# Спутниковые методы и системы исследования Земли исследования Земли

## Спутниковое зондирование опасных погодных явлений и климатических экстремумов: возможности и перспективы

*докладчик:* **Пичугин Михаил Константинович**

**лаборатория спутниковой океанологии и лазерного зондирования ТОИ ДВО РАН**

pichugin.mk@gmail.com

**XIV международная школа-семинар, 27.05.2026 г., ТОИ ДВО РАН**

# Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева

## лаборатория спутниковой океанологии и лазерного зондирования

**Зав. лаб. -** *к.ф.-м.н., Салюк П.А.*

**Митник Леонид Моисеевич –** *профессор, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник*
*Автор более 200 отечественных и зарубежных научных работ по дистанционному зондированию*

***г. Владивосток, ул. Балтийская, 43, 327-328***

# Опасные погодные явления vs экстремальные события

**Экстремальное событие** — *это событие, редкое для данного места и времени года; его редкость может определяться по интенсивности, продолжительности, пространственному охвату или их сочетанию относительно многолетнего климатологического распределения.*

**Опасное погодное явление** — *экстремальное или интенсивное метеорологическое (гидрометеорологическое) событие, которое может причинять значительный ущерб населению, инфраструктуре, экосистемам или экономике*

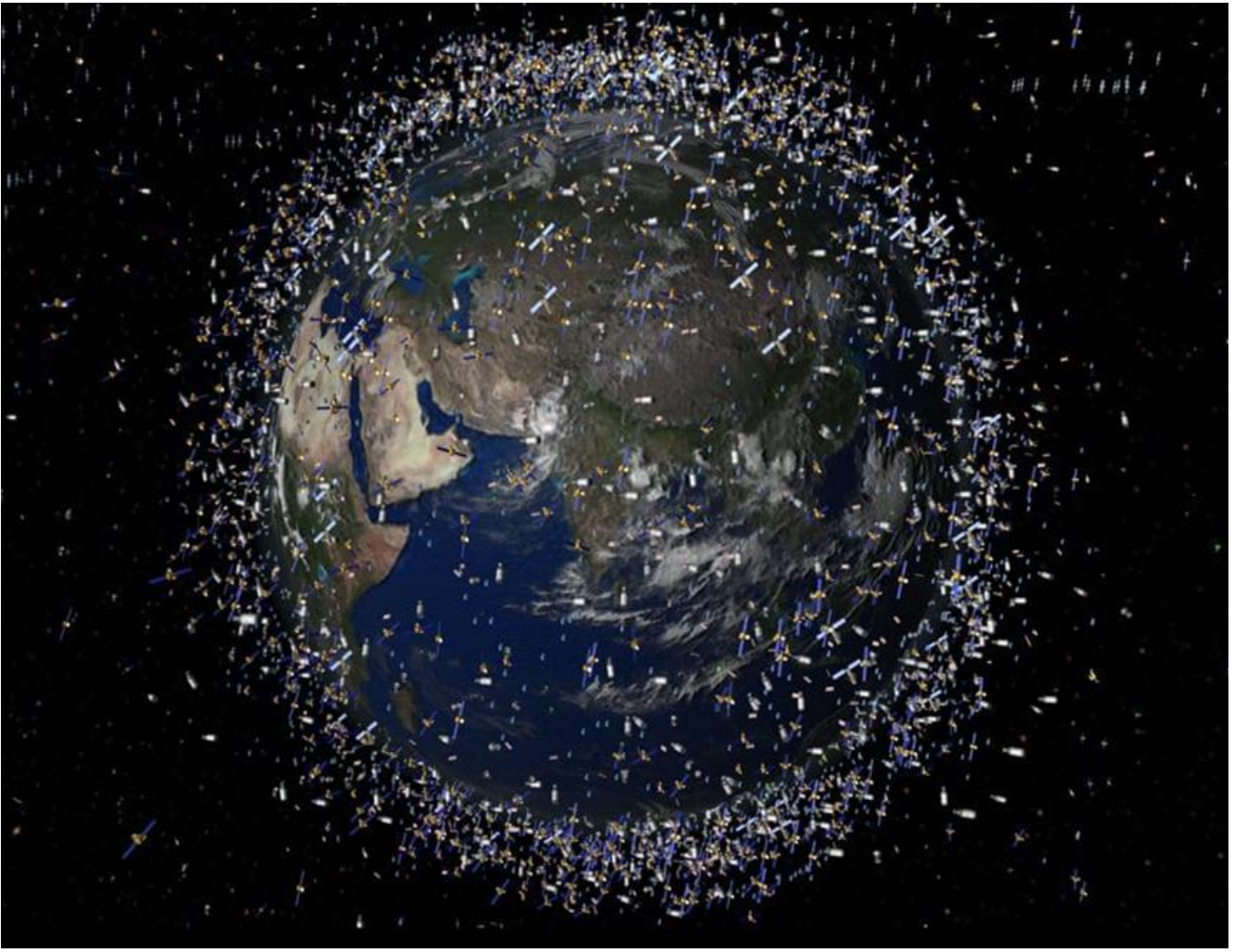
# Классификация экстремальных явлений - тренды

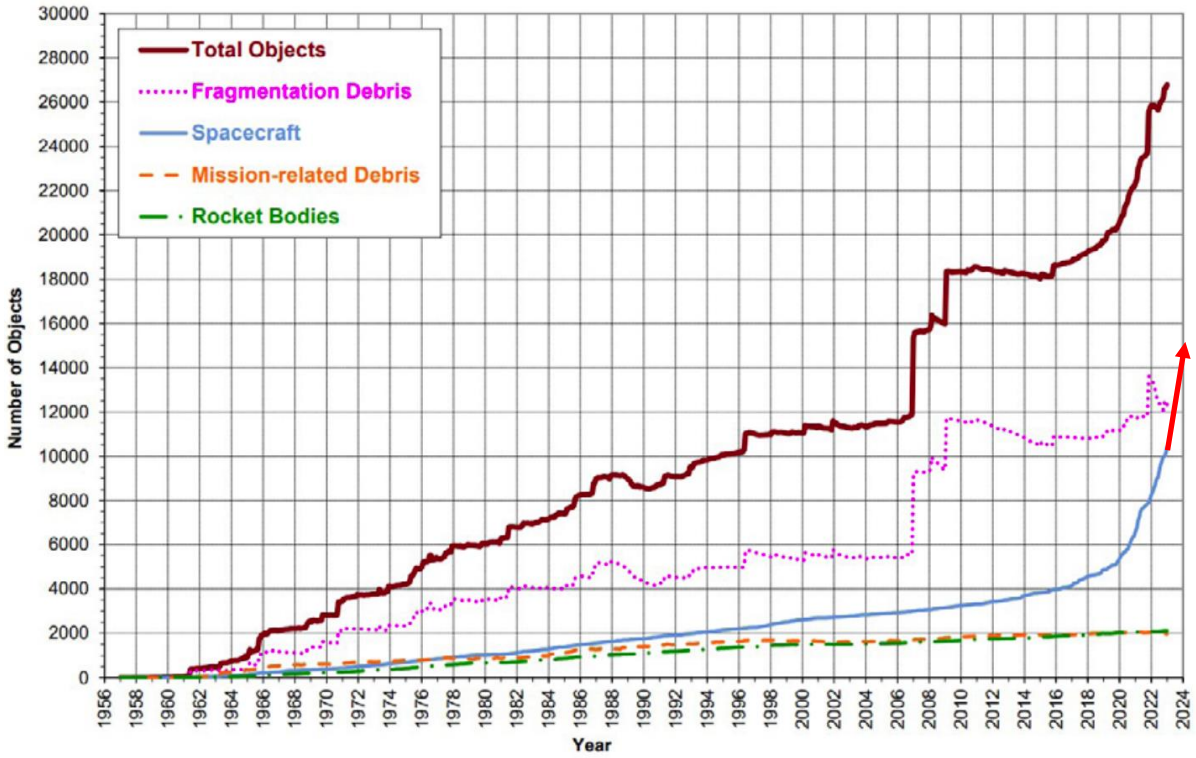
| Тип явления | Событие/характеристика | Уровень достоверности в тренде |
|---|---|---|
| **Температурные экстремумы** | Волны тепла, аномальные морозы, тёплые/холодные ночи | Практически достоверно (**Г**)* |
| **Экстремальные осадки** | Ливни, наводнения | Вероятно (**Г**) |
| **Речные наводнения** | Пиковый сток, сезонные паводки | Высокая уверенность (**Р**)* |
| **Засухи** | Метеорологические, агроэкологические, гидрологические | Средняя уверенность (**РР**)* |
| **Тропические циклоны** | Интенсивность, осадки, быстрая интенсификация | Вероятно (**Г**) |
| **Внетропические циклоны** | Экстремальный ветер, осадки | Низкая уверенность в трендах |

** **Г** – глобально, **Р** – регионально, **РР** – ряд регионов*

*Seneviratne, Sonia I., et al. "Weather and climate extreme events in a changing climate." Climate change 2021: The physical science basis: Working group I contribution to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (2021): 1513-1766.*

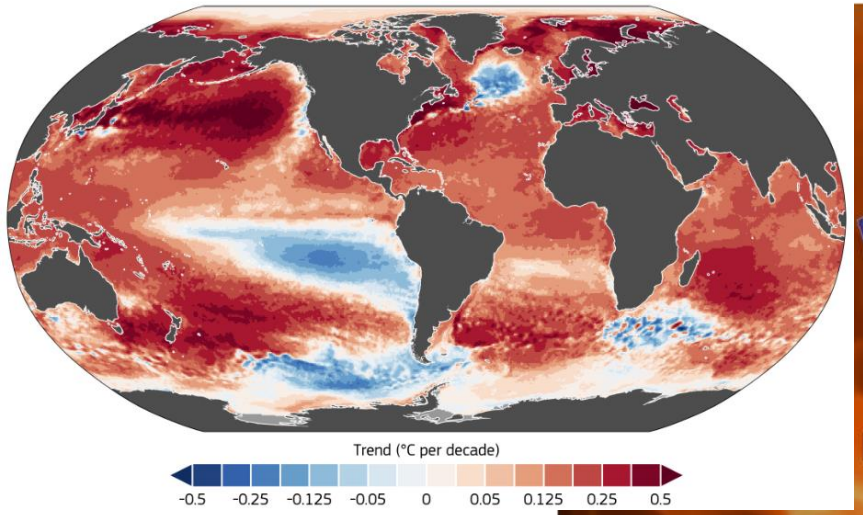
# Сколько искусственных спутников Земли в космосе?

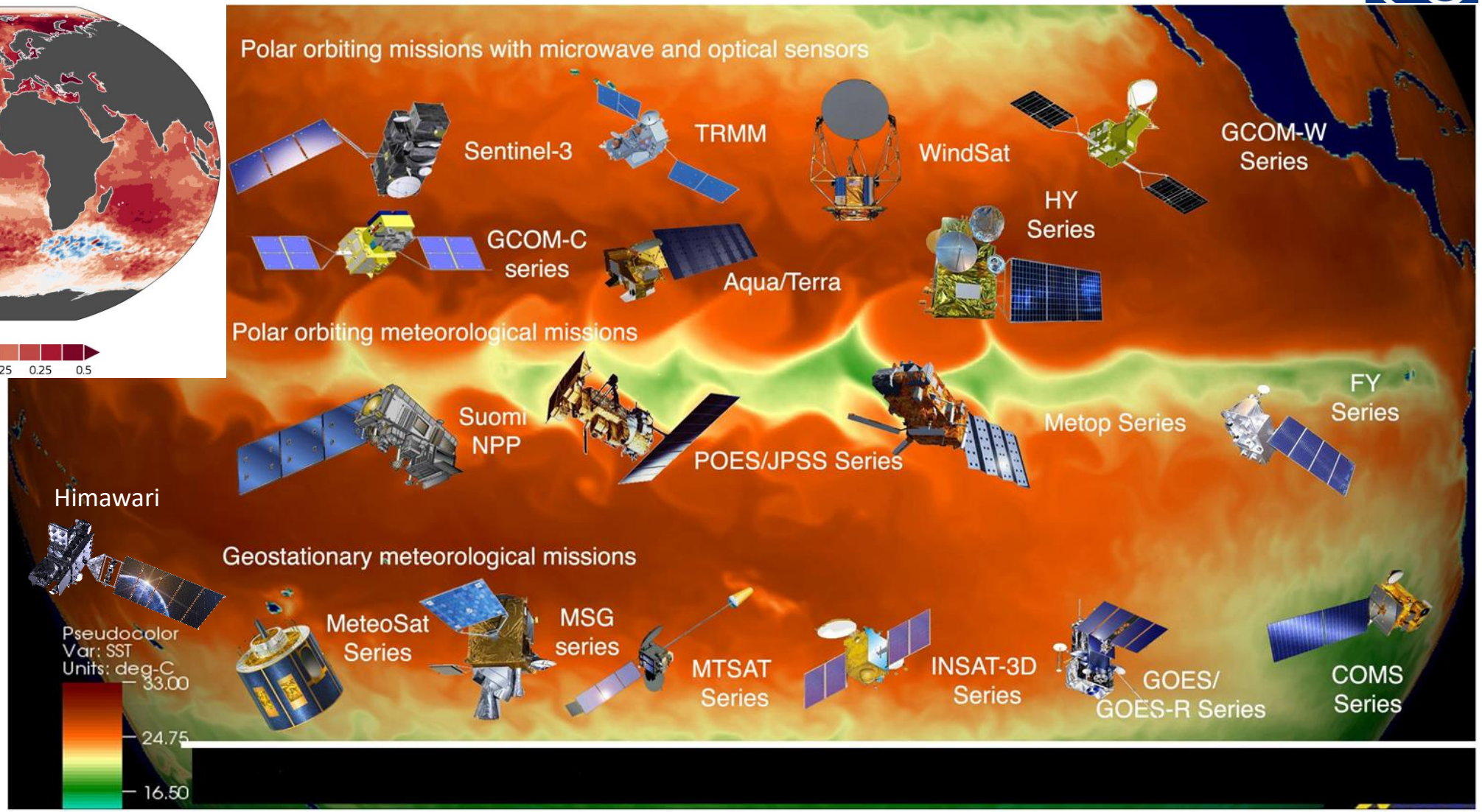





**Количество спутниковых аппаратов** за последнее десятилетие **выросло** почти **экспоненциально**. Сейчас на орбите Земли находится **более 15000 спутников**

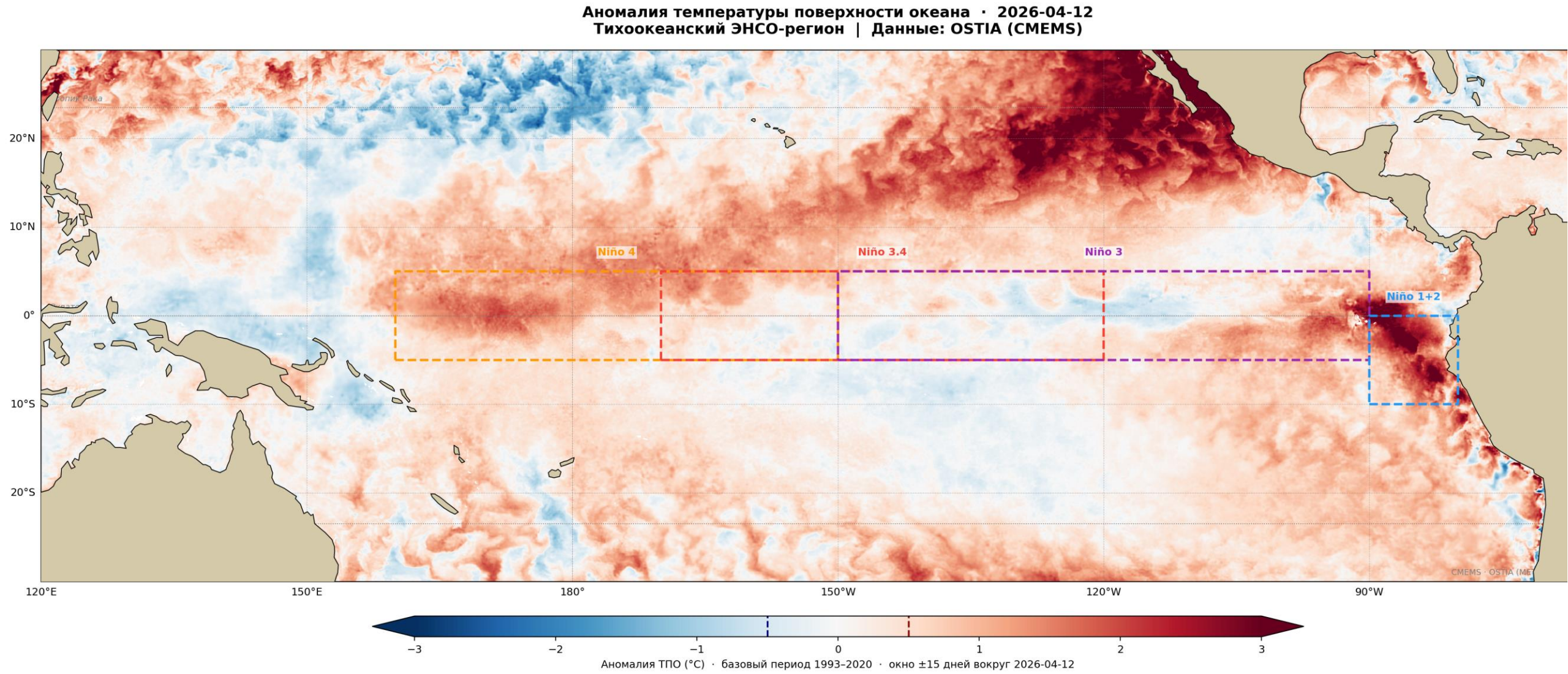
# Температура поверхности океана



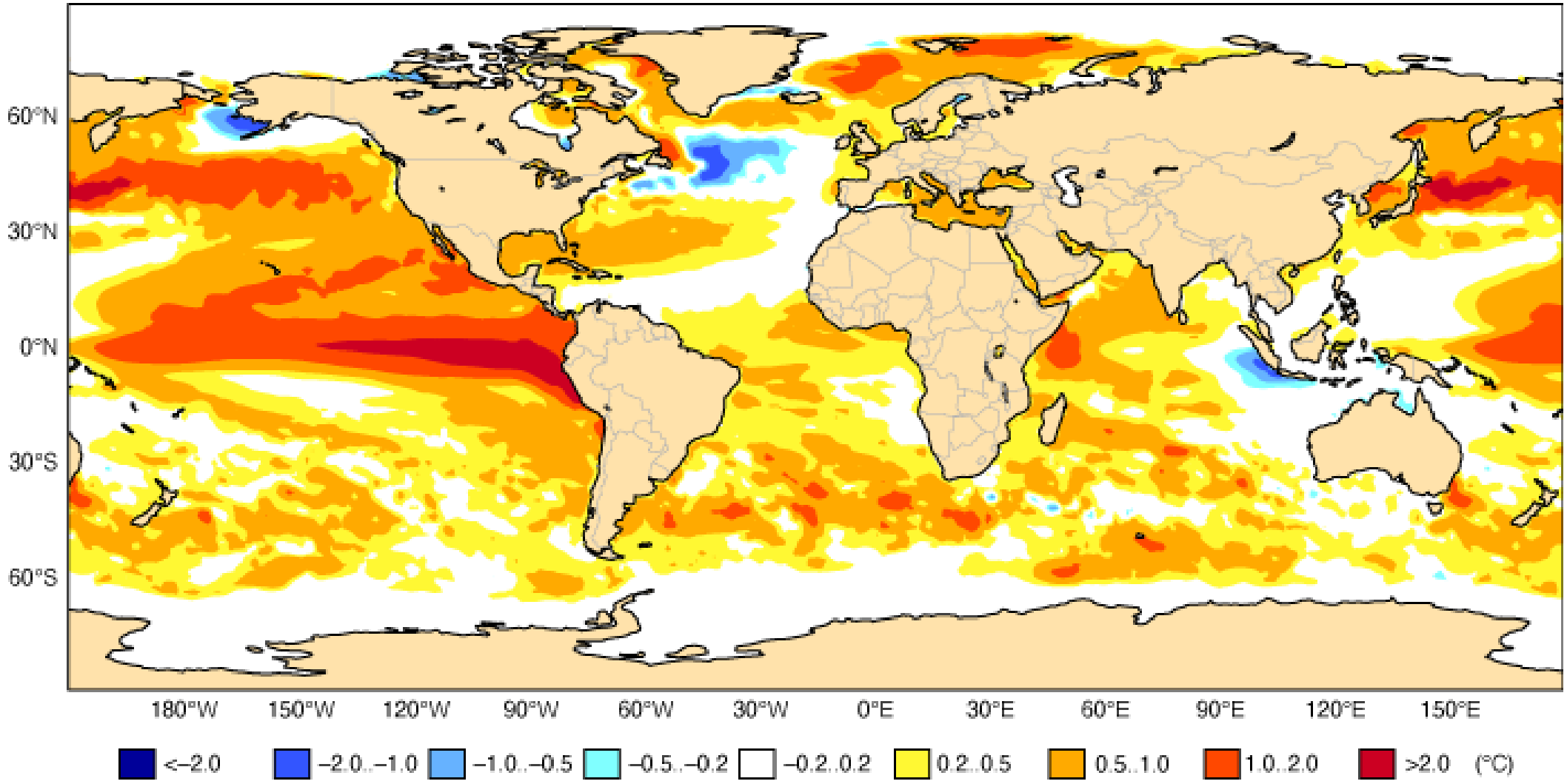




**Температура поверхности океана (ТПО) в центральной и восточной зонах экваториальной части Тихого океана; основные спутниковые миссии, вносящие вклад в регулярные измерения ТПО**

# ТПО – Эль-Ниньо?

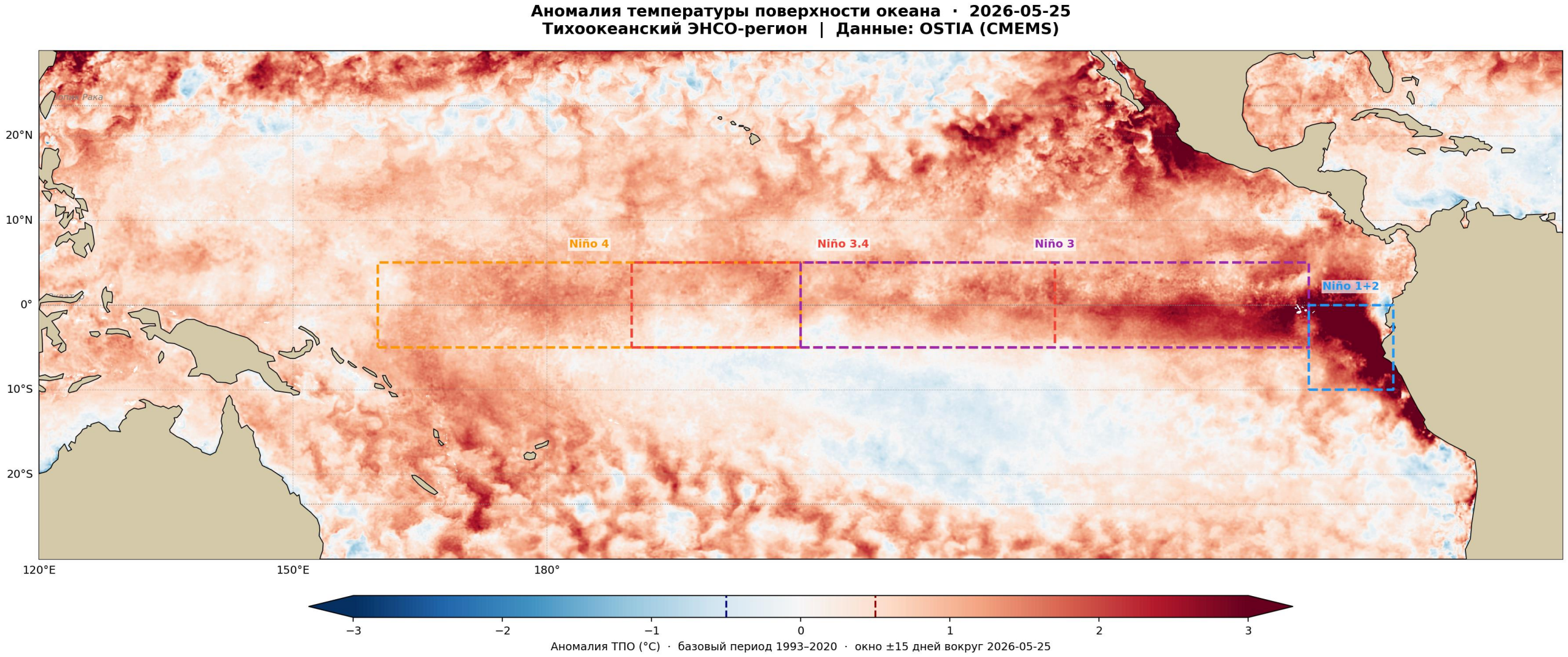


# Сезонные прогнозы ENSO и аномалий ТПО

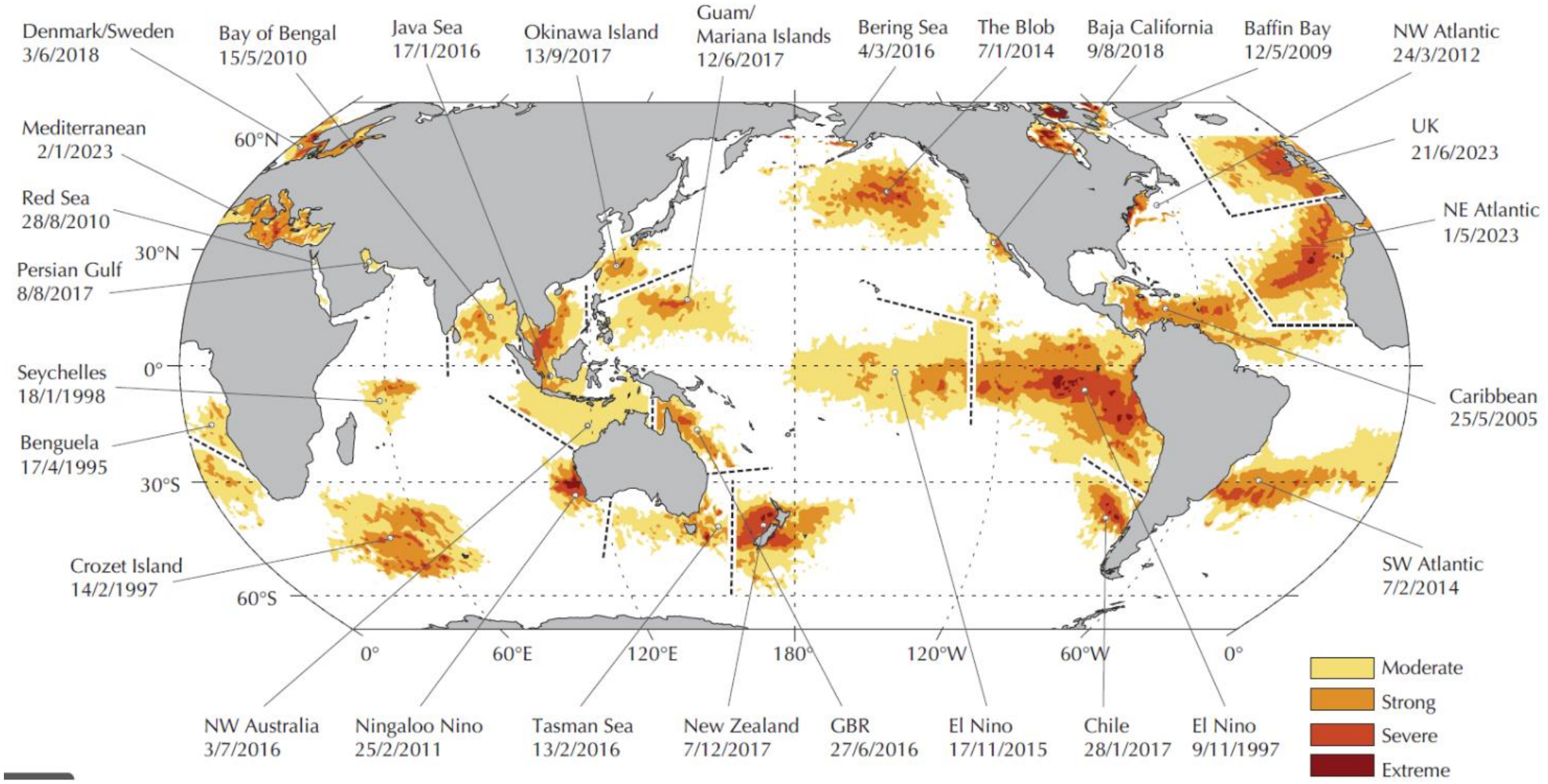



**Карта аномалий температуры поверхности океана в прогнозе ECMWF для летнего сезона (июнь - август) 2026 г., выпущенном в марте 2026 г. Источник: C3S / ECMWF - *https://www.ecmwf.int/en/about/media-centre/science-blog/2026/el-nino-2026***

# ТПО – Эль-Ниньо

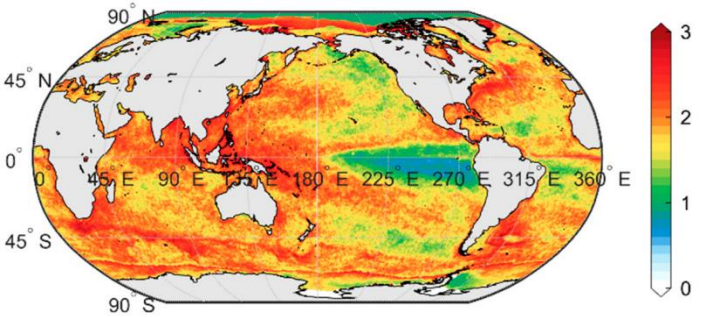


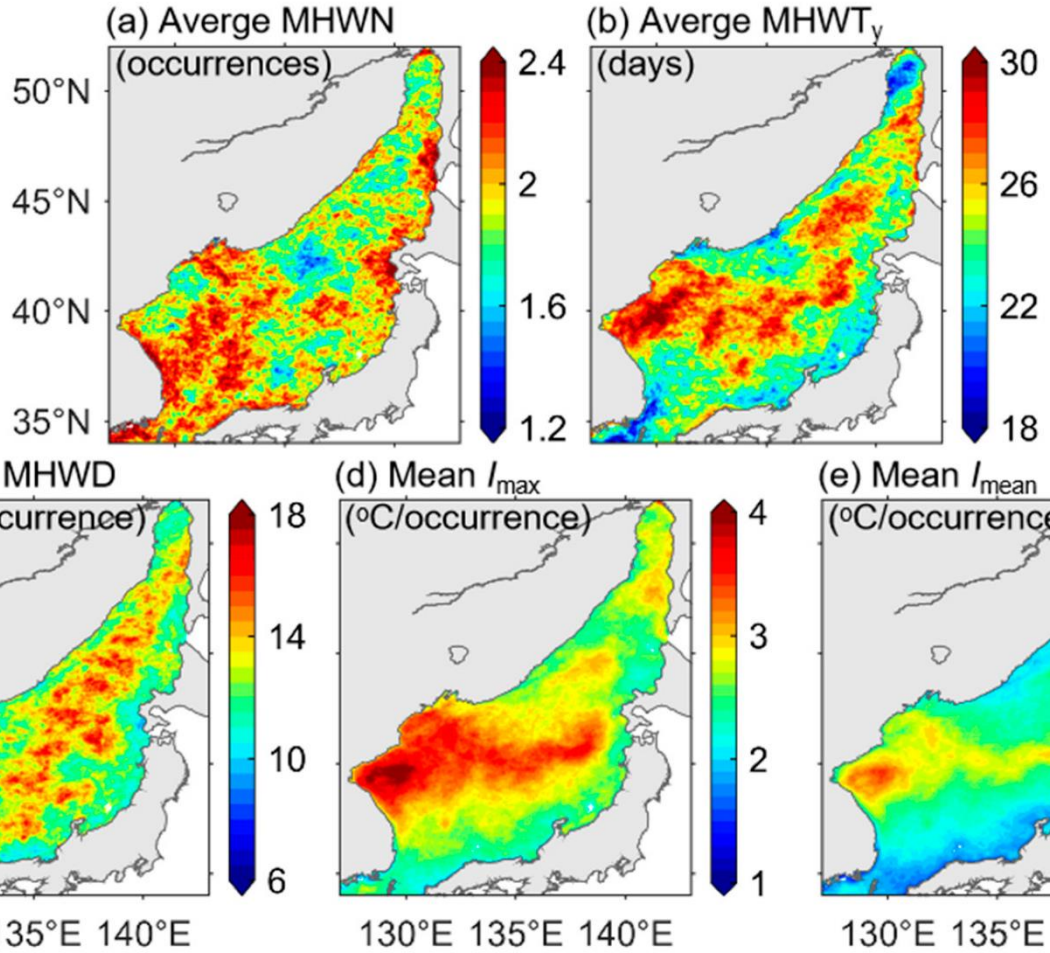
# Морские волны тепла



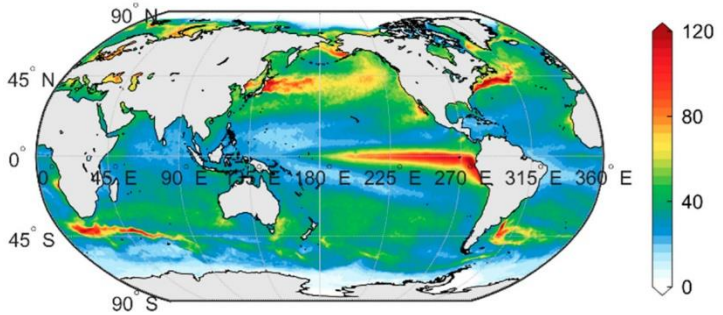
# Морские волны тепла – Японское море

**Average MHW occurrences**



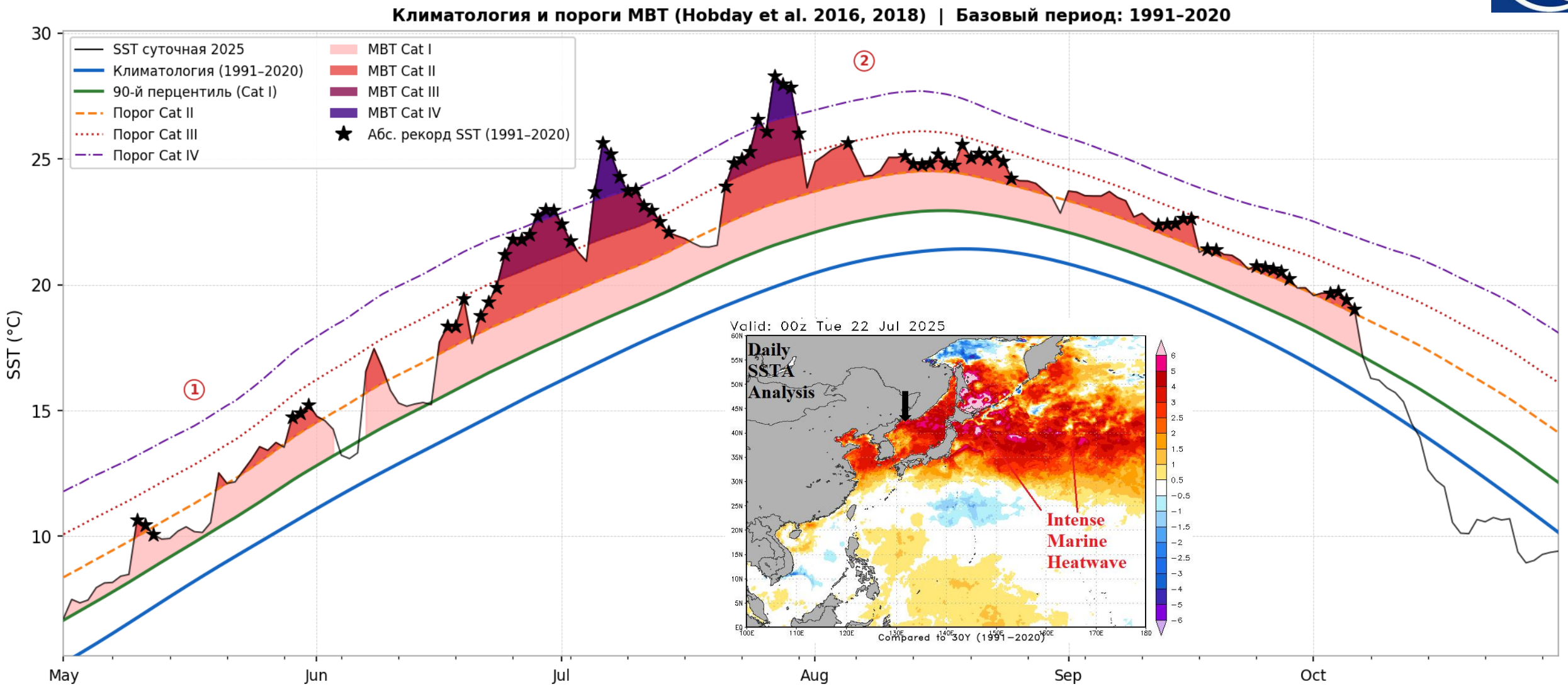




**Average yearly sum of MHW-intensity (MHWIy, °C days)**




**Характеристики морских волн тепла в Японском море в сравнении с Мировым океаном. Источник:** ***Wang, Dingqi, et al. "Characteristics of marine heatwaves in the Japan/East Sea." Remote Sensing 14.4 (2022): 936.***

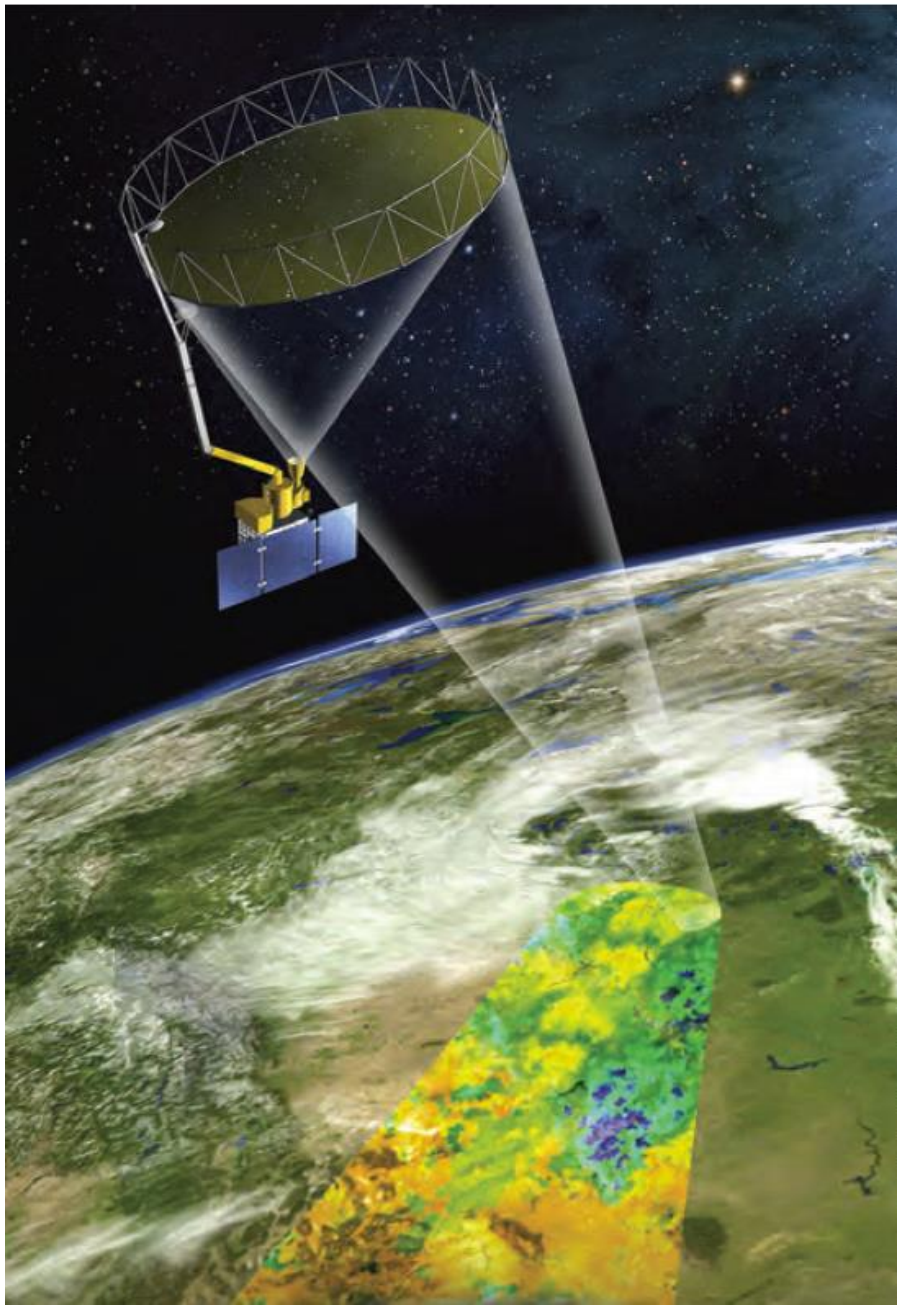
# Морские волны тепла – залив Петра Великого, 2025 г.



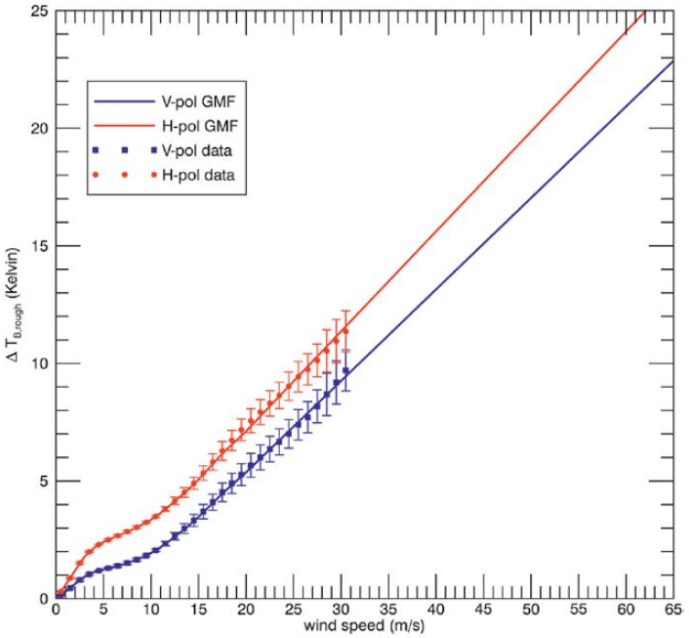

**Экстремальная морская волна тепла в заливе Петра Великого, теплый сезон 2025 г.**

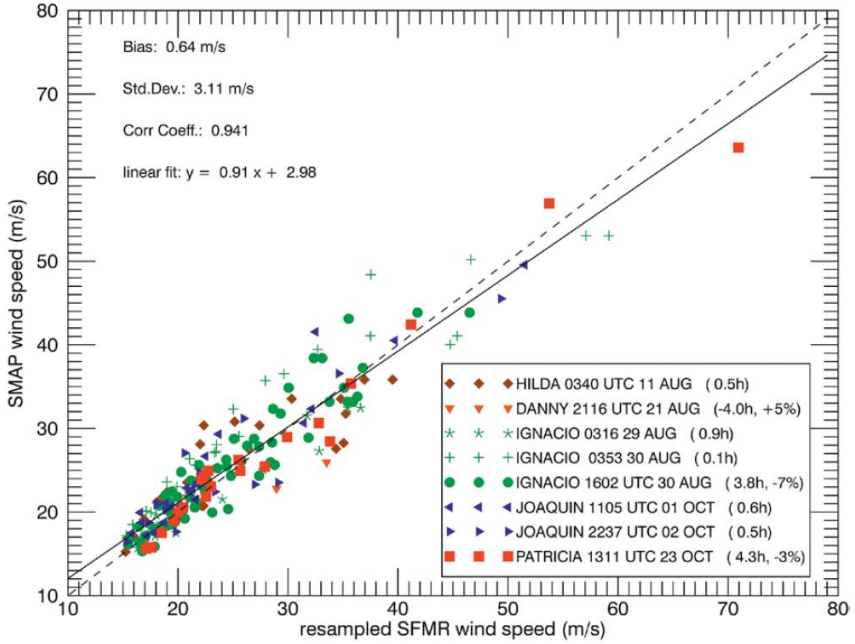
**Источник данных: OSTIA**

# SMAP – скорость ветра



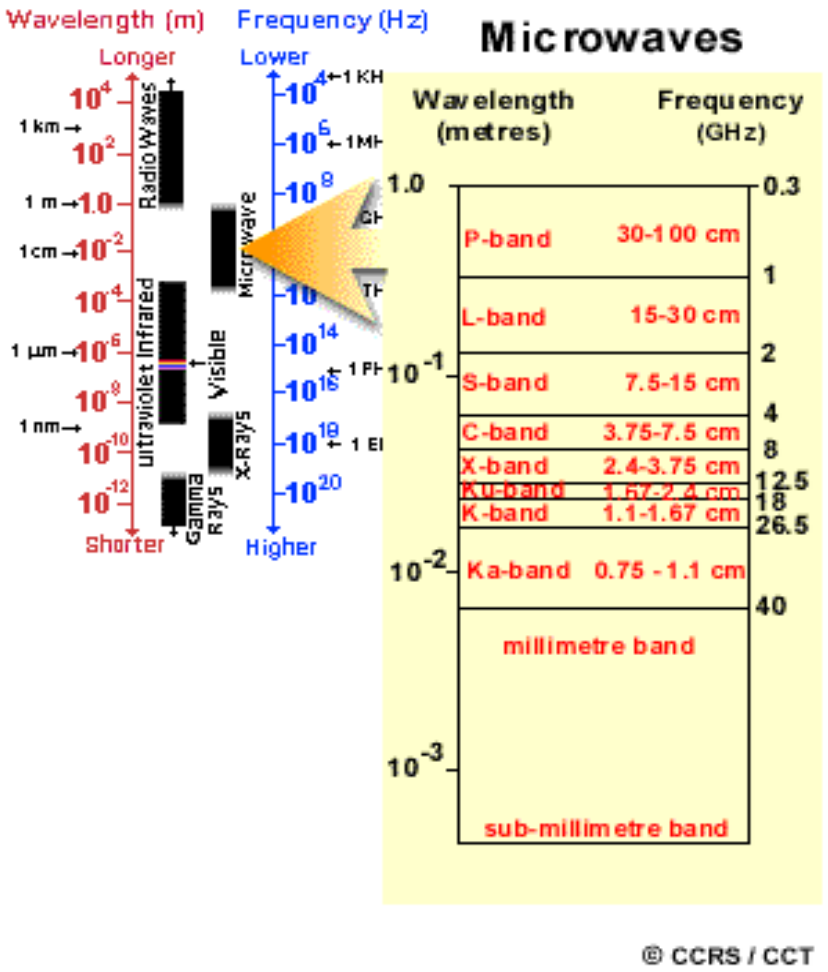
| | |
|---|---|
| Название миссии | SMAP |
| Высота орбиты | 685 km |
| Время пересечения экватора (местный часовой пояс) | 18:00 Восходящий виток / 6:00 Нисходящий виток |
| Размер антенны | 6.0 m |
| Ширина полосы обзора | 1000 km |
| Наклонение орбиты | 98 град. |
| Угол обзора | 40,0 град. |
| разрешение | 39 x 47 км |
| Цикл | 8 дней |



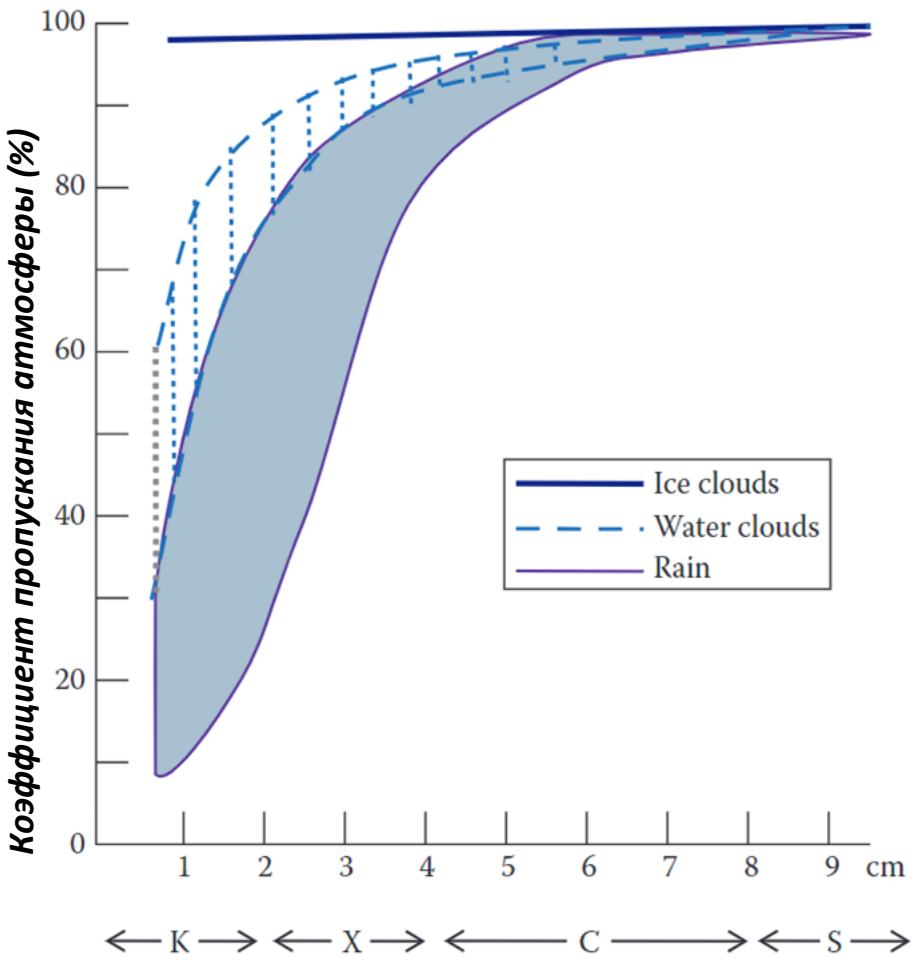

*Meissner, T., Ricciardulli, L., & Wentz, F. J. (2017). Capability of the SMAP Mission to Measure Ocean Surface Winds in Storms, Bulletin of the American Meteorological Society, 98(8), 1660-1677.*

# Микроволновое излучение

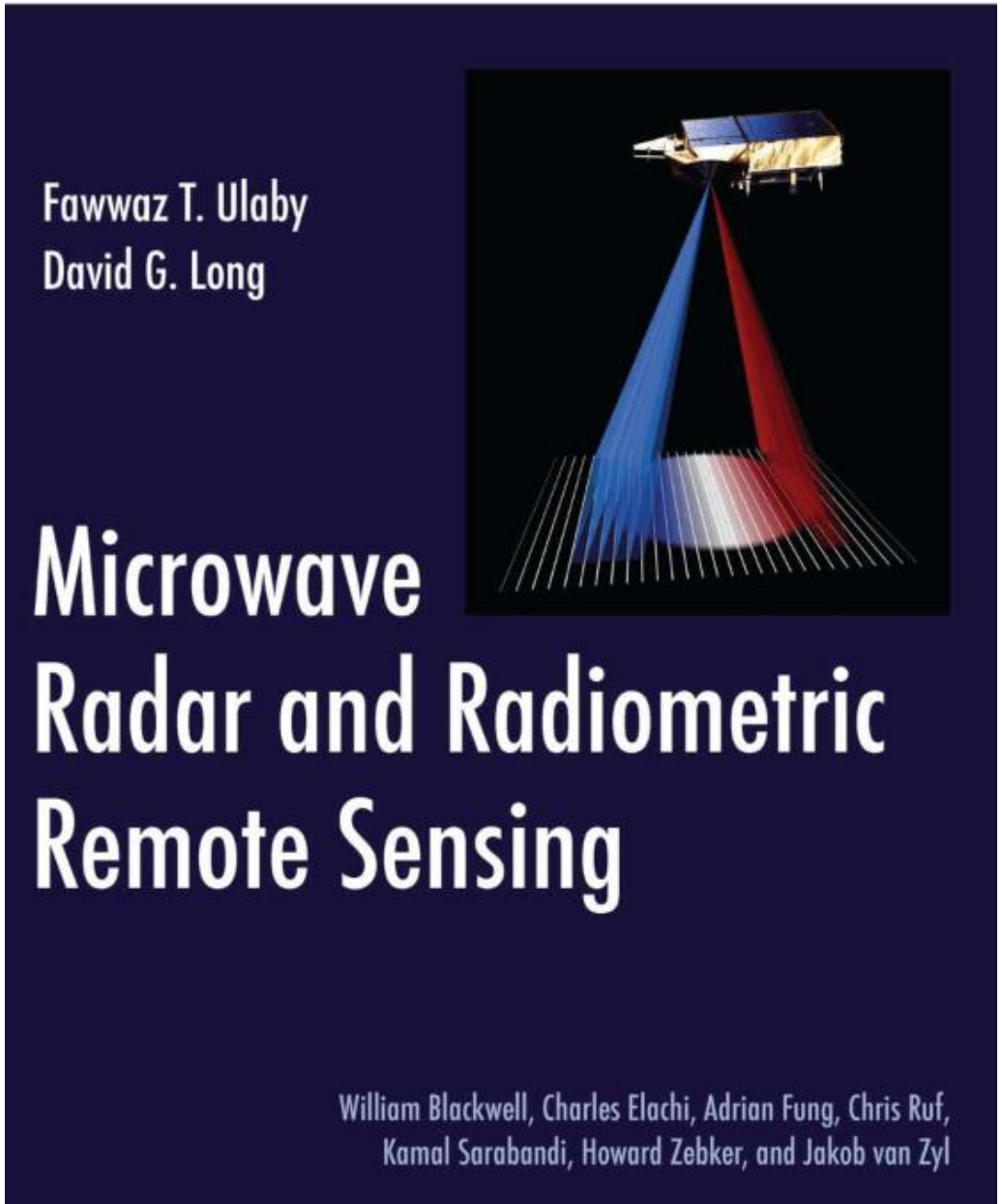



**SMAP** работает **в L-диапазоне** с длиной волны около **21 см (1.4 ГГц)**, для которого:

- атмосферное рассеяние и поглощение малы;
- измеряемая яркостная температура в основном определяется свойствами поверхности;
- заметно влияние радиочастотных помех.



# Микроволновая радиометрия - книга



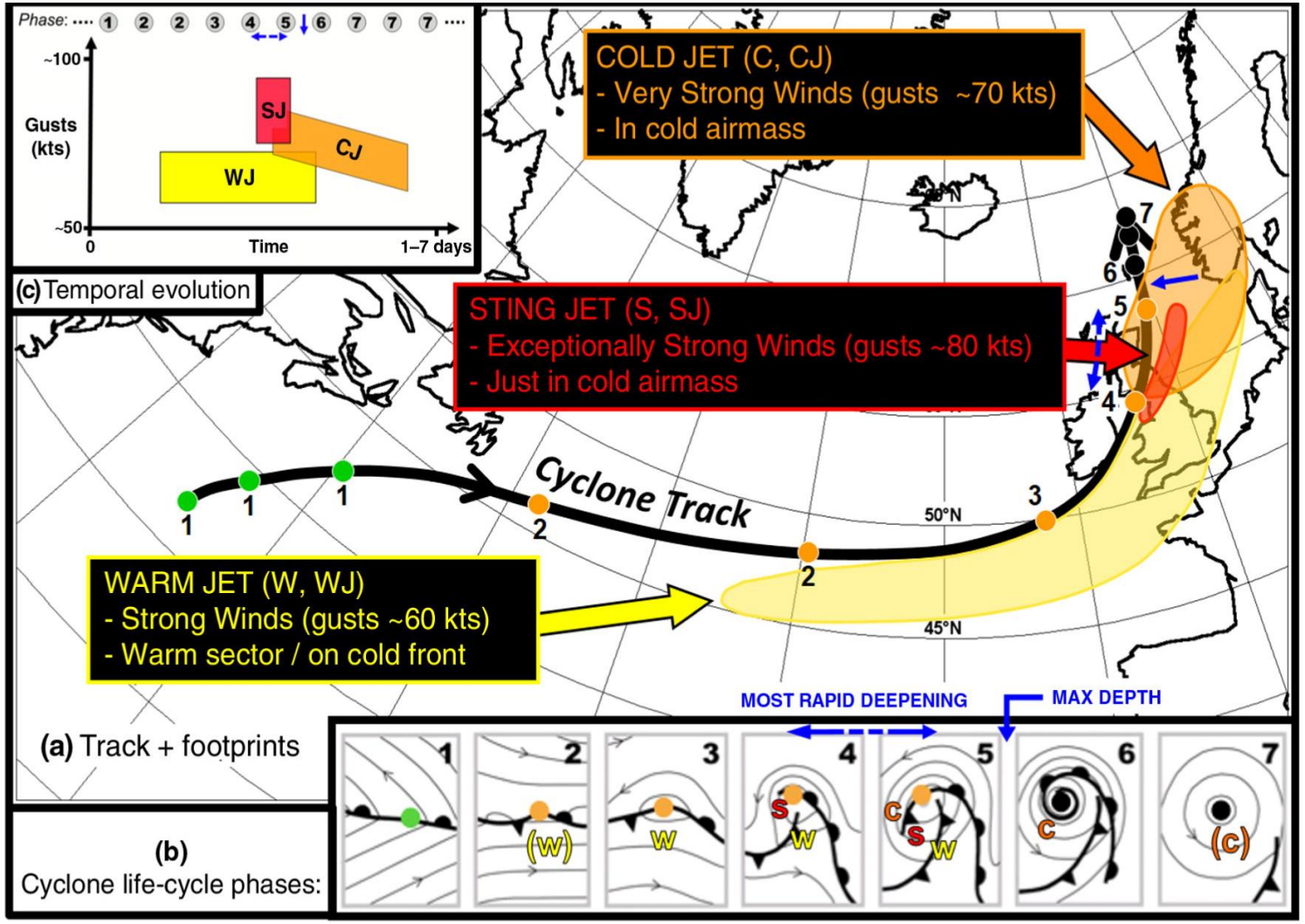

**Фундаментальное учебное и справочное издание по микроволновому дистанционному зондированию, охватывающее теорию, измерительные системы и приложения радиолокационного и радиометрического зондирования.**

# Внетропический циклогенез

- Внетропические циклоны (ВТЦ) играют решающую роль в формировании погодных условий в средних и высоких широтах и приводят к существенным социально-экономическим последствиям, влияя на судоходство, морскую инфраструктуру и прибрежные регионы.

- За последние 15-20 лет возрос интерес к процессам, вызывающим экстремальный ветер в интенсивных ВТЦ (Mass and Dotson, 2010), которые развиваются по концептуальной модели эволюции Шапиро-Кейзера (Shapiro, Keyser, 1990). Эти циклоны, особенно «взрывные» (углубление более 1 бержерона – ≥ 24 гПа / 24 ч на широте 60°), составляют значительную часть наиболее разрушительных случаев зимнего циклогенеза в Северной Атлантике (Hart et al., 2017) и северной части Тихого океана (Zhang et al., 2017).

# Внетропический циклогенез - концептуальная модель ветра




**Концептуальная модель ветра** для ВТЦ Северной Атлантики (Hewson, Neu, 2015) определяет три отличительные области в нижних слоях тропосферы:

- **теплая (WJ) и холодная (CJ) конвейерные струи** в теплом и холодном секторах циклонов соответственно могут вызывать весьма разрушительные порывы приводного ветра;
- **наиболее опасная и разрушительная особенность взрывного циклогенеза** – возникновение мезомасштабной (менее 100 км) области чрезвычайно сильных приводных ветров и их порывов, которую называют **«жалящая струя» – Sting Jet (SJ)**.

# Идентификация и характеристики внетропических циклонов

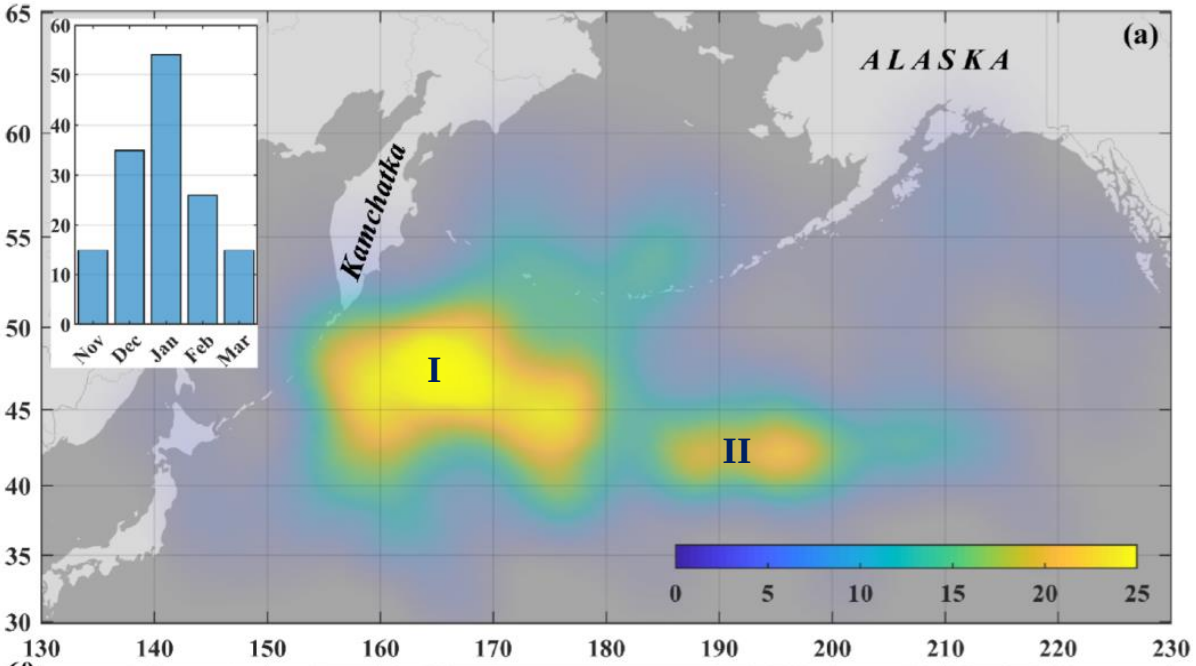
***Идентификация ВТЦ с ураганным ветром и показатели их интенсивности***

**ВТЦ идентифицировались как шторм с ураганным ветром (HF) при следующих условиях:**

- **максимальная скорость ветра по данным SMAP $W_{max} \geq 33$ м/с (по шкале Бофорта) в радиусе 800 км от центра ВТЦ, что значительно превышает радиусы ветра ураганной силы, определенные для Северной Атлантики (Bell, 2004);**
- **центры ВТЦ регистрировались над СТО ( район 30-65°N, 130°E – 120°W) по ежечасным полям SLP из ERA5;**
- **выбранная зона HF находилась в пределах полосы обзора SMAP и содержала не менее четырех точек сетки размером 0,25°×0,25°, что позволяло однозначно определять $W_{max}$ в пределах погодной системы;**
- **распределение высоких скоростей ветра анализировалось только для штормов, в которых область HF полностью покрывалась измерениями SMAP.**

***Ураганные ветры были связаны только с ВТЦ. Исключением стал район у юго-восточного побережья Камчатки в марте 2017 года, где SMAP ошибочно детектировал экстремальный ветер вблизи дрейфующих льдов из-за их ошибочного маскирования.***

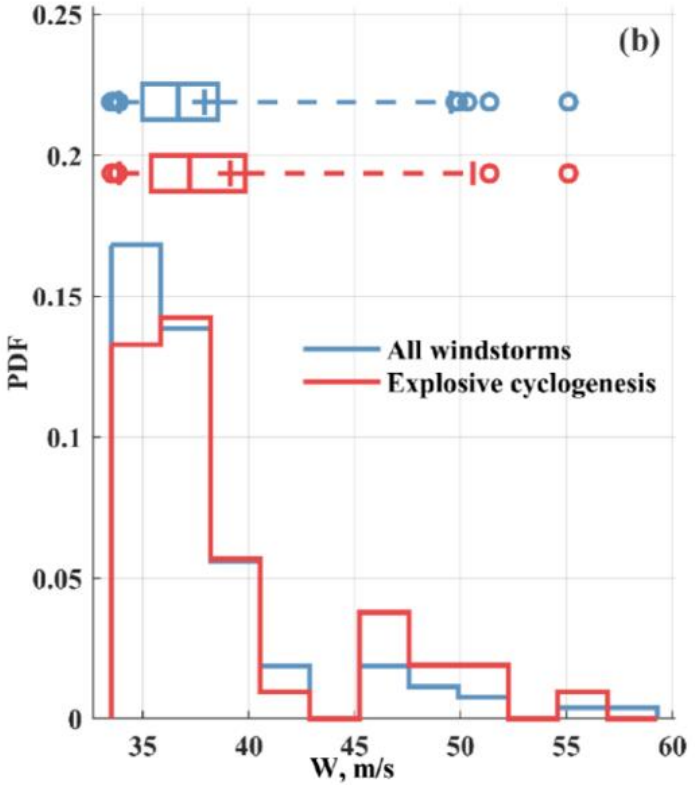
**I очаг циклогенеза (~ 45% ураганных событий) – к ЮВ от Камчатки, в основном районе циклонической активности в СЗТО. II очаг (20% событий) имеет сезонный сдвиг на восток, предположительно, в связи с усилением циклонической потенциальной завихренности в нижней тропосфере в осенне-зимний период под влиянием региональных особенностей распределения ТПО (*Pickart et al., 2009)*.**

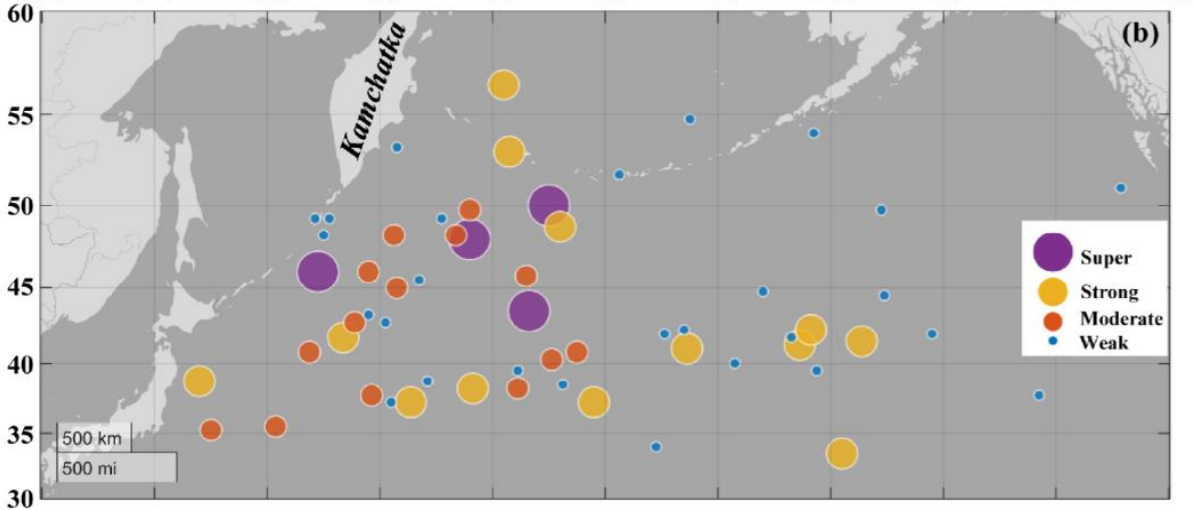



**Карта повторяемости ВТЦ с ураганным ветром (≥ 33 м/с).**

**I и II – очаги циклогенеза.**

**Цветовая шкала – в событиях на единицу площади $10^6$ км$^2$ (соответствует сферической ячейке 5°). На вставке показано сезонное распределение ВТЦ с ураганным ветром.**

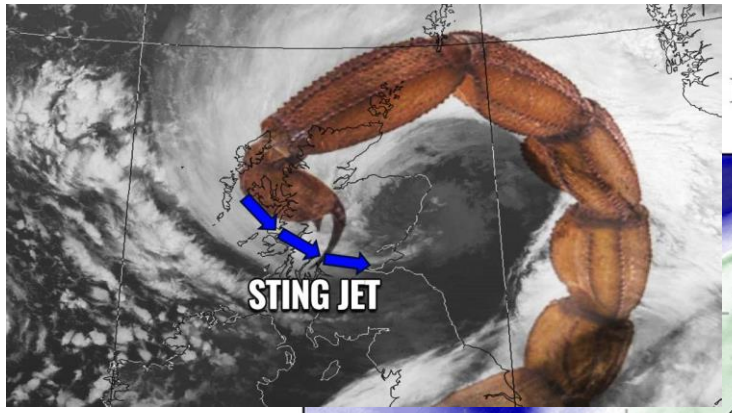


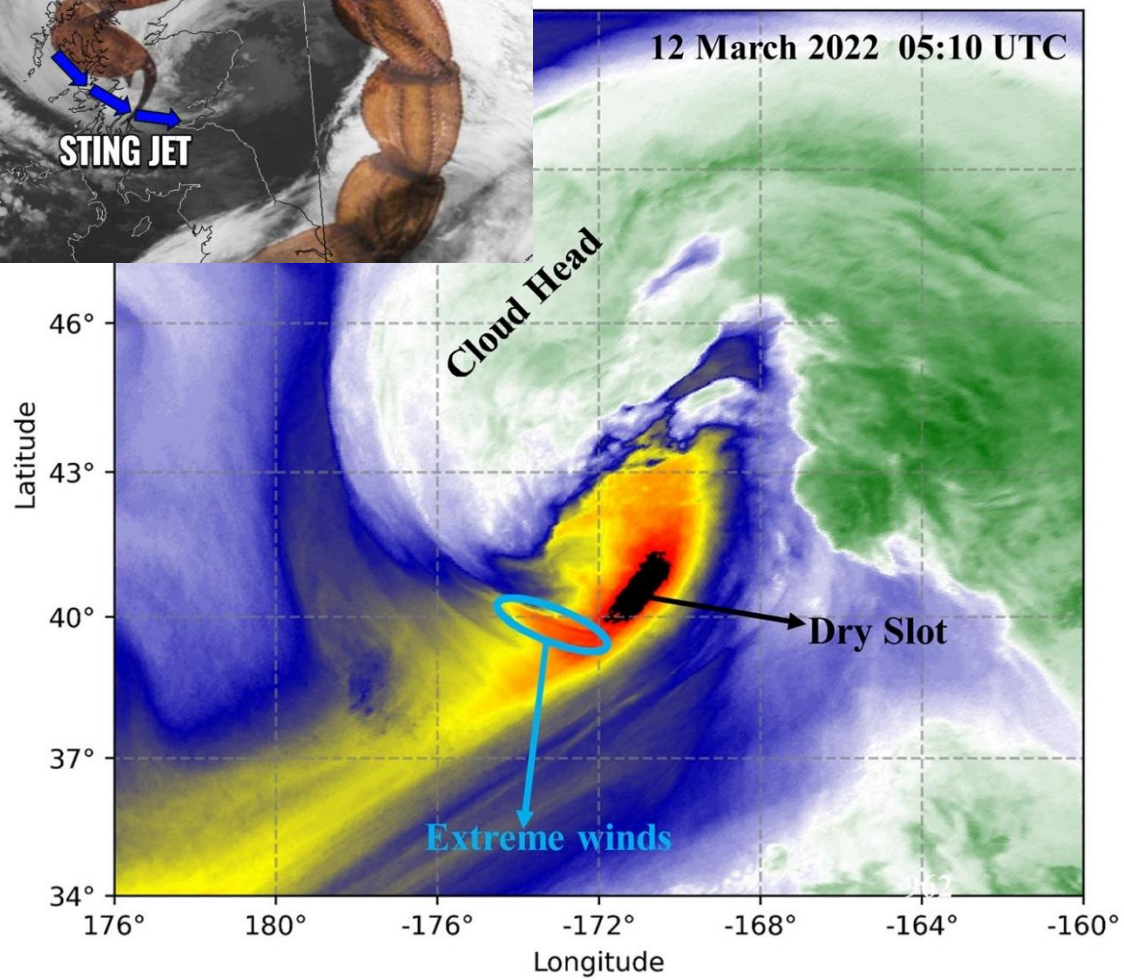



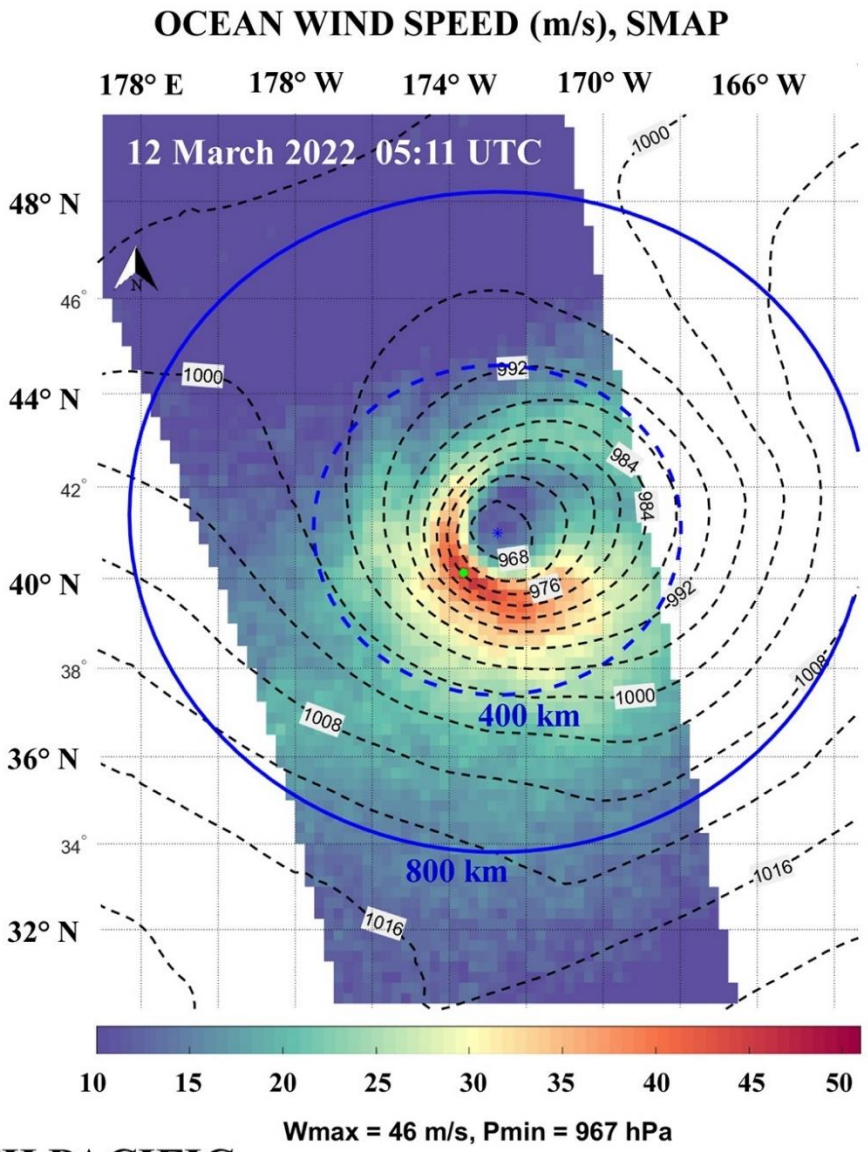

**Карта активности взрывного циклогенеза с различной интенсивностью по классификации (*Zhang et al., 2017*).**

- **слабая**
- **умеренная**
- **сильная**
- **супер-сильная**

# Зимние внетропические циклоны с экстремальным ветром



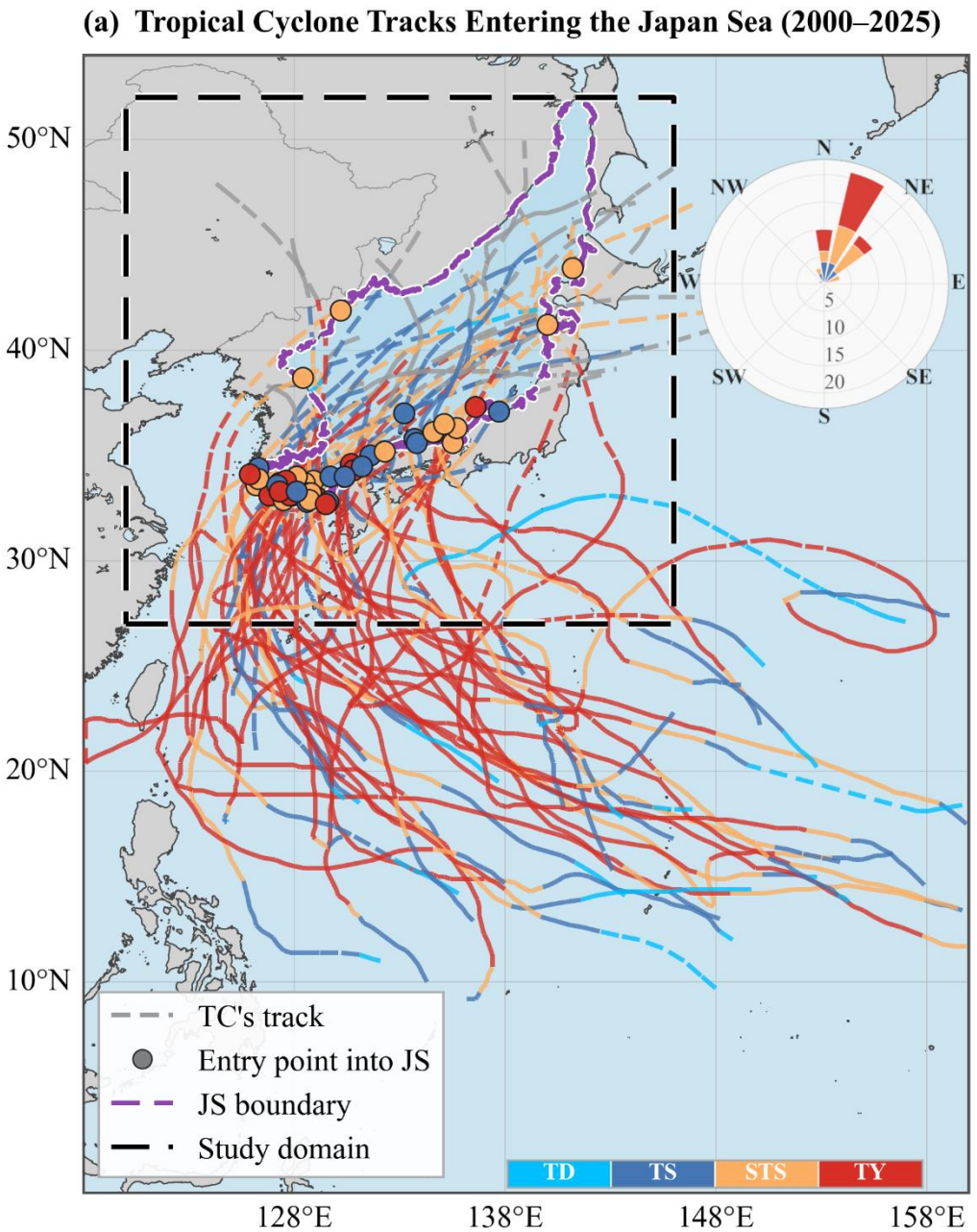



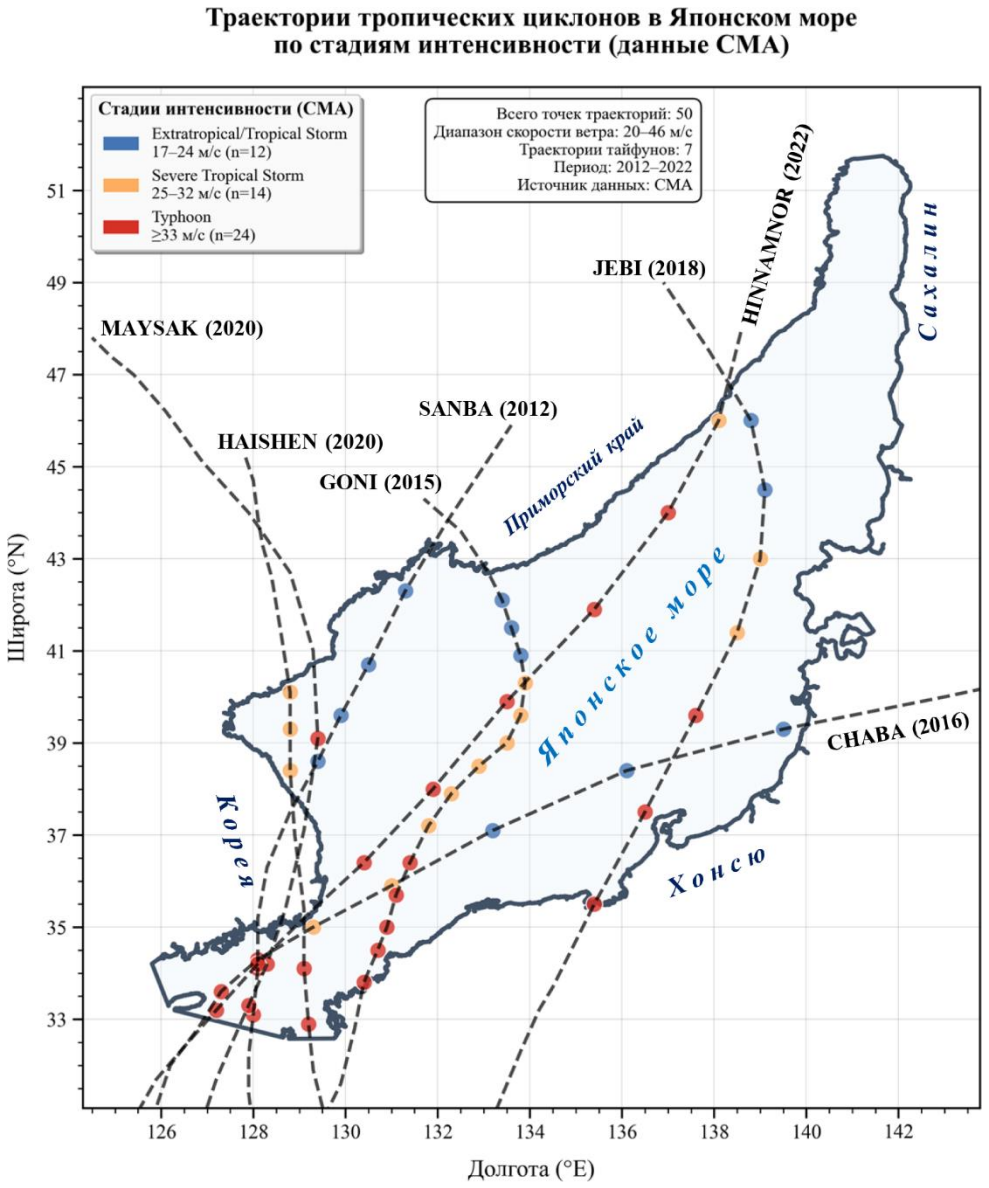




## WINDSTORM EVENT OVER THE NORTH PACIFIC

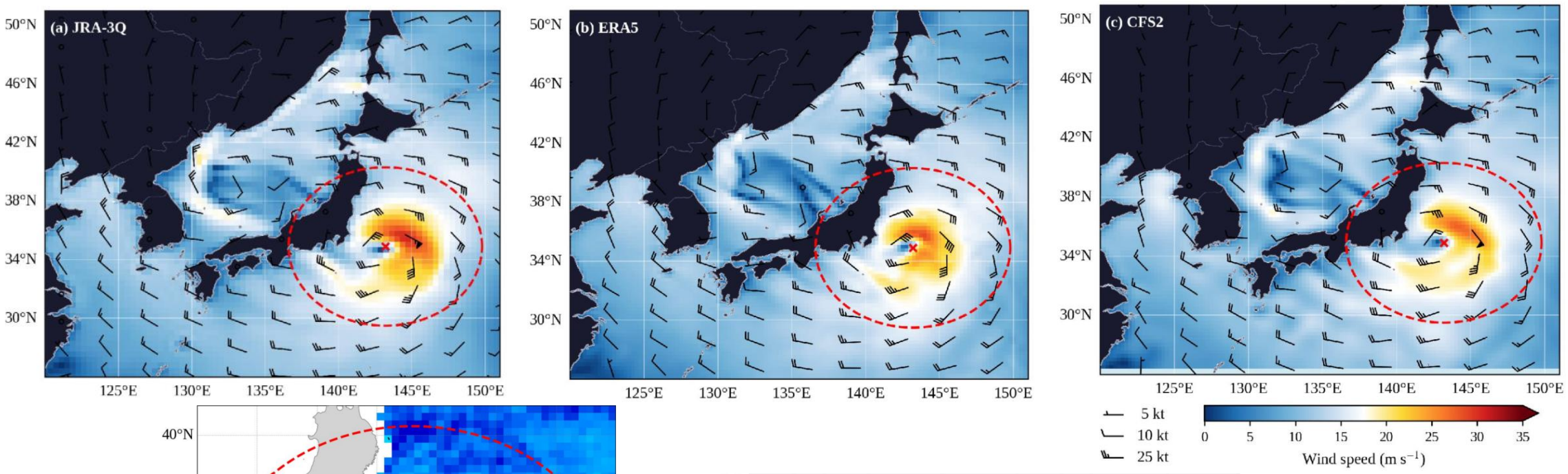
*Pichugin, Mikhail, Irina Gurvich, and Anastasiya Baranyuk. "Assessment of extreme ocean winds within intense wintertime windstorms over the north pacific using SMAP L-band radiometer observations." Remote Sensing 15.21 (2023): 5181.*

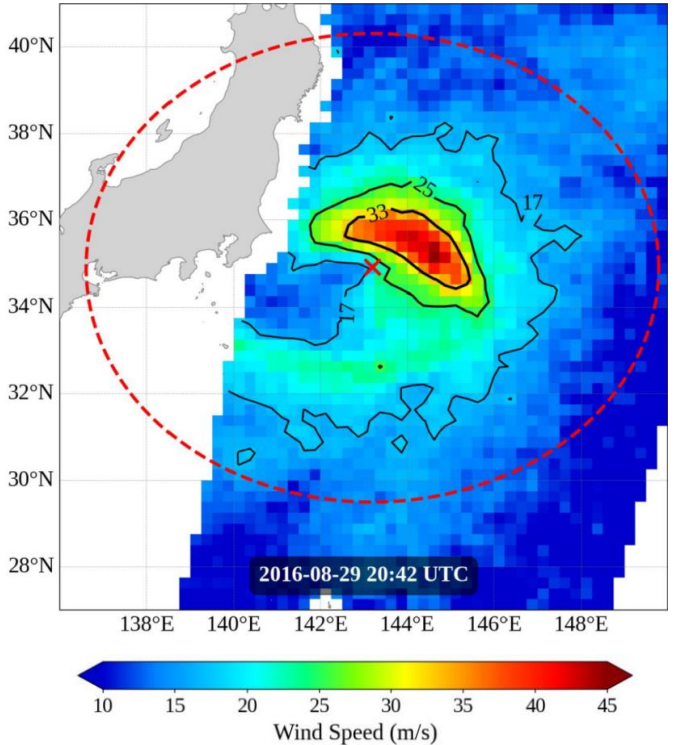
# Тропические циклоны - Японское море

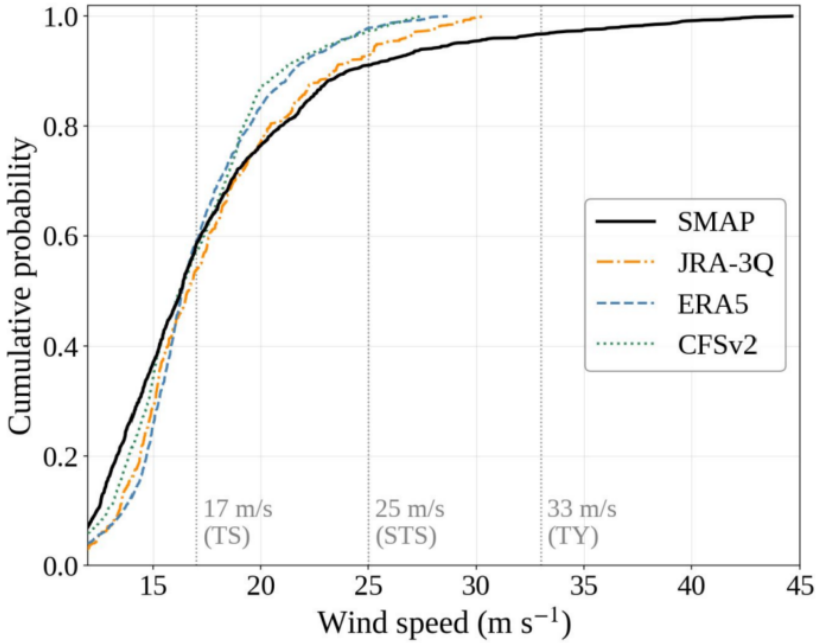


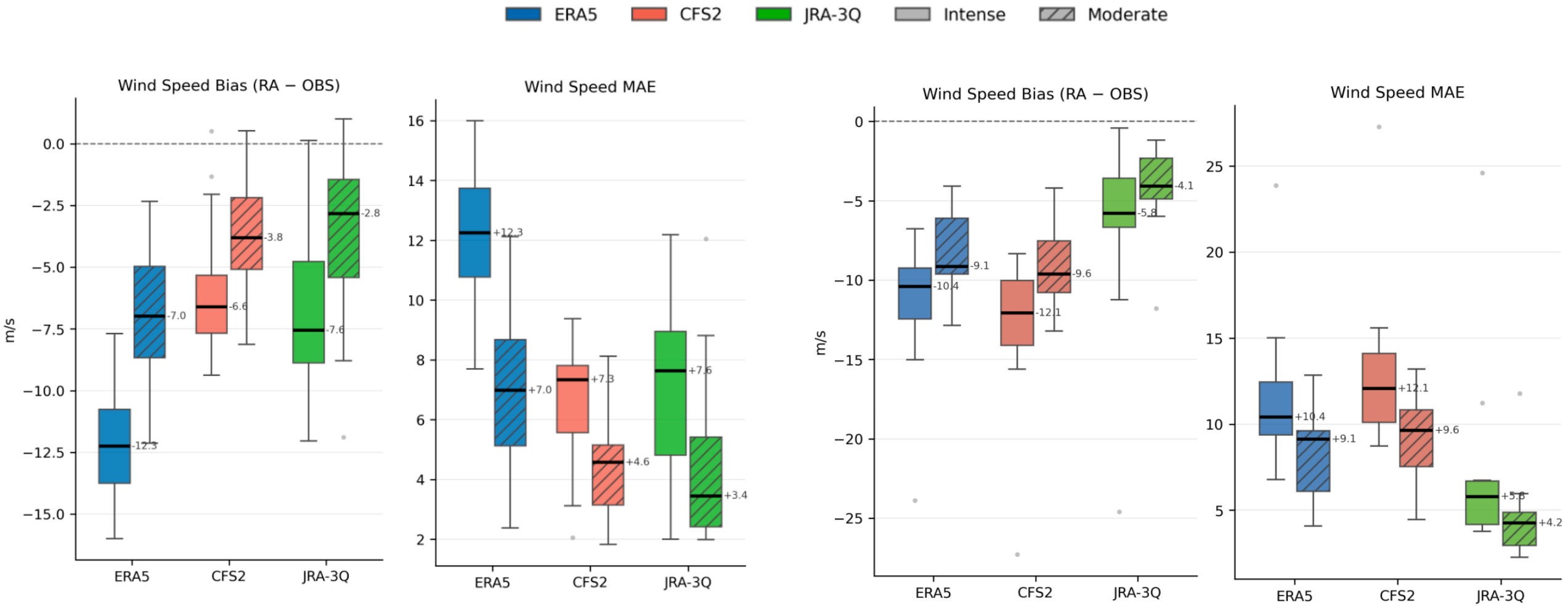
# Тайфун LIONROCK (2016 г.) – скорость ветра



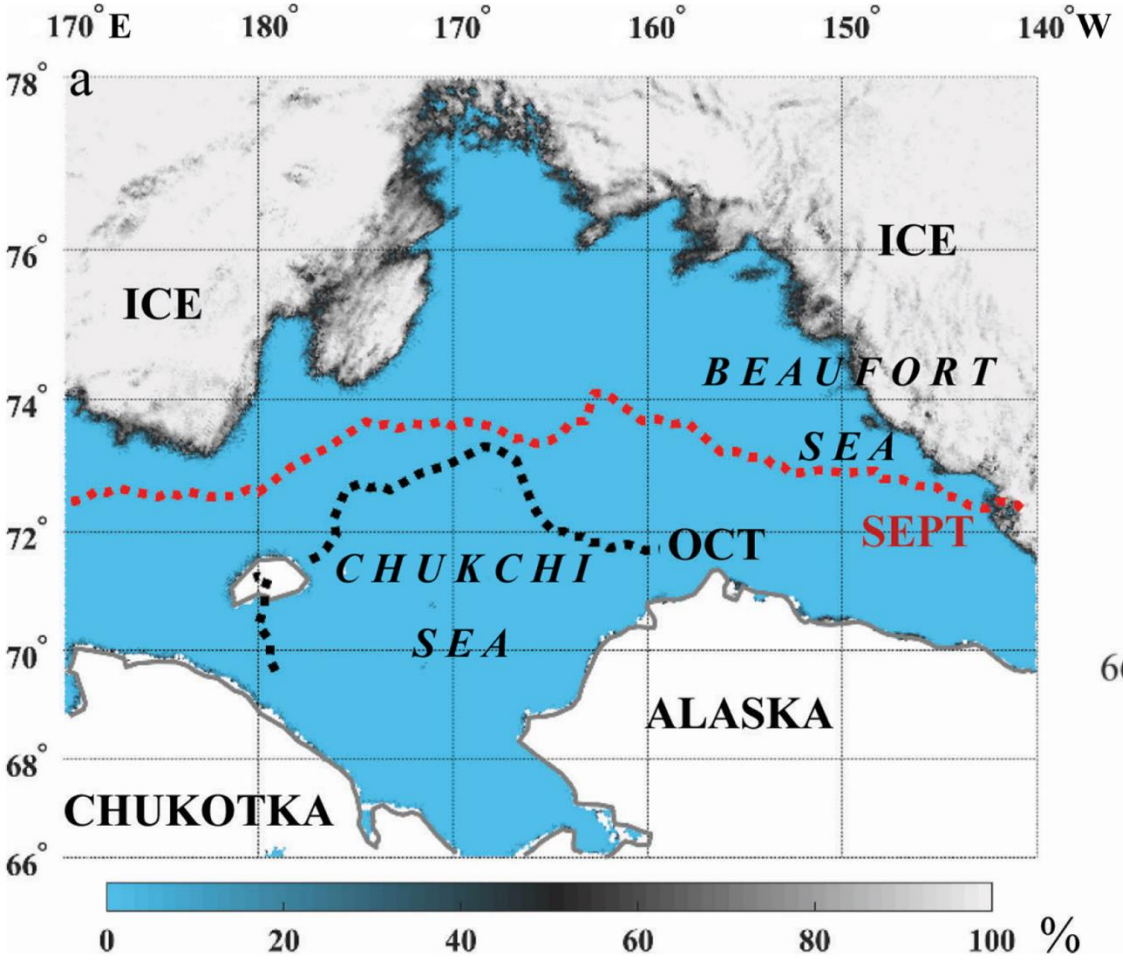



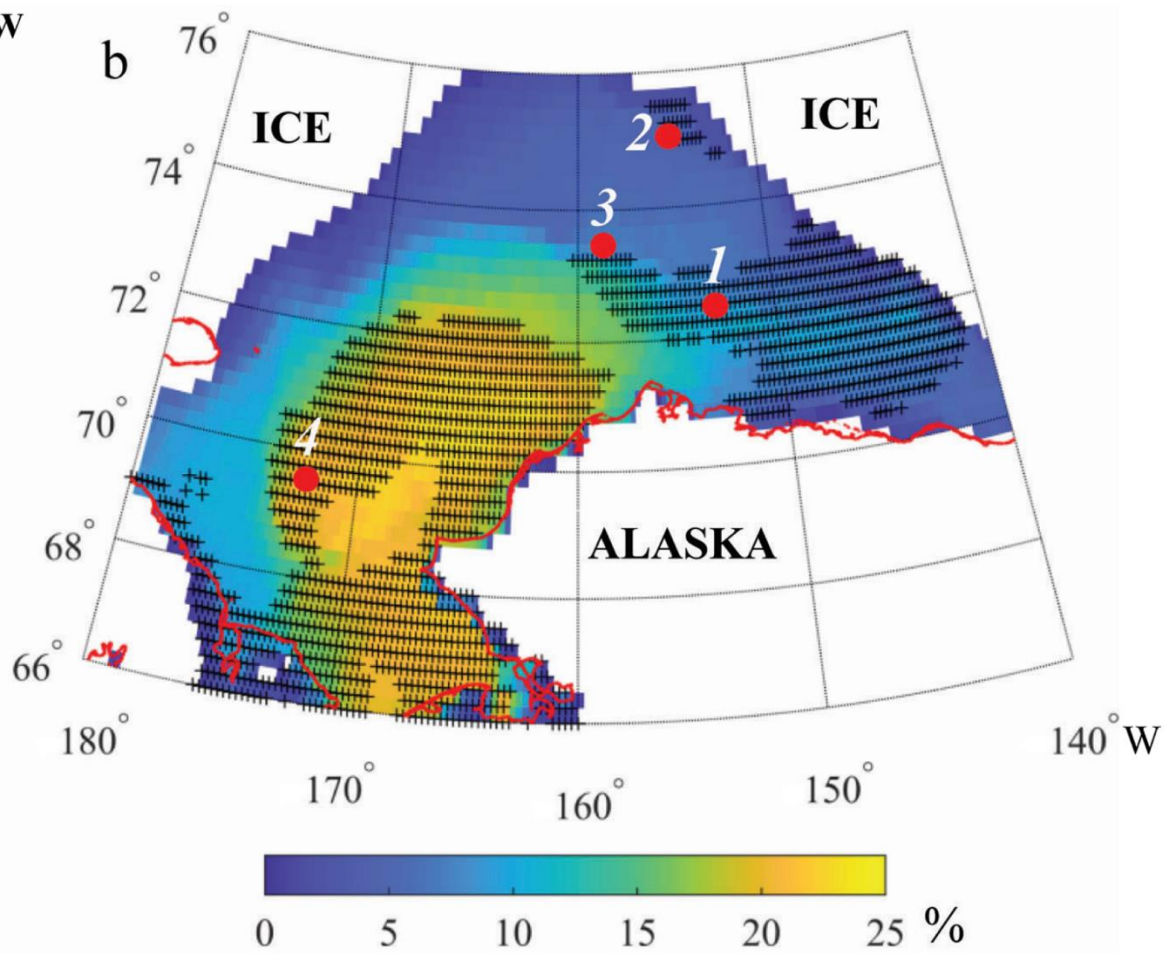



# Тропические циклоны - максимальная скорость ветра



# Полярные мезоциклоны в Тихоокеанской Арктике

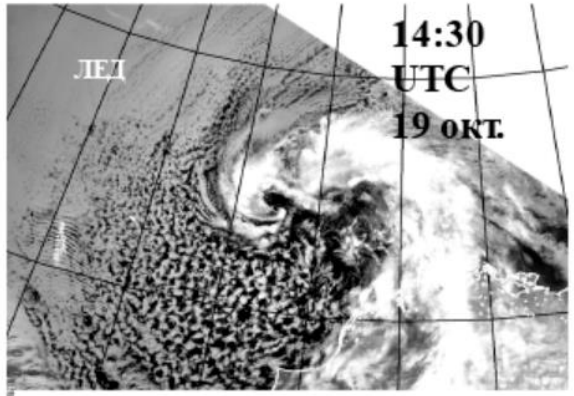


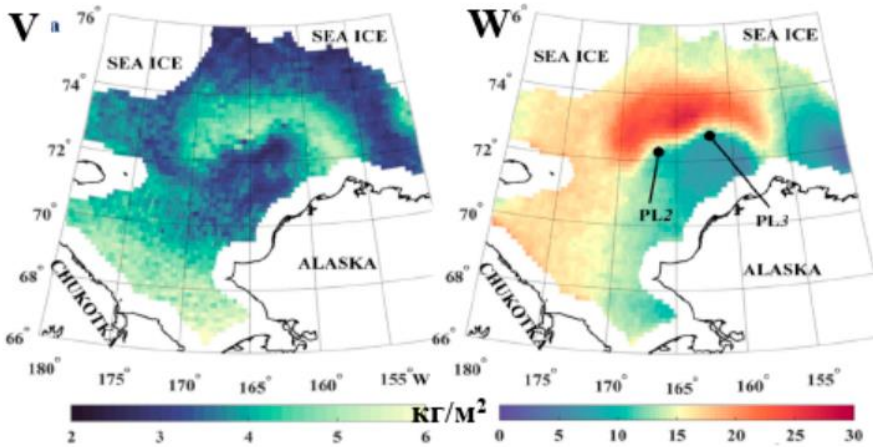

Сравнение с климатическим медианным положением кромки льда за **1981–2010 гг.** показывает значительное отступление льда в октябре 2017 г.

Карта частоты благоприятных условий для мезоциклогенеза в октябре 2017 г. показывает области, где термодинамические факторы чаще способствовали развитию полярных мезоциклонов.

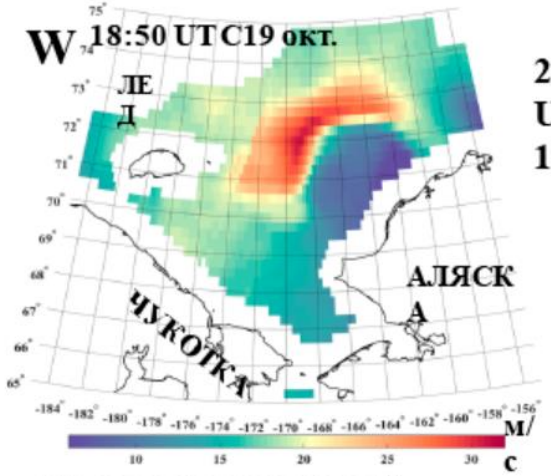
# Мультисенсорный анализ - Полярные мезоциклоны в Арктике



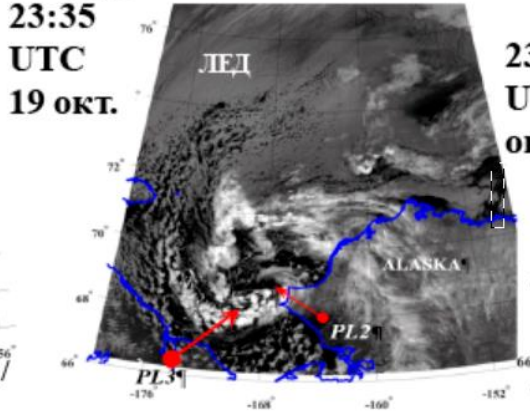

СпектрорадиометрMODIS (спутник AQUA)



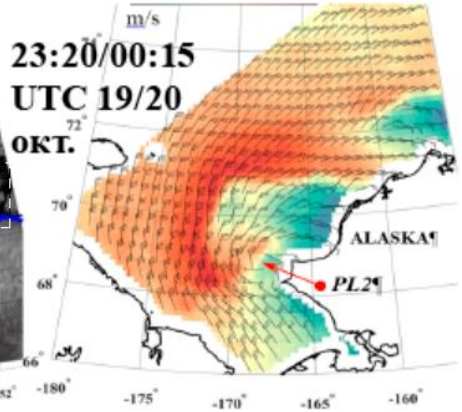

Радиометр AMSR2 (спутник GCOM-W1) 14:24 Гр. 19 окт.




Поляризационный радиометр WindSat

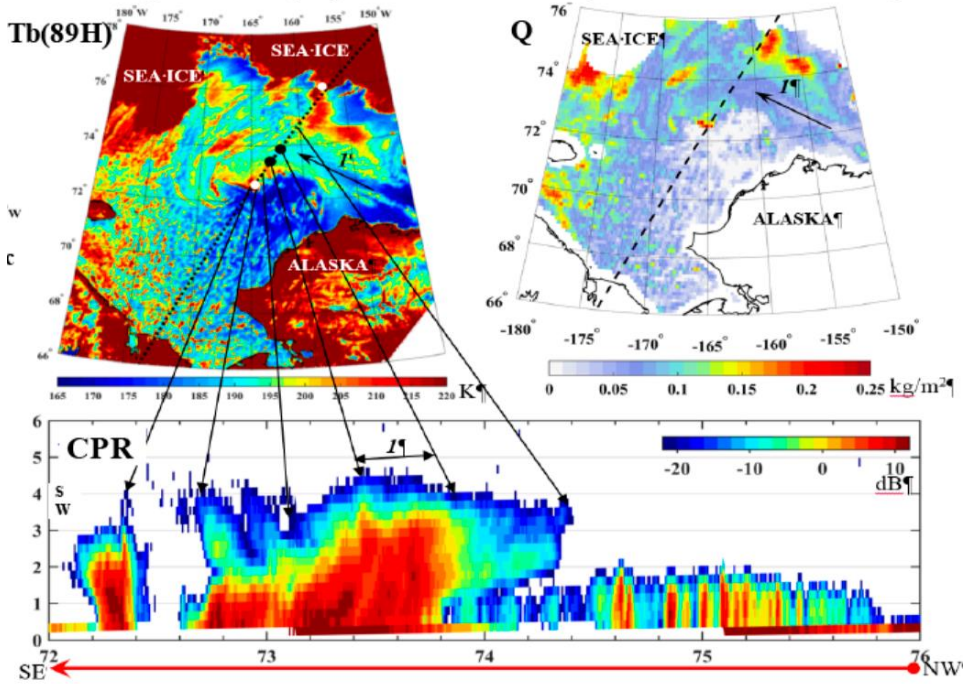



Радиометр VIIRS спутник Suomi/NPP)




Скаттерометр ASCAT-A/B (спутник Coriolis)

Радиометр AMSR2 (спутник GCOM-W1) 14:24 UTC 19 октября




Радиолокатор CPR (спутник CloudSat) 14:34 UTC 19 октября

*Gurvich, Irina, Mikhail Pichugin, and Anastasiya Baranyuk. "Satellite multi-sensor data analysis of unusually strong polar lows over the chukchi and beaufort seas in october 2017." Remote Sensing 15.1 (2022): 120.*

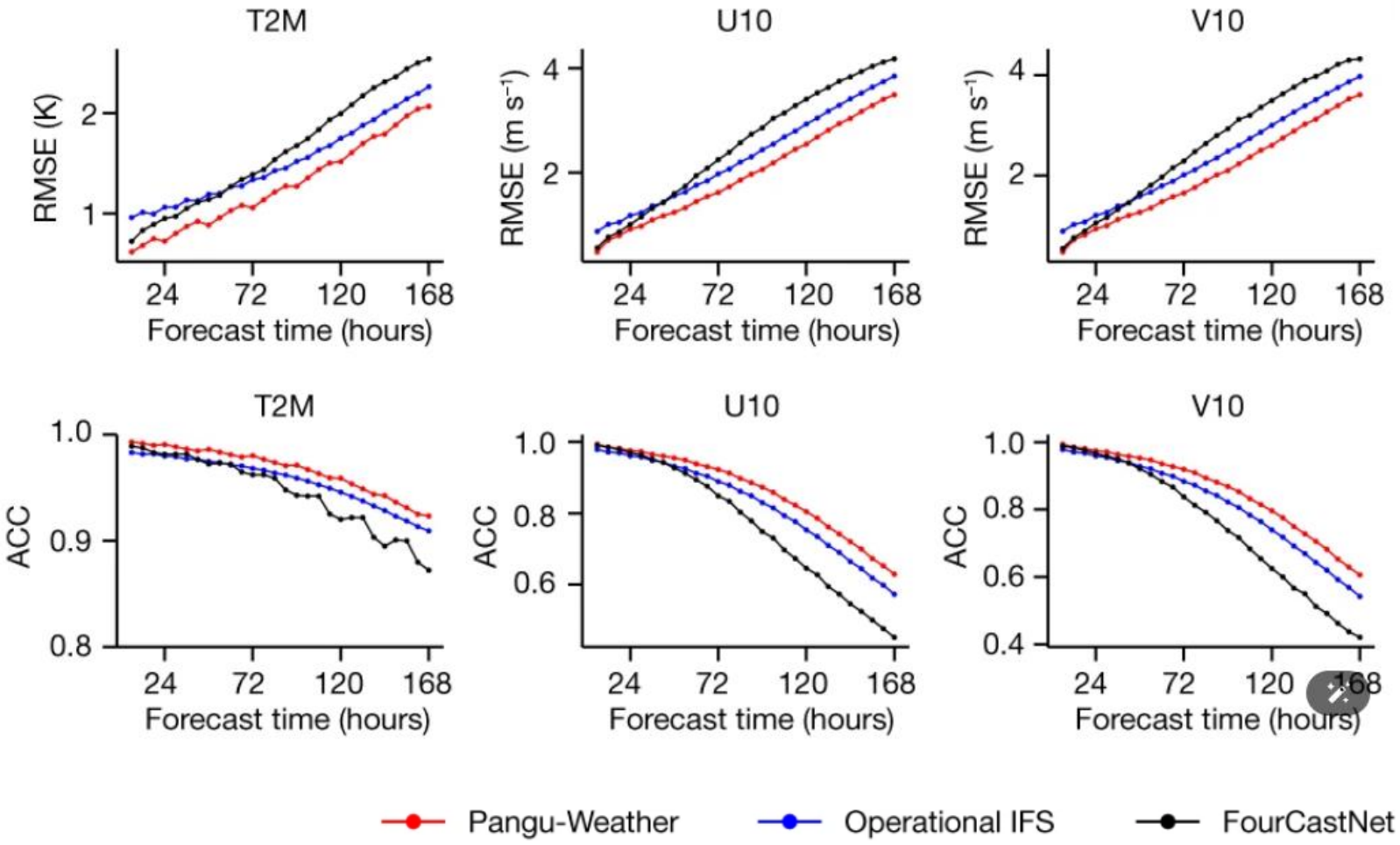
# ИИ и спутниковые данные для прогноза погоды

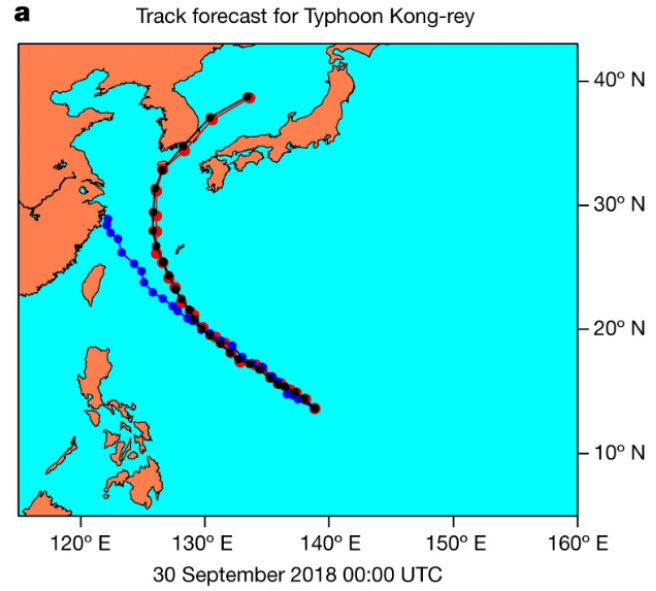
***Новое поколение data-driven моделей глобального прогноза, обученных на длинных рядах спутниковых наблюдений и данных реанализов (ERA5)***

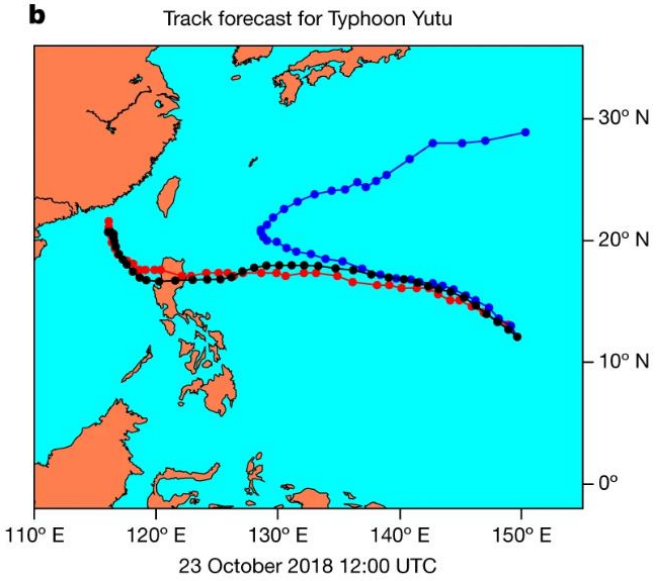
| Модель | Разработчик | Ключевая особенность |
|---|---|---|
| **Pangu-Weather** | Huawei | 3D-трансформер; прогноз на 7 дней за секунды |
| **GraphCast** | Google DeepMind | Графовые нейросети; превосходит HRES на 90 % метрик |
| **FourCastNet** | NVIDIA | Adaptive Fourier Neural Operator; высокое разрешение 0.25° |
| **AIFS** | ECMWF | Интеграция ML в операционный конвейер |
| **FengWu / ClimaX** | Академические | Мультизадачные climate foundation models |

- ***GraphCast*** и ***Pangu-Weather*** уже **превосходят традиционные NWP-модели** по ряду верификационных метрик
- ***Pangu-Weather*** и ***FourCastNet*** v2 дают **точные и надёжные прогнозы интенсивности ТЦ до 5 суток**

# ИИ для прогноза погоды – Pangu-Weather

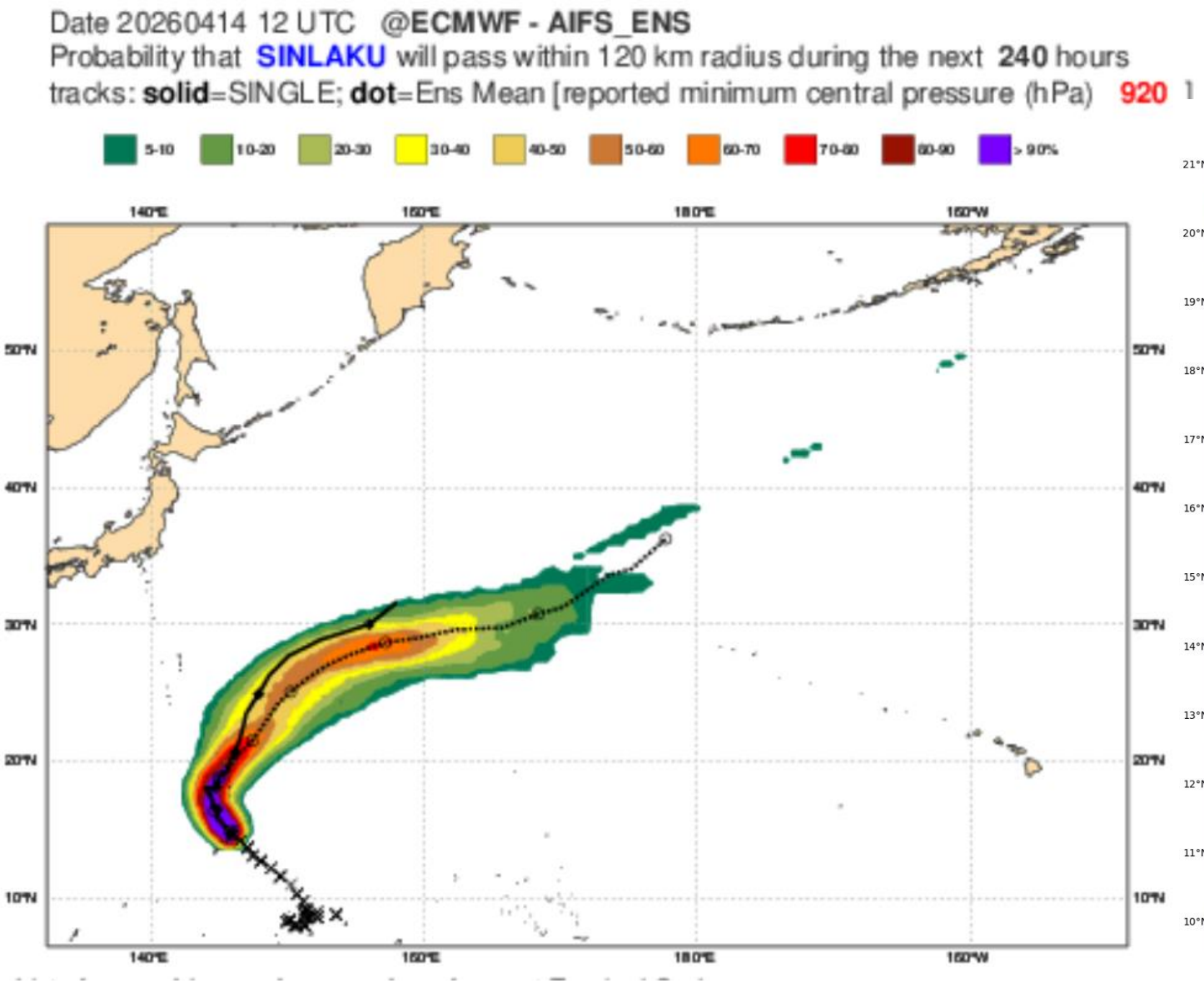


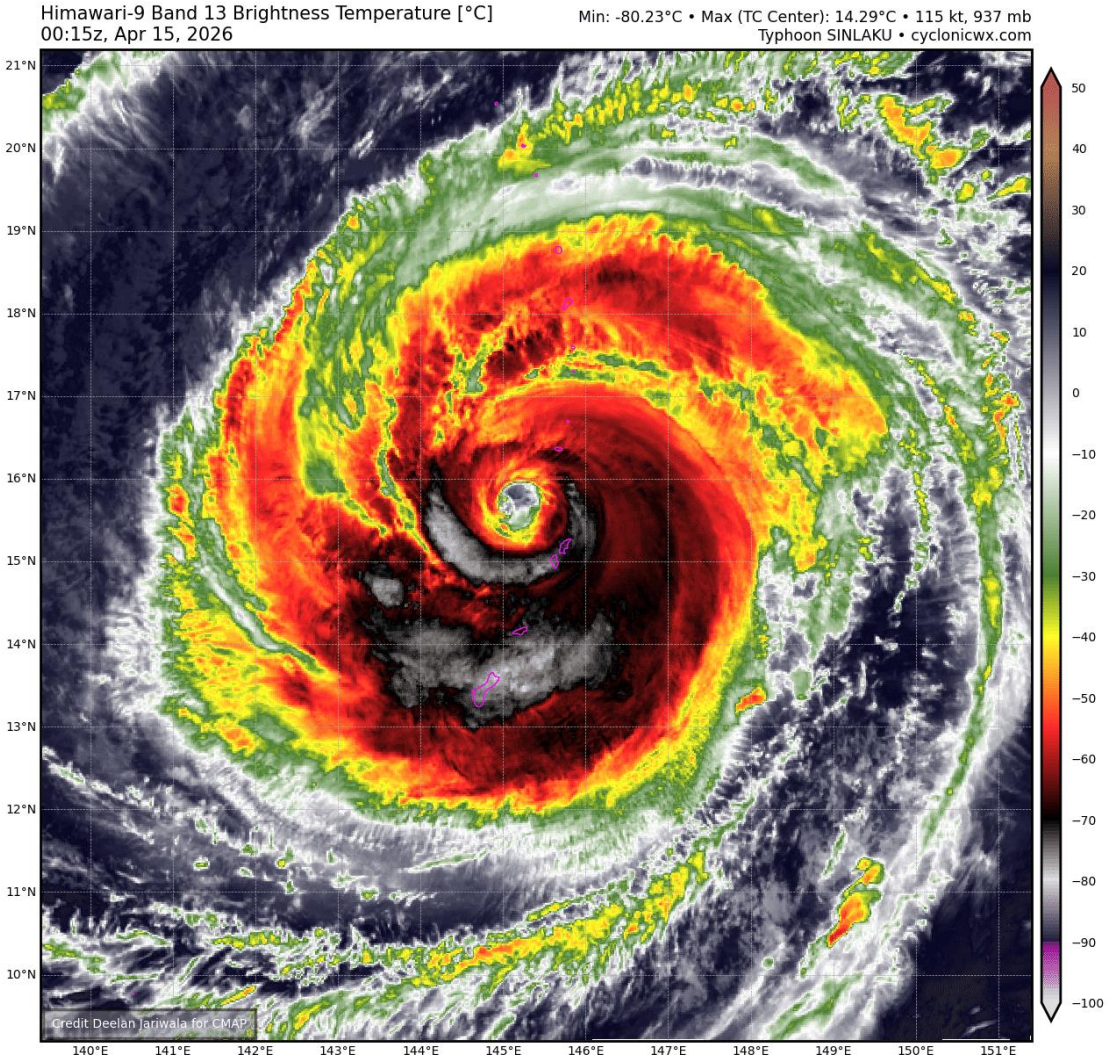




*Bi, Kaifeng, et al. "Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks." Nature 619.7970 (2023): 533-538.*

# Super Typhoon SINLAKU

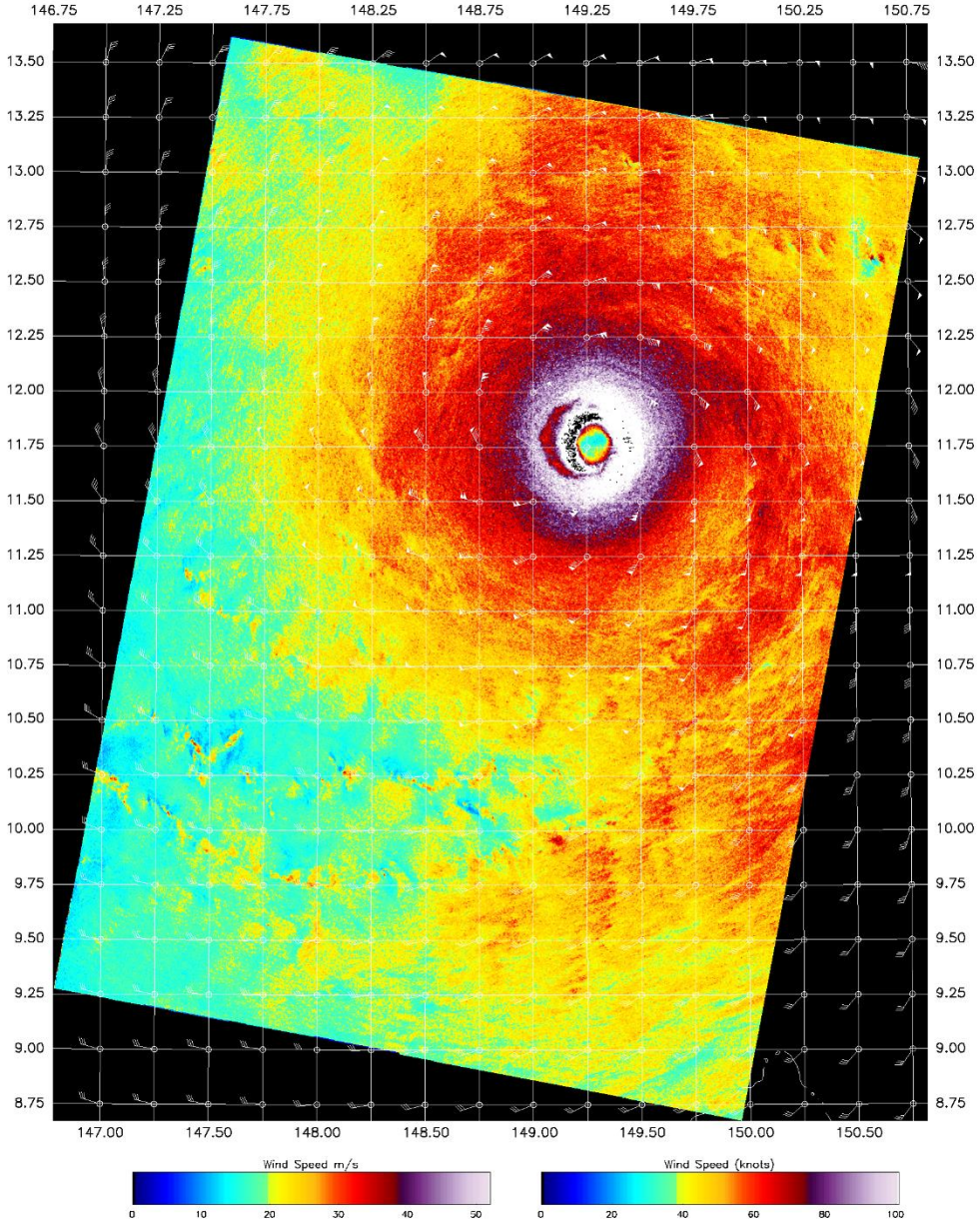


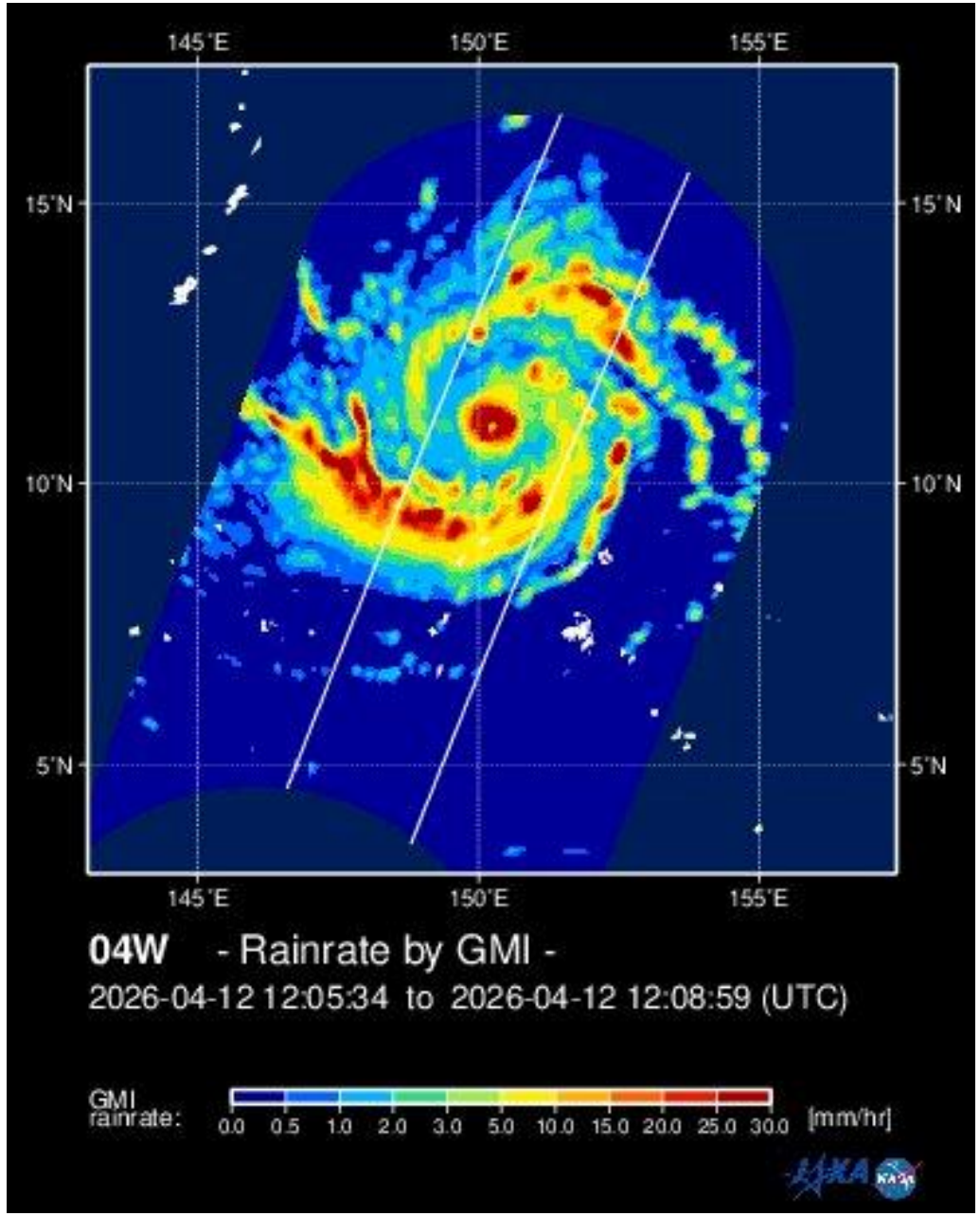

*SINLAKU, 15 апреля 2026 г.*




*https://charts.ecmwf.int/products/cyclone?base_time=202604140000 &product=tc_strike_aifs_ens&unique_id=04W_SINLAKU_2026*

# Super Typhoon SINLAKU

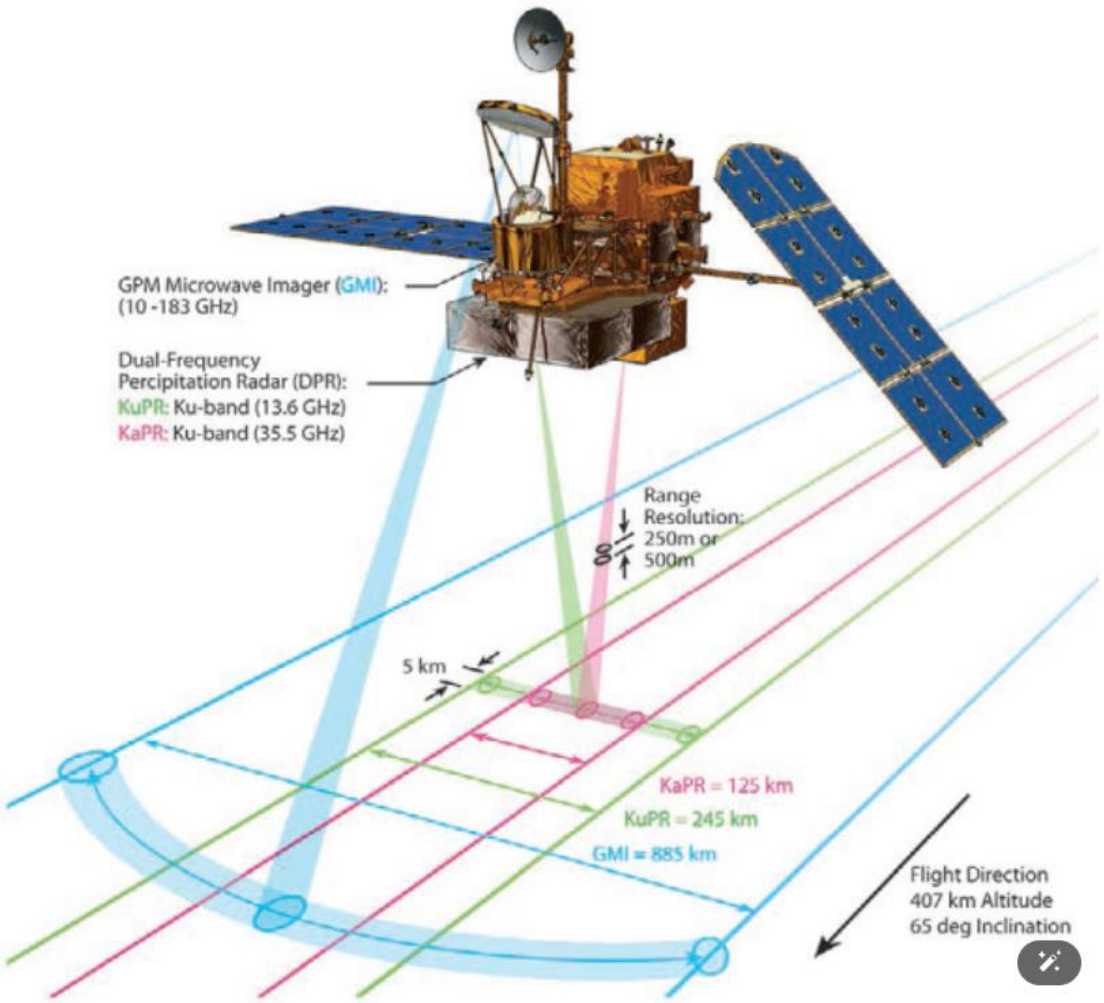


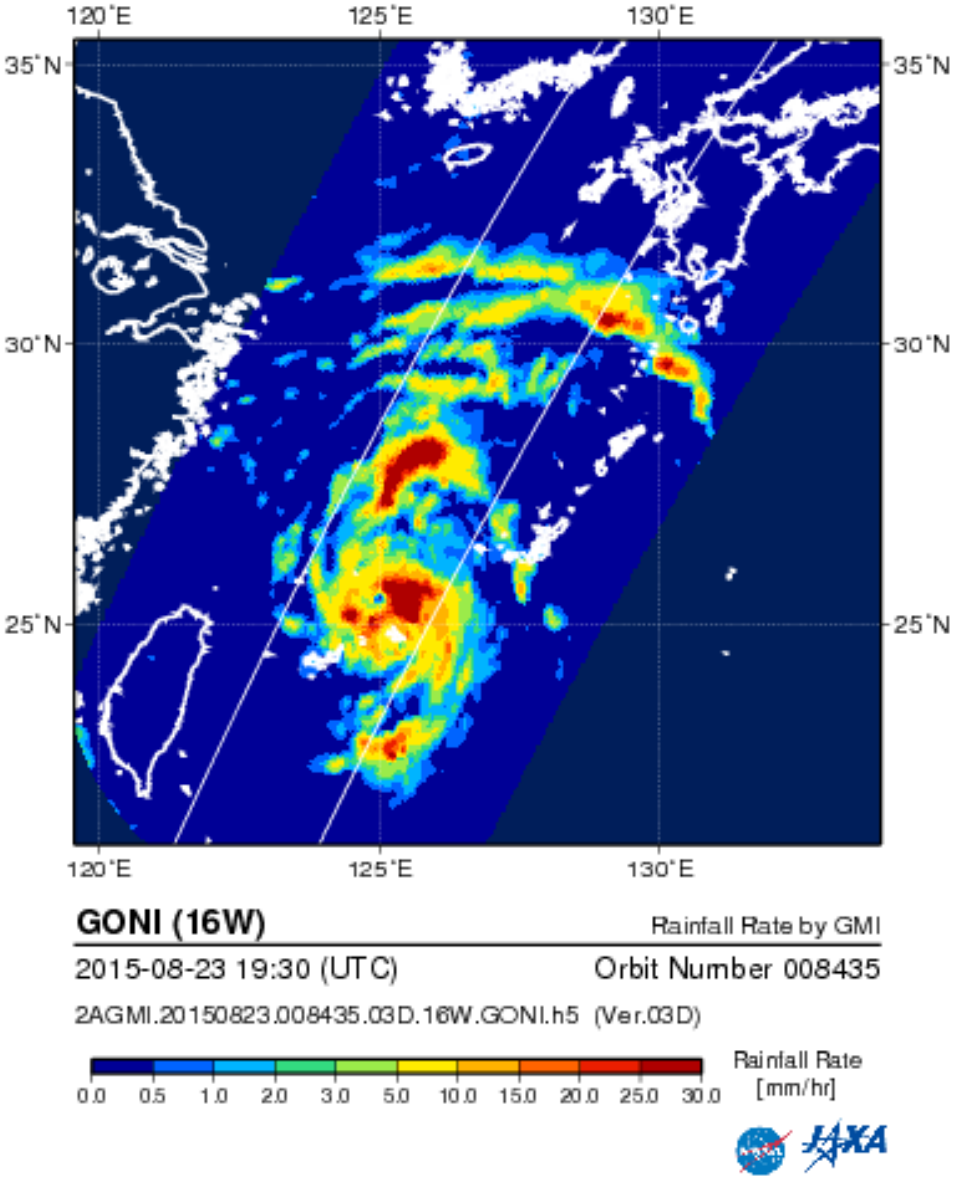




***Скорость ветра в тайфуне SINLAKU по данным RadarSat-3, 04:09 UTC, 13/04/2026 г.***

# Тропические циклоны - осадки

*Hou, Arthur Y., et al. "The global precipitation measurement mission." Bulletin of the American meteorological Society 95.5 (2014): 701-722.*




**Миссия Global Precipitation Measurement (GPM), запущенная NASA и JAXA в 2014 году. На борту:**

- **двухчастотный радар (DPR) – 3D структура осадков**
- **микроволновый радиометр (GMI) – интенсивность осадков**