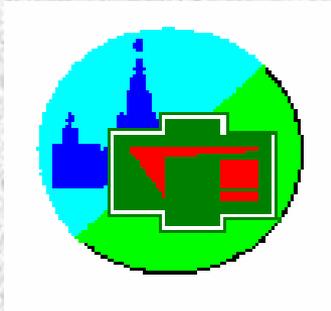


*Всероссийская конференция «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» 19-21 ноября 2024*



# **Отклик верхней атмосферы на внетропические циклоны**

*Захаров В.И.<sup>123</sup>, Шалимов С.Л.<sup>34</sup>,*

*Акперов М.Г.<sup>2</sup>*

- 1 МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия,  
2 Институт Физики Атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия  
3 Институт физики земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия  
4 Институт Космических Исследований РАН, Москва, Россия*

# Отклик среды на крупные атмосферные события

В настоящее время **нет единой теории**, объясняющей как возмущения от атмосферных процессов (например, циклонов) передаются на высоты верхней атмосферы.

**В качестве возможного механизмы передачи возмущений часто рассматривают**

**внутренние гравитационные и акустические волны в нижней атмосфере**, которые могут доходить до ионосферы.

В ионосфере присутствует заряженная компонента - ионосферная плазма, которая изучается **радиофизическими или контактными методами**.

**В нашей работе реализованы оба подхода**

# Методы исследований

В настоящей работе для исследования ионосферного отклика на прохождение внетропических циклонов используются

- 1. региональная сеть станций СДВ радиопросвечивания (позволяющая регистрировать возмущения нижней ионосферы),
- 2. измерения посредством спутниковой миссии SWARM (регистрация возмущений в верхней ионосфере).

В работе проведено предварительное сравнение результатов анализа тропических и внетропических циклонов

# Использованные данные

В работе использованы данные о

- **внетропических циклонах 2014-2023 г.г. – база данных ИФА РАН;**
- <http://www.nhc.noaa.gov/aboutsshws.php>)
- <https://worldview.earthdata.nasa.gov>).
- <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>
- <https://www.jma.go.jp/jma/indexe.html>

**Swarm mission data** есть в свободном доступе

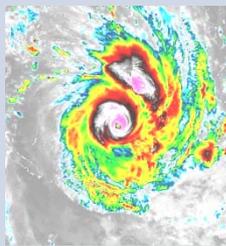
<https://earth.esa.int/web/guest/swarm/data-access>

# Тропические и внетропические ...

## Тропические циклоны

Приэкваториальная область  
**ТЦ как система аварийного сброса энергии океана**

Образования с теплым ядром



**В первом приближении – осесимметричные, как и зоны осадков. Глаз ТЦ – есть всегда, обычно неск. десятков км**

**Частоты образования –**  
десятки в год  
Размеры – до 1000км (9-10 град ),  
ветра до 100 м/сек.  
Падения давления – до 100 hPa  
**ТОЛЬКО Пониженное давление**

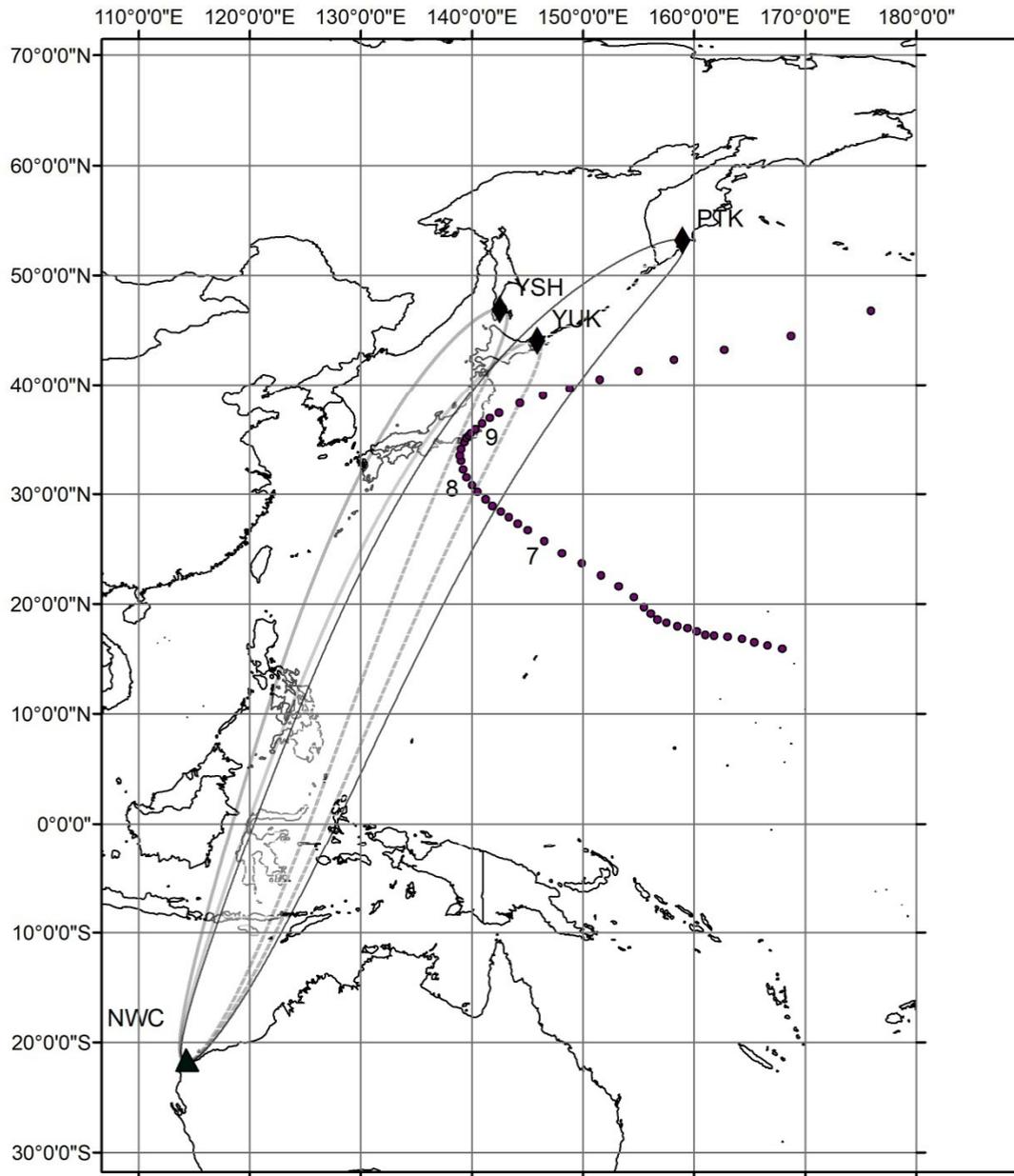
## Внетропические циклоны и антициклоны

Во всех регионах  
Барические или термические проявления циркуляции атмосферы  
**Естественная циркуляция атмосферы всех широт. Связь с центрами циркуляции атмосферы**  
Система одного или многих центров.  
**Параметры несимметричны**  
Неопределенной формы, выделяются по изобарам.

**Частоты появлений –** тысячи в год, но крупных также сотни.  
Размеры – до 3-4 тыс км, ветры не более 40 м/с.  
Падение давления – до 50...60 hPa  
**В целом – более крупные, но менее мощные, чем ТЦ**  
**Есть циклоны и антициклоны**

# СДВ радиопросвечивание

- Проводится регистрация амплитудно-фазовых характеристик СДВ (VLF) сигналов с частотами от неск. кГц до неск. десятков кГц. **Амплитуда и фаза сигналов является чувствительным индикатором состояния ионосферы.**
- Приемные станции СДВ радиопросвечивания **региональной сети Дальневосточного региона России** находятся в Петропавловске-Камчатском, Южно-Сахалинске и Южно-Курильске. Станции оборудованы UltraMSK приемниками, которые **измеряют одновременно амплитуду и фазу MSK (MinimumShiftKeying)** модулированных сигналов в частотном диапазоне 10-50 кГц от нескольких передатчиков.
- Приемник может регистрировать сигналы с шагом дискретизации от 50 мс до 60 с. Для анализа использовались данные с временным интервалом 20 с.

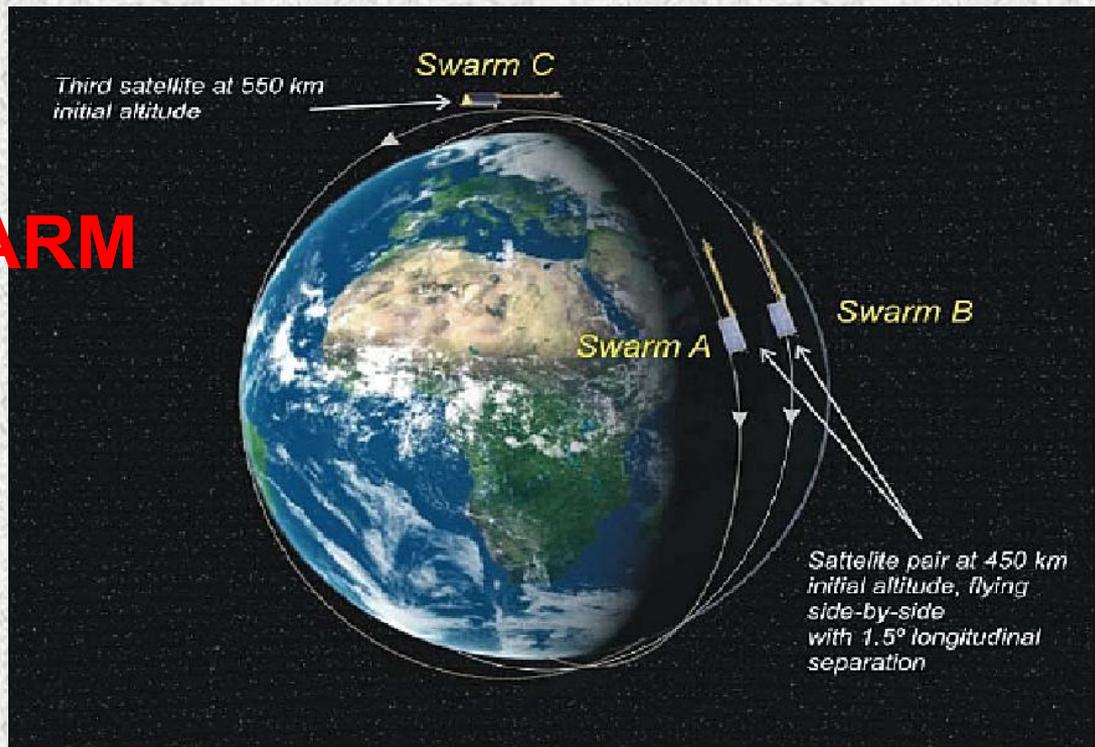


# Пример : СДВ эксперимент

- Были приняты СДВ сигналы для **ЦИКЛОНА**, который пересекал зоны чувствительности трасс в отсутствии магнитной и сейсмической активности (которые могут привести к возмущениям сигнала).
- Анализ проводился для амплитуды и фазы сигнала от передатчика NWC (19,8 кГц), расположенного на западном побережье Австралии. Использовались данные, полученные на принимающих станциях в Петропавловске-Камчатском (РТК), Южно-Сахалинске (YSH) и Южно-Курильске (YUK).

# Контактные исследования плазмы зондами Ленгмюра

## SWARM



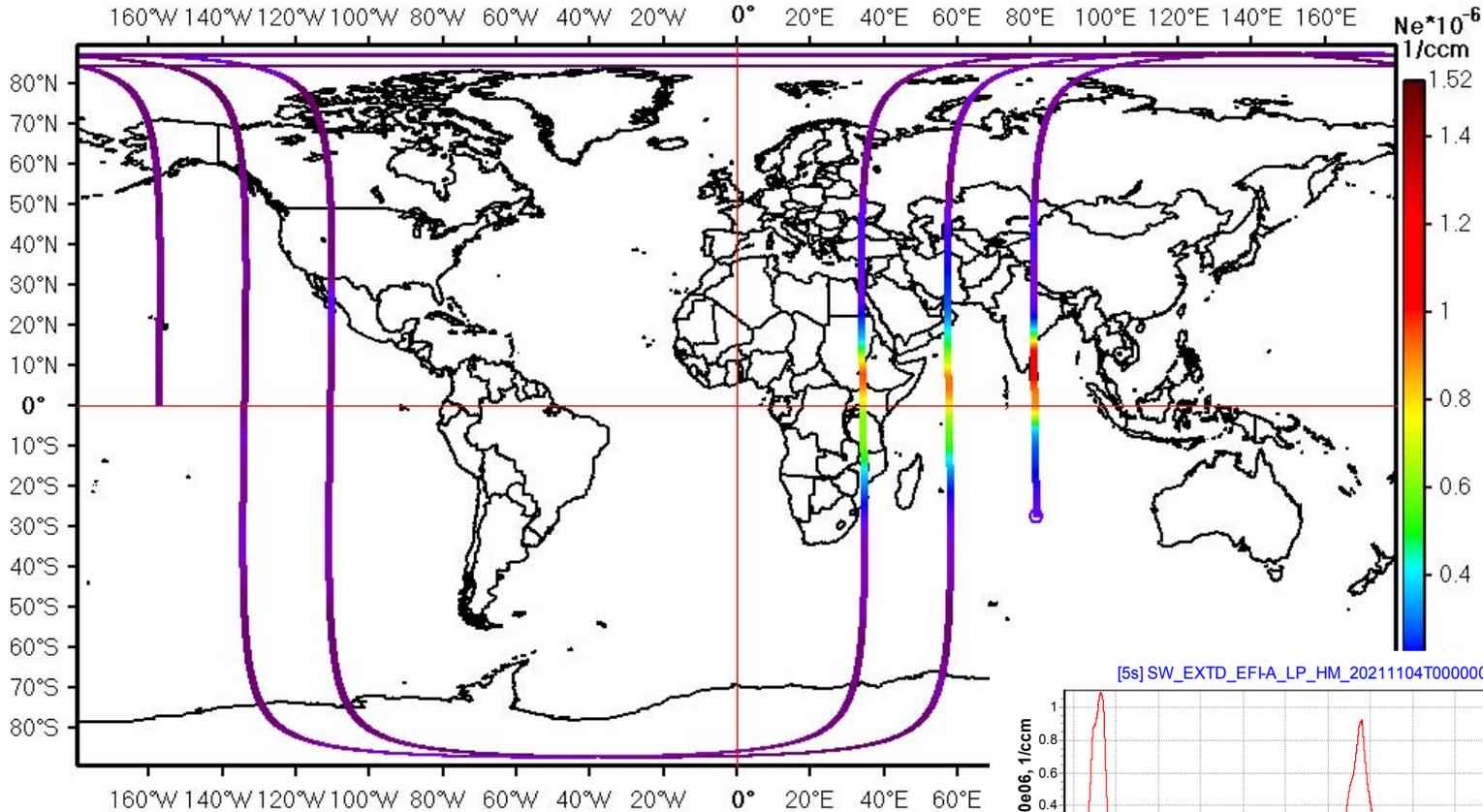
- Swarm — спутниковая миссия Европейского Космического Агентства (ЕСА), предназначенная для изучения магнитного поля Земли.
- Миссия состоит из трёх спутников на различных полярных орбитах высотой от 460 до 530 км. **Масса каждого спутника — 472 килограмма.** Первоначально два спутника выведены на орбиту высотой 460 километров, затем они будут постепенно снижаться до 300 километров. Третий спутник выведен на более высокую орбиту высотой 530 километров.
- Запуск был осуществлён 22 ноября 2013 г. при помощи ракеты-носителя «Рокот».

Parameter	Swarm-A	Swarm-C	Swarm-B
Orb. Altitud	≤ 460 km (initial altitude of satellite pair)		≤ 530 km
Orb.inclinat	87.4°		88°
ΔRAAN	1.4° difference between A and B		~0-135°
Mean anomaly at epoch	Δt = 2-10 s difference between A and B		-

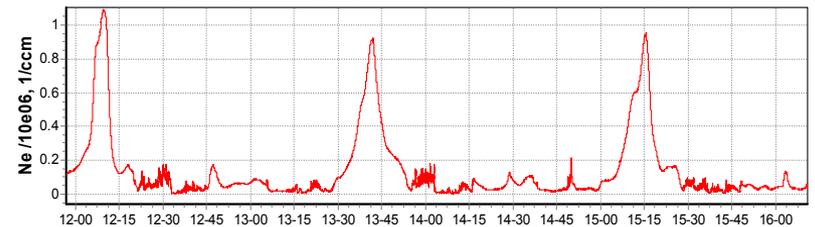
Для ИФЗ РАН

# Пример данных

SWARM Ne cur 5min 2021-11-04 12-00 - 16-00



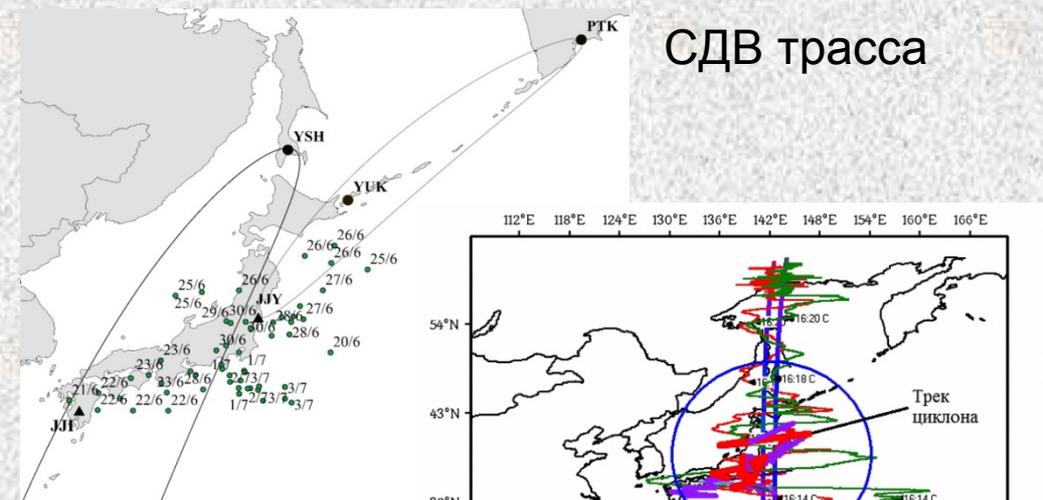
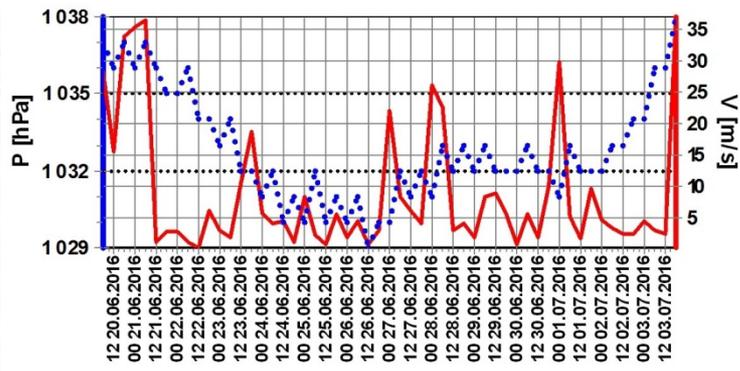
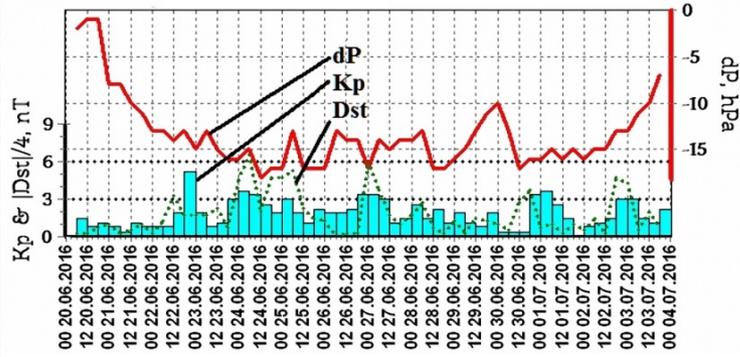
[5s] SW\_EXTD\_EFIA\_LP\_HM\_20211104T000000\_20211104T235959\_0103



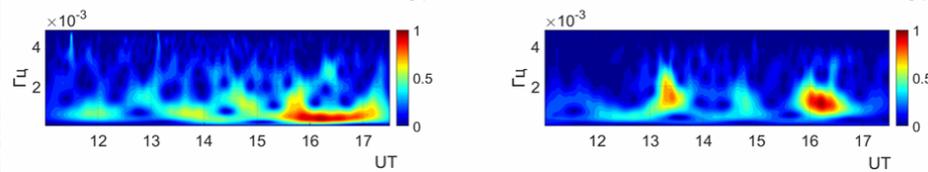
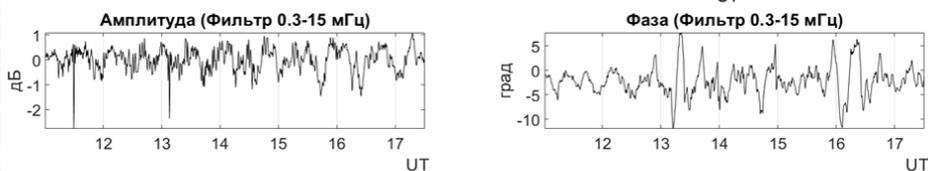
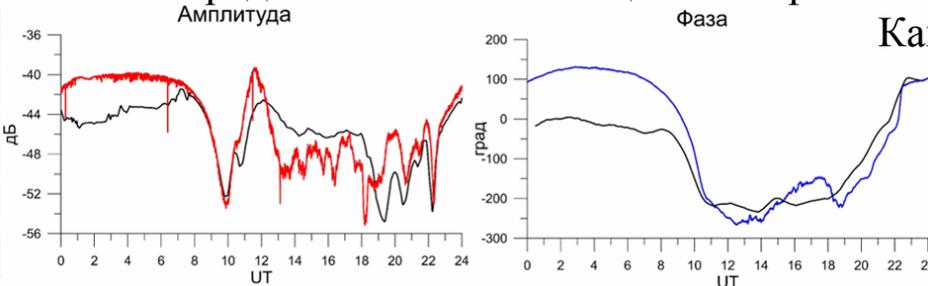
На приэкваториальных широтах - экваториальная аномалия и плазменные пузыри (F-рассеяние); на средних широтах интенсивность циклонов убывает. Для больших широт значительно влияние полярного овала и высокоширотной ионосферы. Влияние гео- гелиомагнитной обстановки. Интерференция волн.

# Циклон ДВ

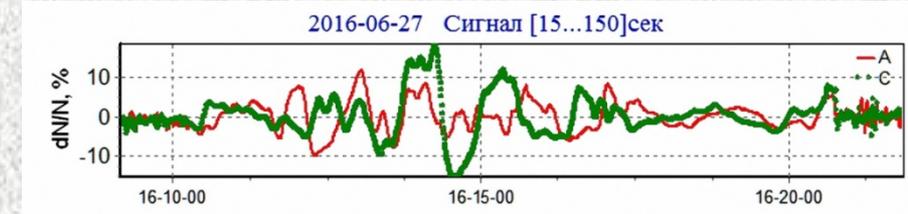
## 20 июня — 3 июля 2016



### Сигнал передатчика JYU на станции в Петропавловске-Камчатском



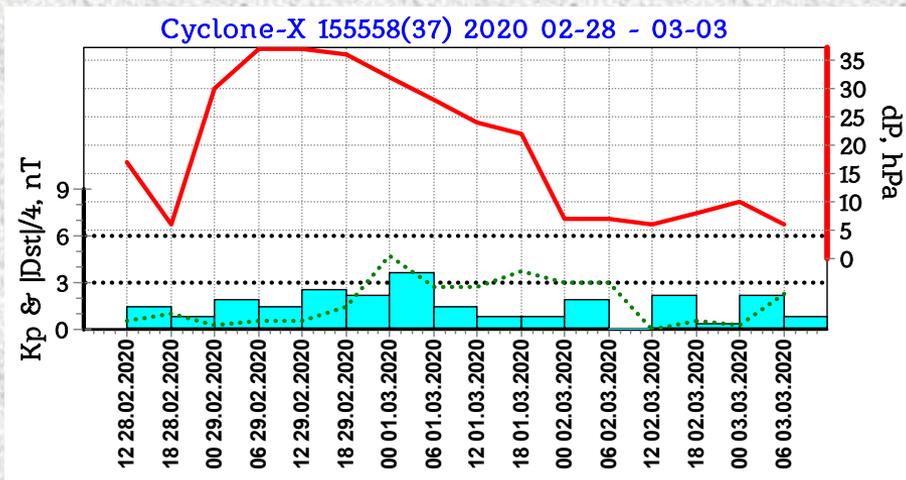
27 июня 2016 г



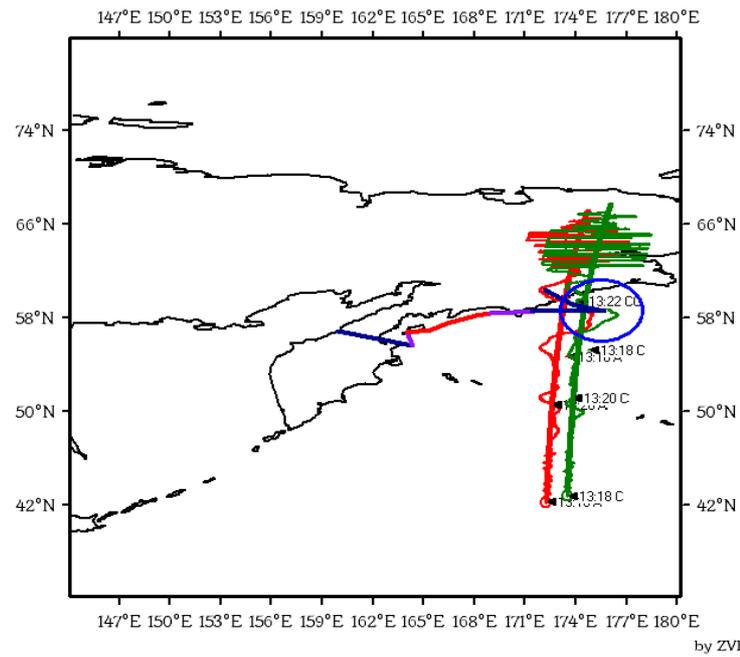
### Анализ данных Swarm

# Антициклон

## 28.02 – 03.03 2020



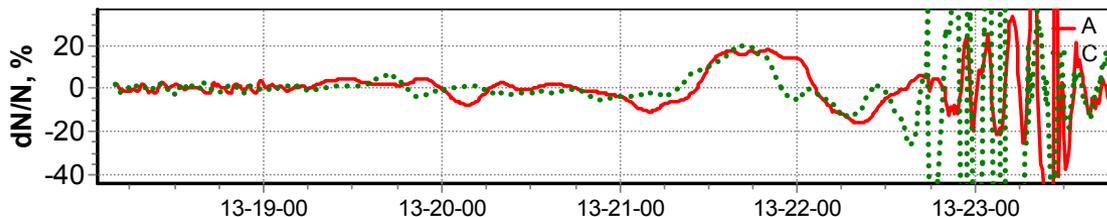
Cyclone-X 155558(37) vs SWARM Ne cur 5min d/N 2020-03-02 13-18 - 13-24



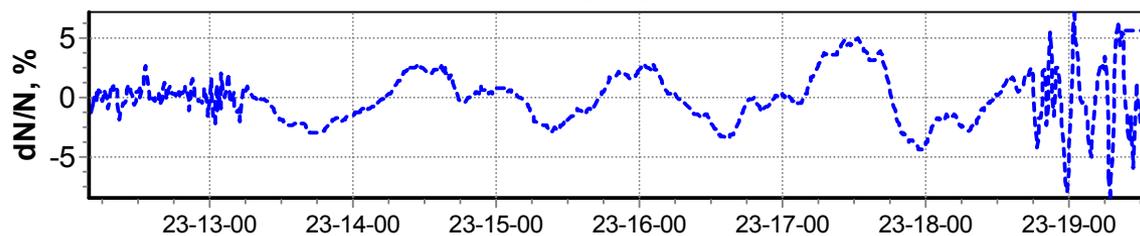
by ZVI

Cyclone-X 155558(37) vs SWARM Ne cur 5min dN/N dN 2020-02-29 23-12 - 23-20

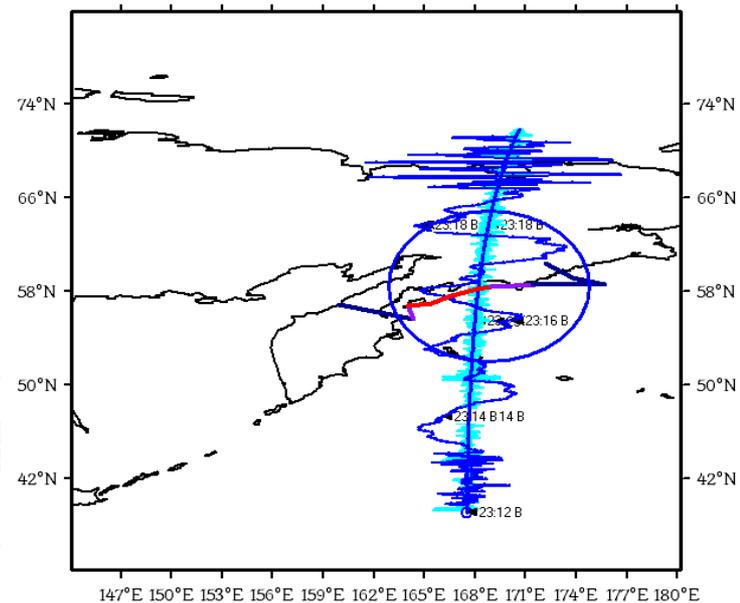
2020-03-02 Signal [15...150]sec



2020-02-29 Signal [15...150]sec



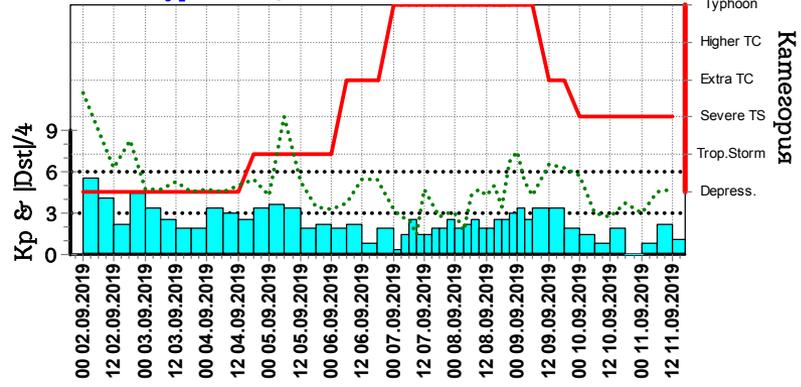
147°E 150°E 153°E 156°E 159°E 162°E 165°E 168°E 171°E 174°E 177°E 180°E



by ZVI

# ТЦ FAXAI 02-11 сентября 2019

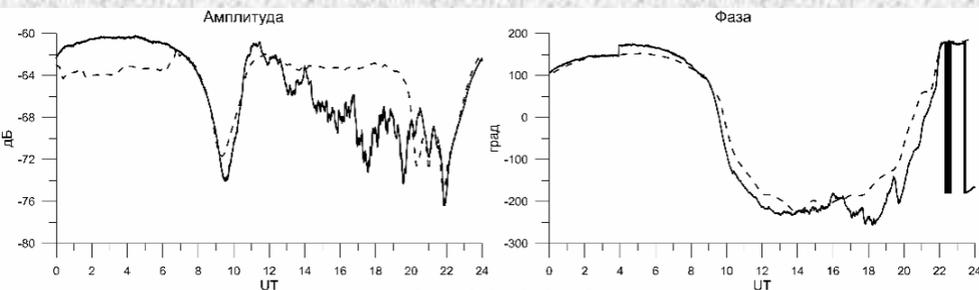
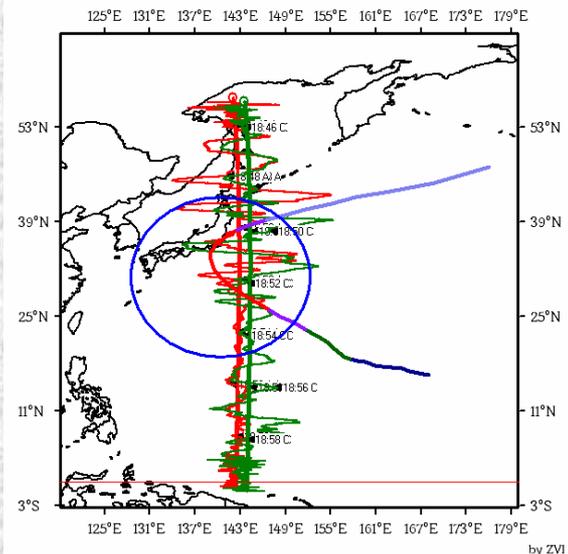
Typhoon\_JMA FAXAI 2019 09/02 - 09/11



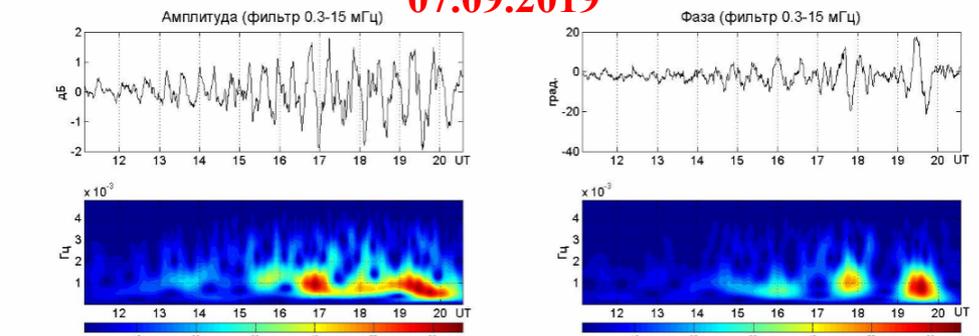
**Максимальная зарегистрированная скорость ветра 43 м/сек, радиус ядра оценивается до 150-200 км, внешний радиус проявлений ТЦ достигает 500 км. Высота действия ТЦ 14 км, т.е. тайфун возмущает среду до высоты тропопаузы.**

**Диапазон собственных частот тайфуна от 0.8 до 30 мГц, что дает возможность генерации АГВ волн с периодами 1-40 мин.**

FAXAI vs SWARM Ne cur 5min [dN/N] 2019-09-07 18:45 - 19:00



**07.09.2019**



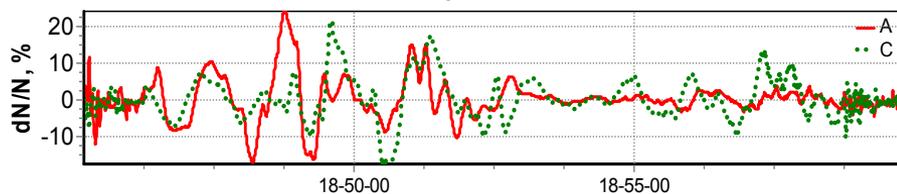
07/09.2019 было 8 удачных пролетов спутников.

**В 5 случаях возможно выделить возмущения отн. амплитуды 5...20%.**

В 2 случаях нет уверенной регистрации волноподобных структур, в 1 случае зарегистрирован **аномально мощный отклик**, неизвестной причины.

**Параметры откликов в целом соответствуют теоретическим оценкам области с учетом дисперсионных соотношений ВГВ.**

2019-09-07 Signal [15...150]sec



# ИТОГИ

Исследования отклика ионосферы на прохождение внетропических циклонов совместно на

- 1) региональной сети станций СДВ-радиопросвечивания и
- 2) данных об электронной концентрации, регистрируемых на спутниках системы ECA Swarm

для 40 внетропических циклонов в Дальневосточном регионе России в период 2014–2023 гг. в 12 случаях установлено, что ВГВ, генерируемые циклоном и при благоприятных условиях достигающие ионосферы, способны вызывать как вариации фазы и амплитуды СДВ-сигнала, так и вариации плотности плазмы в верхней ионосфере, причем структура откликов показывает возможность взаимодействия внутренних волн от разных источников.

- Волновые структуры соответствуют акустико-гравитационной ветви собственных колебаний атмосферы. Полученные отклики составляют 3...10% вариаций  $N_e$ . Локализация возмущения происходит в широкой пространственной области.
- Совместный анализ данных показывает, что волновая картина может быть более сложной из-за интерференции волн, возбуждаемых при волновых взаимодействиях с поверхностью океана, береговой кромкой и т.п.
- В целом, при общем подобии отклика, внетропический атмосферный вихрь показывает более сложную по сравнению с ТЦ, структуру отклика в ионосфере, что позволяет предположить наличие нескольких центров генерации и интерференцию волн от них на ионосферных высотах

# Основные статьи по теме

- 1) **Zakharov V.I., Sigachev P.K. Ionospheric disturbances from tropical cyclones // Advances in Space Research, 2022. V.69. No. 1. P. 132-141. DOI 10.1016/j.asr.2021.09.025.**
- 2) Zakharov V.I., Pilipenko V.A., Grushin V.A., Khamidullin A.F. Impact of typhoon VongFong 2014 on the ionosphere and geomagnetic field according to SWARM satellite data: 1. Wave disturbances of ionospheric plasma // Solar-Terrestrial Physics. 2019. Vol. 5. Iss. 2. p. 101-108, doi DOI: 10.12737/stp-52201914
- 3) Martines-Bedenko V. A., Pilipenko V. A., Zakharov V. I., Grushin V.A., Influence of the Vongfong 2014 hurricane on the ionosphere and geomagnetic field as detected by SWARM satellites: 2. Geomagnetic disturbances» // Solar-Terrestrial Physics, 2019, V. 5, no. 4. p. 74–80, doi: 10.12737/stp-54201910
- 4) S. L. Shalimov, V. I. Zakharov, M. S. Solov'eva, P. K. Sigachev etc. Wave Perturbations of the Lower and Upper Ionosphere during the 2019 Faxai Tropical Typhoon // Geomagnetism and Aeronomy, 2023, Vol. 63, No. 2, pp. 186–196. © Pleiades Publishing, Ltd., 2023. DOI: 10.1134/S0016793222600576
- 5) Shalimov S.L., Zakharov V.I., Solov'eva M.S., Bulatova N.R., Korkina G.M., Sigachev P.K. Response of the Ionosphere to Strong Tropospheric Disturbances // Atmospheric and Oceanic Physics, Pleiades Publishing, Ltd, 2023, v 59, p. 1326-1336 Doi 10.1134/S0001433823120216
- 6) Zakharov V. I. Experimental study of the mechanisms of the impact of large tropical cyclones on the ionosphere // Proc. SPIE 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics, 2020. vol. 11560. Paper 115607Y, 4 p. doi: 10.1117/12.2574814.
- 7) Захаров В.И., Пилипенко В.А., Грушин В.А., Хамидуллин А.Ф. Влияние тайфуна VongFong 2014 на ионосферу и геомагнитное поле по данным спутников SWARM: 1. Волновые возмущения ионосферной плазмы // Солнечно-земная физика, 2019, т.5, N2, с. 114-123. doi 10.12737/szf-52201914
- 8) Мартинес-Беденко В.А., Пилипенко В.А., Захаров В.И., Грушин В.А. Влияние тайфуна VongFong 2014 г. на ионосферу и геомагнитное поле по данным спутников SWARM: 2. Геомагнитные возмущения // Солнечно-земная физика, 2019, т.5, N4, с. 90-98. doi 10.12737/szf-54201910 Шалимов С.Л., Захаров В.И., Соловьева М.С., Сигачев П.К., и др. Волновые возмущения нижней и верхней атмосферы во время тропического циклона FAXAI 2019 г. // Геомагнетизм и Аэрномия. 2023, т. 63. N2. с. 216-226. DOI: 10.31857/S0016794022600442
- 9) С. Л. Шалимов, В. И. Захаров, М. С. Соловьева и др ОБ ОТКЛИКЕ ИОНОСФЕРЫ НА СИЛЬНЫЕ ТРОПОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ // ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА, 2023, № 6, с. 106–117 DOI: 10.31857/S0205961423060088, EDN: DGBRAJ
- 10) **В.И. Захаров, М.С. Соловьева, С.Л. Шалимов, и др Отклик верхней атмосферы на внетропические циклоны // Солнечно-земная физика, 2025. N1 В печати**