностическая модель CFSv2 и мезомасштабная численная модель прогноза погоды WRF.

Для анализа был выбран ПМЦ над Чукотским морем 19-20 октября 2017 г. со скоростью ветра на пике интенсивности  $W \geq 25$  м/с, обеспеченный мультисенсорными спутниковыми измерениями.

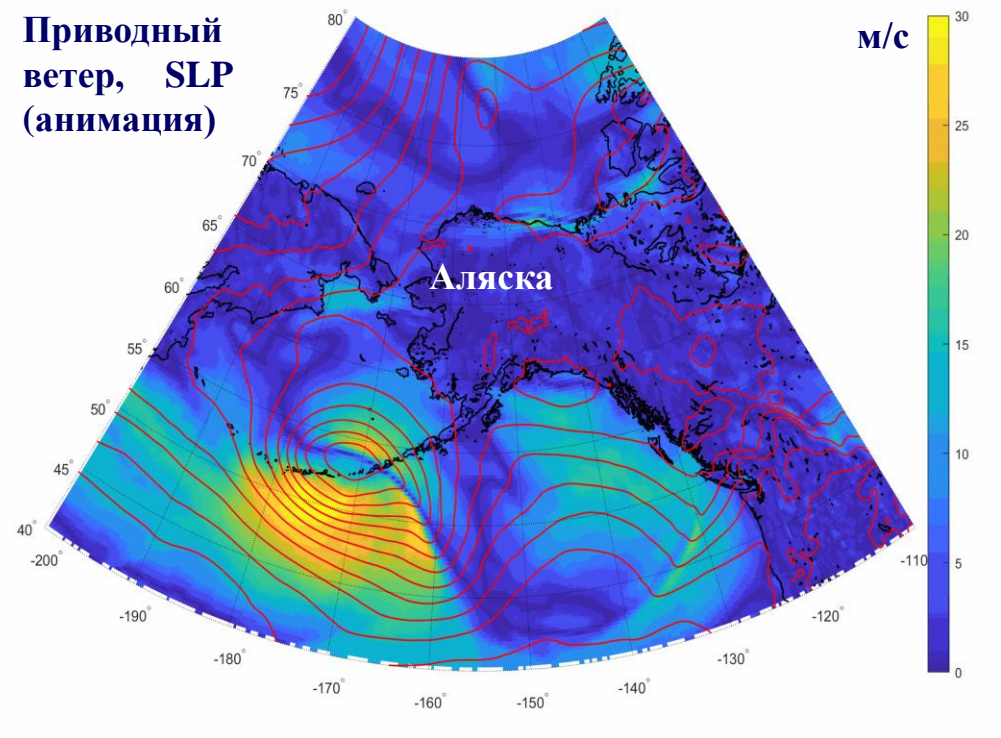
## Данные и методы

- видимые и ИК изображения облачности по данным спектрорадиометра **MODIS** (спутники **Aqua/Terra**) – идентификация, траектории ПМЦ;
- поля приводного ветра  **$W$**  по измерениям скаттерометра **ASCAT** (спутники **MetOp-A/B**) и микроволнового радиометра **AMSR2** (спутник **GCOM-W1**) – оценка интенсивности ПМЦ;
- поля яркостных температур на частоте 89 ГГц, горизонтальной поляризации  **$T_{я}^{\Gamma}(89)$**  по данным **AMSR2** – характеристики атмосферного процесса;
- поля интегрального паросодержания атмосферы  **$V$**  и водозапаса облаков  **$Q$**  по данным **AMSR2**, восстановленные алгоритмами, основанными на физическом моделировании радиояркостных температур уходящего излучения системы океан-атмосфера и их последующем обращении в геофизические параметры при помощи нейронных сетей – гидрометеорологические характеристики ПМЦ;
- вертикальное сечение ПМЦ по данным радиолокатора миллиметрового диапазона **CPR** (**Cloud Profiling Radar**) на спутнике **CloudSat** – вертикальный профиль радиолокационной отражаемости облачности – структура облачной системы;
- синоптические карты приземного анализа и барической топографии (сайт <http://nomads.ncdc.noaa.gov>) – анализ синоптической ситуации;
- поля вектора ветра на высоте 10 м и атмосферного давления на уровне моря по данным реанализа **ERA5** (на сетке  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ) и оперативной прогностической модели **CFSv2** (на сетке  $0.2^{\circ} \times 0.2^{\circ}$ ) – сравнение с данными **AMSR2**;
- мезомасштабная численная модель прогноза погоды **WRF** с разрешением 5 км и почасовым шагом – моделирование эволюции ПМЦ, сравнение с данными спутниковых измерений и реанализа.

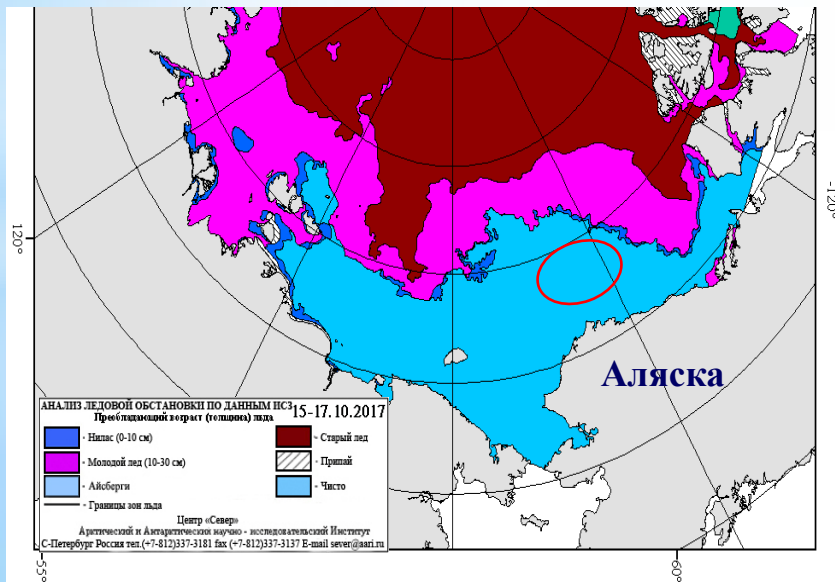
# Мезомасштабный циклогенез над морями Бофорта и Чукотским 17-23 октября 2017 г.



Приводный ветер, SLP (анимация)

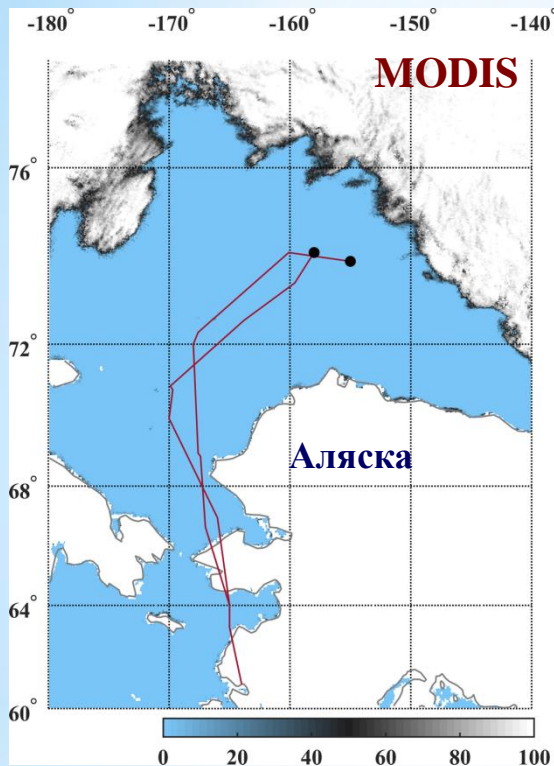


CFSv2 07 Гр. 17 окт. – 23 Гр. 22 окт. 2017 г.



По данным MODIS, в период 17-22 октября 2017 г. над морями Бофорта и Чукотским наблюдалось несколько ПМЦ различной интенсивности. В одном из них **19-20 октября** скорость ветра превысила **25 м/с**.

# Траектория ПМЦ по данным MODIS и WRF

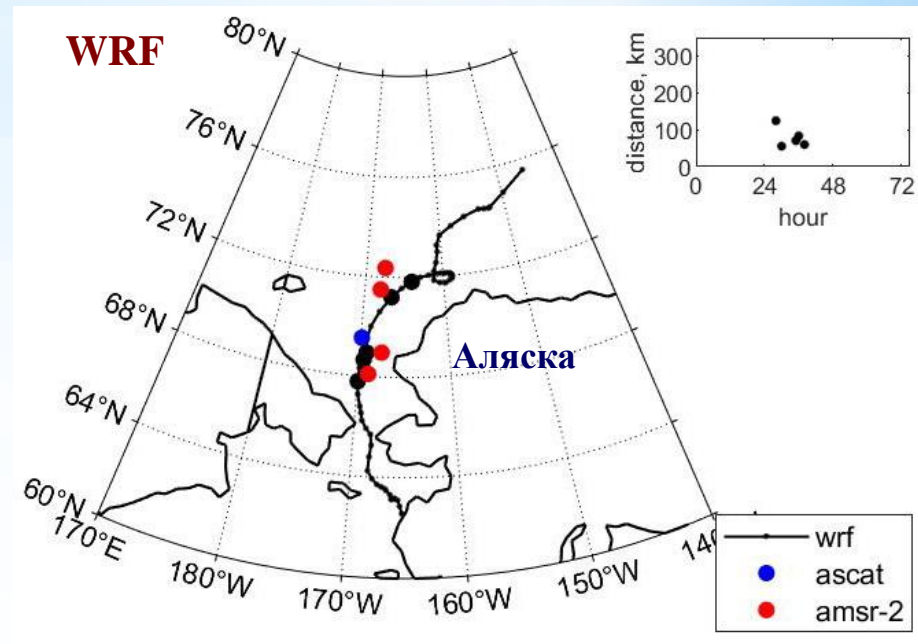


19 окт.  
координаты в  
14:30 Гр. по  
данным MODIS  
и в 14:34 Гр. по  
данным CPR  
практически  
совпадают.

Шкала –  
градации  
сплоченности  
льда в %

23:10 Гр. 18 окт. – 07:45 Гр. 22 окт. 2017 г.

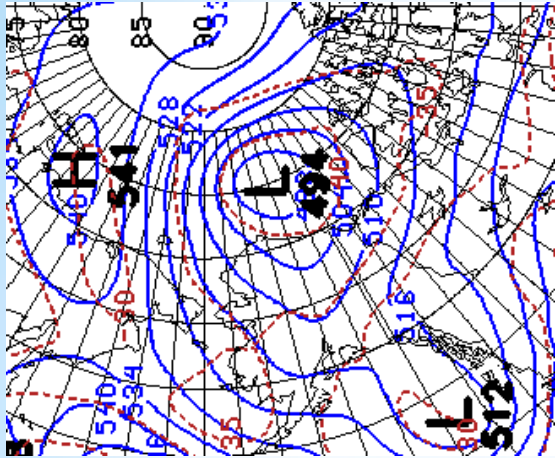
Жизненный цикл ПМЦ был длиннее типичного для полярных мезоциклонов ( $\approx 3$  суток) и составлял около 5 сут. За это время ПМЦ проделал путь от Чукотского поднятия до Бристольского залива, где заполнился 24 октября.



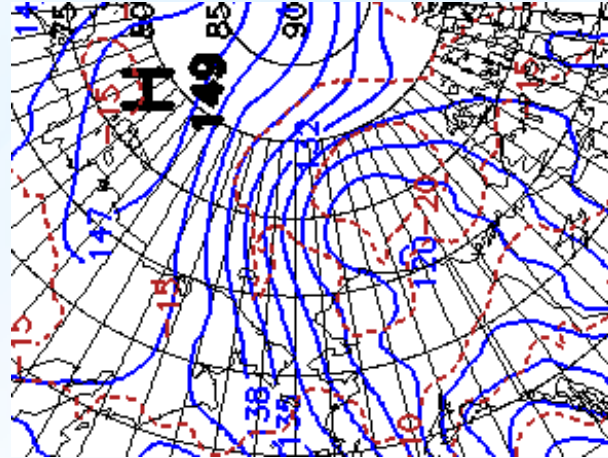
12 Гр. 18 октября – 00 Гр. 22 октября 2017 г.

На вставке – расстояния между центром ПМЦ по спутниковым данным (цветные точки) и синхронным им результатам моделирования (черные точки). По спутниковым данным центр ПМЦ определялся визуально по полю скорости ветра, для результатов моделирования – по минимальному значению атмосферного давления.

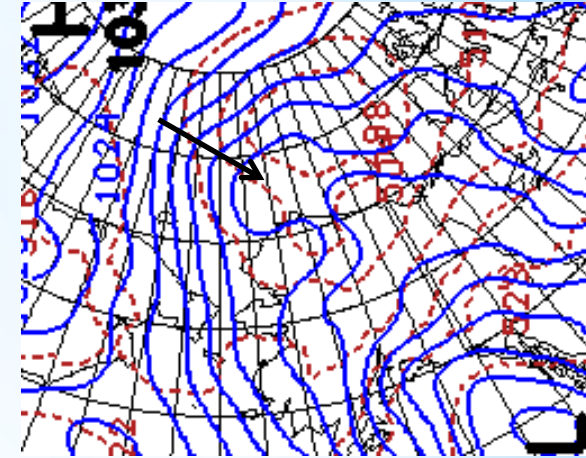
# Формирование двух волновых ПМЦ, начальная стадия развития



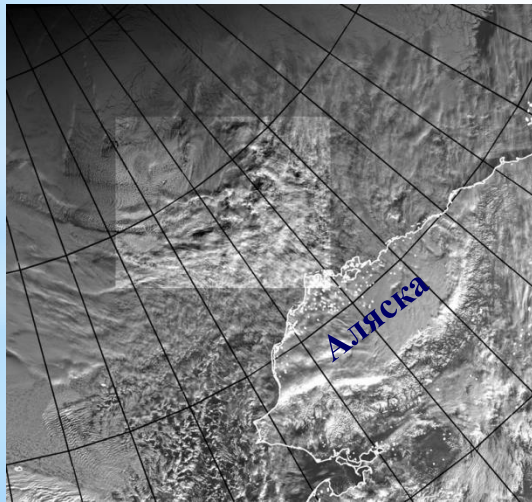
Карта AT500 в 00:00 Гр. 19 окт.  
Очаг холода очерчен изотермой  $-40^{\circ}\text{C}$



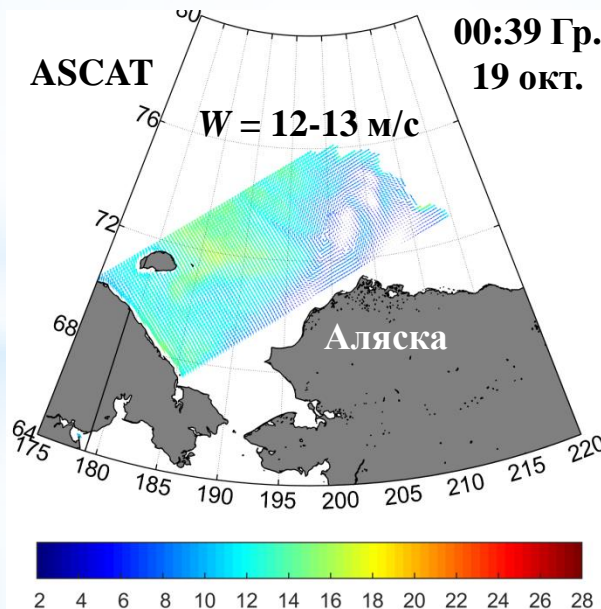
Карта AT850 в 00:00 Гр. 19 окт.



Карта приземного анализа  
и OT500/1000 в 00:00 Гр. 19 окт.



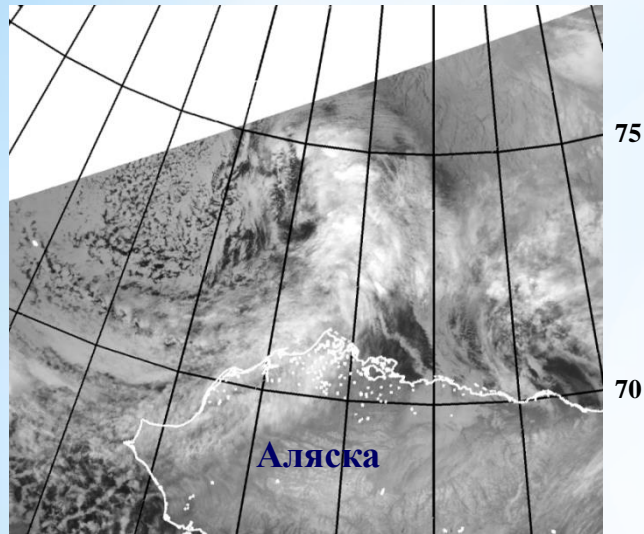
Видимое изображение Terra  
MODIS в 23:10 Гр. 18 окт.



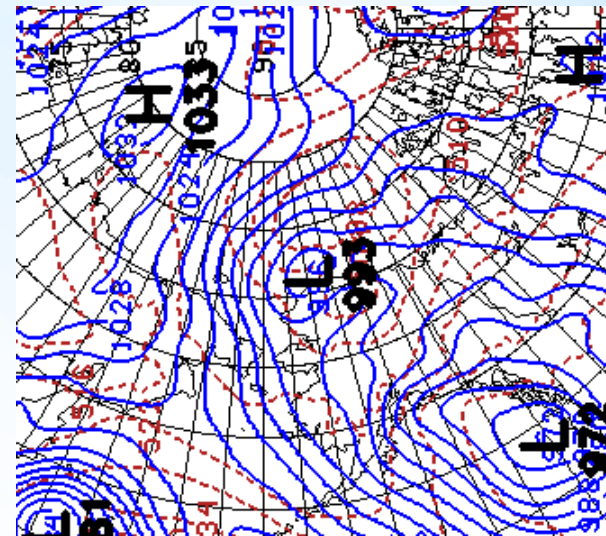
## Условия для развития конвективного вихря:

- холодная высотная депрессия;
- $\Delta T = T_b - T_{500} \approx -40^{\circ}$ ;
- адвекция холода из приполюсных районов;
- бароклинная неустойчивость нижней тропосферы в прикромочных зонах

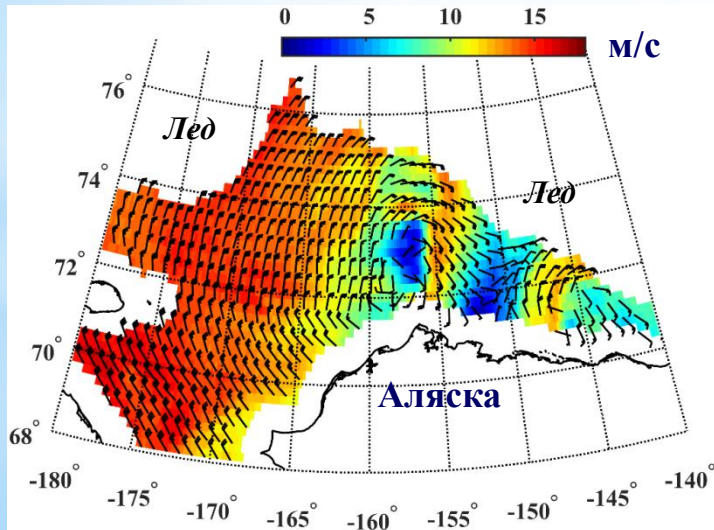
## Развивающийся ПМЦ: эволюция за 8 ч



-170 -160 -150  
ИК изображение Terra MODIS  
в 07:15 UTC 19 окт. 2017



Карта приземного анализа  
и OT500/1000 в 06:00 Гр. 19 окт.

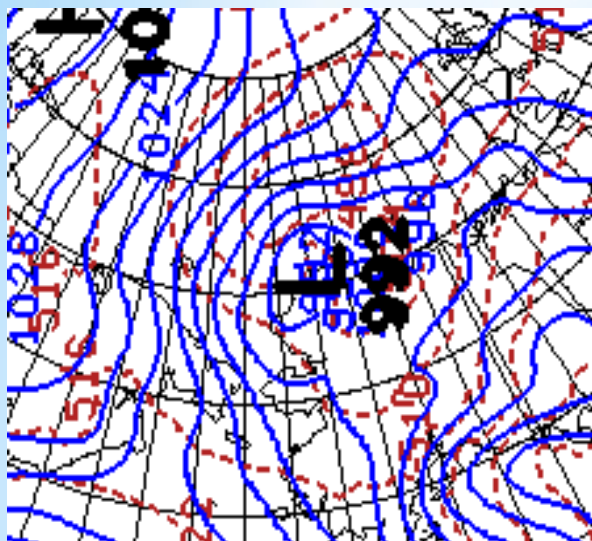


Поле вектора ветра по данным ASCAT в  
04:00-06:30 UTC 19 окт. 2017

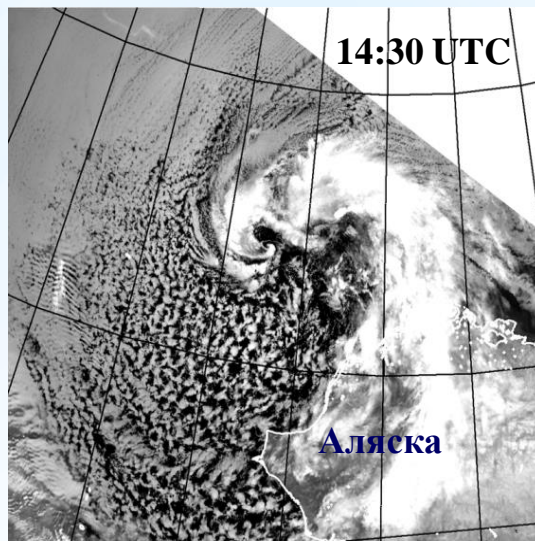
ПМЦ появился на карте приземного анализа, очерчен одной замкнутой изобарой. В отличие от данных MODIS, в поле вектора ветра по данным скаттерометра отображен один мезовихрь, что, вероятно, связано с недостаточностью пространственного разрешения ASCAT.



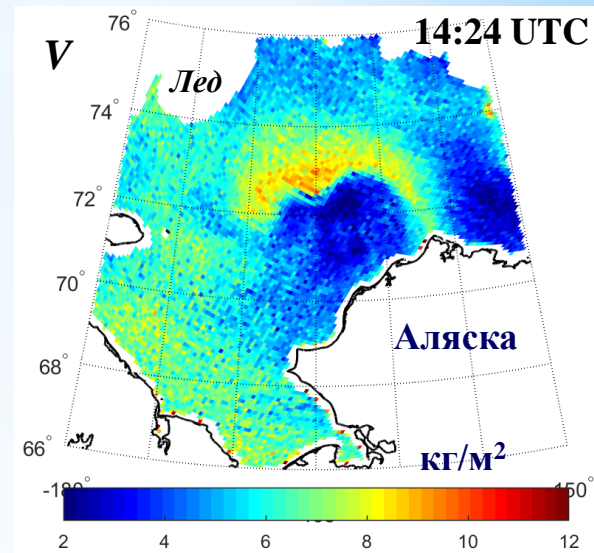
# Стадия максимального развития ПМЦ, пик интенсивности: эволюция за 7 ч



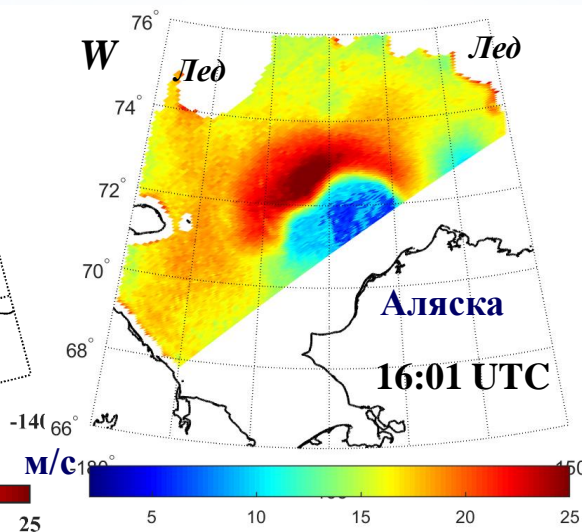
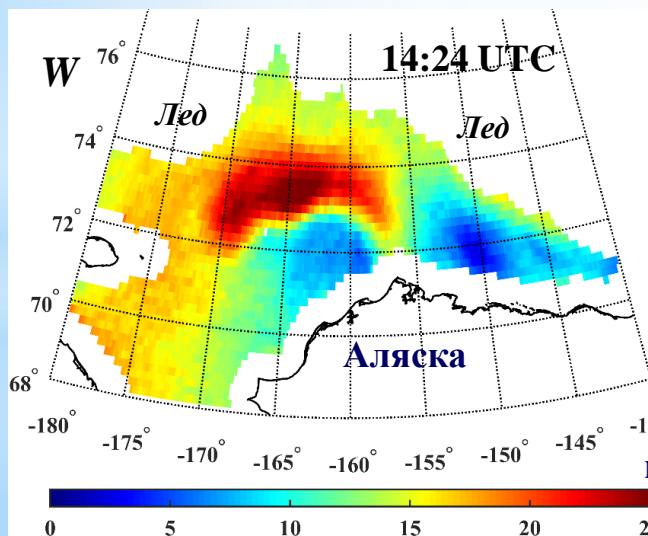
Карта приземного анализа и OT500/1000 в 12:00 Гр. 19 окт.



ИК изображение Aqua MODIS в 14:30 Гр. 19 окт.



Поле интегрального паросодержания атмосферы по данным AMSR2 в 14:24 Гр. 19 окт. 2017



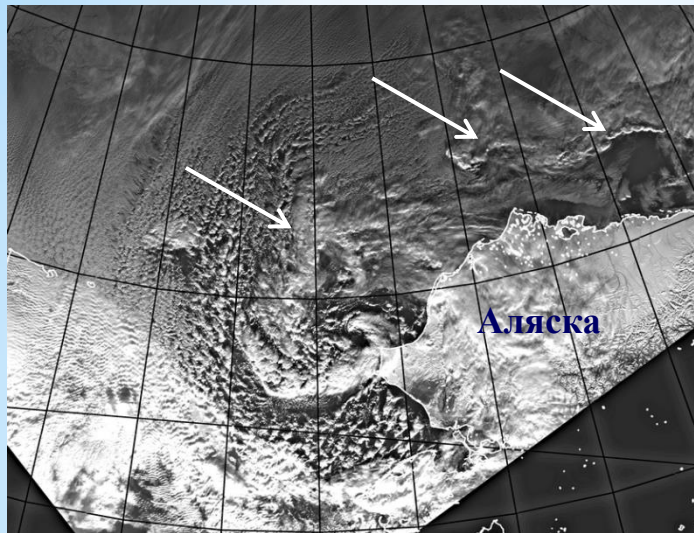
Поле скорости приводного ветра по данным AMSR2 в 14:24 UTC (слева) и в 16:01 UTC (справа) 19 окт. 2017

**$W > 25$  м/с**

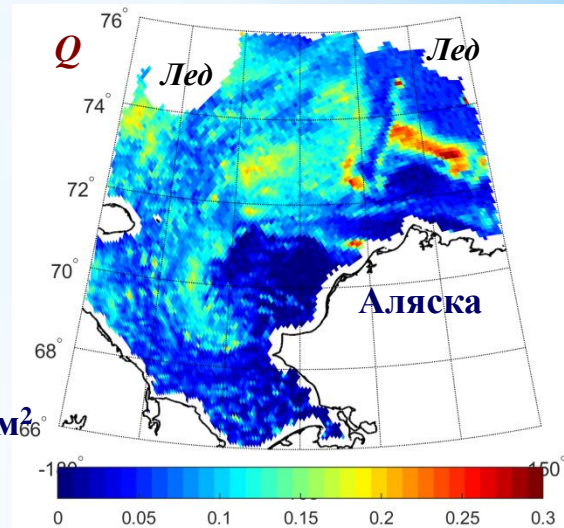
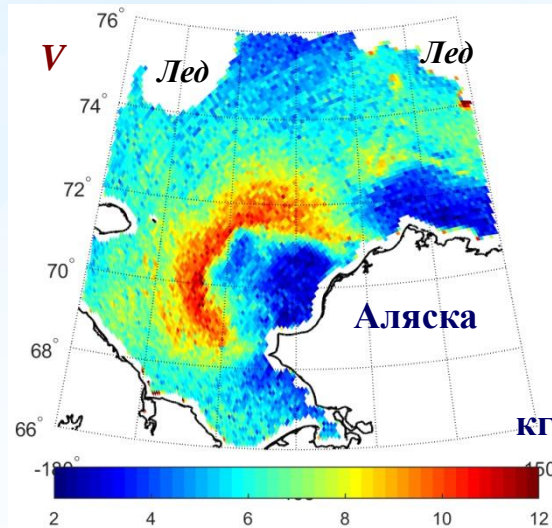
В полях облачности, водяного пара и, менее отчетливо, приводного ветра видна структура из двух мезовихрей.

Визуально площадь с  $W \geq 25$  м/с за полтора часа уменьшилась.

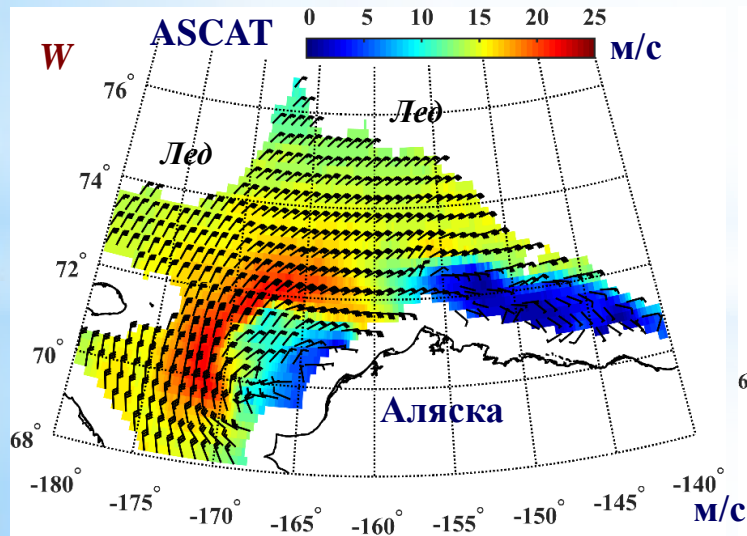
# Стадия максимального развития ПМЦ, начало ослабления: эволюция за 8 ч



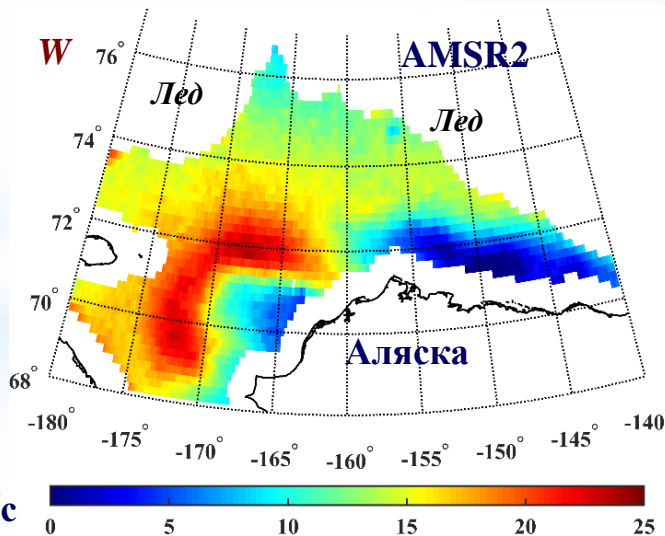
Видимое изображение Aqua MODIS в 22:35 UTC 19 окт.



Поля интегрального паросодержания атмосферы (слева) и водозапаса облаков (справа) по данным AMSR2 в 22:29 UTC 19 окт.



Поле вектора приводного ветра по данным ASCAT в 20:55-22:35 UTC 19 окт.



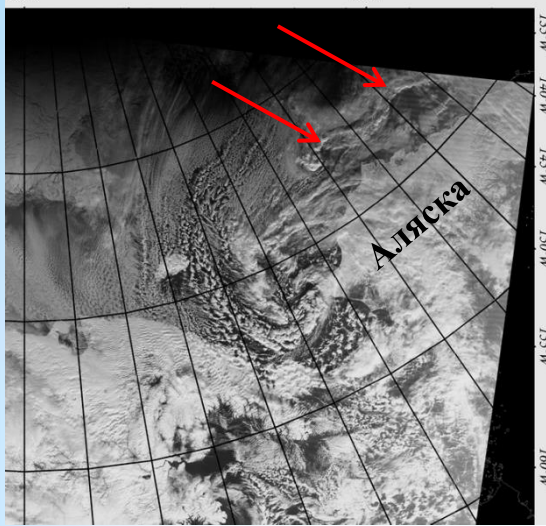
Поле приводного ветра по данным AMSR2 в 22:29 UTC 19 окт.

Начало ослабления ПМЦ (сохраняются 2 вихря)

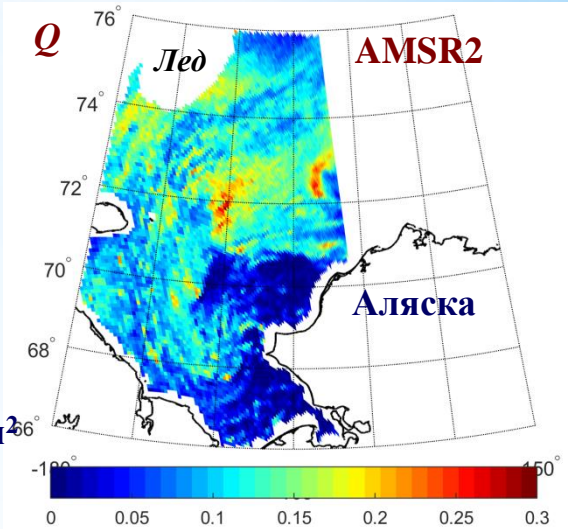
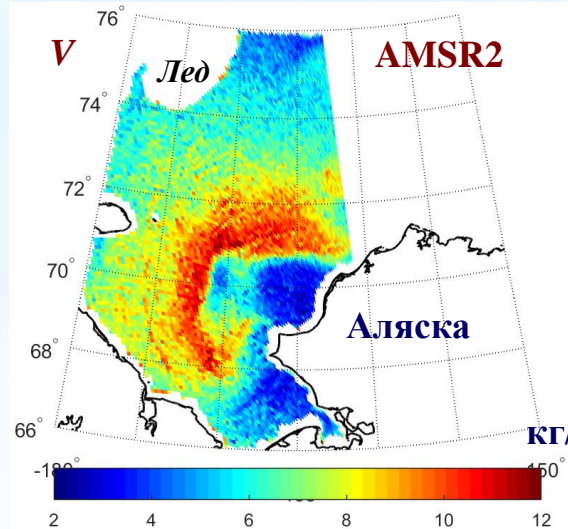
$W \approx 20 - 23$  м/с, местами до 25 м/с

Развитие новых волновых мезовихрей над морем Бофорта

# Уменьшение интенсивности ПМЦ: эволюция за 1 ч 20 мин

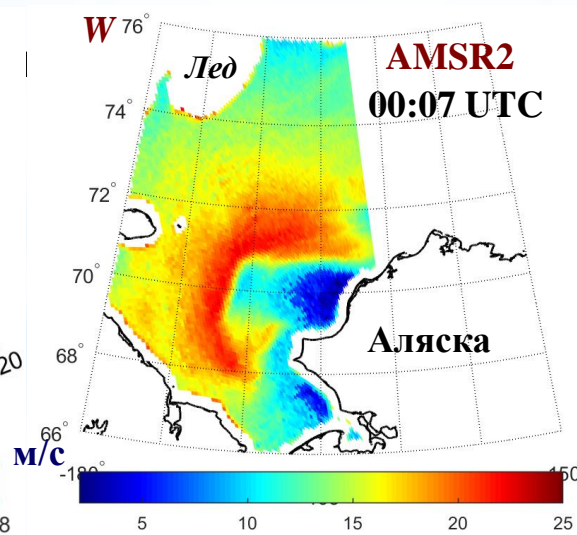
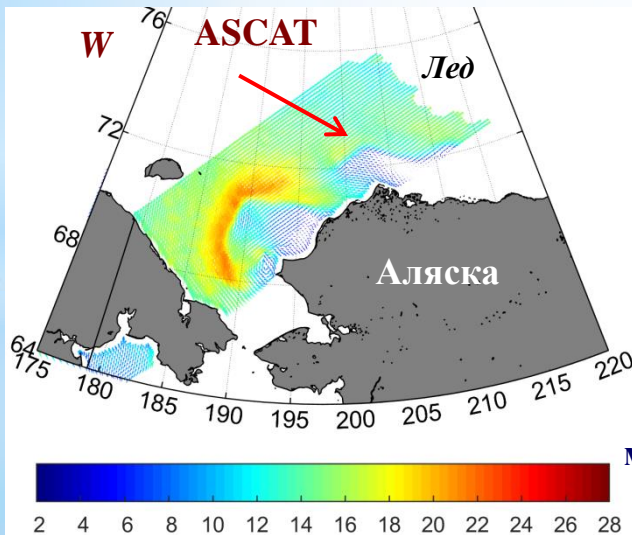


Видимое изображение Terra MODIS в 23:55 Гр. 19 окт. 2017 г.



Поля водяного пара (слева) и капельной влаги (справа) по данным AMSR2 в 00:08 UTC 20 окт. (справа) 2017 г.

$W \approx 20 - 22$  м/с



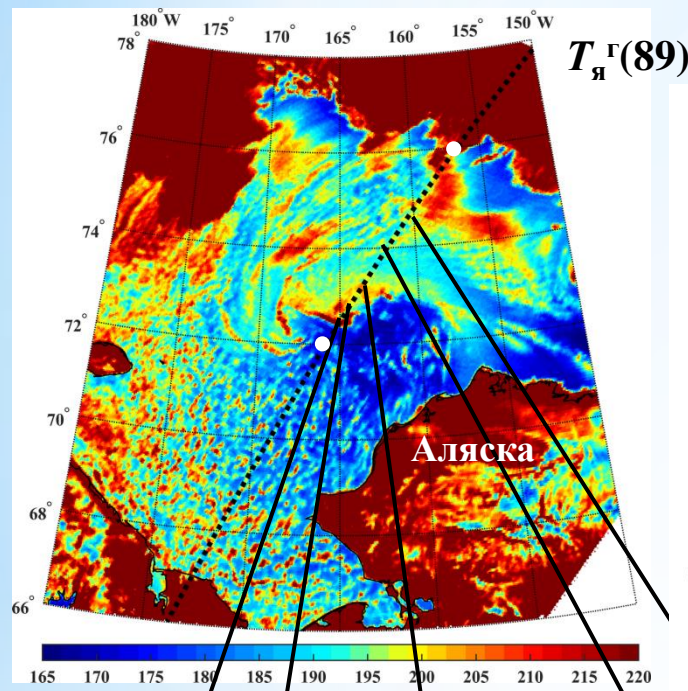
Поля приводного ветра по данным ASCAT в 00:18 UTC 19 окт. (слева) и AMSR2 в 00:08 UTC 20 окт. (справа) 2017 г.

Интенсивность ПМЦ уменьшается, вихревая структура облачной системы начинает размываться.

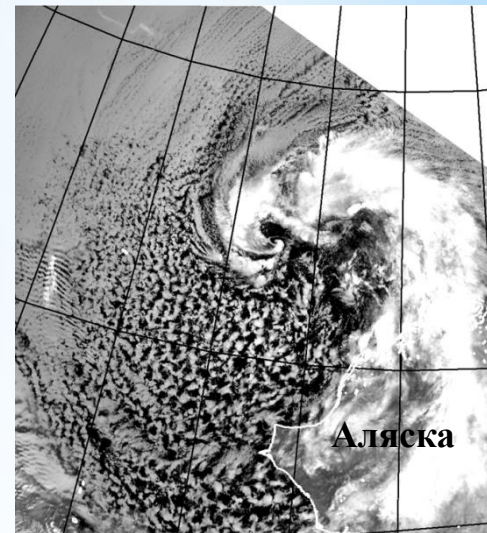
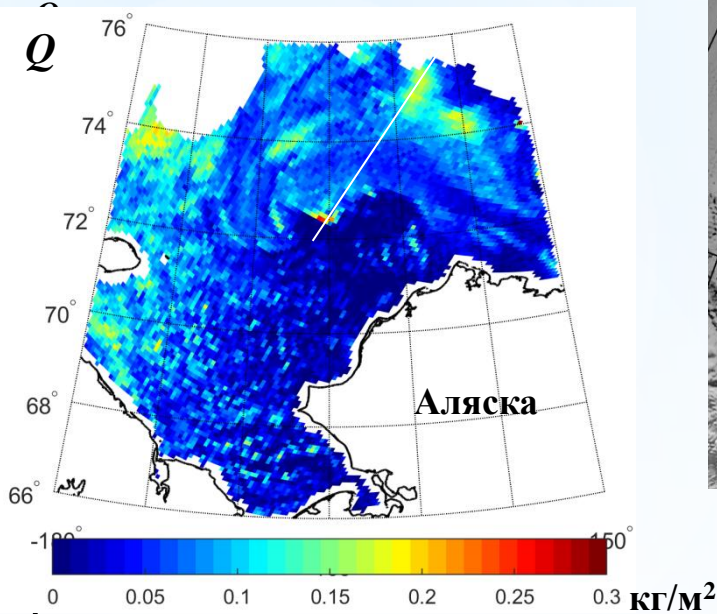
Сохраняются два мезовихря в полях облачности и гидрометеорологических параметров.

Видны два развивающихся волновых мезовихря над морем Бофорта.

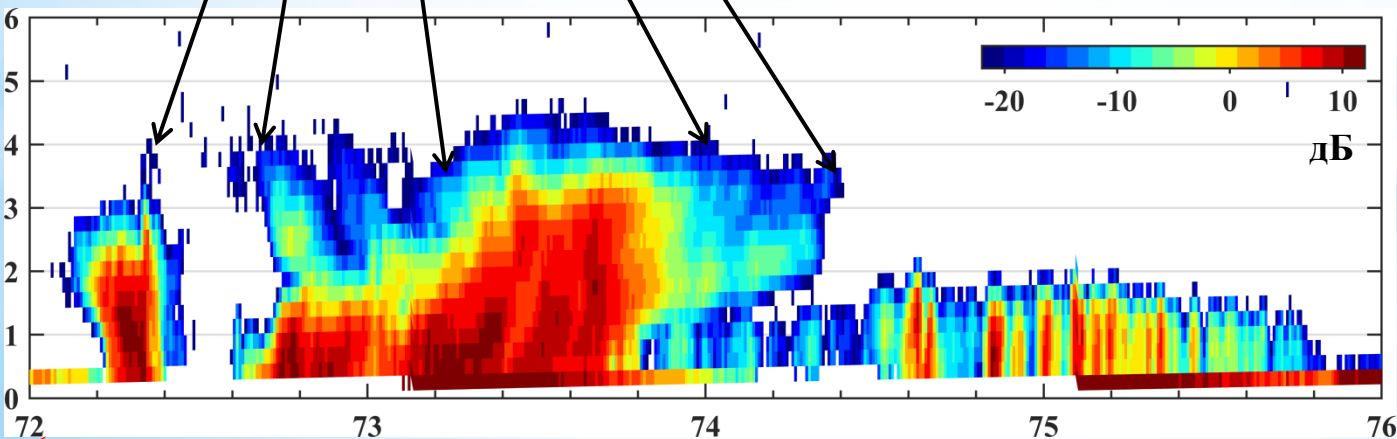
**Вертикальный профиль РЛ-отражаемости облачности ПМЦ на пике интенсивности по данным CPR (спутник CloudSat), поля яркостной температуры на частоте 89 ГГц, на горизонтальной поляризации  $T_{я\Gamma}(89)$  и капельной влаги  $Q$  по данным AMSR2**



14:24 Гр. 19 окт.



ИК изображение Aqua MODIS в 14:30 Гр.



73.4-73.8°с.ш.:  
 $S_b, C_u \text{ cong}$   
 $T_{я} = 193-197 \text{ К}$   
 $Q \approx 0.05 \text{ кг/м}^2$   
 $РЛ = 6- \geq 10 \text{ дБ}$

Повышенная РЛ-отражаемость в сочетании с низким водозапасом – в облачности преобладают ледяные кристаллы.

Ю

CPR 14:34 Гр. 19 окт.

С

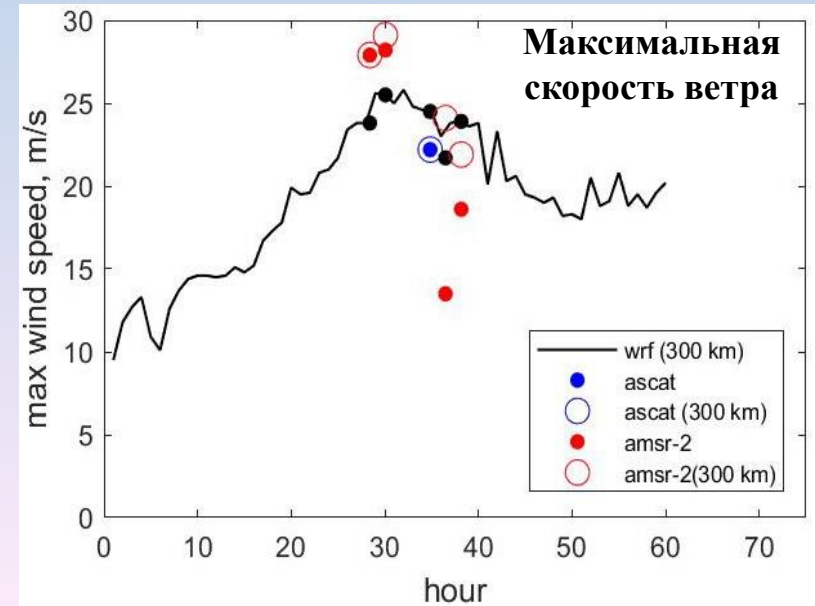
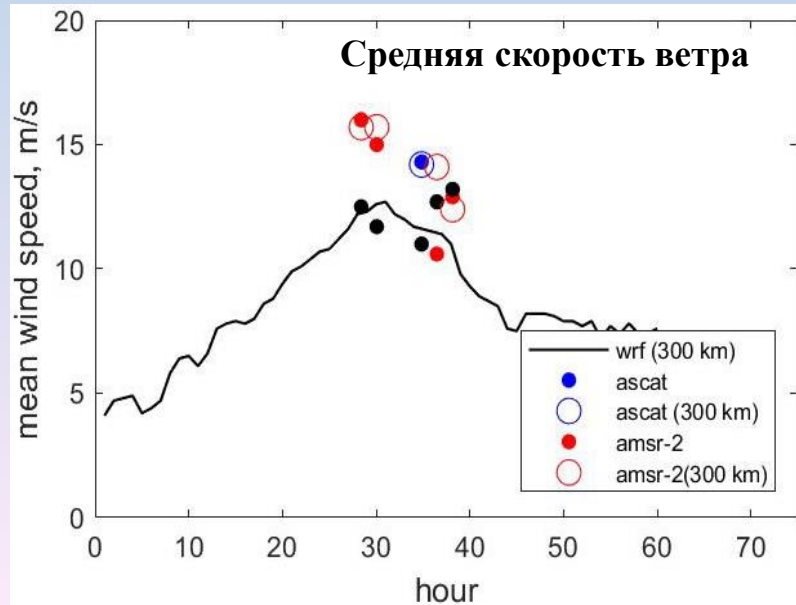
# Численные эксперименты для ПМЦ за период 3.5 сут – 12 ч 18 окт. – 00 ч 22 окт. (с момента возникновения до выхода к побережью Аляски в ночь с 20 на 21 октября). Пространственное разрешение модели 5 км, шаг 1 ч.



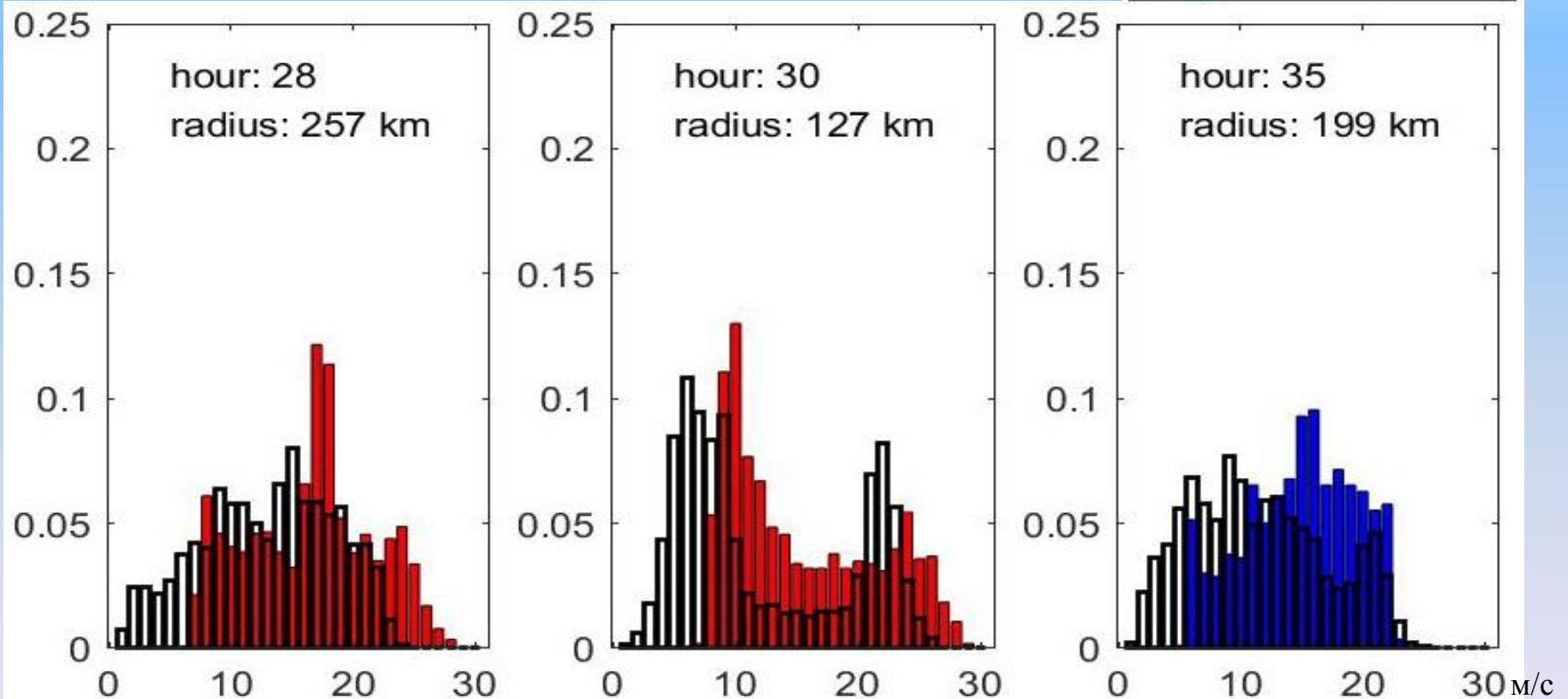
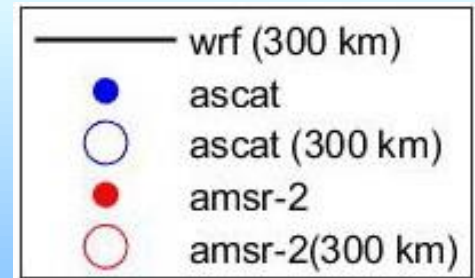
**Начальные и граничные условия по данным реанализа:**

- ERA-Interim (пространственное разрешение  $0.75 \times 0.75^\circ$ , временное разрешение 6 ч);
- NCEP (пространственное разрешение  $1 \times 1^\circ$ , временное разрешение 6 ч).

Небольшой радиус, ограниченный полосой обзора спутника для двух снимков, является причиной значительной разницы между максимальными значениями скорости ветра по спутниковым и модельным данным (заштрихованные кружки), т.к. максимальная скорость ветра в пределах малого радиуса носит более случайный характер.

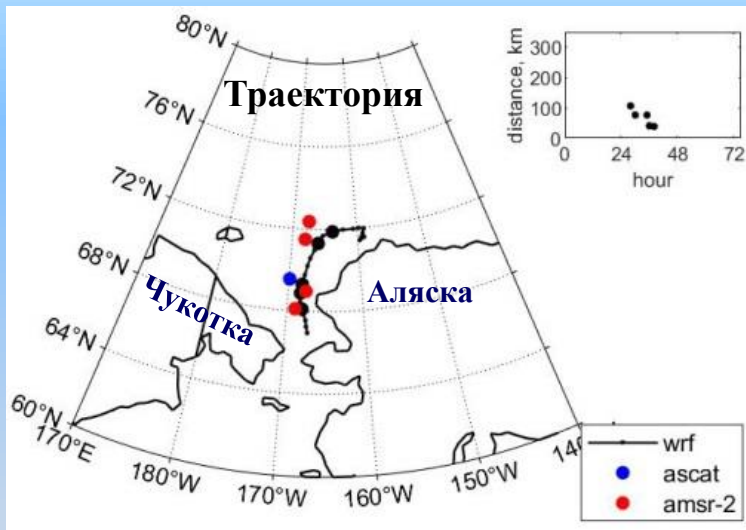


# Распределение повторяемости скорости ветра в ПМЦ по расчетам WRF, данным ASCAT и AMSR2 для интервала 3.5 сут с шагом 1 м/с

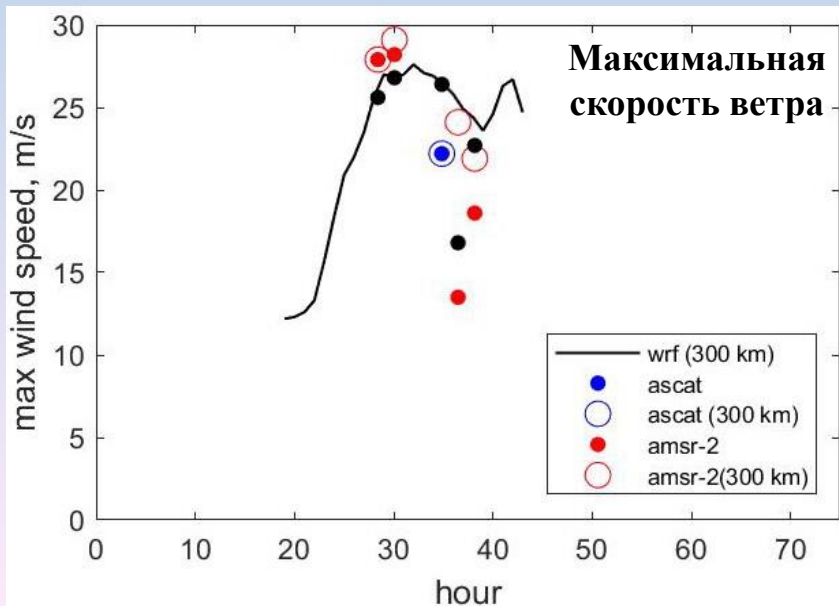
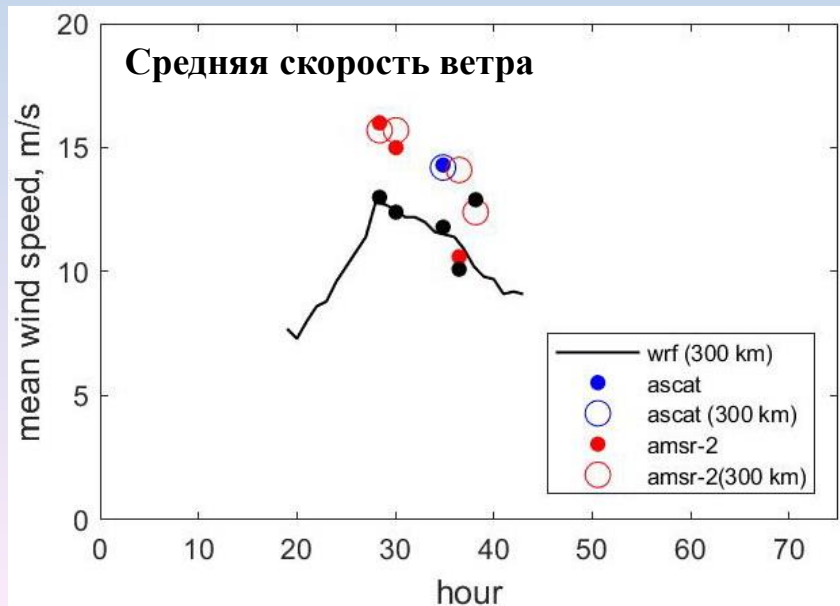


Сравнение распределений дано для первых трех (из пяти) спутниковых снимков, так как для двух последних снимков радиусы ПМЦ, ограниченные полосой обзора спутника, малы (26 км и 73 км).

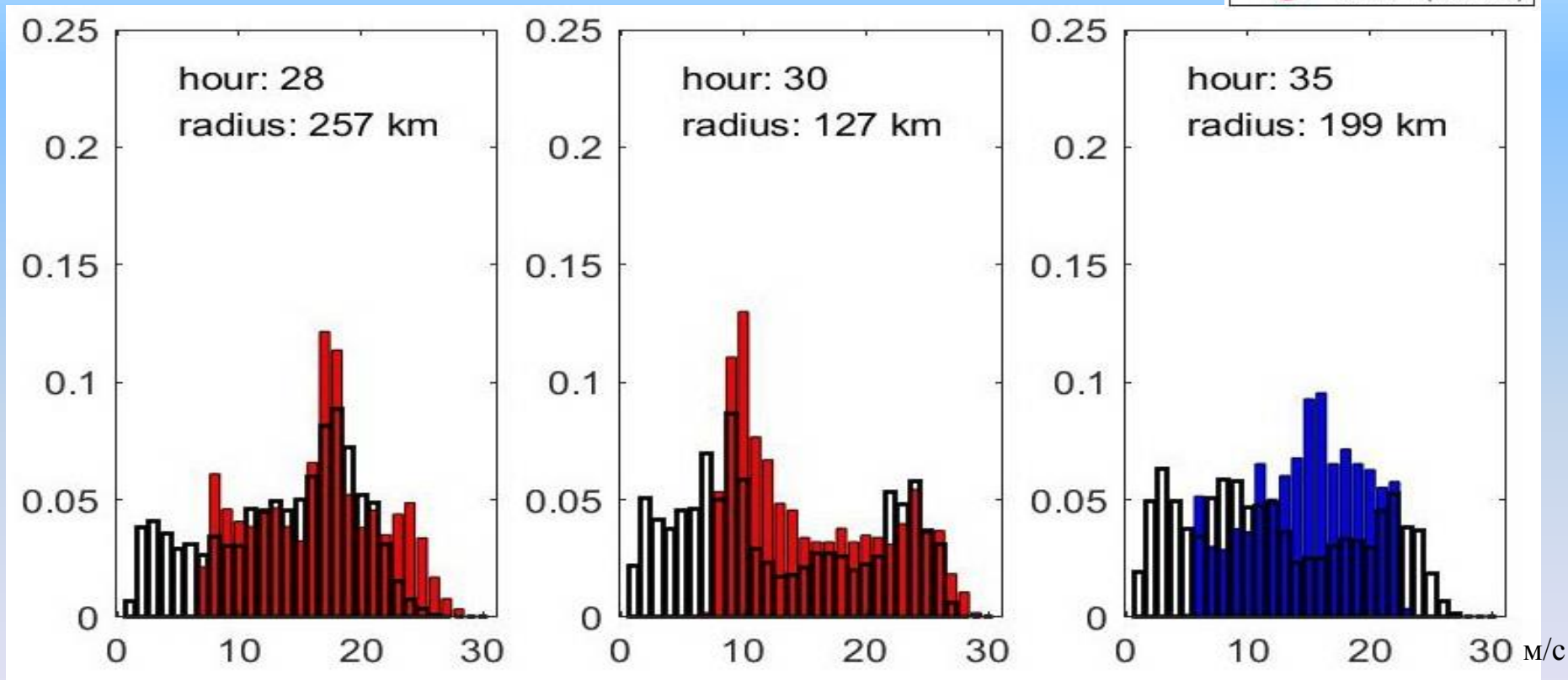
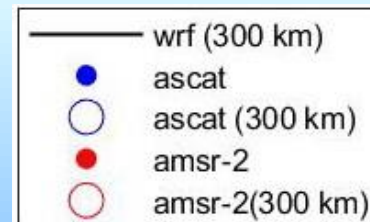
# Численные эксперименты для ПМЦ в стадии максимального развития: период 1 сут – 06 ч 19 октября - 06 ч 20 октября, пространственное разрешение модели 5 км, шаг 1 ч



Среднее и максимальное значения скорости ветра вычислялись в пределах двух радиусов относительно центра ПМЦ. Первый соответствует радиусу ПМЦ – определялся по данным MODIS (300 км - черная линия для модельных данных и незаштрихованные круги для спутниковых данных). Если спутниковые данные (ASCAT, AMSR2) охватывали ПЦ не полностью, для более корректного сравнения спутниковых и модельных данных средняя и максимальная скорость ветра вычислялись для радиуса, ограниченного полосой обзора каждого спутника. На рисунках – заштрихованные черные (модельные данные) и цветные (спутниковые данные) кружки.



## Распределение повторяемости скорости ветра в ПМЦ в стадии максимального развития по расчетам WRF, данным ASCAT и AMSR2 для интервала 1 сут с шагом 1



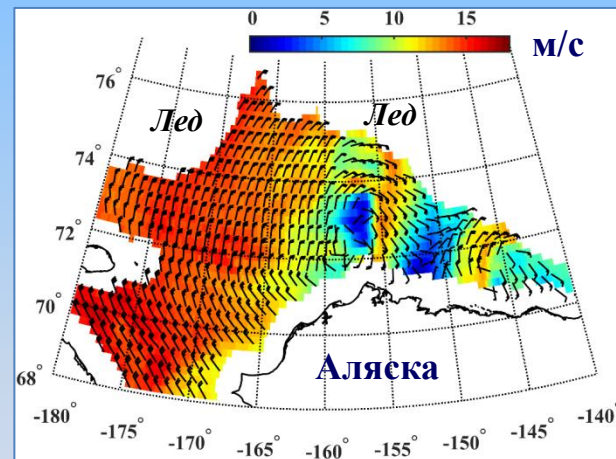
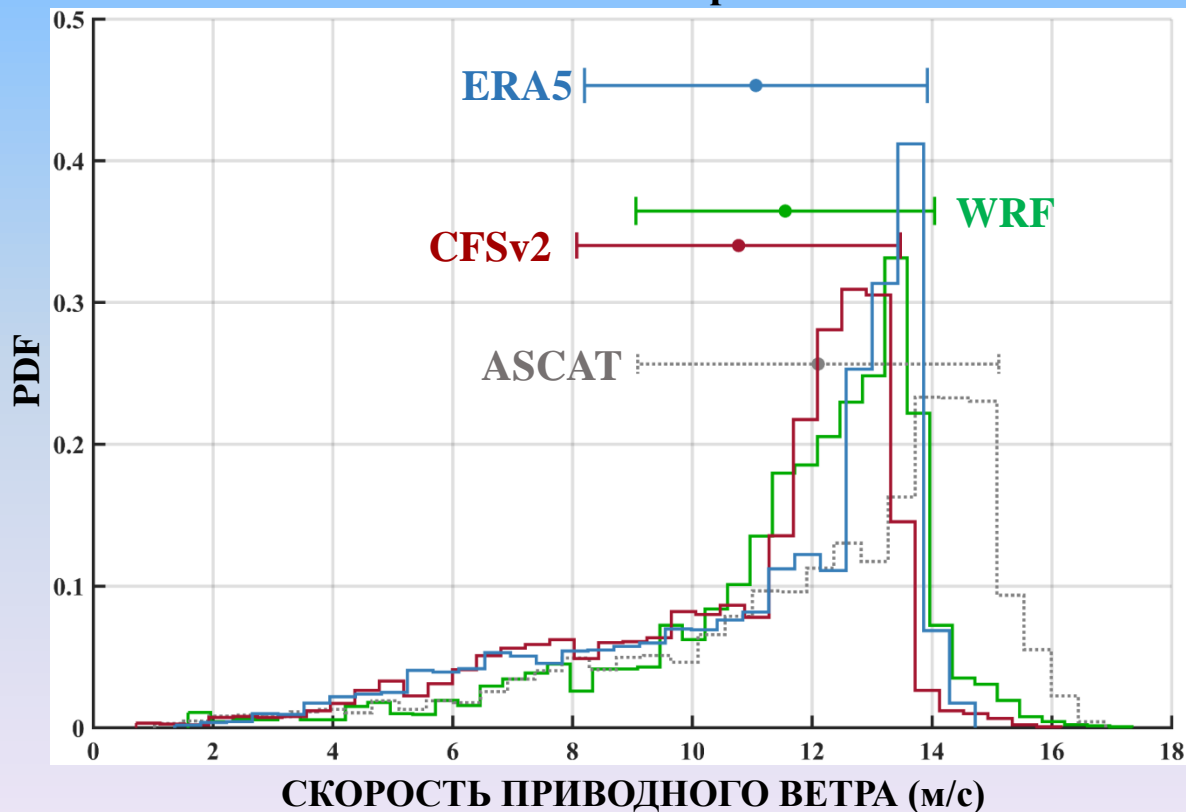
Точность воспроизведения ПМЦ понижается с удалением от начального момента расчета. Поэтому численные эксперименты для суточного периода, который соответствует зрелой стадии циклона, должны были бы воспроизвести скорость ветра более точно, чем для 3.5 сут. Однако для данного случая результаты практически одинаковы.



# Плотность пространственного распределение скорости ветра у морской поверхности по спутниковым и модельным данным над морями Чукотским и Бофорта (68°с.ш. – 77°с.ш., 180°з.д. – 140°з.д.).

## Развивающийся ПМЦ

05:00 UTC 19 октября 2017 г.



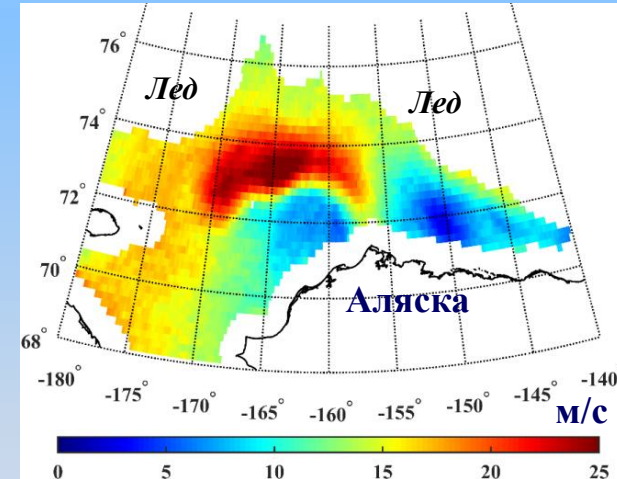
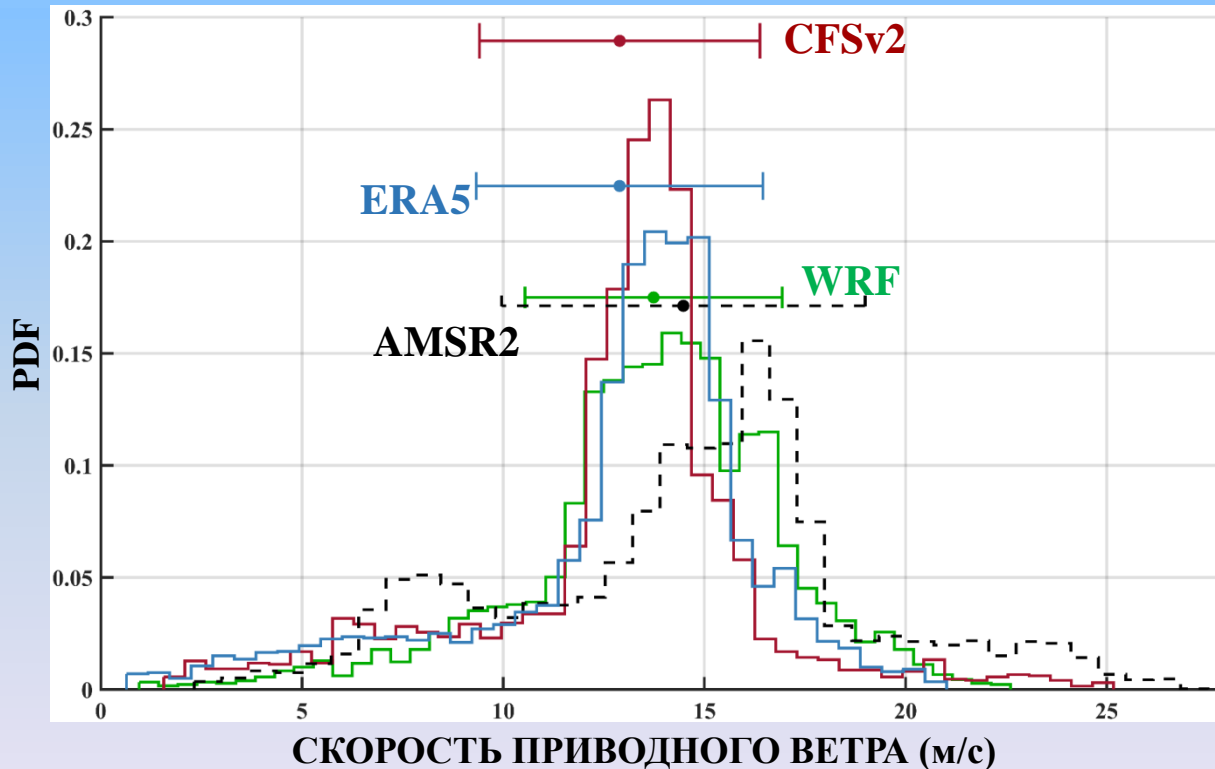
Поле вектора ветра по данным  
ASCAT в 04:00-06:30 UTC  
19 окт. 2017

Соответствие спутниковых и модельных данных при малых и средних скоростях ветра. Небольшой сдвиг скорости ветра в сторону увеличения по данным ASCAT.

# Плотность пространственного распределение скорости ветра у морской поверхности

## Стадия максимального развития ПМЦ, пик интенсивности

19 октября 2017 г. в 14:00 UTC

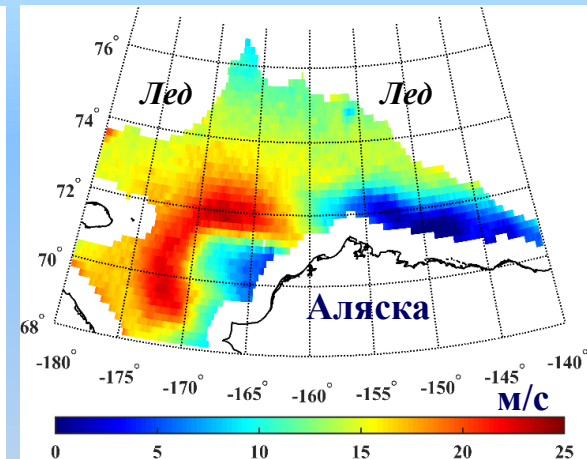
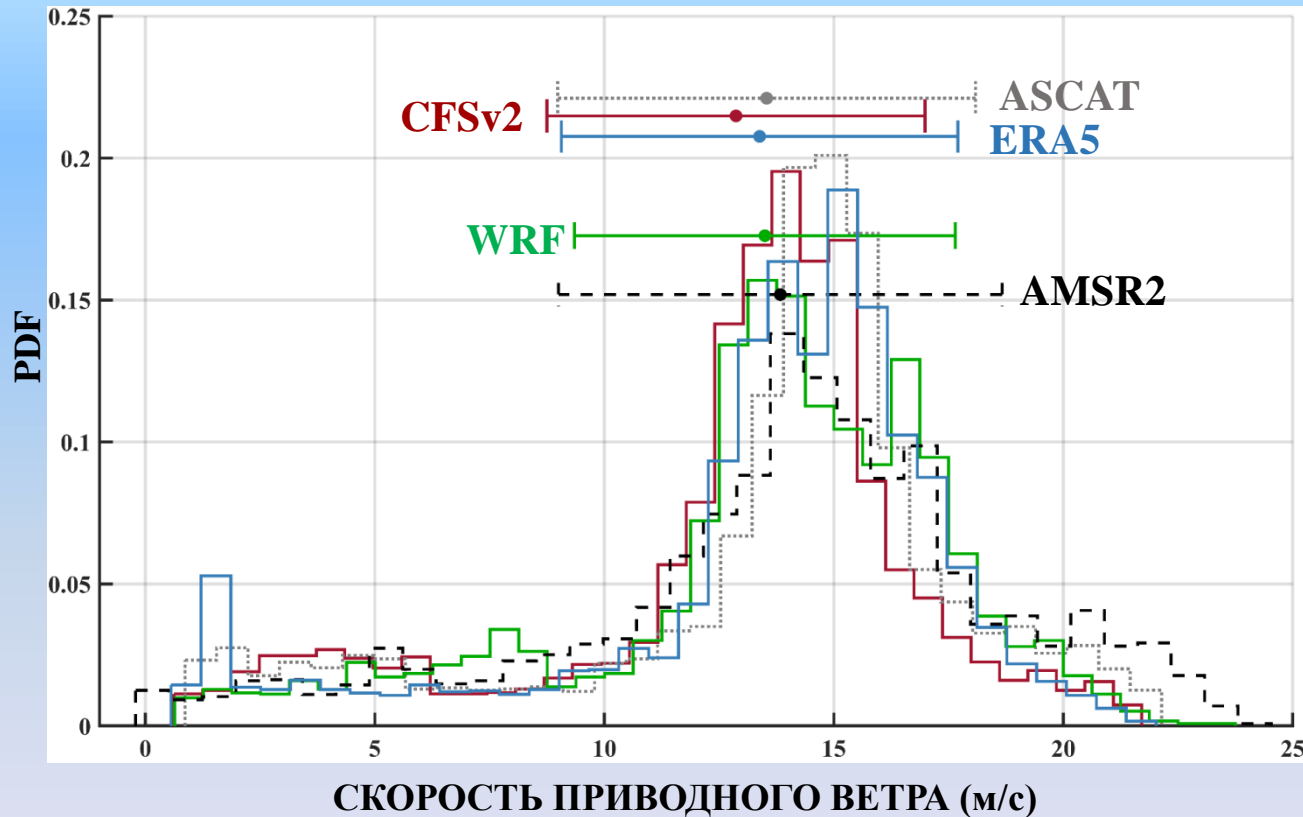


Поле приводного ветра по данным AMSR2 в 14:24 UTC 19 окт. 2017 г.

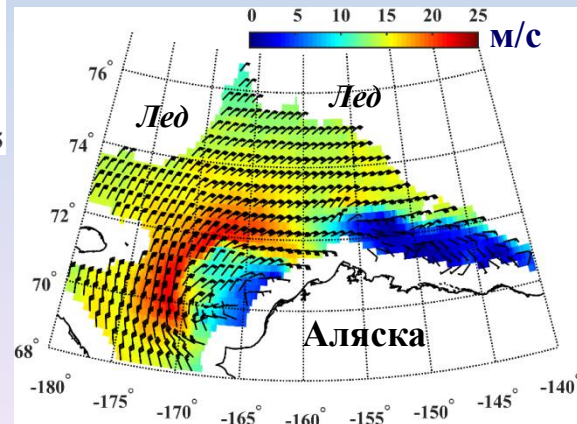
Соответствие спутниковых и модельных данных для малых и средних скоростей ветра. Небольшой сдвиг скоростей ветра в сторону увеличения по данным AMSR2 по сравнению с данными реанализа и модельными расчетами. Оценки скорости ветра по данным AMSR2 и CFSv2 близки по значениям при  $W \geq 25$  м/с.

# Плотность пространственного распределение скорости ветра у морской поверхности

## Стадия максимального развития ПМЦ, начало ослабления



Поле приводного ветра по данным AMSR2 в 22:30 UTC 19 окт. 2017



Поле вектора ветра по данным ASCAT в 20:55-22:35 UTC 19 окт. 2017

Соответствие спутниковых и модельных данных на малых и средних скоростях ветра. Завышение скорости ветра выше 23 м/с относительно модельных данных и измерений ASCAT по данным AMSR2.

## Выводы

- Сравнение результатов спутниковых измерений (радиометр AMSR-2, скаттерометр ASCAT) и расчетов мезомасштабной модели прогноза погоды WRF показывает систематическую недооценку средней скорости ветра в ПМЦ по результатам моделирования на несколько м/с. Тем не менее, модель WRF хорошо воспроизводит траекторию движения и эволюцию ПМЦ.
- Максимальные значения скорости ветра воспроизводятся моделью WRF более точно, чем средние, хотя разница между модельными и спутниковыми данными весьма изменчива в течение жизненного цикла ПМЦ.
- В целом оценки плотности распределения скорости ветра по данным реанализа ERA5, оперативной прогностической модели CFSv2, расчетов мезомасштабной модели прогноза погоды WRF и спутниковых измерений показали хорошее соответствие спутниковых и модельных данных.
- При скоростях ветра выше 20 м/с отмечается некоторое расхождение в оценках спутникового и модельного ветра, что необходимо учитывать для получения достоверных статистических оценок частоты появления экстремальных ПМЦ.

*Работа выполнена в рамках госбюджетной темы «Разработка физических основ и методов дистанционного зондирования Земли и современных информационных технологий для комплексных исследований океана и атмосферы»,  
рег. № АААА-А17-117030110037-8*



**Спасибо**

**за**

**внимание!**