

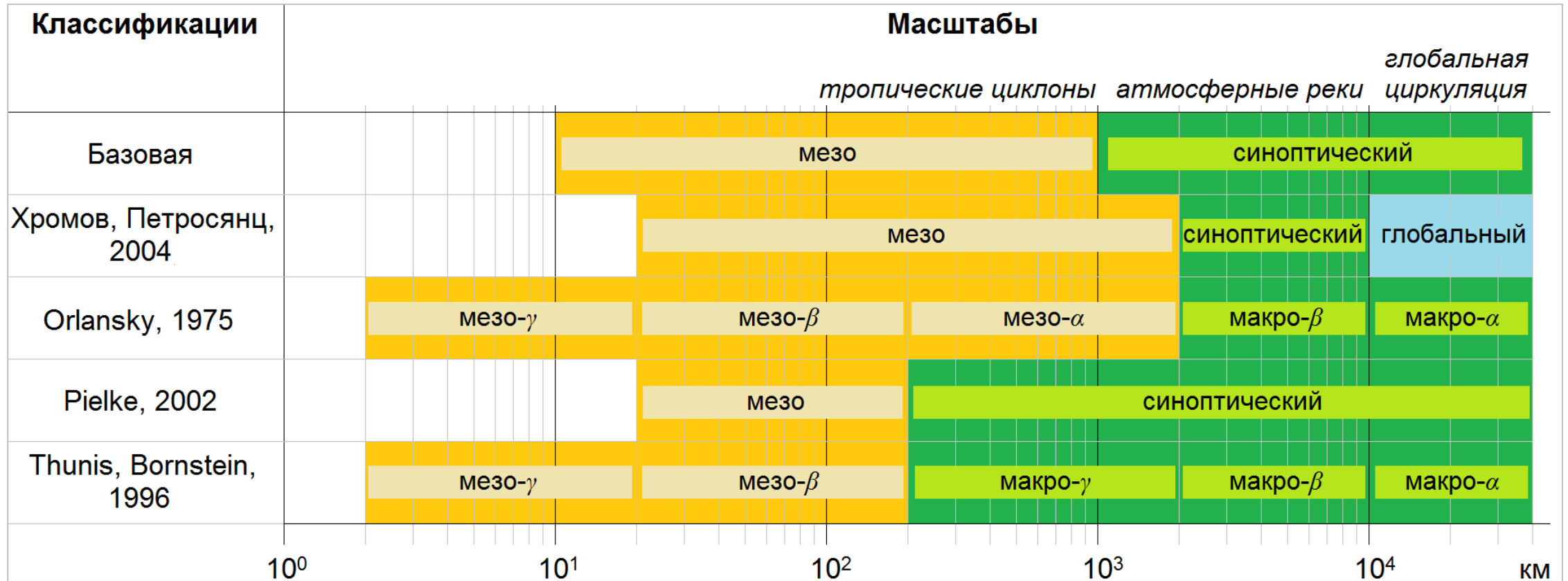
# Закономерности формирования образов атмосферных процессов в спутниковых радиофизических наблюдениях

Д.М. Ермаков, ИКИ РАН



Георгий Сергеевич Голицын  
(1935 – 2026)

# Варианты классификации атмосферных процессов

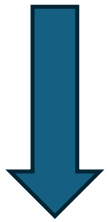


Российский гидрометеорологический энциклопедический словарь / Под ред. А.И. Бедрицкого. СПб; Москва: Летний сад. 2009. Т. 1–3.

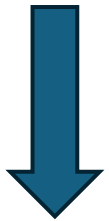
Голицын Г.С. Статистика и динамика природных процессов и явлений: Методы, инструментарий, результаты. М.: КРАСАНД. 2013. 398 с.

# Жизненный цикл и энергетика крупномасштабных атмосферных процессов

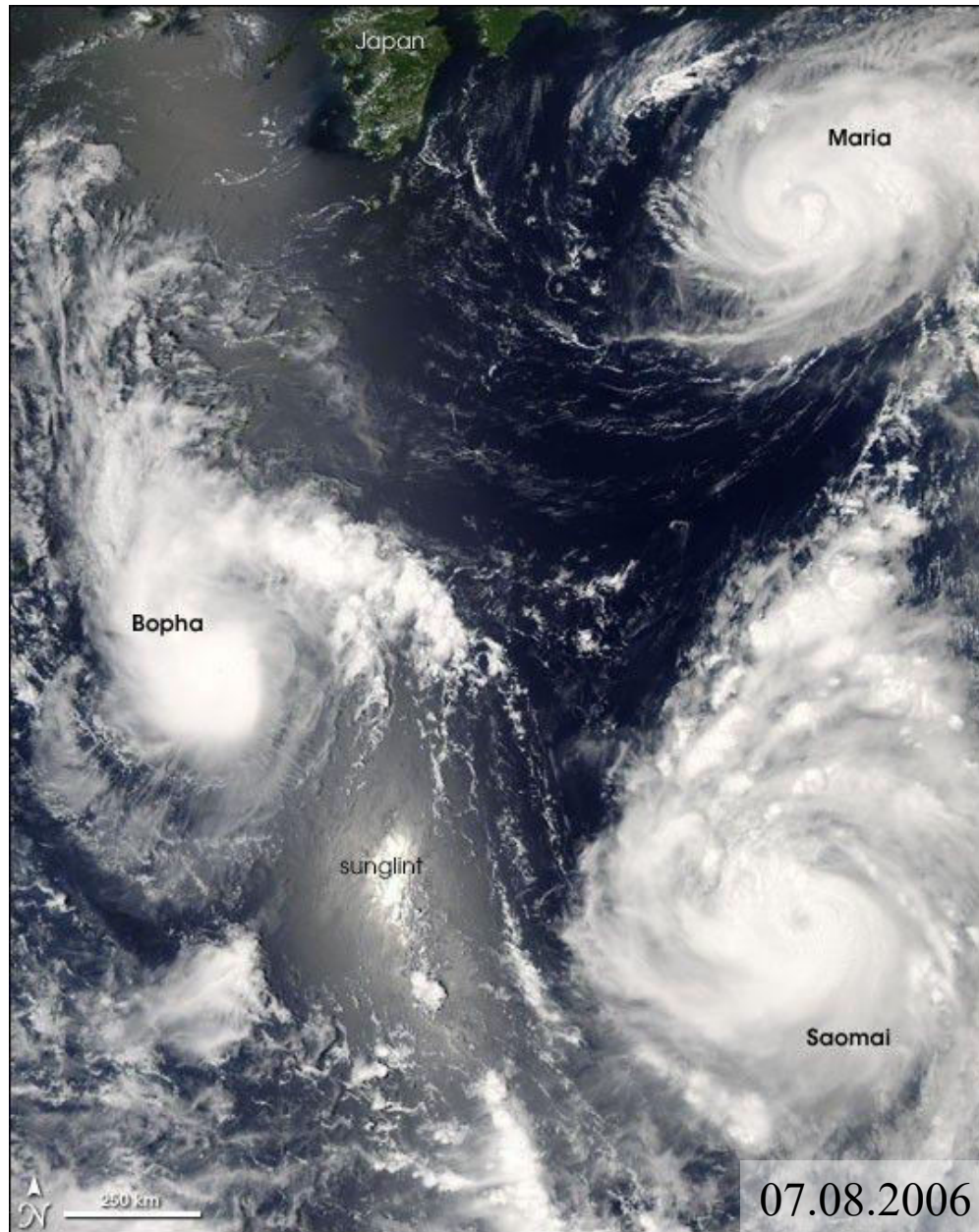
Зарождение



Эволюция



Диссипация/  
Трансформация



Формируются, как правило, над океаном, в насыщенной влагой атмосфере; важную роль играет резкий градиент свойств подстилающей поверхности и/или воздушных масс;

Движение и изменение характеристик обусловлены наличием источников энергии (скрытого и явного тепла), закономерностями общей атмосферной циркуляции, градиентами геофизических полей на крупных масштабах;

Диссипация обусловлена прекращением действия основных источников энергии и/или взаимодействием с более интенсивными атмосферными процессами.

# Характеристики и индикаторы атмосферных процессов

Масштаб (характерные размеры по горизонтали и вертикали)

Время жизни

Скорость перемещения (направление и величина)

Интенсивность

...

Закономерности динамики (и) пространственного распределения

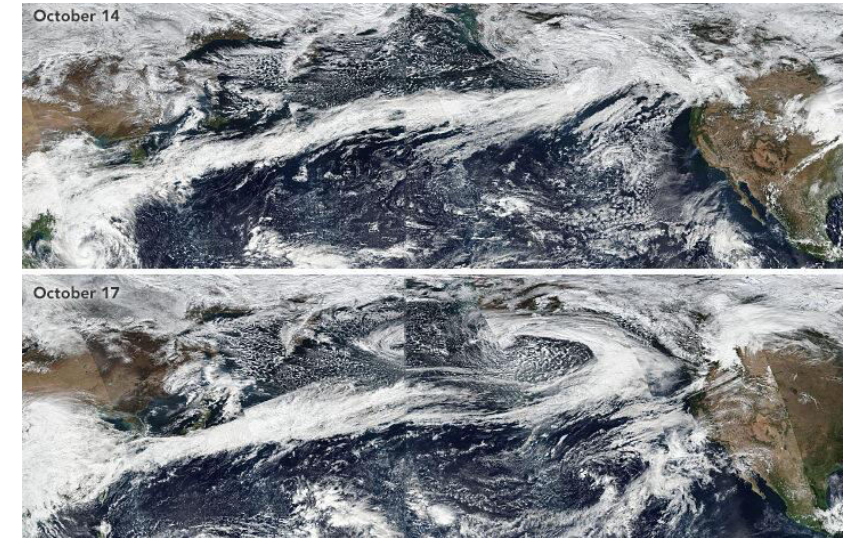
- давления

- влажности

- температуры

- скорости ветра

...



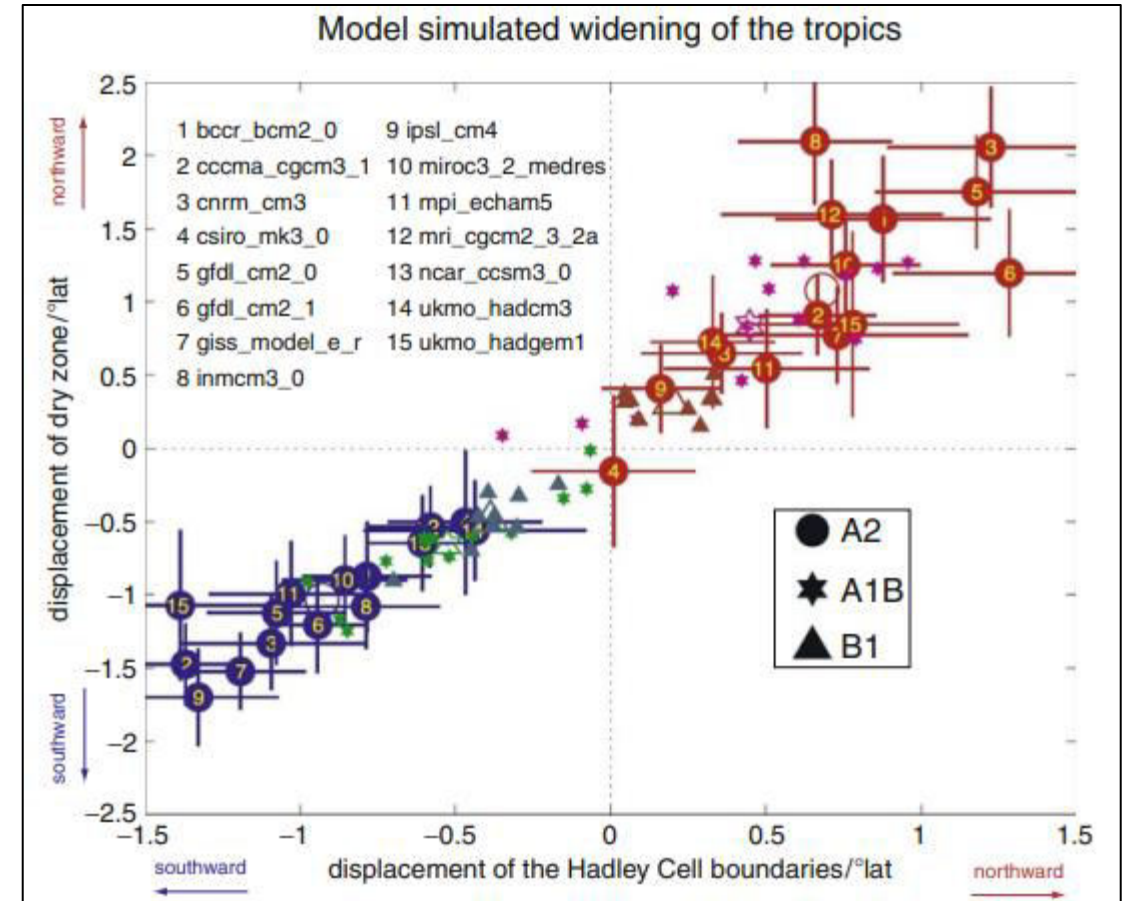
Атмосферная река между Азией и Северной Америкой в середине октября 2017 г.

# Важность спутниковых наблюдений атмосферных процессов

**TABLE 1** Estimates of tropical widening (in degrees latitude per decade) from observation-based studies

Study	Indicator	Data	Widening
Rosenlof [13]	Tropical upwelling (60 hPa)	Analyses	3.0
Reichler and Held [14]	Tropopause height	Radiosonde	0.4
	Tropopause height	Reanalyses	0.7
Fu et al. [15]	Tropospheric temperatures	MSU	0.7
Hudson et al. [16]	Total ozone	TOMS	1.0 (NH only)
Seidel and Randel [17]	Tropopause height	Radiosonde, reanalyses	1.8–3.1
Hu and Fu [59]	Outgoing longwave radiation	Various satellite sensors	1.5
	Mean meridional circulation	Reanalyses	1.0
Archer and Caldeira [92]	Jet stream separation	Reanalyses	0.3
Seidel et al. [23]	Jet stream separation	Reanalyses	1.0

Reichler T. Changes in the atmospheric circulation as indicator of climate change. In: Climate change: Observed impacts on planet Earth (Ed. Trevor M. Letcher). Elsevier. 2009. P. 145–164



**FIGURE 4** Displacements of (*x*-axis) the poleward boundaries of the tropical HC and (*y*-axis) the subtropical dry zone for different GCMs and scenarios. Reddish colors are for the NH and bluish colors are for the SH. The circles, hexagrams, and triangles denote the changes (2081–2100 minus 2001–2020, in degrees latitude) estimated from the A2, A1B, and B1 scenarios of the IPCC-AR4 simulations. The open symbols denote the multimodel ensemble mean values. The crosses centered on each circle show the 95% confidence intervals using a Student's *t*-test. Adapted from Ref. [22].

# Влияние уровня обработки спутниковых данных на выбор методики анализа

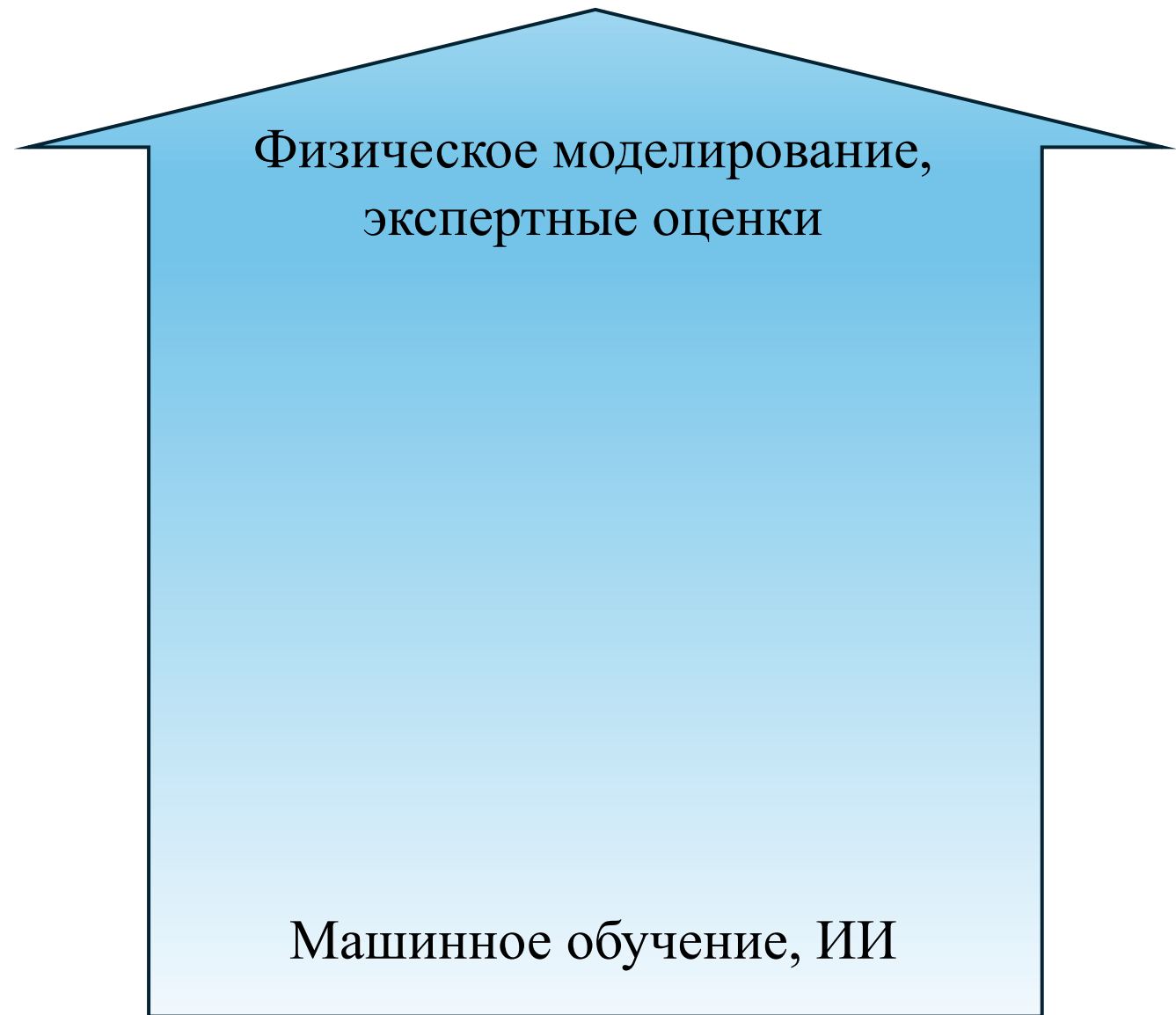
L2 (восстановленные  
параметры атмосферы  
и поверхности)



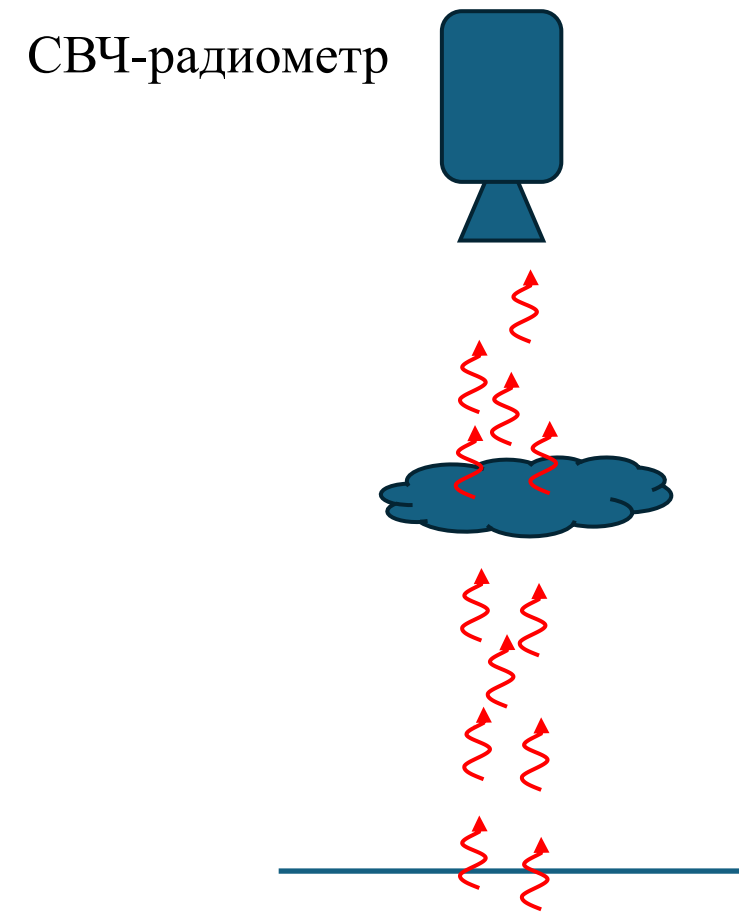
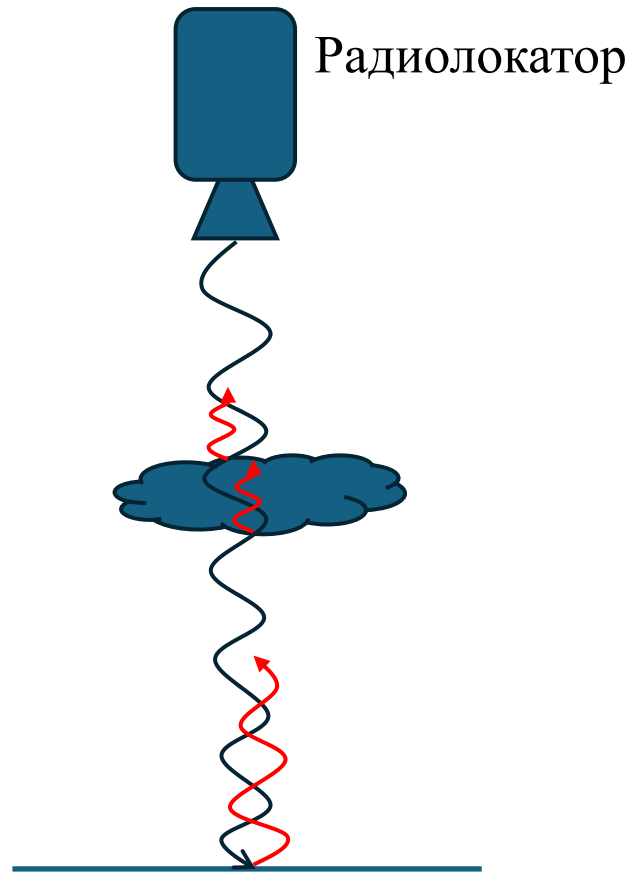
L1B, (калиброванные  
L1A измерения)



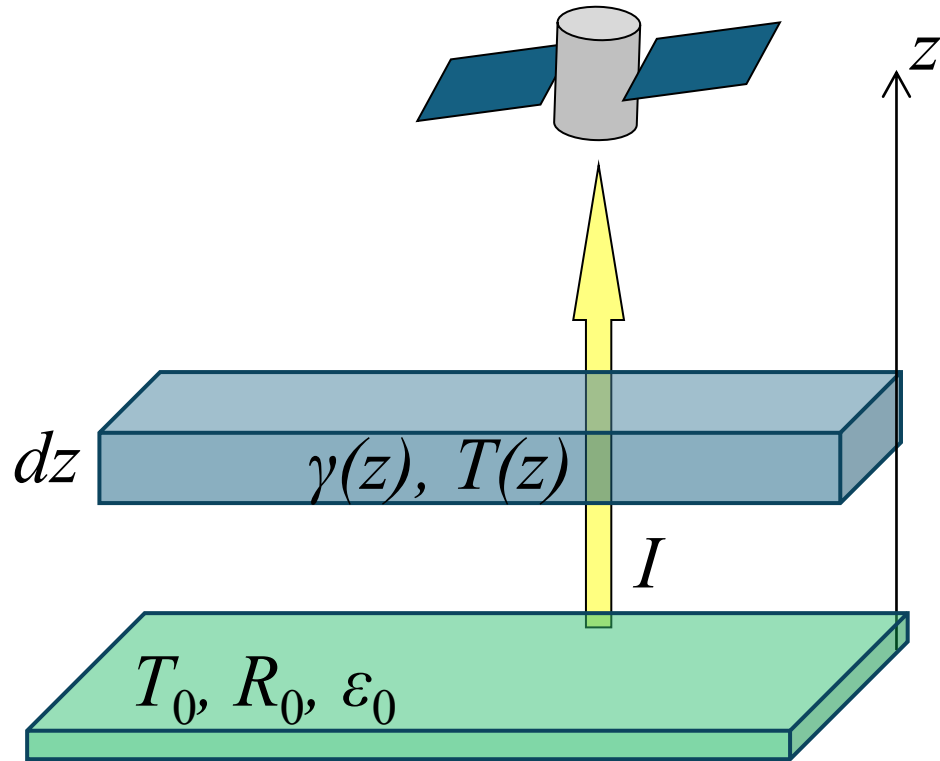
L0 (сырые данные)



# Взаимодополняемость спутниковой СВЧ-радиометрии и радиолокации



# Упрощенное уравнение переноса излучения в микроволновом диапазоне

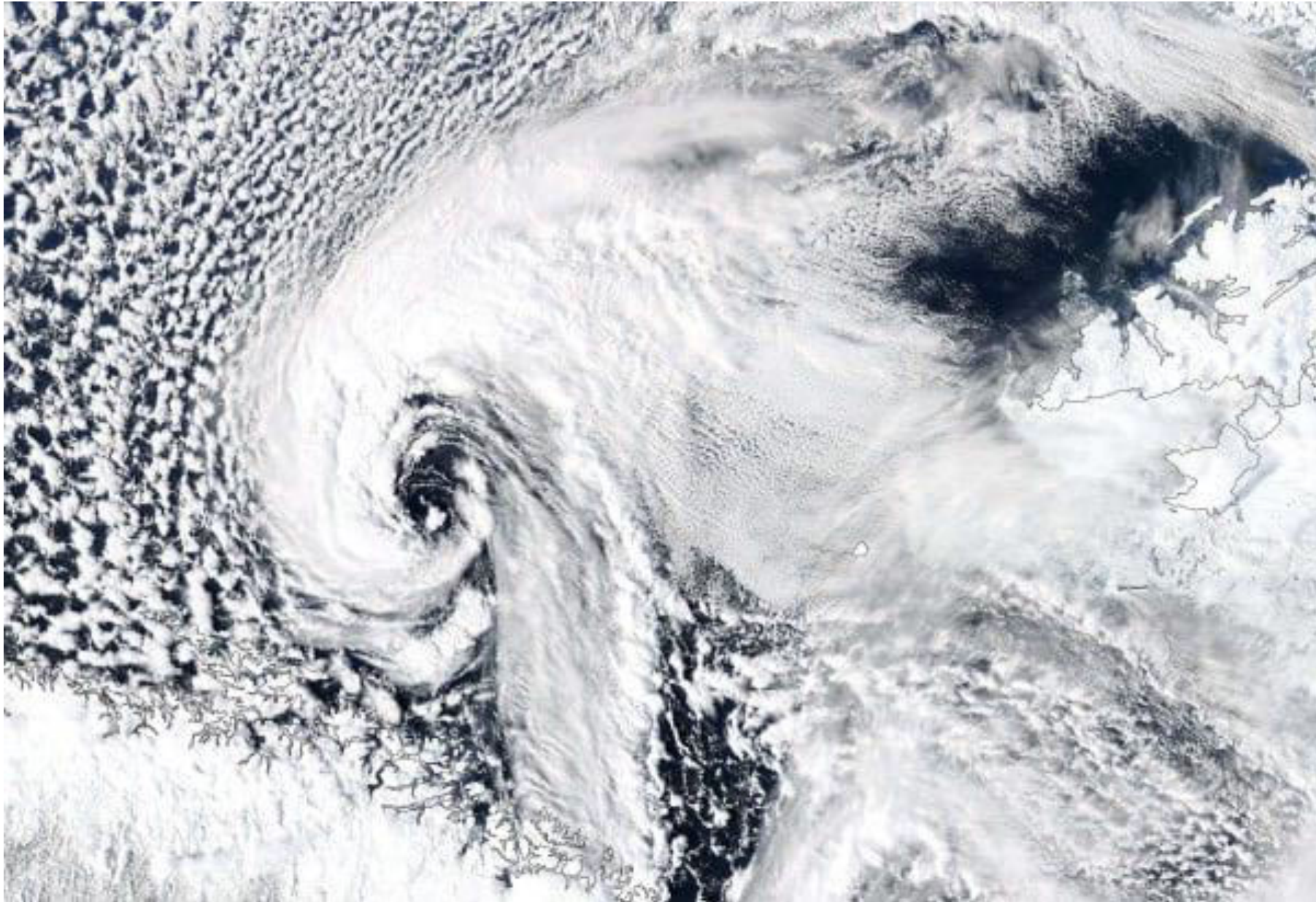


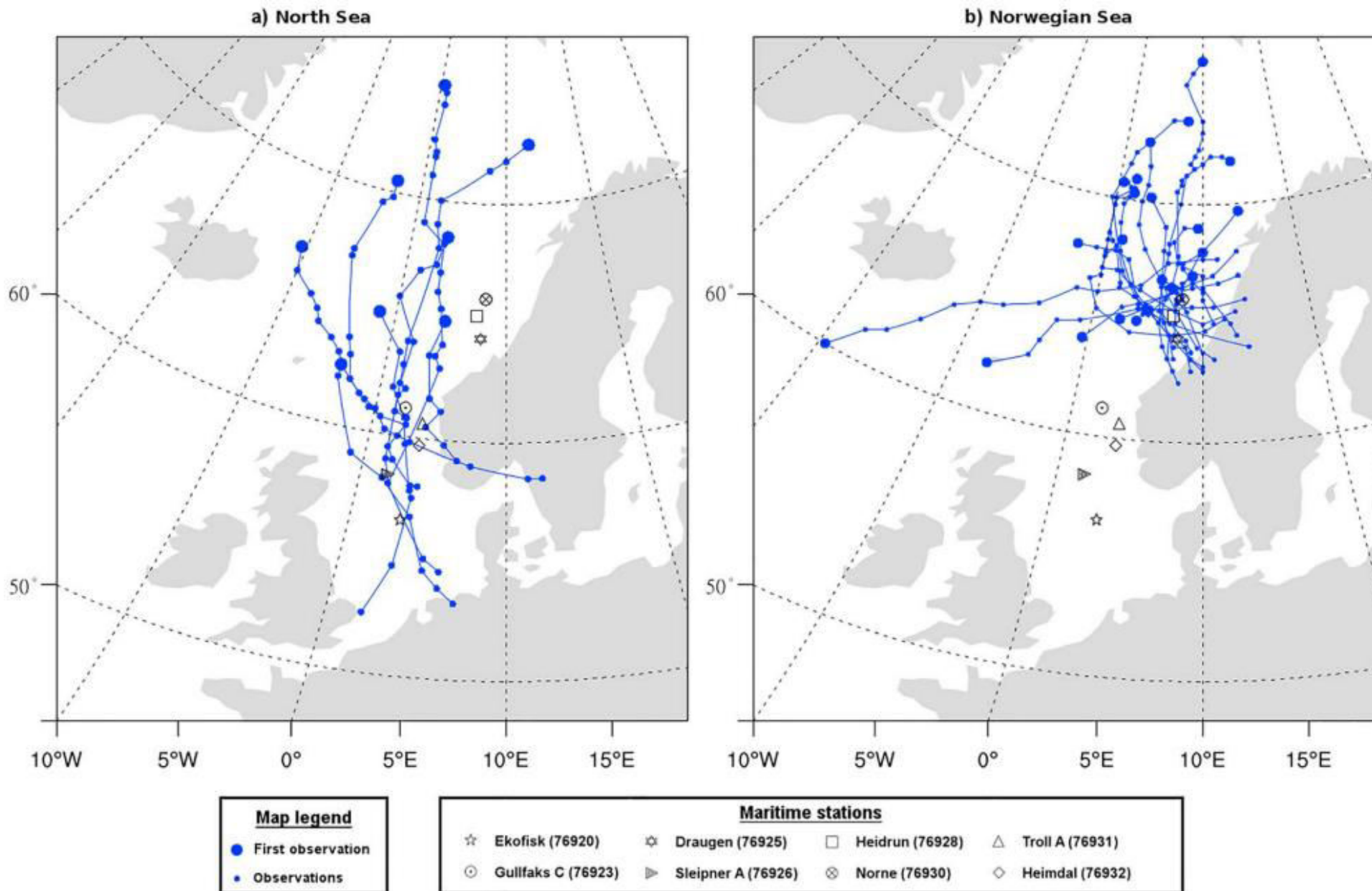
Космическое излучение,  
отраженное поверхностью

$$\begin{aligned}
 T_{br} = & \text{Регистрируемая яркостная температура} \\
 = & T_0 \epsilon_0 \exp(-\tau) \quad \text{Излучение подстилающей поверхности} \\
 + & \int_0^{\infty} T(z) \gamma(z) \exp\left(-\int_z^{\infty} \gamma(h) dh\right) dz \quad \text{Восходящее излучение слоя} \\
 + & R_0 \exp(-\tau) \int_0^{\infty} T(z) \gamma(z) \exp\left(-\int_0^z \gamma(h) dh\right) dz \\
 + & R_0 T_r \exp(-2\tau) \quad \text{Нисходящее излучение слоя, отраженное поверхностью}
 \end{aligned}$$

Нисходящее излучение слоя, отраженное поверхностью

# Примеры: наблюдения полярных циклонов





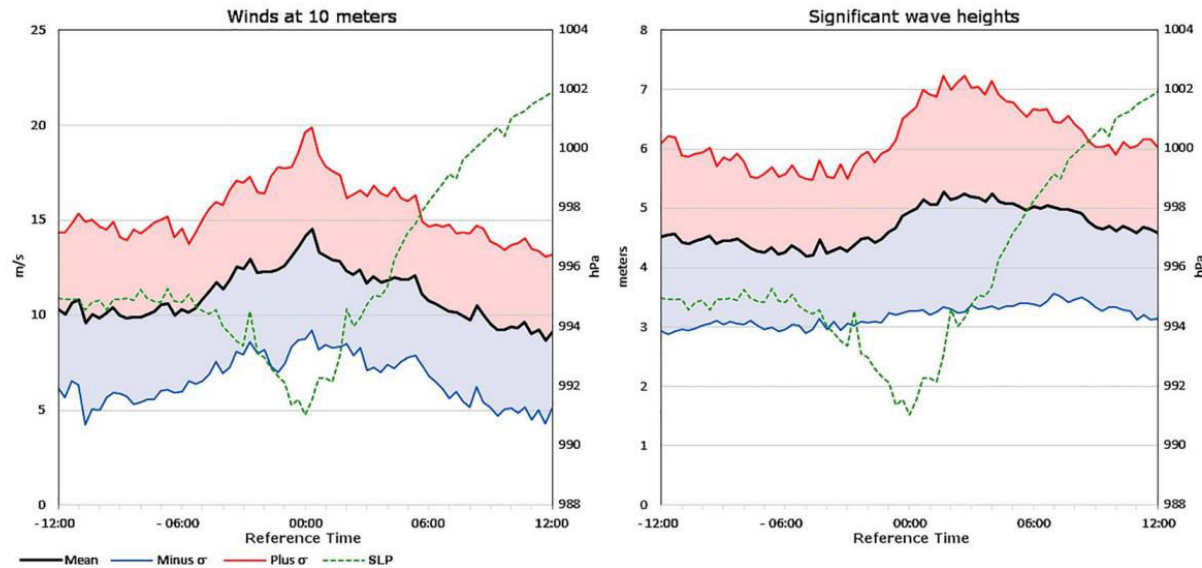
Климатология 29  
 ПЦ за 14 зим  
 (1999-2013),  
 прошедших вблизи  
 метеостанций в  
 Северном и/или  
 Норвежском морях

Пример записи  
(фрагмент):  
MSLP –  
минимальное  
давление на  
уровне моря;  
WS – скорость  
ветра;  
SWH –  
значимая  
высота волн

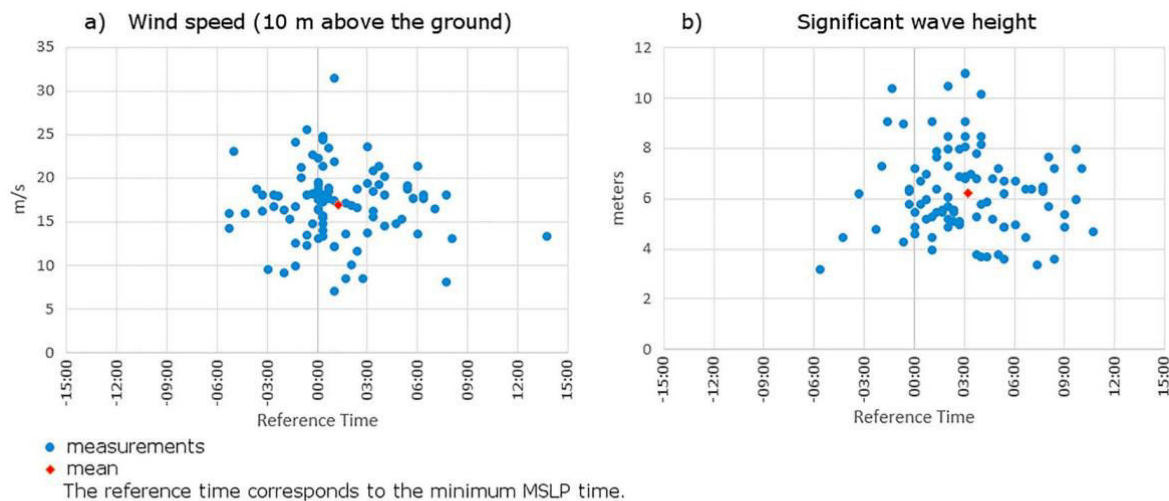
**Table 2**

*List of PLs Impacting Maritime Station, Considered in This Study*

No	Date	Station	Minimum MSLP time	Maximum WS	Maximum SWH
1	31/01/00	76925	08:00	31.5	7.2
	31/01/00	76928	08:00	17.7	6.5
2	31/01/00	76930	09:00	21.5	6.4
	12/11/01	76925	13:40	19.3	8.5
	12/11/01	76928	11:20	16.5	9.1
3	12/11/01	76930	09:20	18.1	6.7
	23/01/02	76925	10:40	12.2	3.8
	23/01/02	76928	07:00	15.6	3.8
4	23/01/02	76930	06:40	13.1	4.7
	25/01/02	76925	—	12.4	5.5
	25/01/02	76928	05:40	11.7	5.2
4bis	25/01/02	76930	06:00	8.5	5
	25/01/02	76925	16:40	12.2	5.3
	25/01/02	76928	14:40	14.9	4.9
5	25/01/02	76930	11:20	8.6	4.8
	23/02/02	76920	09:00	18	7.3
	23/02/02	76926	03:40	18.8	—
	23/02/02	76925	19:20	19.6	8.5
	23/02/02	76928	18:20	18.9	8.1
6	23/02/02	76930	17:00	22.8	7.8
	31/01/03	76920	04:40	16.9	7.2
	31/01/03	76926	02:00	21.5	7.7
7	31/01/03	76923	15:00	24.5	10.5
	31/01/03	76932	17:40	20.1	6.7
8	29/01/04	76920	00:00	16.6	6.8



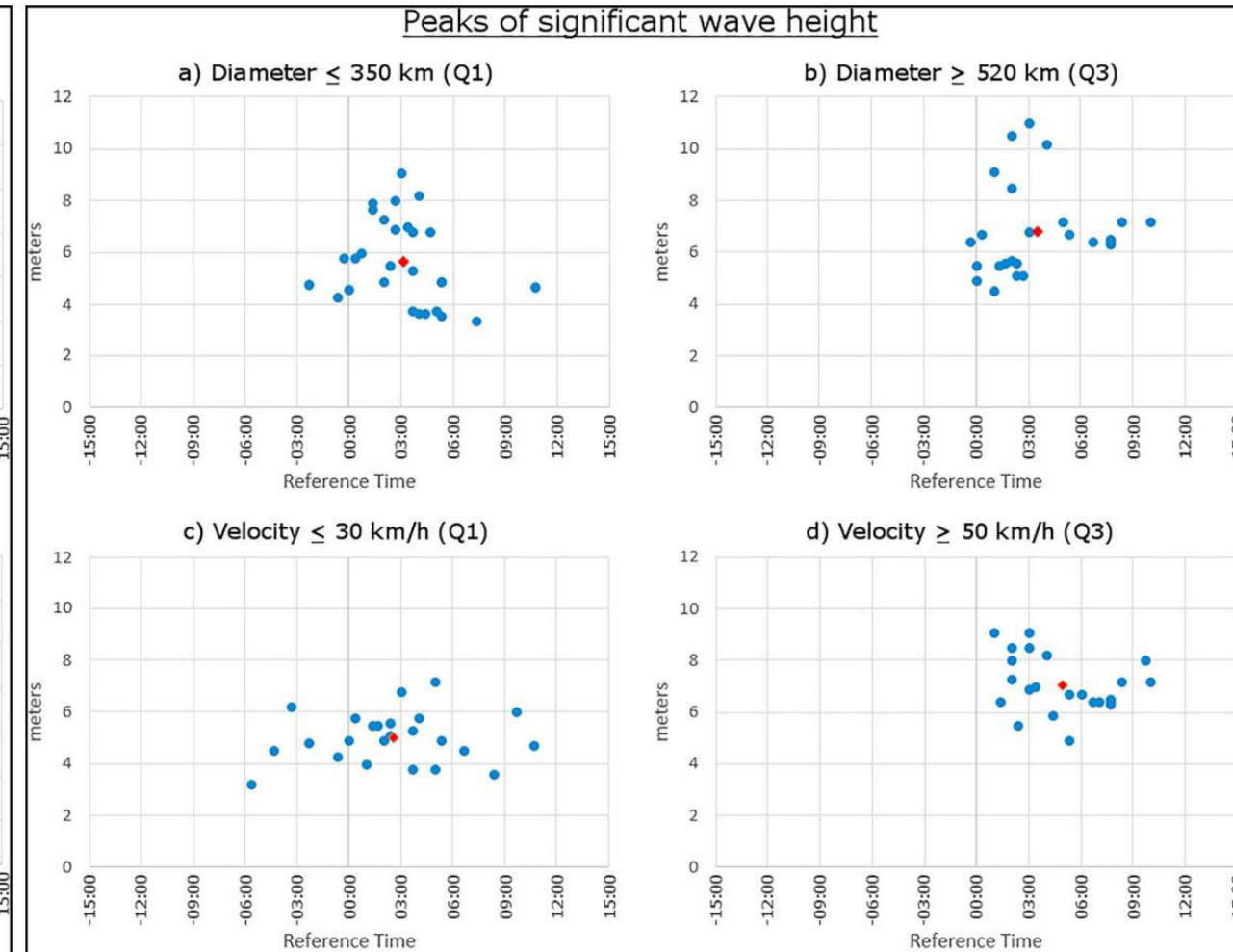
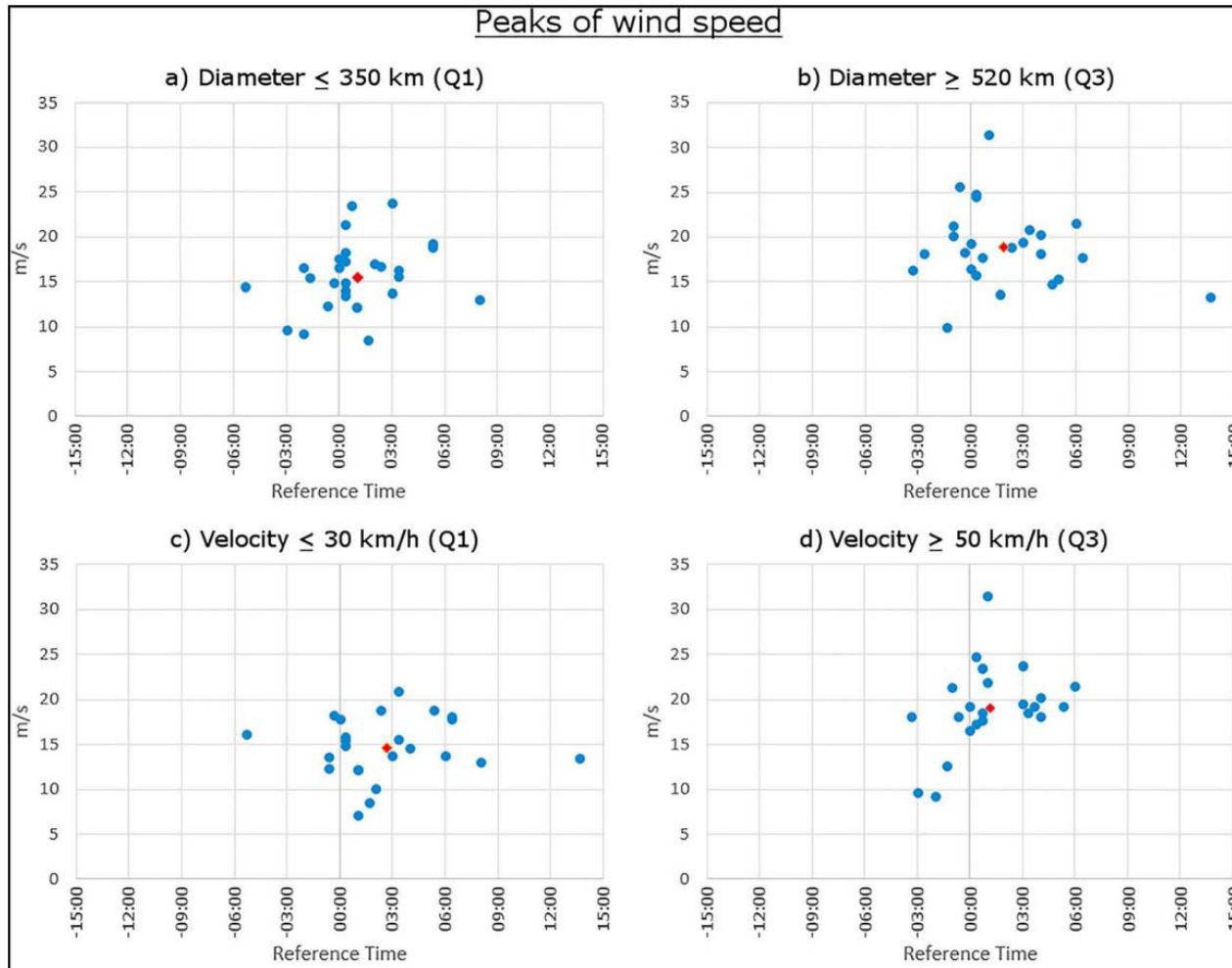
**Figure 2.** Mean and range standard deviations of wind speed and significant wave heights averaged for transits of 29 polar lows (refer text). The 00:00 reference time is the time of minimum sea level pressure (SLP).



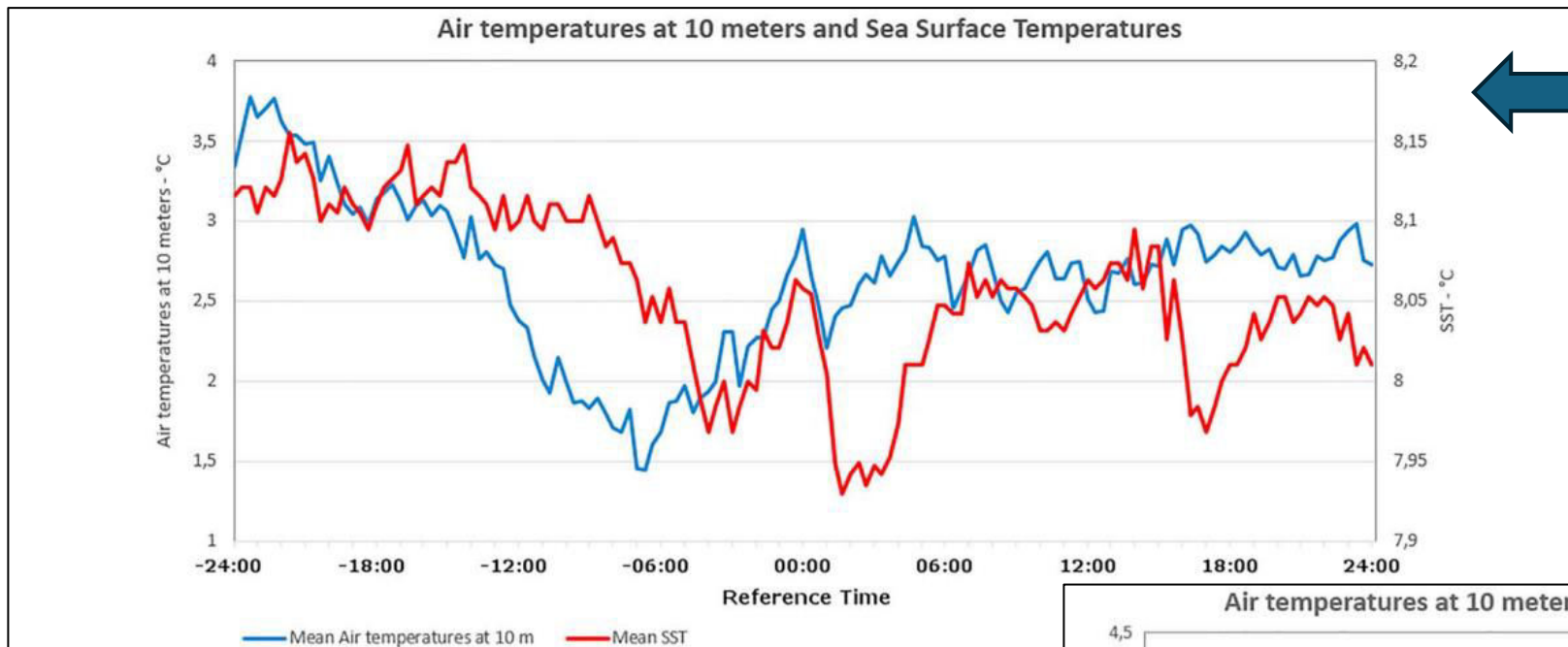
**Figure 4.** Peak wind speeds (a) and significant wave heights (b) for the 29 polar lows. The red rhombus indicates the mean value. The reference time corresponds to the time of minimum sea level pressure (MSLP).

Средний по ансамблю ПЦ максимум скорости ветра составил **17,1 м/с** и фиксировался **через один час** после достижения минимального давления на уровне моря (около 991 гПа).

Средний по ансамблю ПЦ максимум значимой высоты волн составил **6,3 м** и фиксировался **через три часа** после достижения минимального давления на уровне моря.



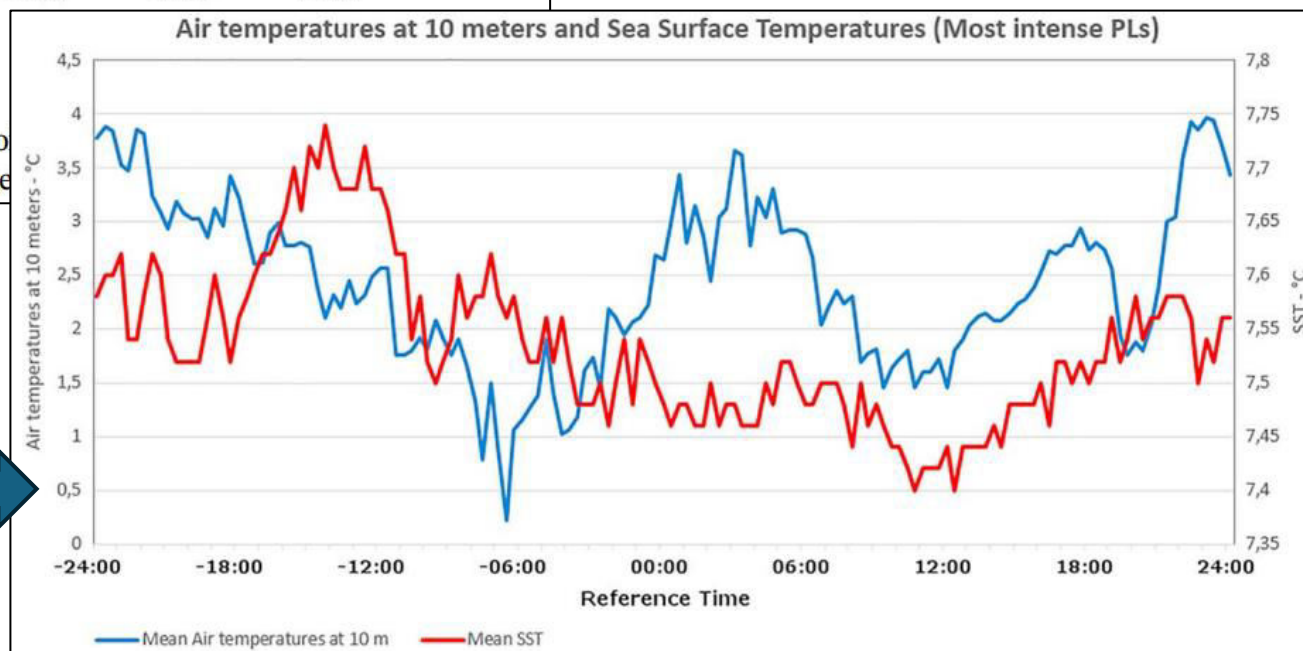
Более крупные и быстрее перемещающиеся ПЦ дают большие возмущения в скорость ветра и в значимую высоту волн. Диапазоны возмущений перекрываются, но подтверждены их статистически значимые отличия. **См. также время запаздывания!**



Средний ход температуры воздуха и поверхности океана для «всех» ПЦ. См. диапазоны значений! Холодный след практически отсутствует, иногда фиксируется «тёплый».

Figure 3. Mean sea surface temperature and air temperature during the transit of time of minimum sea level pressure. Note the different scales used for sea surface

Средний ход температуры воздуха и поверхности океана для наиболее интенсивных ПЦ. Качественно та же картина.



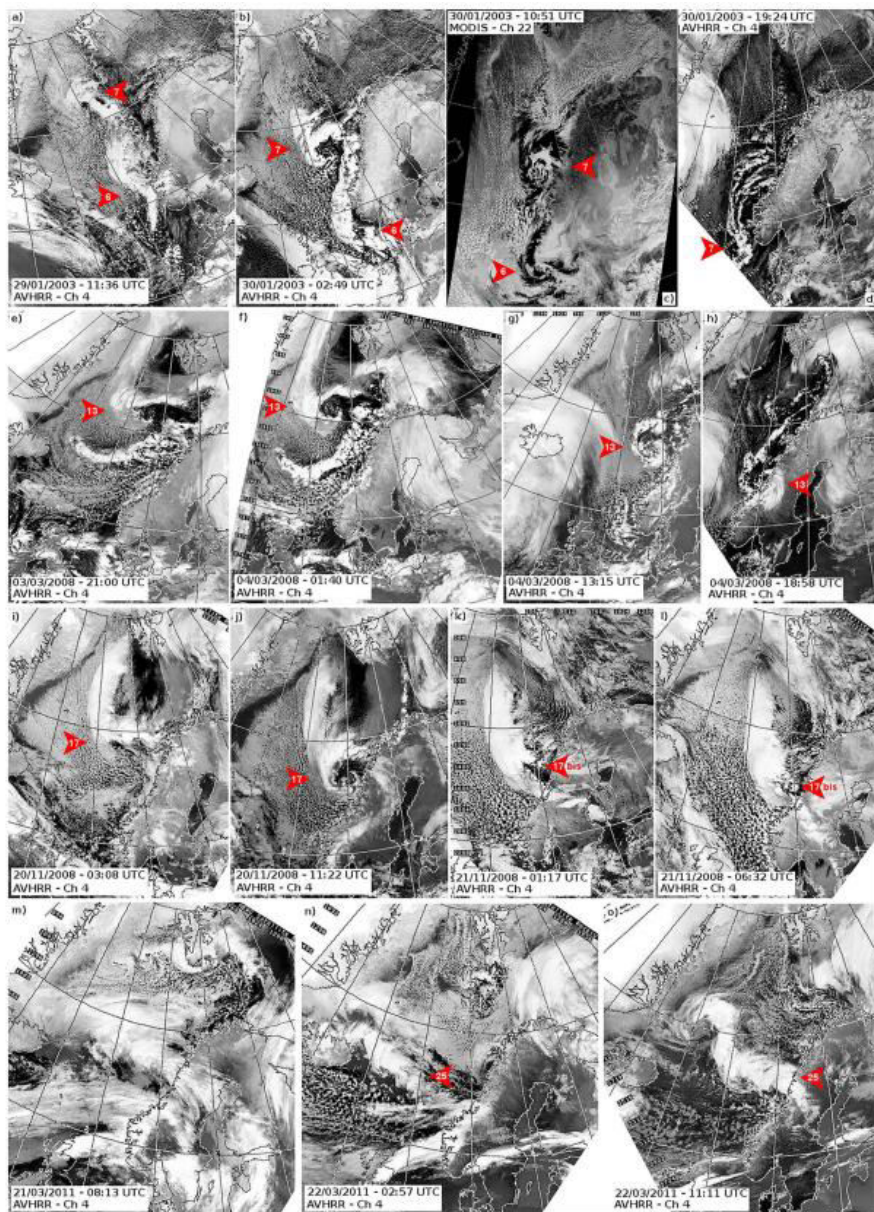


Figure 7. AVHRR thermal-infrared satellite images showing PL6 and PL7 (panels a-d), PL13 (panels e-h), PL17 (panels i-l), and PL25 (panels m-o). AVHRR = advanced very high resolution radiometer; MODIS = Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.

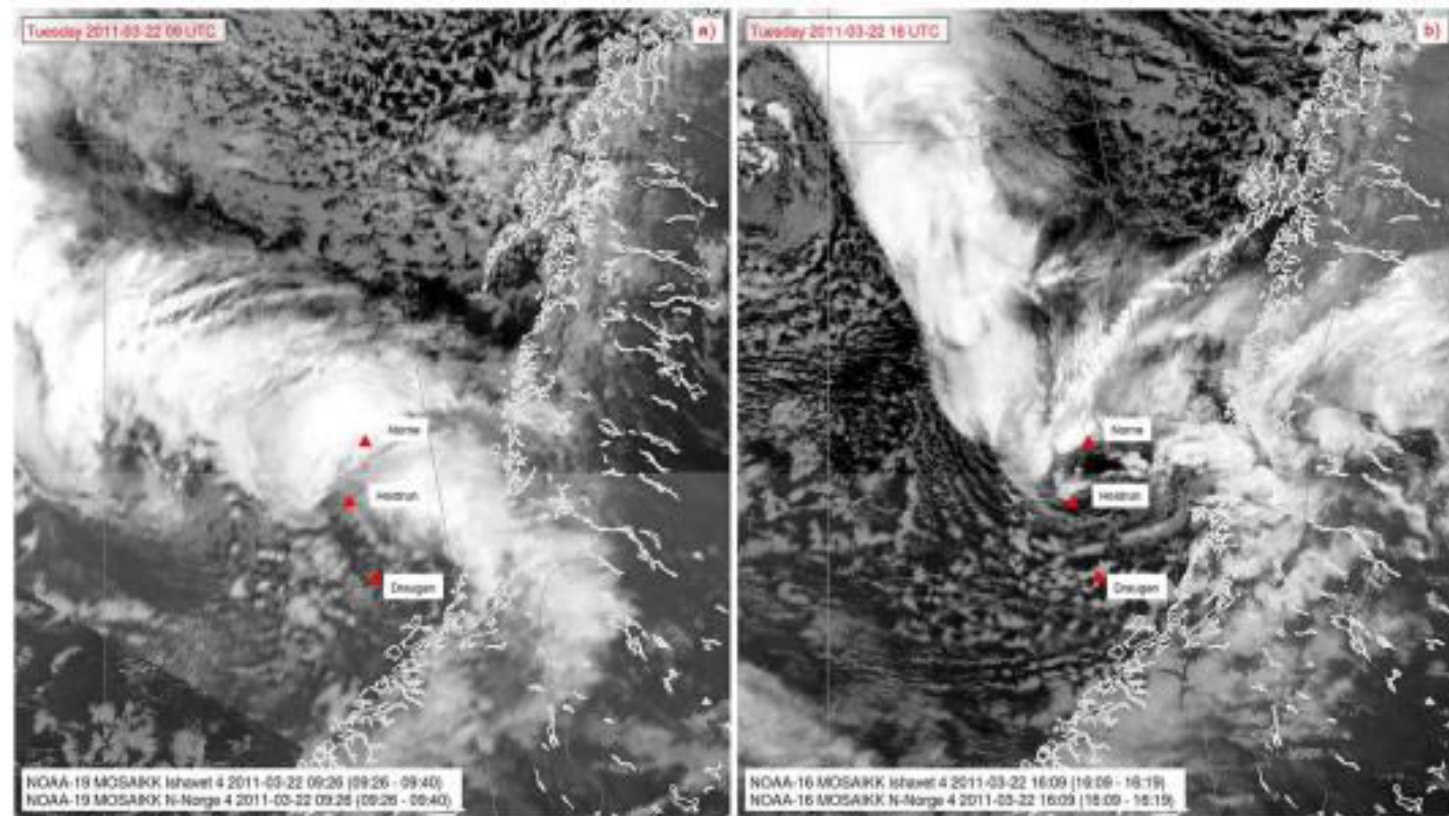
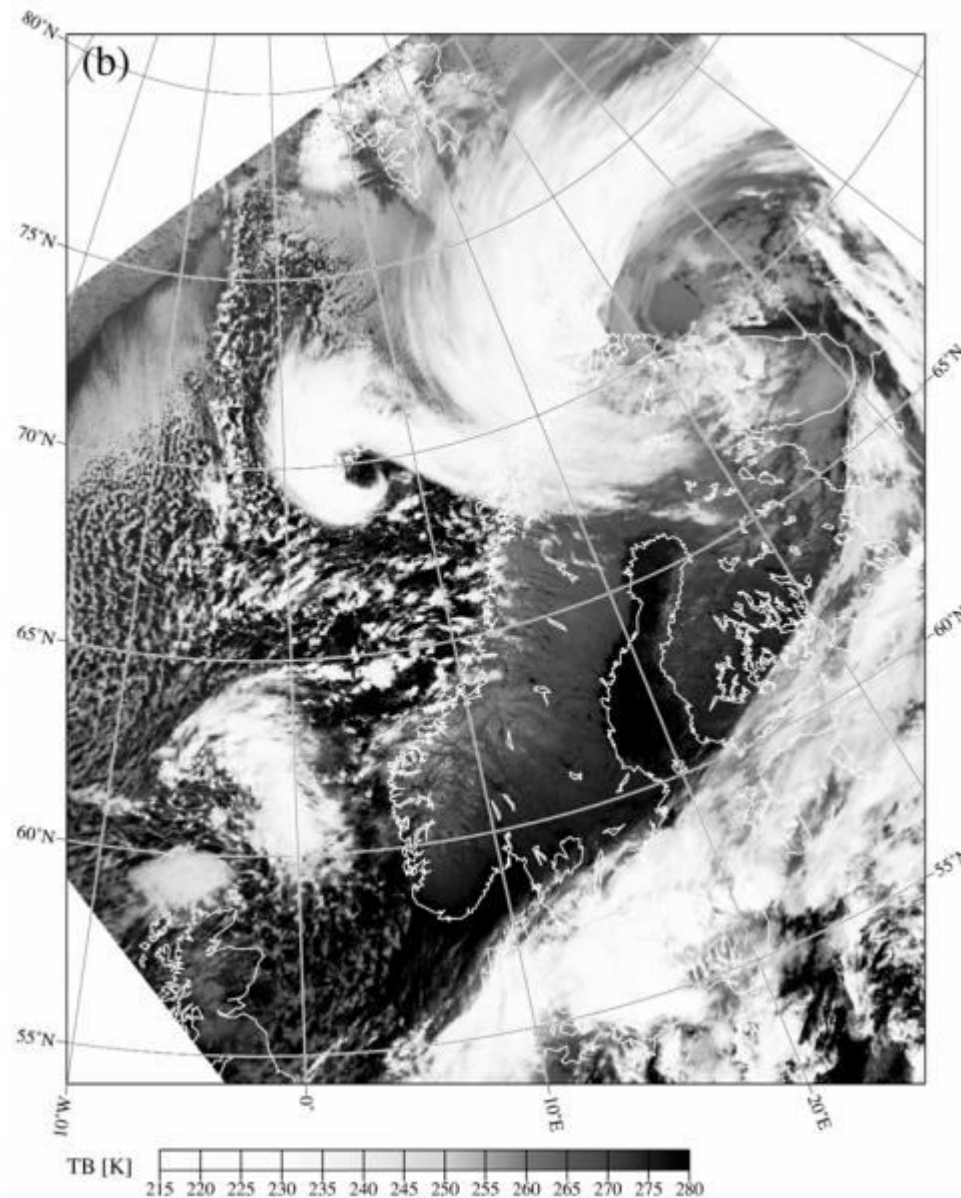


Figure 10. Satellite imagery illustrating the passage of PL25 over maritime stations in the Norwegian Sea. NOAA = National Oceanic and Atmospheric Administration.

Кумулятивный эффект от последовательного прохождения трех ПЦ вблизи метеостанции – пики СВ (м/с) и СВВ (м):  
 1) 16,7 м/с и 5,2 м; 2) 19,2 м/с и 6,2 м; 3) 24,5 м/с и 10,5 м.

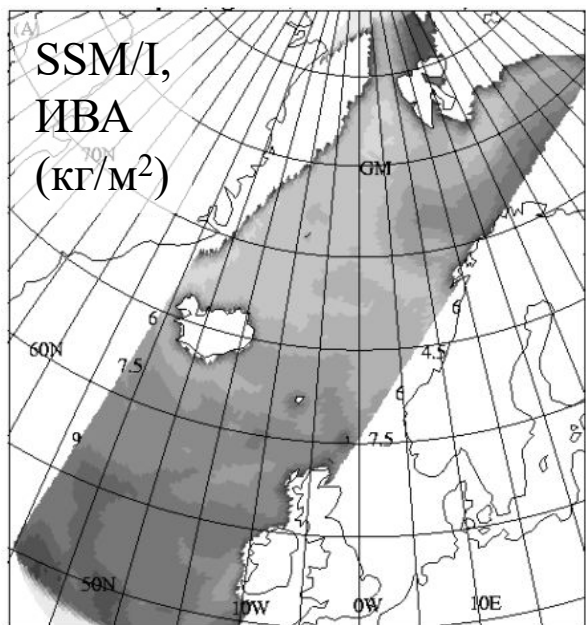


Исследован ПЦ le Cygne («Лебедь»). ПЦ имел аномально долгое время жизни (**72 часа**), что позволило неоднократно наблюдать его несколькими спутниковыми приборами:

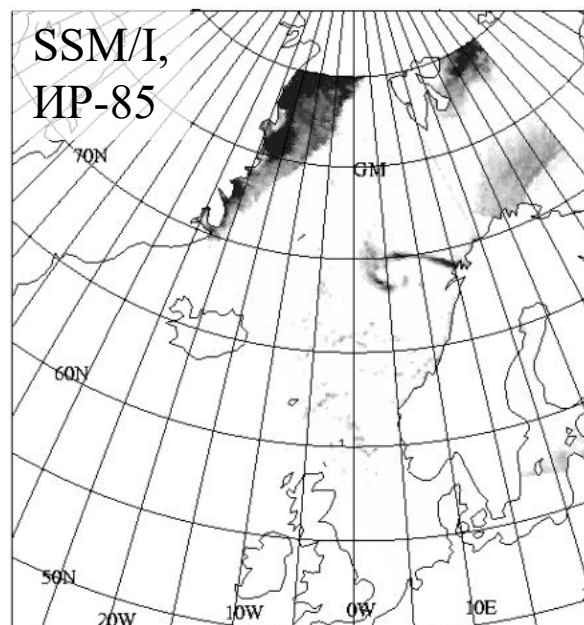
- AVHRR (форма облачности),
- TOVS (вертикальные профили температуры),
- SSM/I (интегральное влагосодержание, водозапас облаков, скорость поверхностного ветра, рассеяние на крупных частицах льда),
- Торех-Poseidon (разрезы скорости ветра и значимой высоты волн).

Привлечены также корабельные измерения.

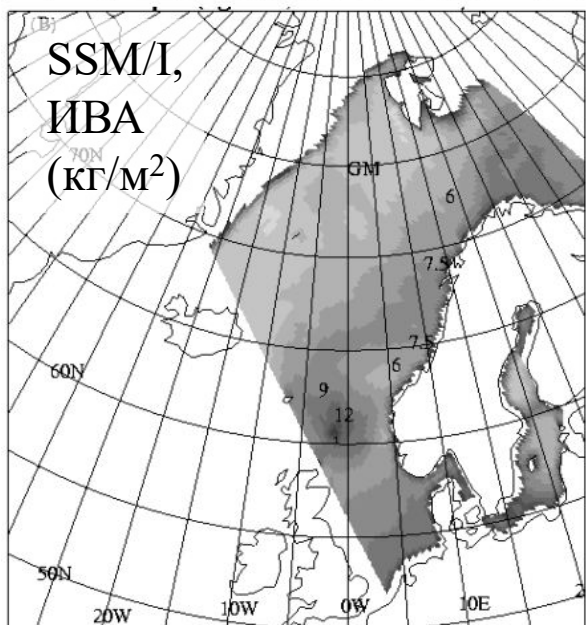
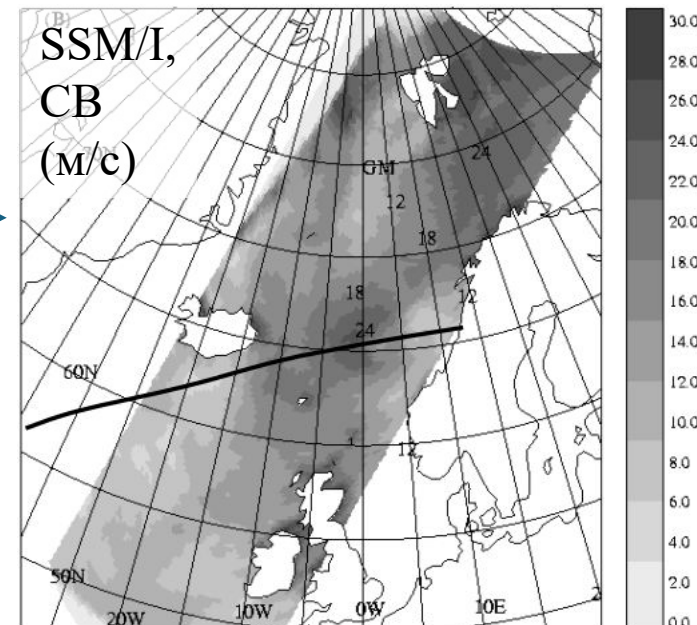
В итоге проведено численное моделирование ПЦ.



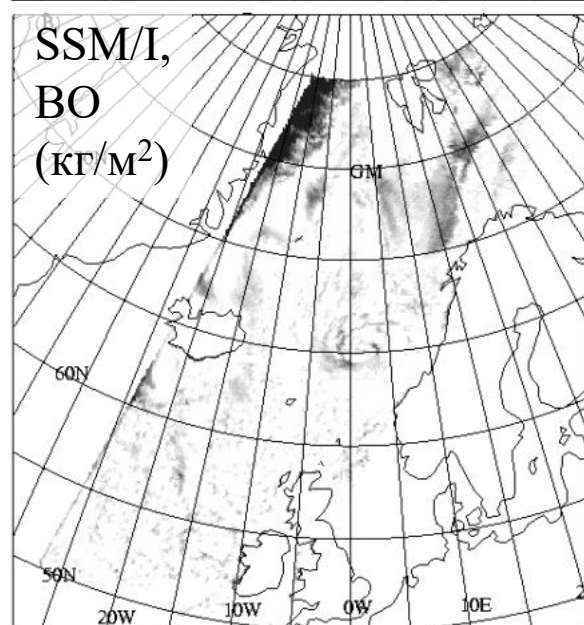
50 км  
шаг  
сетки



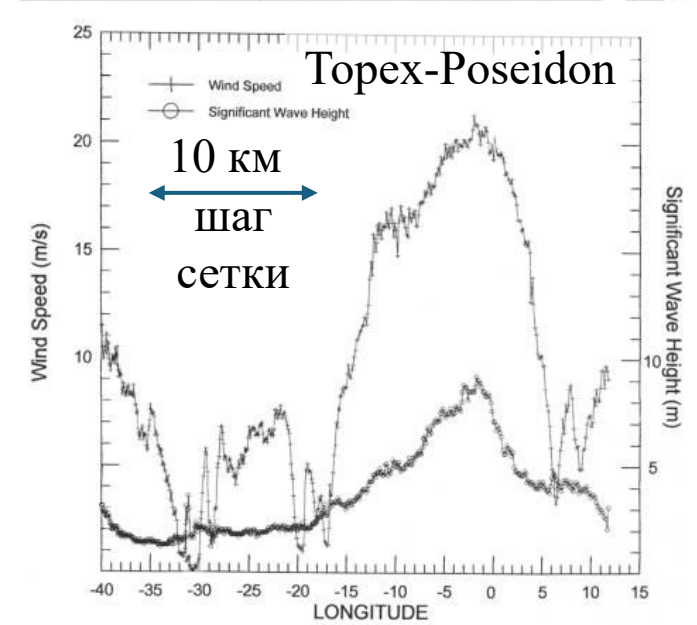
50 км  
шаг  
сетки

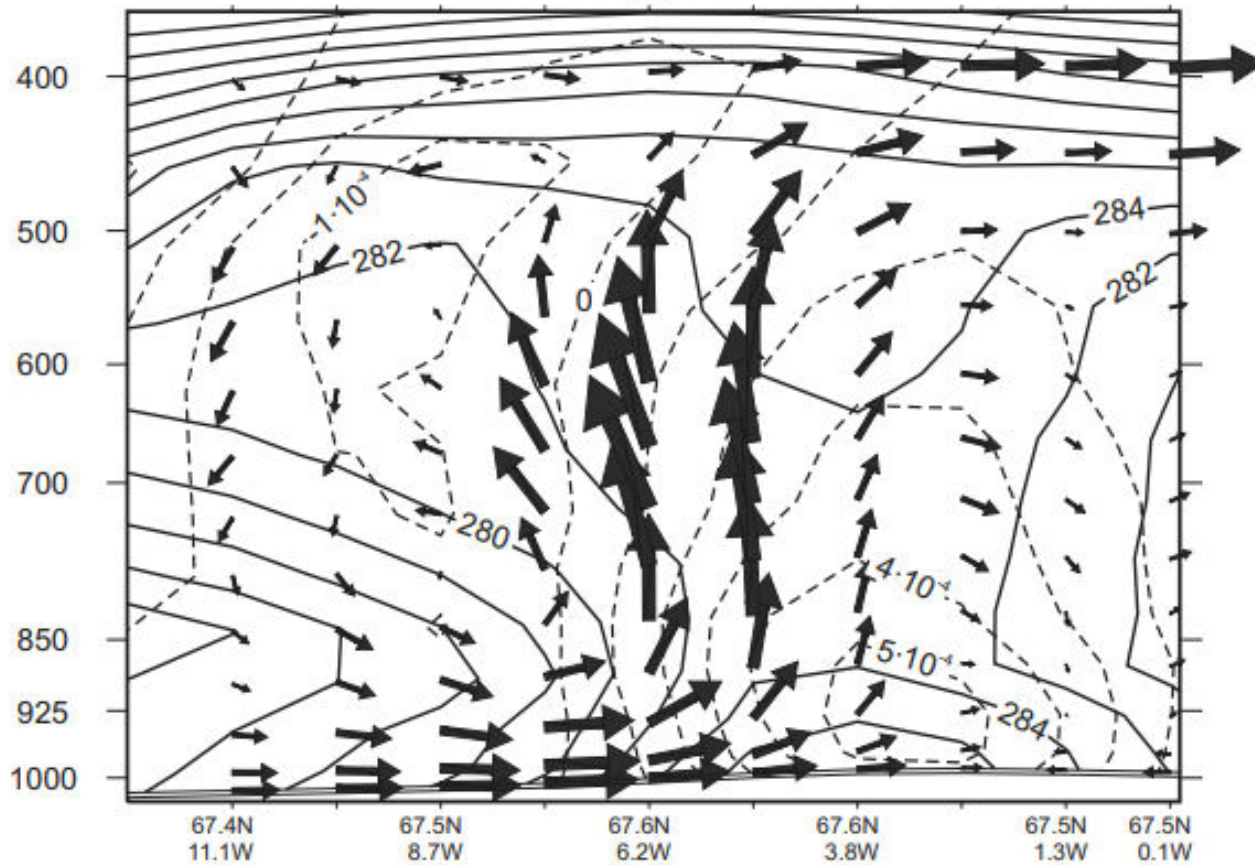


50 км  
шаг  
сетки

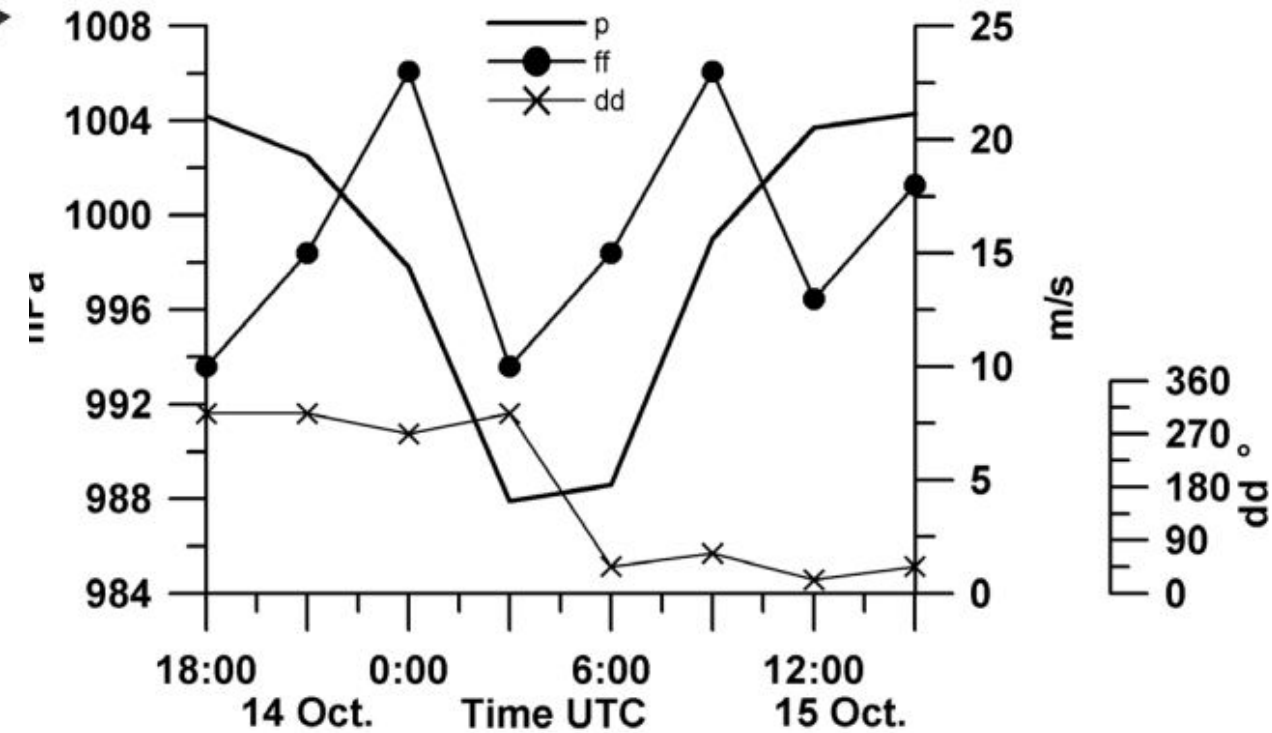


50 км  
шаг  
сетки



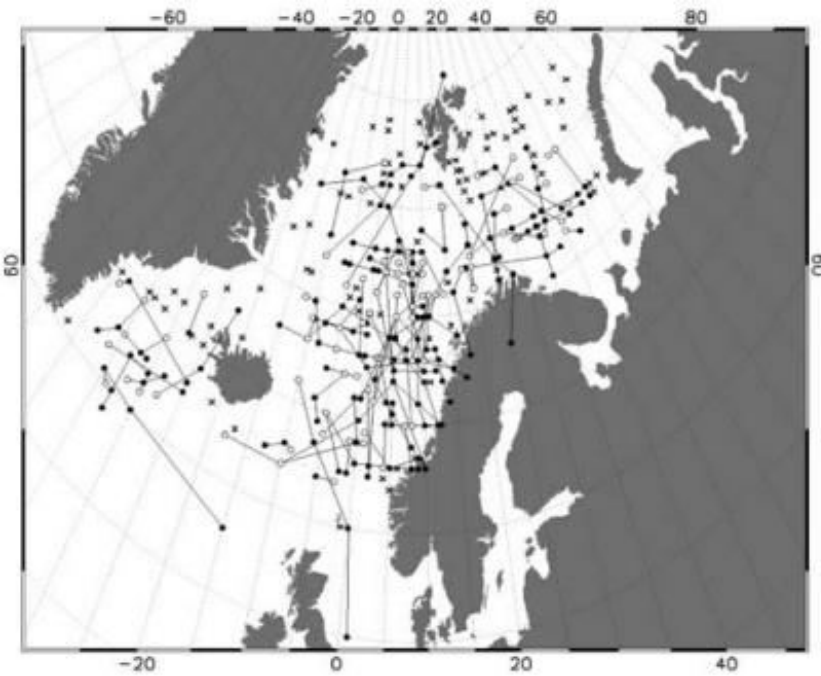


Результат моделирования ПЦ



Судовые наблюдения

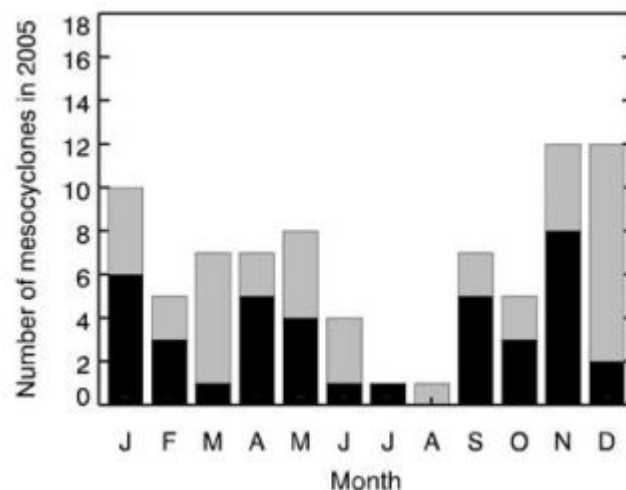
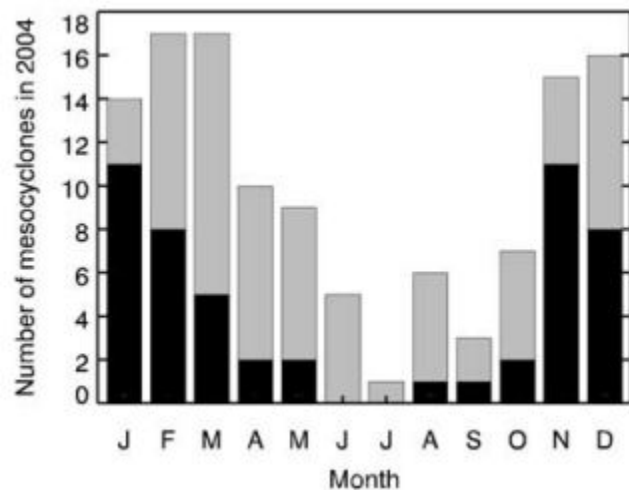
Симметрия структуры?



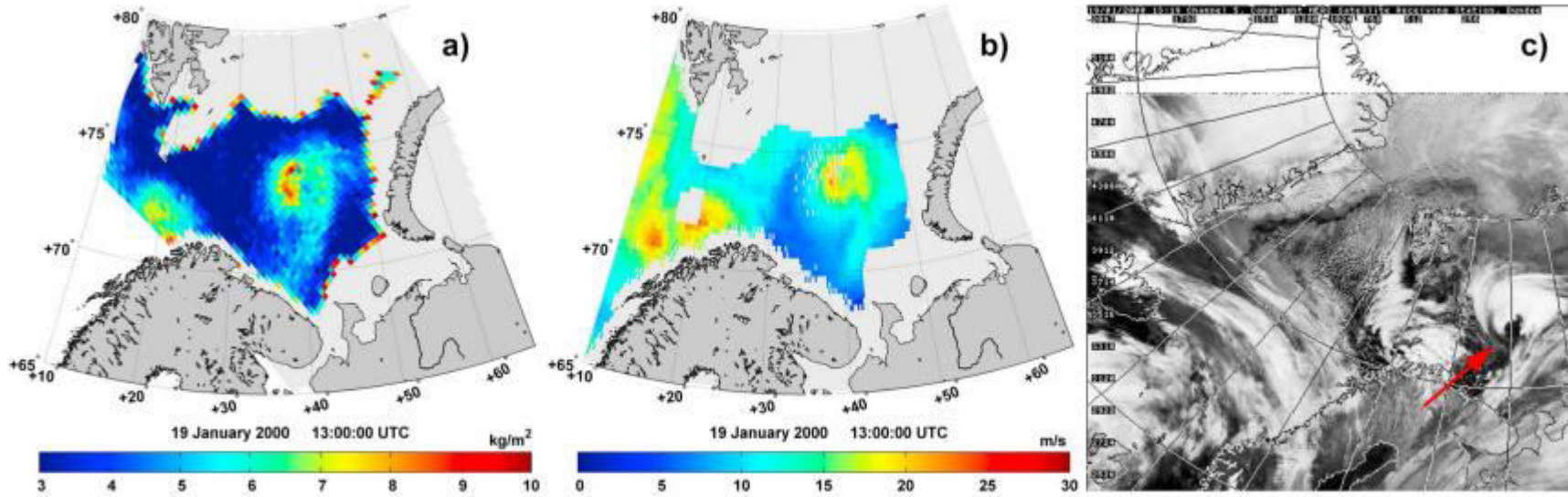
Одна из первых попыток построить климатологию (за 2004 – 2005 гг.) ПЦ на основе спутниковых данных ДЗЗ.

Указано, что использование реанализа не достаточно в силу неудовлетворительной воспроизводимости ПЦ в моделях. Введено четкое разграничение ПЦ – ПМЦ по критерию максимальной скорости ветра.

Из этого следует, что анализа формы облачности по ИК-наблюдениям мало, нужны данные о ветре (SSM/I, HOAPS).



Детектировано 90 ПЦ и 109 ПМЦ; 75 ПЦ в форме запятной, 15 – спирали. Получены распределения ПЦ по частоте возникновения в разные месяцы (слева), максимальным скоростям ветра, размерам, времени жизни и др.



Слева направо:  
ИВА по SSM/I (авторская методика)  
СВ по SSM/I (данные RSS)  
Облачность по AVHRR (тепловой ИК канал),  
стрелкой показан ПЦ

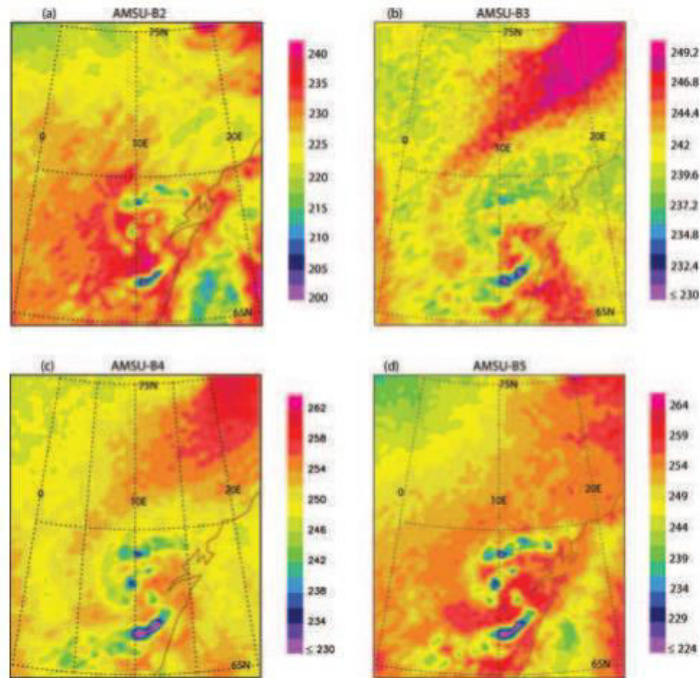
**Figure 1.** A polar low on 19 January 2000 present on (a) total atmospheric water vapor content field, (b) sea surface wind speed field, and (c) AVHRR thermal infrared imagery; red arrow points to cloud signature associated with a polar low.

Региональная климатология ПЦ за 14 сезонов (1995/1996–2008/ 2009) по данным SSM/I.

Выявлены 637 ПЦ в Северном, Норвежском и Баренцевом морях.

Методология заключается в выявлении характерной формы ПЦ в поле интегрального влагосодержания и дальнейшего применения критерия максимального ветра (в течение короткого интервала времени).

Отмечается, что 1) форма облачности по ИК-наблюдениям не всегда показательна, т.к. неглубокие ПЦ могут перекрываться более высокими слоями облачности; 2) необходим очень тщательный контроль точности вычисления ИВА по данным SSM/I вследствие их невысоких значений и малых градиентов в полярных областях. Получены распределения ПЦ по диаметрам, времени жизни, пройденному пути, скорости дрейфа, максимальной скорости ветра.



Спектральные каналы AMSU-B, характеризующие температуру атмосферы на разных высотах

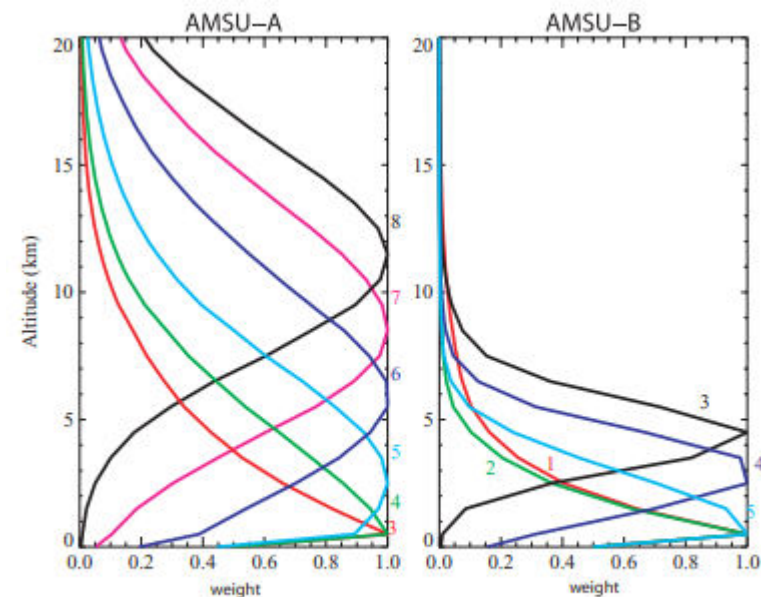
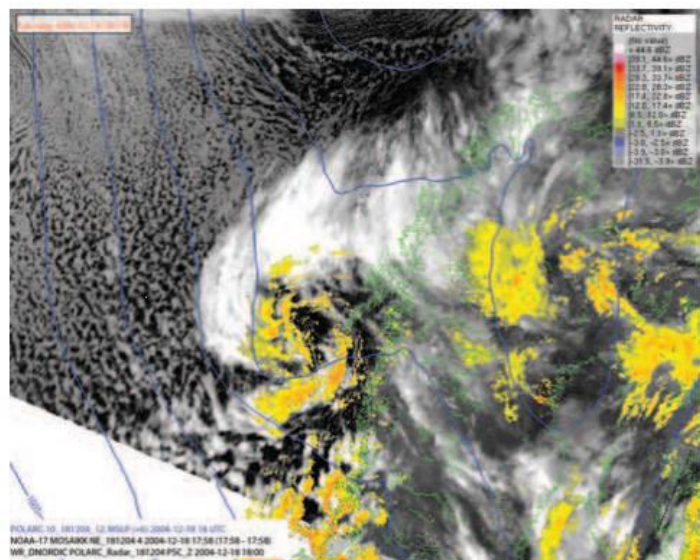


Fig. 1. Normalized weighting functions for the AMSU-A temperature channels sounding in the troposphere (3–8) and AMSU-B channels at nadir, for a subarctic profile.



Комплексное описание ПЦ, комбинирующее изображение облачной структуры по ИК-измерениям AVHRR (11 мкм), изобары по шестичасовому прогнозу модели HIRLAM и сигнал радарного рассеяния на гидрометеорах.  
Работа анализирует применимость данных AMSU для исследования и описания свойств ПЦ; другие данные привлекаются для подтверждения предположений о механизмах, связанных с фазовыми переходами влаги.

# Заключение

1. Радиофизические, в частности – СВЧ-радиометрические, наблюдения, несмотря на низкое пространственное разрешение, крайне полезны и востребованы при исследовании различных атмосферных процессов, в том числе – полярных циклонов.
2. Важно подчеркнуть, что в силу особых механизмов формирования, получаемые в таких наблюдениях «изображения» не всегда позволяют интуитивно понятную трактовку и требуют понимания основных закономерностей генерации и распространения микроволнового излучения в природных средах.
3. Следует учитывать, что ИК- и СВЧ- «изображения», полученные синхронно, могут отражать «смещенные» фазы развития одного и того же процесса в силу инерции системы океан-атмосфера и чувствительности измерений к разным геофизическим параметрам.
4. В большинстве работ, вплоть до самых новых, подчеркивается, что атмосферные модели усвоения данных ДЗЗ пока не вполне удовлетворительно воспроизводят мезомасштабные атмосферные процессы, в связи с чем актуальность построения их климатологии на базе прямых спутниковых наблюдений не снижается.

# Литература

Blechshmidt A.-M. (2008), A 2-year climatology of polar low events over the Nordic Seas from satellite remote sensing, *Geophysical Research Letters*, **35**, L09815, doi:10.1029/2008GL033706.

Claud C., Funatsu B.M., Noer G., Chaboureau J.-P. (2009), Observation of polar lows by the Advanced Microwave Sounding Unit: potential and limitations, *Tellus*, **61A** (2): 264-277, doi:10.1111/j.1600-0870.2008.00384.x.

Claud C., Heinemann G., Raustein E., McMurdie L. (2004), Polar low *le Cygne*: Satellite observations and numerical simulations, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **130** (598): 1075-1102, doi:10.1256/qj.03.72.

Smirnova J.E., Golubkin P.A., Bobylev L.P., Zabolotskikh E.V., Chapron B. (2015), Polar lows climatology over the Nordic and Barents seas based on satellite passive microwave data, *Geophysical Research Letters*, **42** (13): 5603-5609, doi:10.1002/2015GL063865.

Rajo M., Claud C., Noer G., Carleton A.M. (2019), In situ measurements of surface winds, waves, and sea state in polar lows over the North Atlantic, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **124** (1): 700-718, <https://doi.org/10.1029/2017JD028079>.

# Спасибо за внимание

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 26-17-00386 «Система детектирования и определения характеристик полярных циклонов на основе средств дистанционного зондирования Земли и искусственного интеллекта»