

ПОЛЯРНЫЕ ЦИКЛОНЫ НАД ТИХООКЕАНСКОЙ АРКТИКОЙ В ОКТЯБРЕ 2017 г. В УСЛОВИЯХ АНОМАЛЬНО НИЗКОЙ ЛЕДОВИТОСТИ

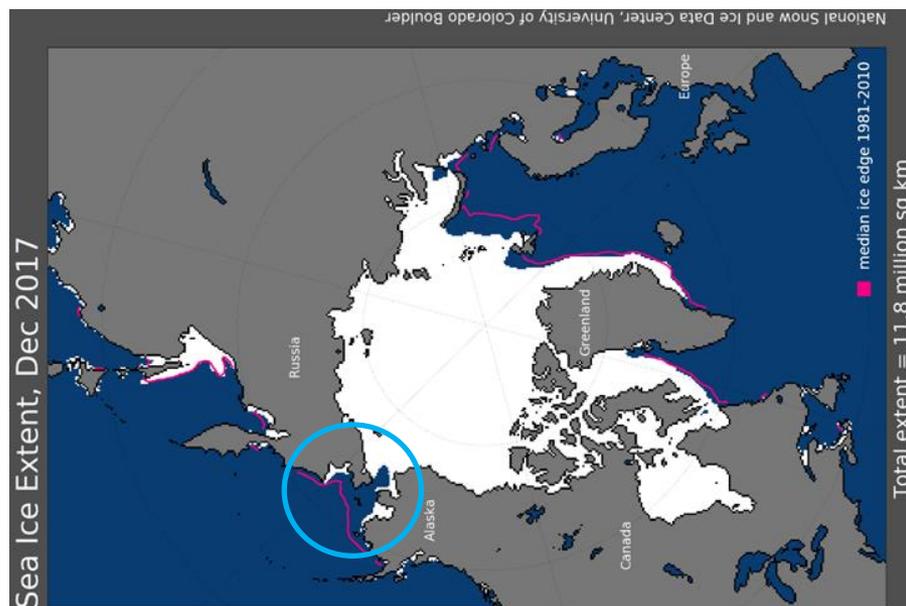
И.А. Гурвич, М.К. Пичугин, А.В. Баранюк

*Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия
E-mail: gurvich@poi.dvo.ru, pichugin.mk@gmail.com,
yukochko@poi.dvo.ru*



Мотивация

Полярные циклоны – морские мезомасштабные погодные системы со штормовыми ветрами – считались редким явлением над Тихоокеанской Арктикой. Таяние арктических льдов привело к сезонности ледяного покрова, более позднему осеннему ледоставу и, как следствие, к интенсификации мезоциклонической деятельности в регионе.



В декабре 2017 г. впервые за всю историю спутниковых наблюдений среднемесячное положение кромки морского льда сдвинулось в южную часть Чукотского моря.

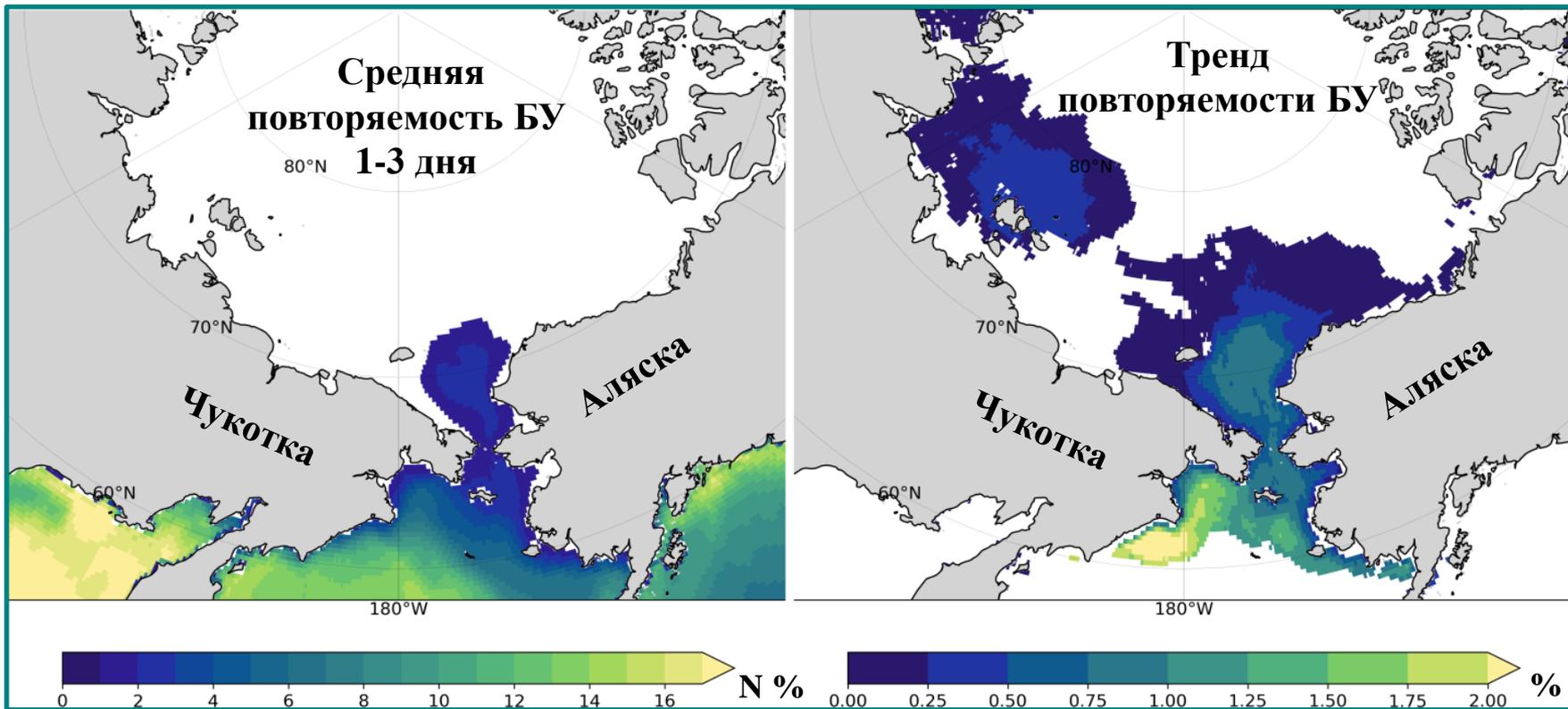
Интерес к Арктике растет:

- таяние арктической ледяной шапки;
- увеличение доступности СЛО;
- интенсификация использования Северного морского пути;
- развитие добычи полезных ископаемых на арктическом шельфе.

Арктика остается непростым регионом:

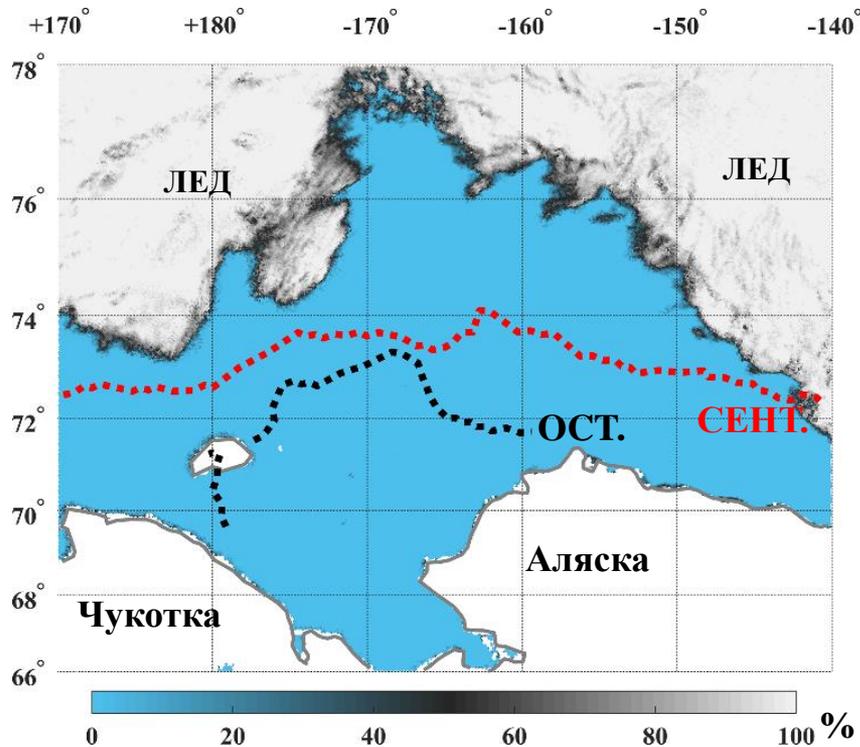
- низкие температуры воздуха;
- сложные погодные и ледовые условия.

Влияет ли изменение климата Арктики на частоту появления экстремальных полярных циклонов в ее тихоокеанском секторе?



Средняя повторяемость и тренд повторяемости благоприятных условий ($\theta_{SST} - \theta_{500} \geq -8.5$ K, *Stoll et al., 2018*) для мезомасштабного циклогенеза над морями Чукотским и Бофорта в % от продолжительности осенне-зимнего сезона (октябрь-декабрь) за период 1979-2021 гг.

Статистически значимый положительный тренд (% за 10 лет) повторяемости благоприятных условий (БУ) для мезоциклогенеза над Тихоокеанской Арктикой (до 1% над юго-восточной частью) – за каждые 10 лет временной период с БУ увеличивается примерно на один день. Это в 1.5-2 раза меньше, чем для северной части Берингова моря, однако допускает рост вероятности появления экстремальных ПЦ по мере сокращения периода становления льда, усиления меридиональности атмосферных процессов и выраженной тенденции ледяного покрова к сезонности в Тихоокеанской Арктике.



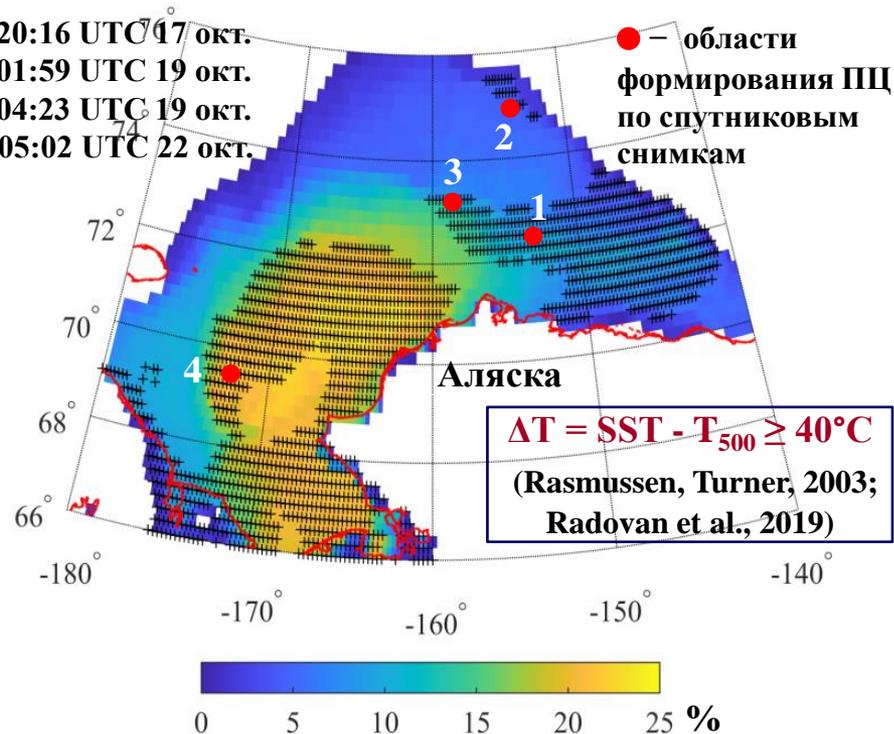
Карта сплоченности морского льда **19 октября 2017 г.**; медианное положение кромки льда в сентябре и октябре за 1981–2010 гг. (Национальный центр данных по снегу и льду (NSIDC) США, индекс морского льда, в. 3).

Аномально низкая ледовитость наблюдалась в Чукотском море осенью и в начале зимы 2017 г. (Tachibana et al., 2019).

Условия для мезоциклогенеза в октябре 2017 г.:

- ✓ значительное увеличение площади открытой воды;
- ✓ высокая ТПМ ($> 4^{\circ}\text{C}$) вдоль СЗ побережья Аляски (см. слайд 9).

- 1 – 20:16 UTC 17 окт.
- 2 – 01:59 UTC 19 окт.
- 3 – 04:23 UTC 19 окт.
- 4 – 05:02 UTC 22 окт.



Повторяемость благоприятных условий для мезоциклогенеза **в октябре 2017 г.** (в % от длины месяца). Заштрихованные области – максимум повторяемости с 1979 г.

С 18 по 22 октября над морями Чукотским и Бофорта наблюдалась серия мезоциклонов. Четыре из них, со скоростью ветра $W \geq 15$ м/с, были идентифицированы как полярные циклоны, полярный циклон с $W > 30$ м/с – как экстремальный.

Цель:

Исследование серии полярных циклонов (ПЦ) над морями Чукотским и Бофорта 18-22 октября 2017 г. с использованием мультисенсорных спутниковых измерений и реанализов.

Значительная часть работы посвящена возможностям реанализов ERA5, MERRA-2 и оперативной прогностической модели NCEP-CFSv2 в обнаружении, отслеживании и оценке интенсивности ПЦ.

Вопросы:

- ✓ **Насколько подробно мы можем рассмотреть развитие экстремальных ПЦ с использованием мультисенсорного подхода?**
- ✓ **Насколько объективно наборы данных реанализов ERA5, MERRA-2 и CFSv2 отражают развитие ПЦ и насколько адекватно воспроизводят скорость ветра по сравнению со спутниковыми наблюдениями?**
- ✓ **Каковы сильные и слабые стороны реанализов в идентификации, отслеживании и оценке интенсивности ПЦ?**

Данные и методы. Спутники

- Идентификация ПЩ в полях облачности – спектрорадиометры MODIS на спутниках Aqua и Terra, радиометры VIIRS на спутнике Suomi NPP и AHVRR на спутниках серии NOAA и MetOp-A/B. Дискретность наблюдений ~ 70 мин.
- Поля яркостных температур (Тя), интегрального паросодержания атмосферы (V) и водозапаса облаков (Q) – усовершенствованный микроволновый сканирующий радиометр AMSR2 на спутнике GCOM-W1 (<https://gportal.jaxa.jp>), алгоритмы, основанные на физическом моделировании яркостной температуры уходящего излучения системы океан-атмосфера (Zabolotskikh et al., 2015).
- Ежедневные поля скорости и направления приводного ветра (W):
 - ✓ активные измерения – скаттерометр ASCAT (спутники MetOp-A/B);
 - ✓ пассивные микроволновые измерения – радиометры AMSR-2 и WindSat (спутник Coriolis) с разрешением 0,25 град. <ftp://ftp.remss.com/> (RSS).

Это обеспечило 11 полей скорости ветра за сутки со средним временным разрешением 130 мин. Для более надежного анализа замаскированы участки на расстоянии ~ 42 км от кромки льда (используемое в алгоритме разрешение для самой низкой частоты 10,7 ГГц).

- Вертикальная структура облачной системы экстремального ПЩ – радиолокатор Cloud Profiling Radar (CPR) на спутнике CloudSat, который входит в состав спутниковой группировки «А-Train». Измерения на частоте 94 ГГц.
- Карты морского льда с высоким разрешением Бременского университета (<http://www.iup.uni-bremen.de/seaice/amsr/>) - измерения AMSR2 на частоте 89 ГГц.

Данные и методы. Реанализы

Почасовые поля давления на уровне моря, зональная и меридиональная составляющие скорости ветра, геопотенциальные высоты и температура воздуха:

- **ERA5** – Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Горизонтальное разрешение 31 км, на регулярной сетке $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ для 137 уровней от подстилающей поверхности до 0,01 гПа. Для отслеживания ПЦ и анализа атмосферных и ветровых условий использовался набор данных ERA5 из Службы изменения климата Copernicus (<https://cds.climate.copernicus.eu/>).
- **MERRA-2** - модель атмосферы Goddard Earth Observing System, версия 5.12.4 (GEOS-5) и схема анализа глобальной статистической интерполяции (GSI) (https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/data_access/). Состоит из ассимиляций почасовых метеопараметров, включающих скорость ветра и атмосферное давление, приведенное к уровню моря. Пространственное разрешение $\sim 0,5^\circ \text{ш.} \times 0,625^\circ \text{д.}$
- **CFSv2** – почасовой усовершенствованный оперативный анализ Системы прогнозирования климата Национального центра прогнозирования окружающей среды (NCEP), версия 2 (<https://nomads.ncdc.noaa.gov/modeldata/>). Основан на улучшенной версии системы усвоения климатических данных (CDASv2) с разрешением 27 км (T574) и доступен с разрешением сетки по горизонтали $\sim 0,2^\circ \times 0,2^\circ$ для скорости приводного ветра и $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ для остальных параметров.

Данные и методы. Алгоритмы обнаружения

Применялись два метода обнаружения и отслеживания ПЦ по следующим параметрам:

- атмосферному давлению на уровне моря (Zahn, Storch, 2008; Chen, Storch, 2013) – обнаружение локальных минимумов;
- относительной завихренности (ζ_{850}) на изобарической поверхности 850 гПа (Zarra et al., 2014) – обнаружение локальных максимумов в отфильтрованных полях ζ_{850} .

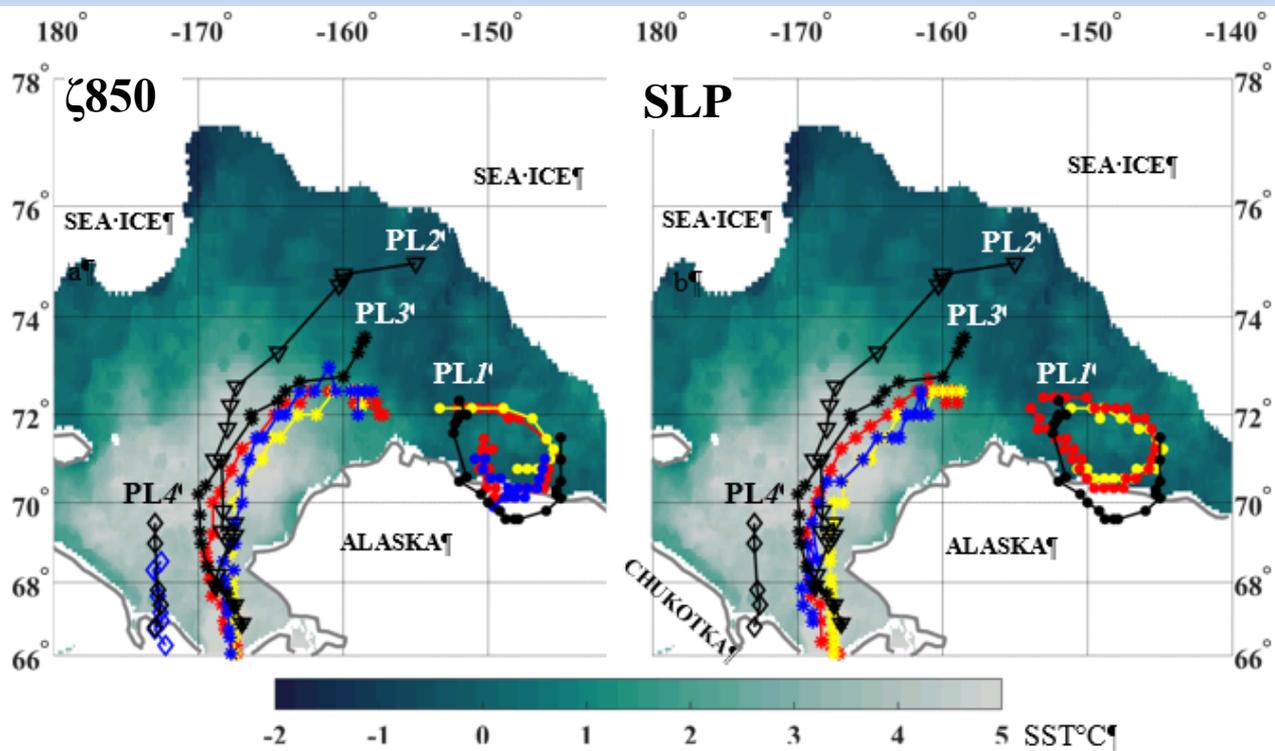
Для лучшего соответствия спутниковым измерениям изменены следующие параметры:

- ✓ критерий конвективной неустойчивости $\Delta T = T_{SST} - T_{500} \geq 39^{\circ}\text{C}$;
- ✓ интенсивность локальных максимумов $\zeta_{850} \geq 10 \times 10^{-5} \text{ c}^{-1}$.

Чтобы выделить мезомасштабные вихри и удалить синоптические и микромасштабные изменчивости, в обоих методах применялся полосовой фильтр Гаусса с длинами волн 100–800 км.

Из-за сходимости долгот к полюсу шаг сетки был преобразован из градусов в километры и линейно проинтерполирован до разрешения 25×25 км для наборов данных всех реанализов.

Траектории и погрешности их определения



Средние расхождения траекторий по данным реанализов относительно спутниковых оценок рассчитывались для точек, близких по времени (< 30 мин) к спутниковым измерениям

SST по данным remss.com (продукт MW + IR v. 5.1)

MCs	ERA5	CFSv2	MERRA-2
850-hPa relative vorticity			
PL1	50 km	60 km	90 km
PL2	-	-	-
PL3	60 km	70 km	80 km
PL4	-	+*	-
Sea level pressure			
PL1	60 km	-	90 km
PL2	-	-	-
PL3	60 km	90 km	90 km
PL4	-	-	-

ζ850 – все реанализы обнаружили ПЦ1 и ПЦ3 мезо-α-масштаба (> 200 км), CFSv2 – мезо-β-масштабный ПЦ4.

SLP – CFSv2 обнаружил только самый интенсивный ПЦ3.

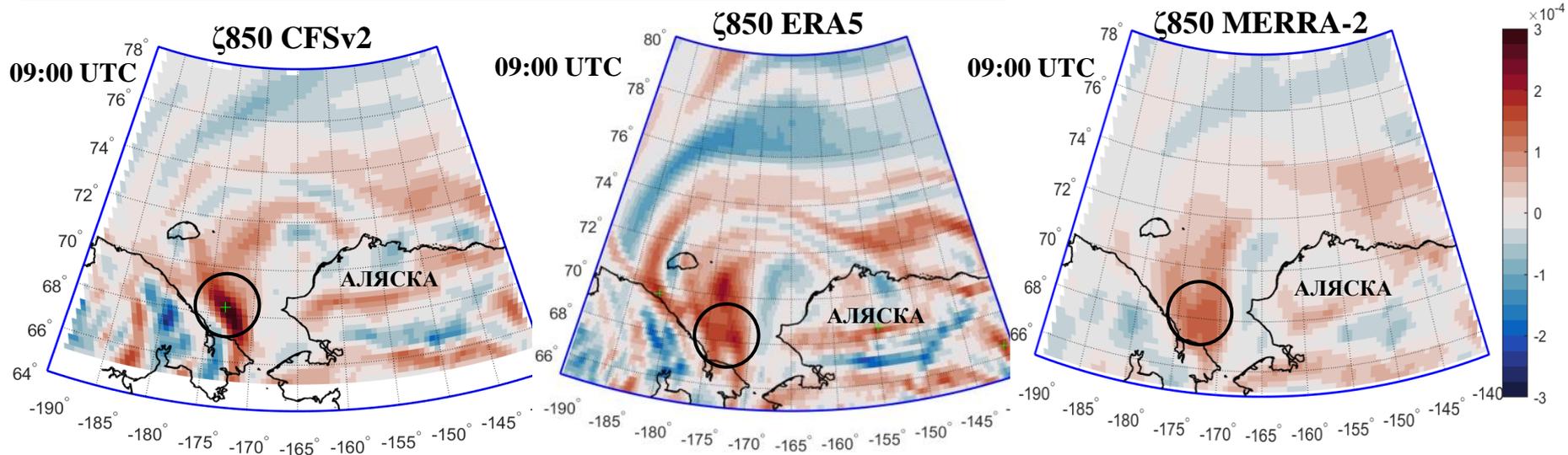
Минимальное расхождение – ERA5, максимальное MERRA-2.

Погрешность траекторий по данным ERA5, MERRA-2 и CFSv2 относительно спутниковых наблюдений.

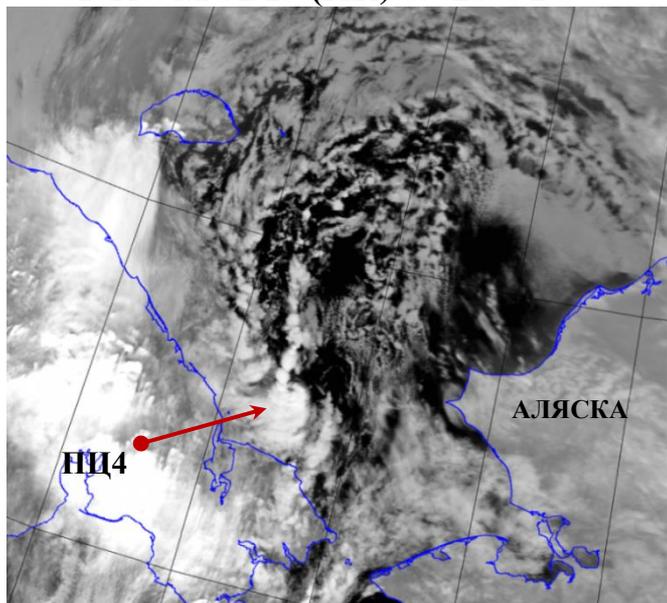
* погрешность опущена из-за ограниченного количества совпадающих по времени точек.

CFSv2 в полях ζ850 обнаружил мезо-β-масштабный ПЦ4 жизненным циклом < 12 ч

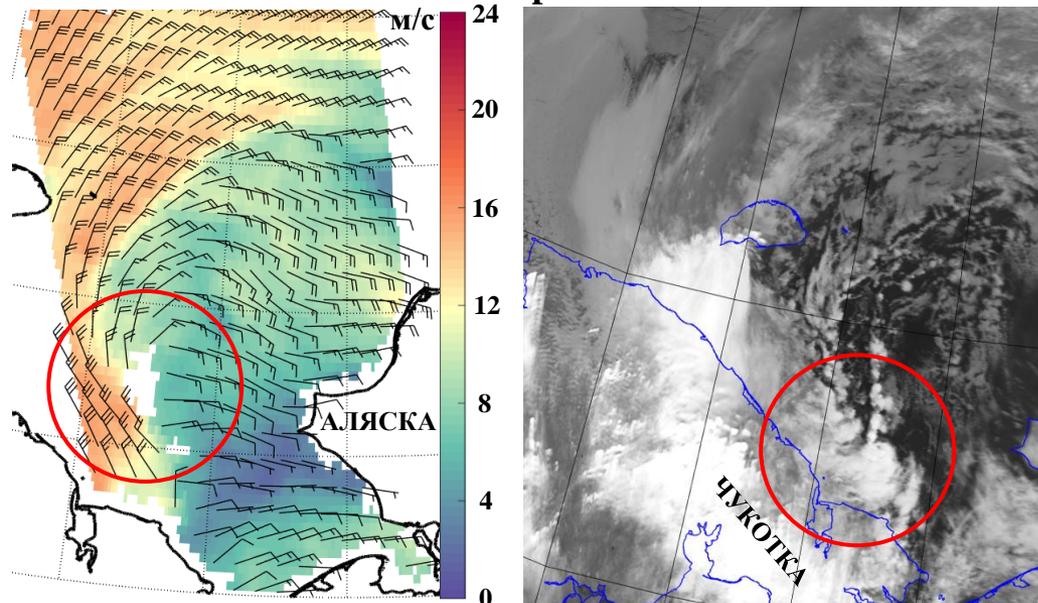
22 октября 2017 г. Горизонтальный размер ПЦ4 < 100 км.



Terra/MODIS (ИК) 09:25 UTC



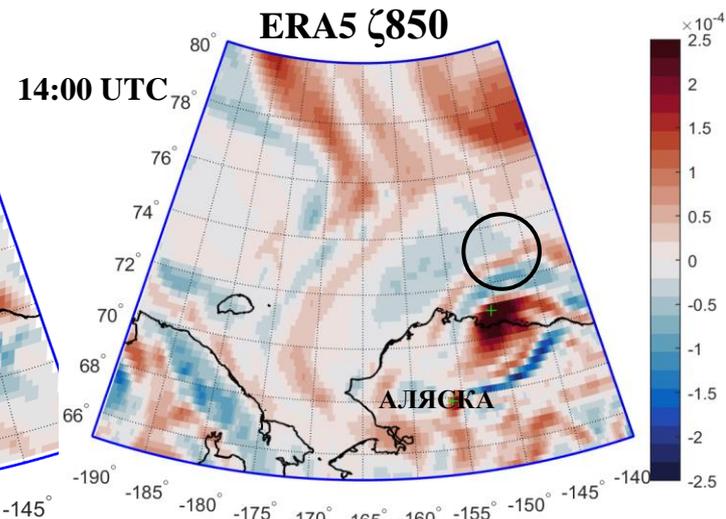
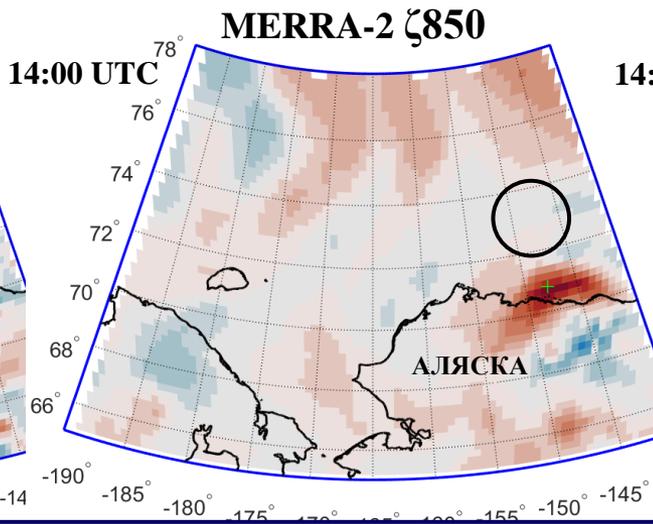
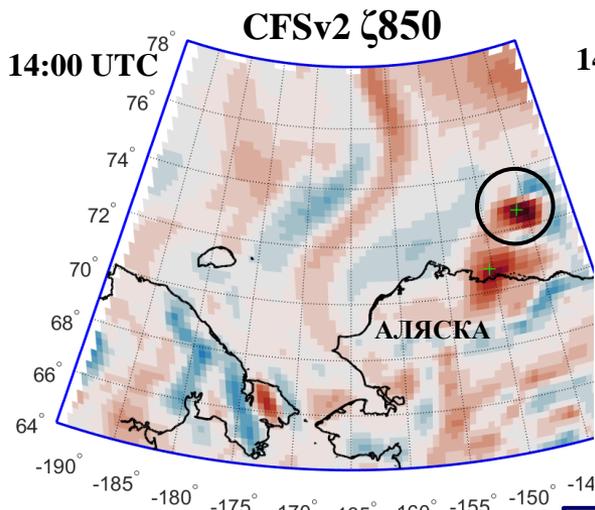
ASCAT/AVHRR MetOp-A 08:15-08:20 UTC



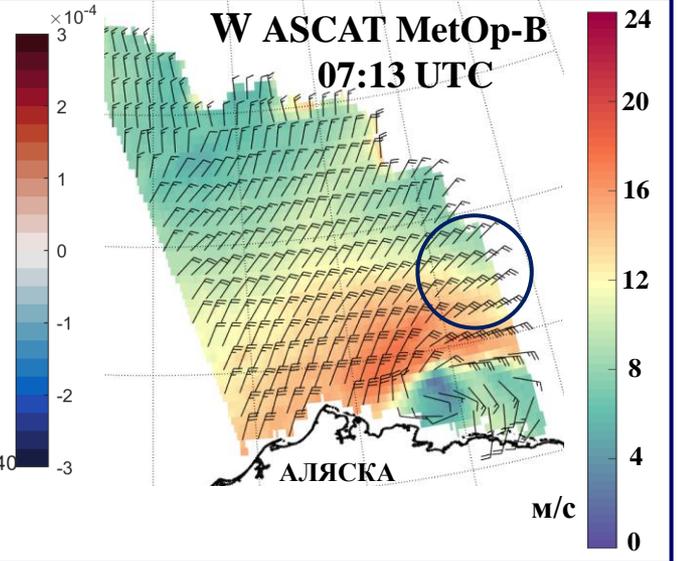
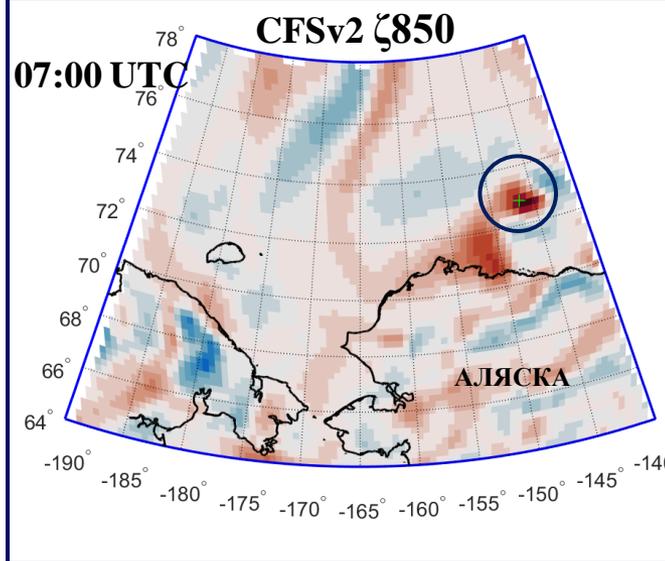
Циркуляция ПЦ4 в полях вектора ветра и облачности

... но ложно обнаружил в поле завихренности два мезоциклона с жизненным циклом > 12 ч, которые не были идентифицированы в спутниковых полях облачности и вектора ветра. Вероятно, при определенных условиях компонент атмосферной модели в анализе CFSv2 генерирует несуществующие мезомасштабные низкоуровневые циркуляции.

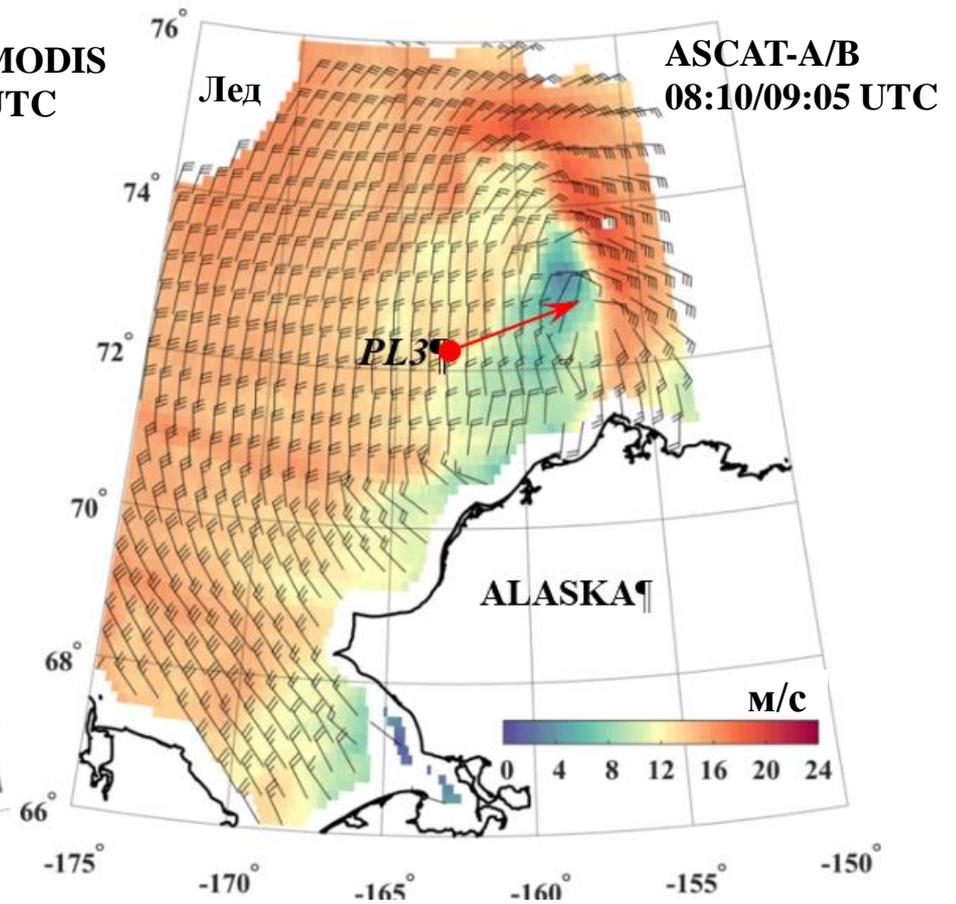
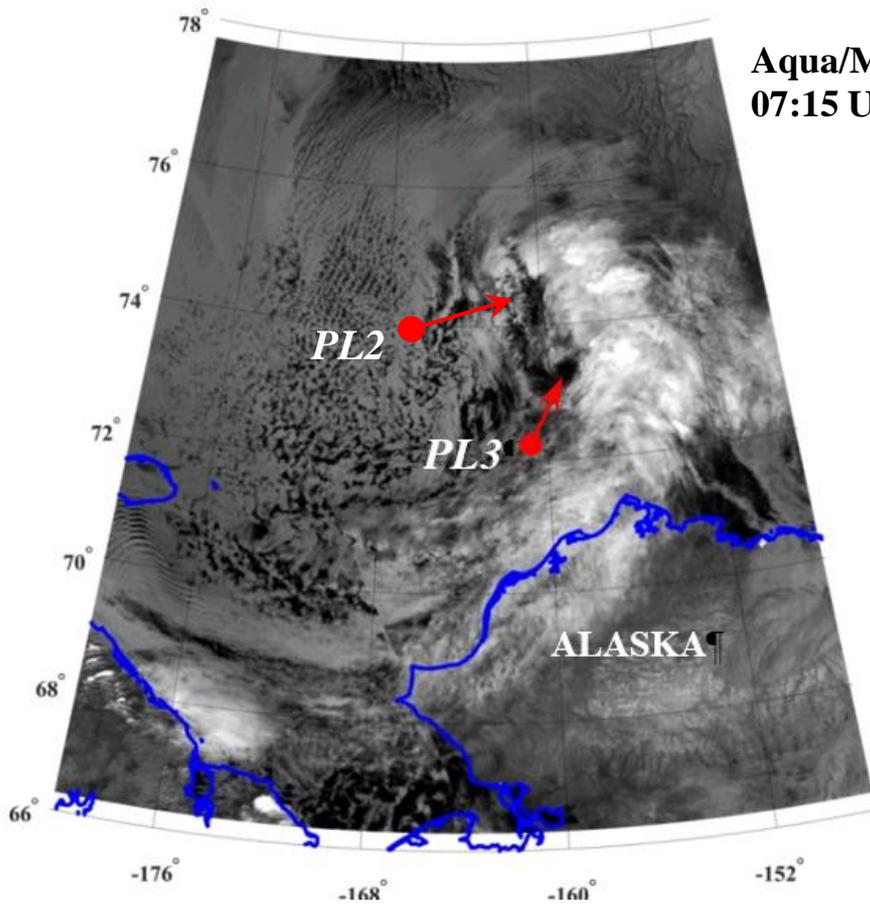
18 октября 2017 г.



Aqua MODIS 13:50 UTC



Экстремальный ПЦ над Чукотским морем 19 октября 2017 г. Начальная стадия



ПЦ2/3 возникли 19 октября 2017 г. севернее 73°с.ш. на фоне холодного вторжения из центральной Арктики. По спутниковым данным, в зрелой стадии скорость ветра в ПЦ3 была близка к ураганной ($W > 30$ м/с), что в ТА наблюдается крайне редко.

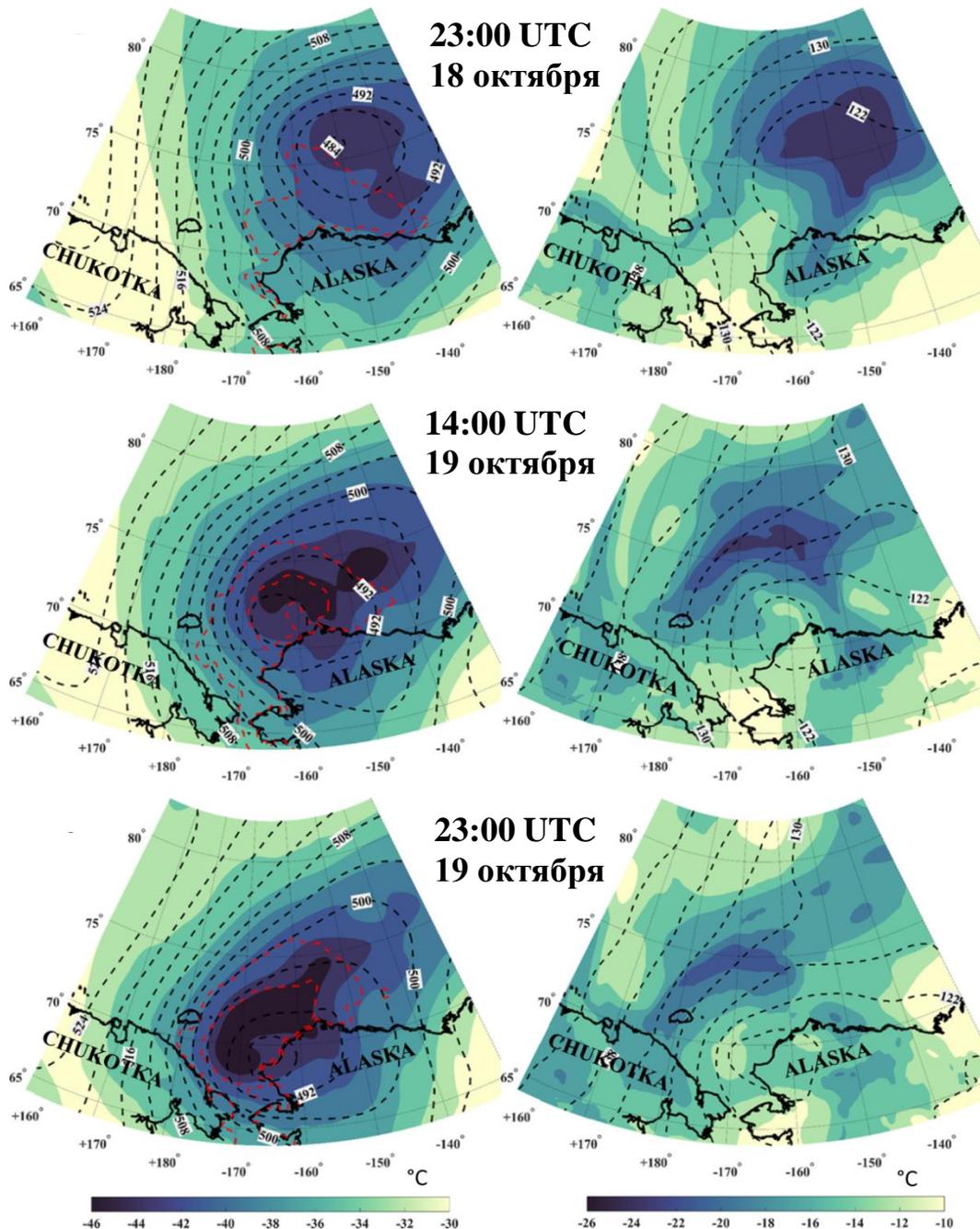
Атмосферные условия

Термобарические поля на
изобарических поверхностях из
реанализа ERA5:

500 гПа (левый столбец);
850 гПа (правый столбец)

--- геопотенциальные высоты (дкм)
затенение - температура воздуха (°C)

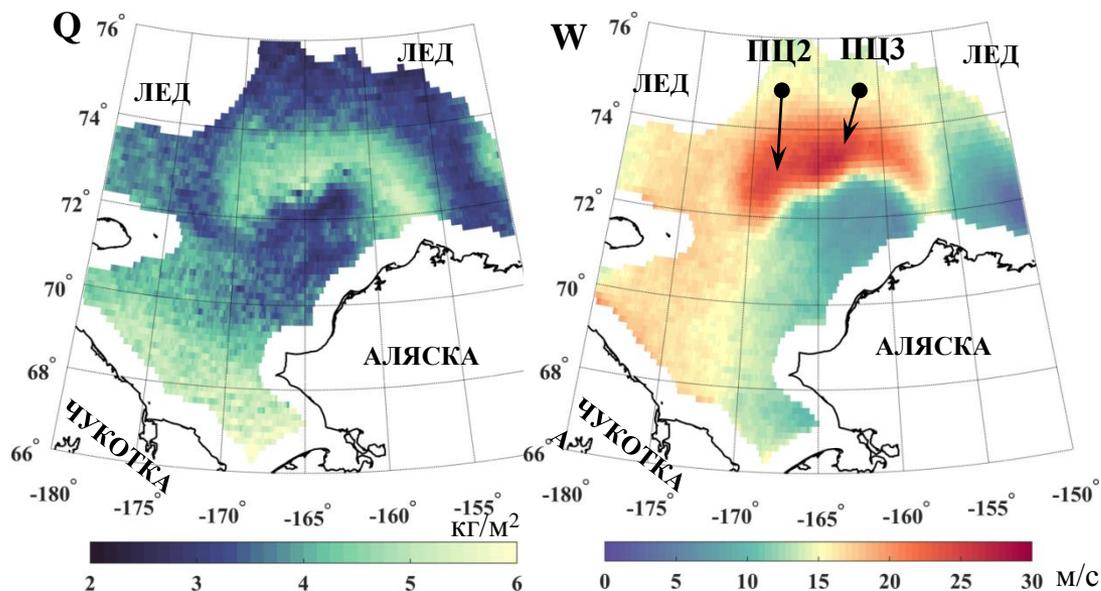
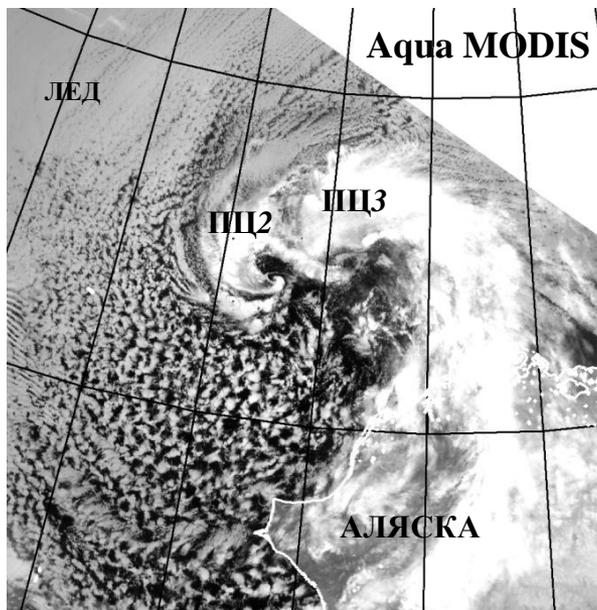
--- $\Delta T = (SST - T_{500}) \sim 40-45^{\circ}\text{C}$.



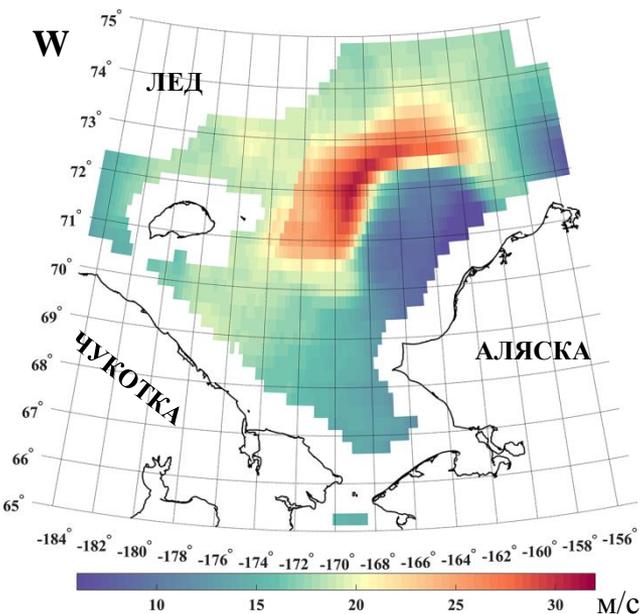
ПЦ перемещались на юг в
мезоциклонической системе типа
«карусель», под холодной высотной
депрессией, которая существовала
более 10 суток и прослеживалась на
AT300 (> 8 км), что позволяет
идентифицировать ее как полярный
вихрь тропопаузы (TPV).

Связи TPV с мезоциклогенезом
малоизучены (Cavallo, Nakim, 2009).
Однако, с учетом длительного времени
жизни TPV, такие исследования
представляются перспективными.

Зрелая стадия



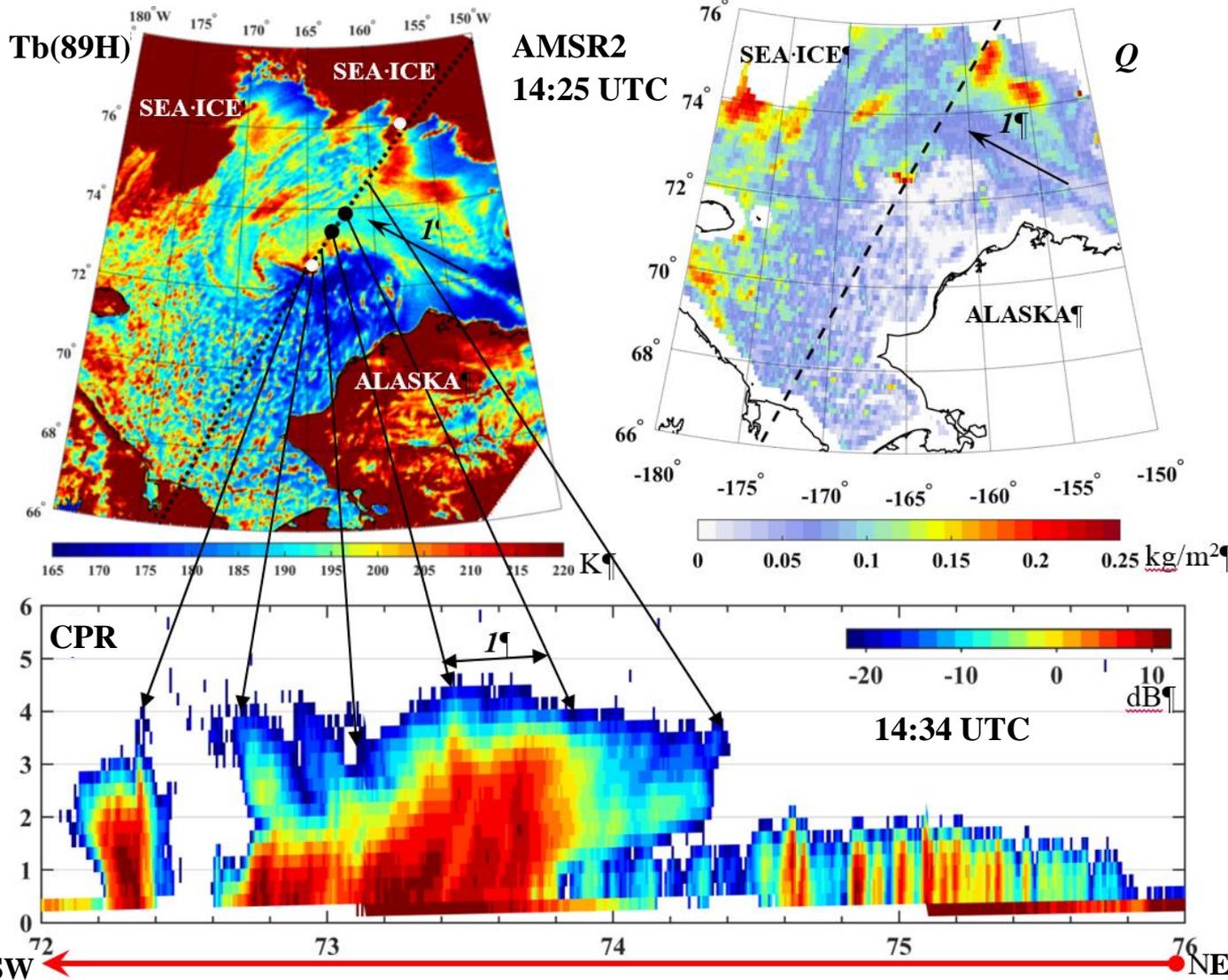
ИК изображение MODIS (спутник Aqua) в 14:30 UTC, интегральное поле паросодержания атмосферы, и поле приводного ветра по данным AMSR2 (спутник GCOM-W1) в 14:25 UTC 19 октября 2017 г. Скорость приводного ветра **W ~ 30 м/с.**



Поле приводного ветра по данным Windsat (спутник Coriolis) в 18:50 UTC 19 окт. 2017 г. Пик интенсивности ЦЦ3. **W > 30 м/с.**

Два центра не воспроизводятся.

Влагосодержание и вертикальная структура зрелого ПЦЗ

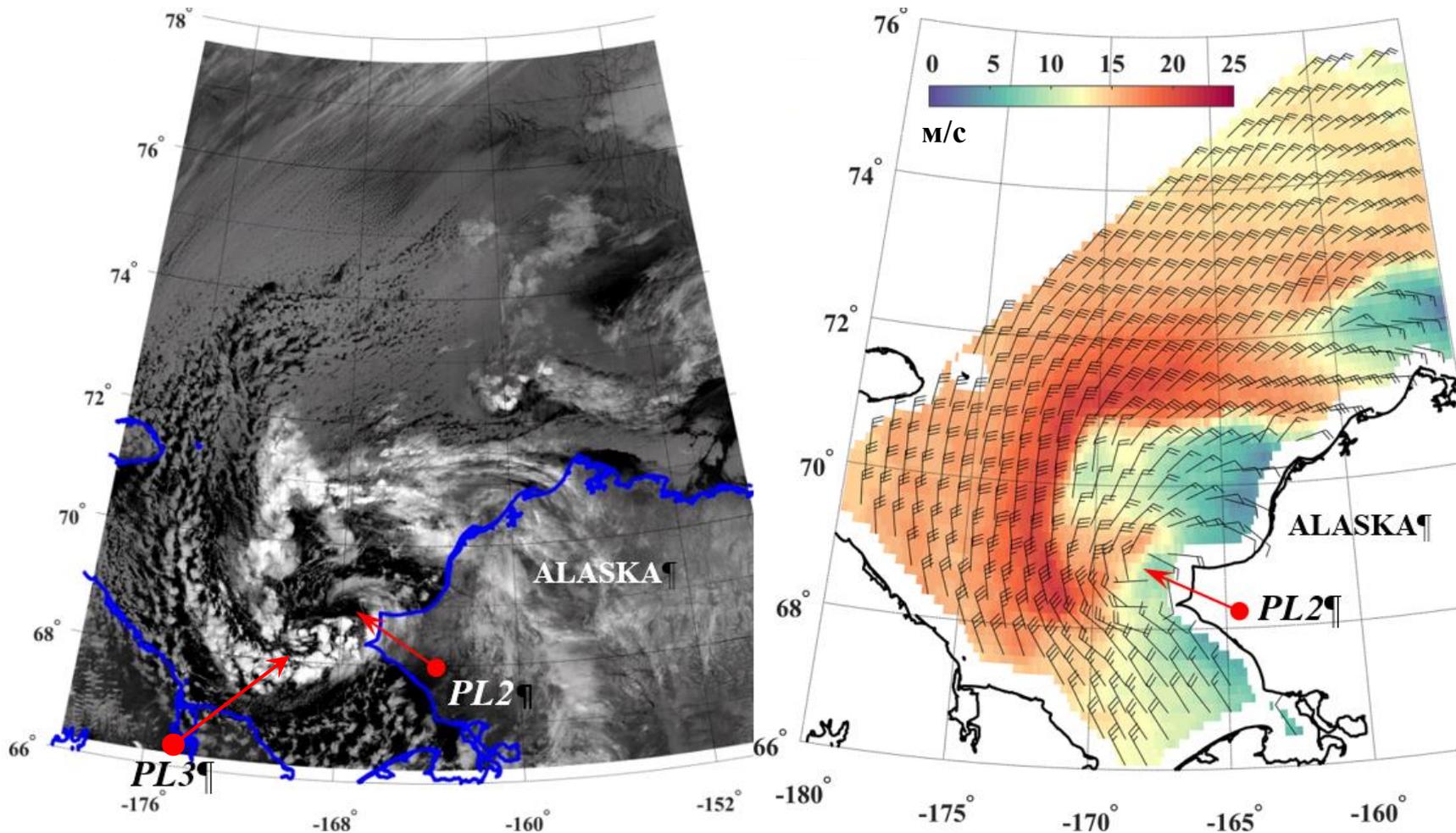


Вертикальная протяженность ~ 4 км, близкая к типичной высоте ВГ облаков (5 км) для 82 ПЦ в северных морях (Listovski et al., 2020).

I – полоса с высокой отражательной способностью CPR, но низким водозапасом облаков и низкими Тя. Возможно, такое расхождение обусловлено преобладанием кристаллов льда с определенными микрофизическими свойствами.

Почти синхронные измерения AMSR2 и CPR, входящих в группировку спутников «A-Train». CPR (спутник CloudSat) зондировал ПЦЗ с северо-востока на юго-запад примерно на 25 км западнее центра через малооблачное пространство между двумя облачными спиралями.

Зрелая стадия, начало диссипации

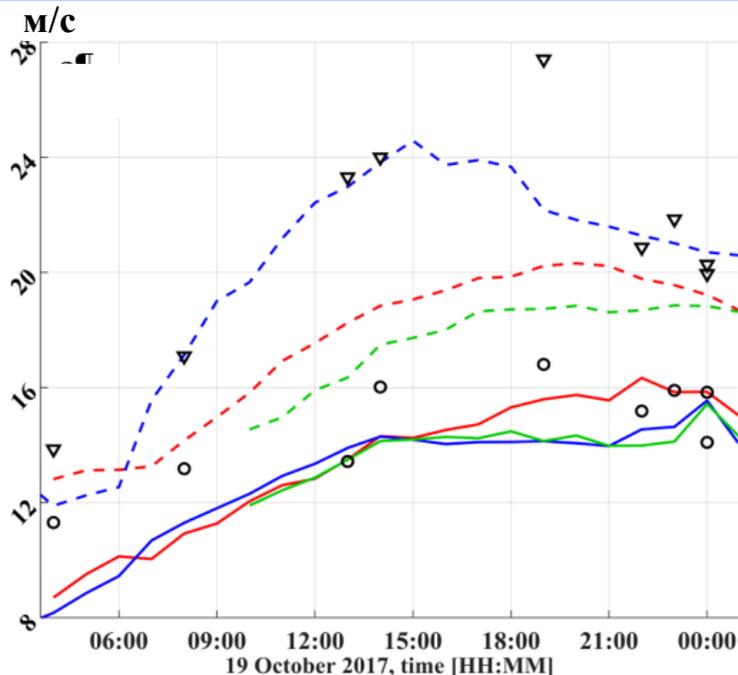


ИК изображение VIIRS в 23:35 UTC 19 октября (слева), поле вектора ветра по измерениям ASCAT-A/B в 23:20/00:15 19/20 октября (справа).

ПЦ существовал около 5 суток – дольше типичного жизненного цикла полярных циклонов (≈ 3 суток). За это время он переместился от Чукотского поднятия до Бристольского залива, где заполнился 24 октября.

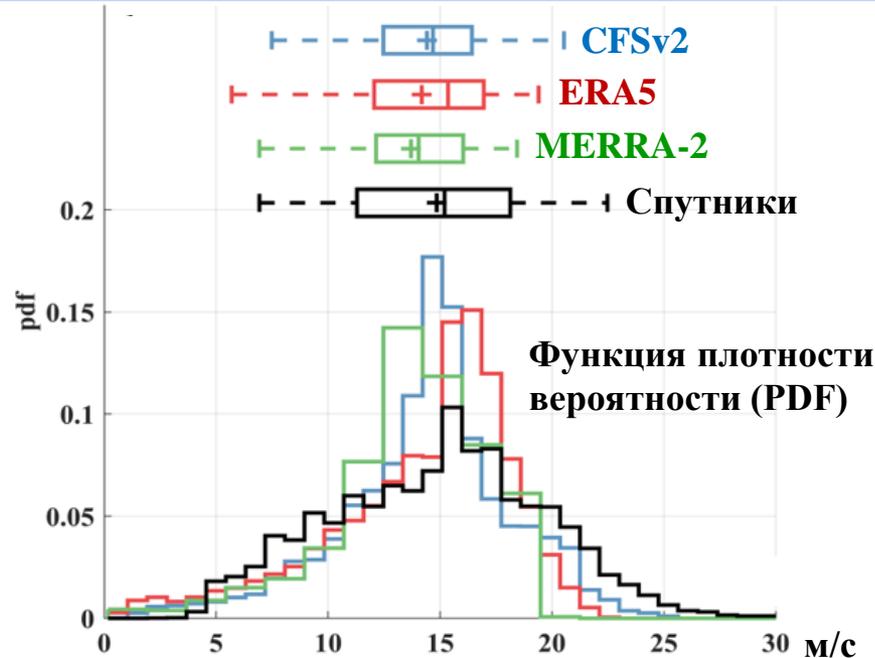
Сравнительный анализ скорости ветра

Статистические оценки медианных и экстремальных значений скорости приводного ветра выполнены для области радиусом 300 км от центра ПЦ.



Спутниковый ветер: кружки – медианные значения, треугольники – экстремумы.

ERA5, MERRA-2, CFSv2: сплошные линии – медианы, пунктирные линии – экстремумы.



Функция плотности вероятности (PDF)

Распределение скорости ветра по территории. Усы – диапазон от 5-го до 95-го перцентиля, вертикальная черта – медиана, знак плюс – среднее.

Медианная скорость ветра (W) – по всем реанализам расхождения в пределах погрешности спутниковых измерений (2–3 м/с). **Экстремальная W (95-й перцентиль)** согласуется со спутниковой в начальной и затухающей фазах развития ПЦ. В зрелой стадии ERA5 и MERRA-2 недооценивают высокие скорости до 8 м/с, CFSv2 адекватно воспроизводит экстремальные W , но на пике интенсивности ПЦ расхождение со спутниковым ветром достигает 5 м/с. **PDF** – пик в диапазоне $W = 15-18$ м/с, максимальные значения – спутники и ERA5. В диапазоне > 20 м/с максимальные вероятности – спутниковый ветер, минимальные – MERRA-2.

Выводы

- Сравнительный анализ траекторий, полученных двумя методами – по атмосферному давлению на уровне моря и относительной завихренности на изобарической поверхности 850 гПа – показал, что реанализы в основном идентифицировали ПЦ с горизонтальными размерами > 200 км.
- Наилучшее соответствие со спутниковыми траекториями (с ошибками 50-60 км) и практически одинаковые результаты для обоих методов отслеживания показал реанализ ERA5.
- CFSv2 продемонстрировал несколько худшие результаты для алгоритма отслеживания по относительной завихренности, а в барических полях идентифицировал только наиболее интенсивный ПЦ3, но обнаружил в полях завихренности мелкомасштабный ПЦ4 со временем жизни менее 12 ч.
- Медианная скорость ветра в ПЦ по данным реанализов хорошо согласуется со спутниковыми оценками.
- Экстремальная скорость ветра (95-й перцентиль) согласуется в начальной и затухающей фазах развития ПЦ. В зрелой стадии ERA5 и MERRA-2 значительно (до 8 м/с) занижают экстремальные скорости ветра. CFSv2 адекватно воспроизводит высокие скорости, но при пиковой интенсивности ПЦ расхождение экстремальных скоростей со спутниковыми достигает 5 м/с.

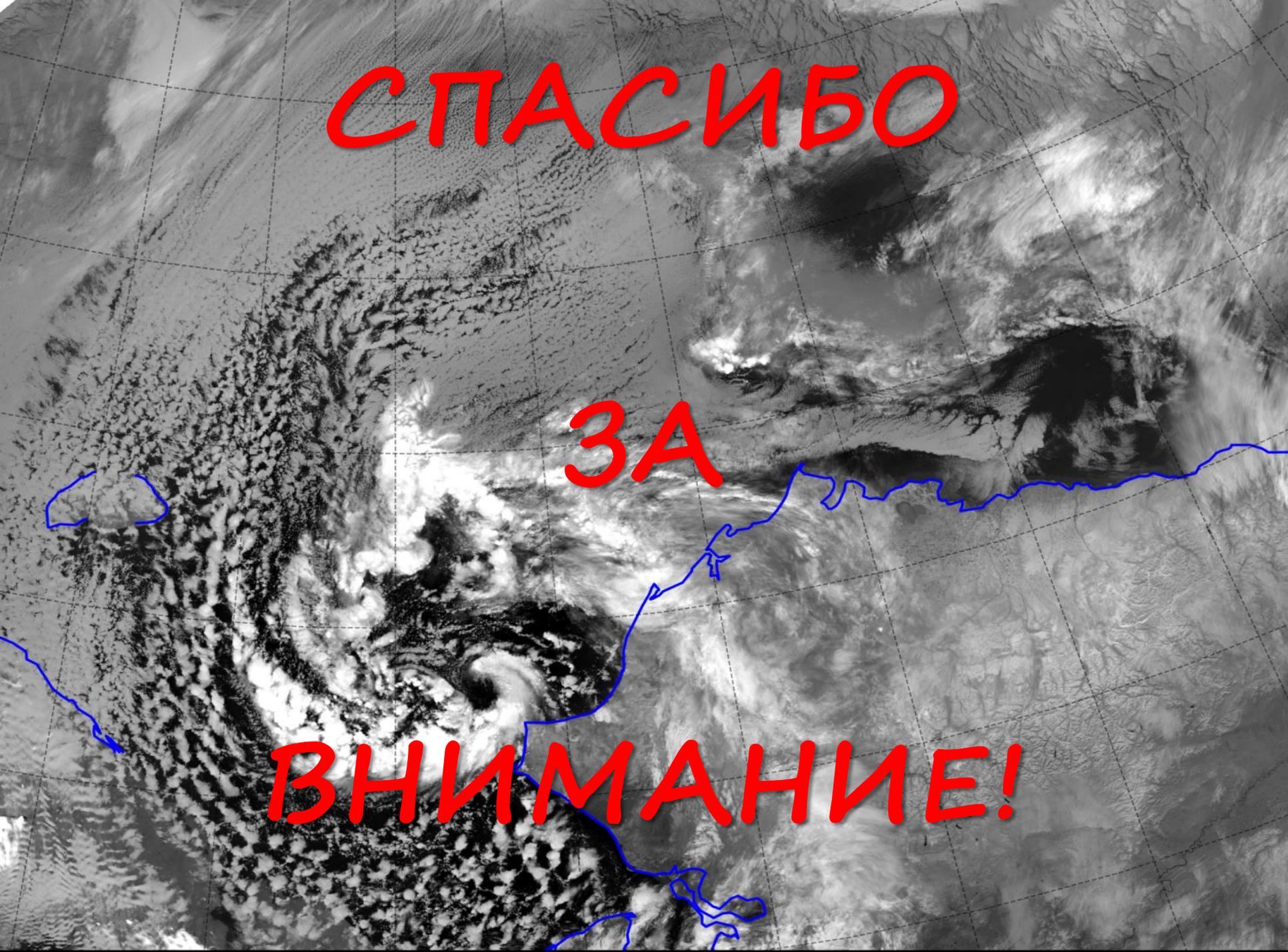
Выводы

- **Нельзя исключать, что сокращение площади арктического ледяного покрова и прогнозируемое смещение к северу интенсивных холодных вторжений приведет к росту частоты экстремальных мезомасштабных процессов в ТА в ближайшие десятилетия. Использование реанализов нового поколения для оценки эволюции и интенсивности ПЦ дает хорошие результаты, но надежное представление об экстремальных ПЦ по-прежнему остается сложной задачей как для оперативных прогнозов, так и для климатических исследований. Прогрессу в этой области может способствовать развитие регионального реанализа с учетом мезомасштабных атмосферных и океанических процессов.**

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы НИР «Технологии дистанционного зондирования Земли и наземных измерительных систем в комплексных исследованиях динамических явлений в океане и атмосфере» (регистрационный номер: 121021500054-3).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Chen F., Storch H.V. Trends and variability of North Pacific polar lows. *Advances in Meteorology*. 2013. 11 pp.**
2. **Cavallo S. M., Hakim G.J. Potential vorticity diagnosis of a tropopause polar cyclone // *Mon. Wea. Rev.* 2009. Vol. 137, No. 4. P. 1358-1371.**
3. **Listowski, C., Rojo M., Claud C., Delanoë J., Rysman J.F., Cazenav, Q., Noer G. New insights into the vertical structure of clouds in Polar Lows, using Radar-Lidar satellite observations // *Geophys. Res. Lett.* 2020. Vol. 47, Issue 17. pp. e2020GL088785.**
4. **Radovan A., Crewell S., Knudsen E.M., Rinke A. Environmental conditions for polar low formation and development over the Nordic Seas: study of January cases based on the Arctic System Reanalysis // *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2019. Vol. 71, Issue 1.**
5. **Rasmussen E. A., Turner J. Polar lows: mesoscale weather systems in the Polar Regions. 2003. Cambridge University Press., 612 pp.**
6. **Stoll P.J., Graversen R.G., Noer G., Hodges R. An objective global climatology of polar lows based on reanalysis data // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2018. Vol. 144. P. 2099–2117.**
7. **Zabolotskikh, E.V.; Mitnik, L.M.; Reul, N.; Chapron, B. New possibilities for geophysical parameter retrievals opened by GCOM-W1AMSR2. *IEEE J. Sel. Topics Appl. Earth Observ. Remote Sens.* 2015. Vol. 8, 4248–4261.**
8. **Tachibana Y., Komatsu K.K., Alexeev V.A., Cai L., Ando Y. Warm hole in Pacific Arctic sea ice cover forced mid-latitude Northern Hemisphere cooling. *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. P. 5567–5567.**
9. **Zahn M., Storch H.V. Tracking polar lows in CLM // *Meteorologische Zeitschrift*. 2008. Vol. 17. P. 445–453.**
10. **Zappa G., Shaffrey L., Hodges K. Can polar lows be objectively identified and tracked in the ECMWF operational analysis and the ERA-Interim reanalysis? // *Mon. Weather Rev.* 2014. Vol. 142. P. 2596–2608.**

A satellite-style grayscale map of the North Atlantic Ocean. A blue outline highlights a specific region in the central and eastern parts of the ocean. Overlaid on the map is the Russian text "СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!" in a bold, red, sans-serif font. The text is arranged in three lines: "СПАСИБО" at the top, "ЗА" in the middle, and "ВНИМАНИЕ!" at the bottom.

СПАСИБО

ЗА

ВНИМАНИЕ!