



ВОЗМУЩЕНИЯ ОТ КРУПНЫХ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ СОВМЕСТНО РЕГИСТРИРУЕМЫЕ В ОБЩЕМ СОДЕРЖАНИИ ОЗОНА И ИОНОСФЕРЕ

Сигачев П. К., Захаров В. И.

МГУ имени М. В. Ломоносова, физический факультет
ФГБУ «Авиаметтелеком Росгидромета»

ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ

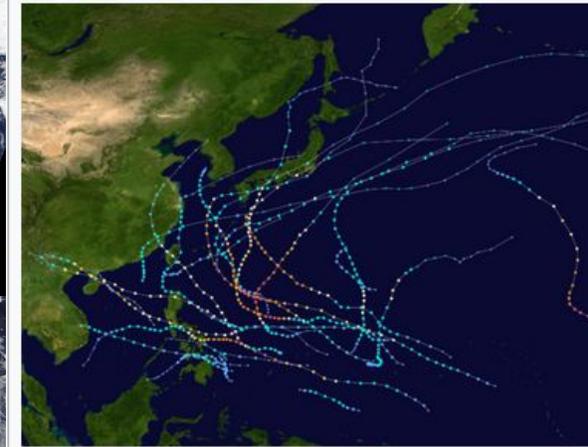
Анализ метеоданных и данных спутникового мониторинга всех крупных (4-5 категории по шкале Саффира-Симпсона) циклонов и тайфунов сезона 2014 года и получение их характеристик (собственных частот АГВ, размеров возможных областей генерации).

Анализ «промежуточного» уровня передачи возмущений – колебания общего содержания озона на высотах стратосферы по данным спутниковой миссии Aqua.

Выделение возмущений электронной концентрации, наблюдаемых по данным спутниковой миссии SWARM в ионосфере для изучаемых циклонов 2014г. Сравнение параметров возмущений с определенными из метеорологических данных



2014 Pacific Сезон тайфунов



Сезон резюме Карта

Сезонные границы

Первая система сформирована	10 января 2014
Последняя система рассеяна	1 января 2015

Сильнейший шторм

название	Vongfong
• Максимальная скорость ветра	215 км / ч (130 миль / ч) (10 минут поддерживается)
• низкое давление	900 гПа (мбар)

Сезонные статистики

Всего депрессий	32
Всего штормы	23
Тайфуны	11
Супер тайфуна	8 (неофициальный)
Общее число жертв	576 общее
Общий ущерб	12400000000 \$ (2014 USD)

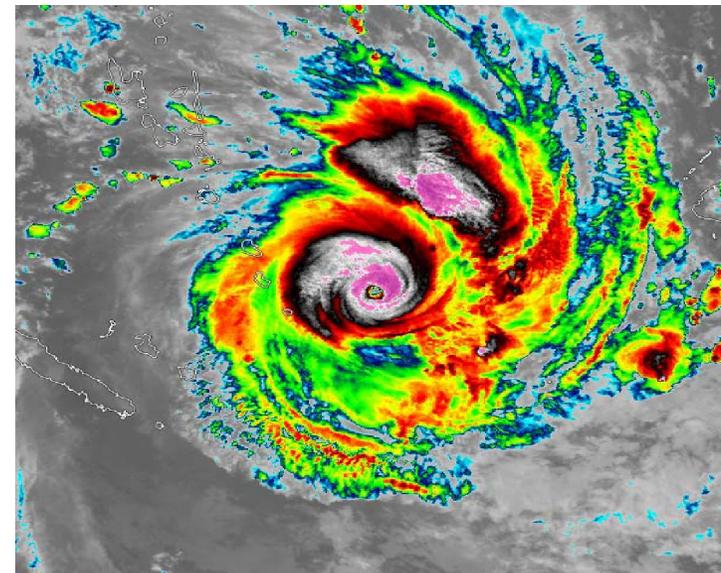
Мощные геофизические процессы в нижней атмосфере обычно протекают с выделением большого количества энергии. Излишки энергии выносятся из области возмущения **внутренними и акустико-гравитационными волнами**, которые в ряде случаев не только оказывают **влияние на колебания общего содержания озона** (далее – ОСО) и **вертикального распределения озона** (далее – ВРО) на высотах стратосферы, но и передают возмущение выше, на высоты ионосферы.

В качестве источника акустико-гравитационных и внутренних гравитационных волн могут выступать тропические циклоны (ТЦ) в ходе своего развития. **Однако процесс передачи возмущений на указанные высоты еще не изучен.** В качестве возможных механизмов рассматривают несколько процессов:

Волновой механизм - ионосферный отклик на динамические процессы в нижней атмосфере может быть связан с акустико-гравитационными волнами (АГВ), включающими ВГВ и акустические колебания, разделённые частотой Брендта-Вяйсяля . Такой отклик связан с генерацией атмосферной турбулентности АГВ, которые распространяются до ионосферных высот.

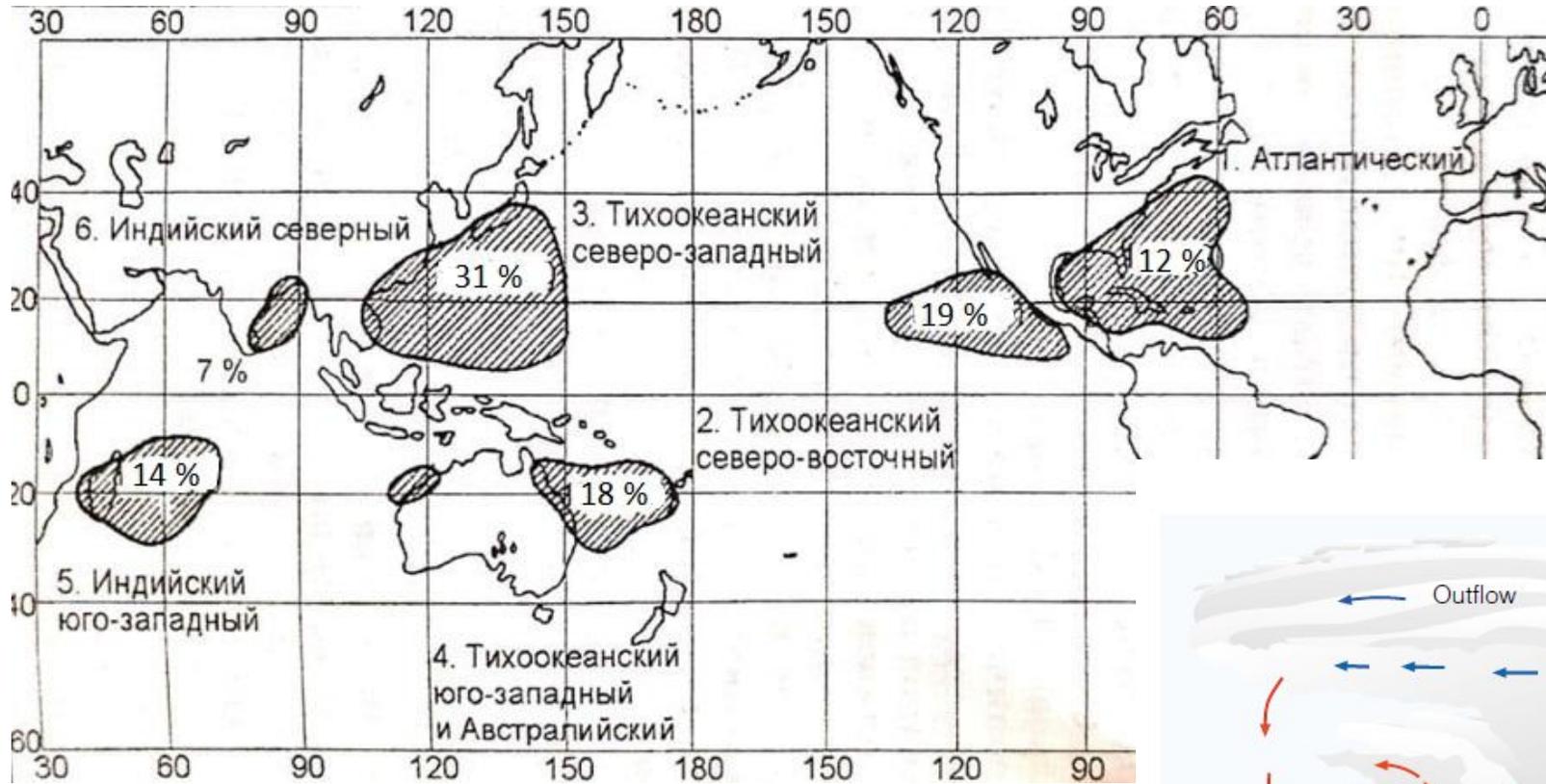


Монтаж космических изображений тайфуна «хагупит» на всех стадиях развития



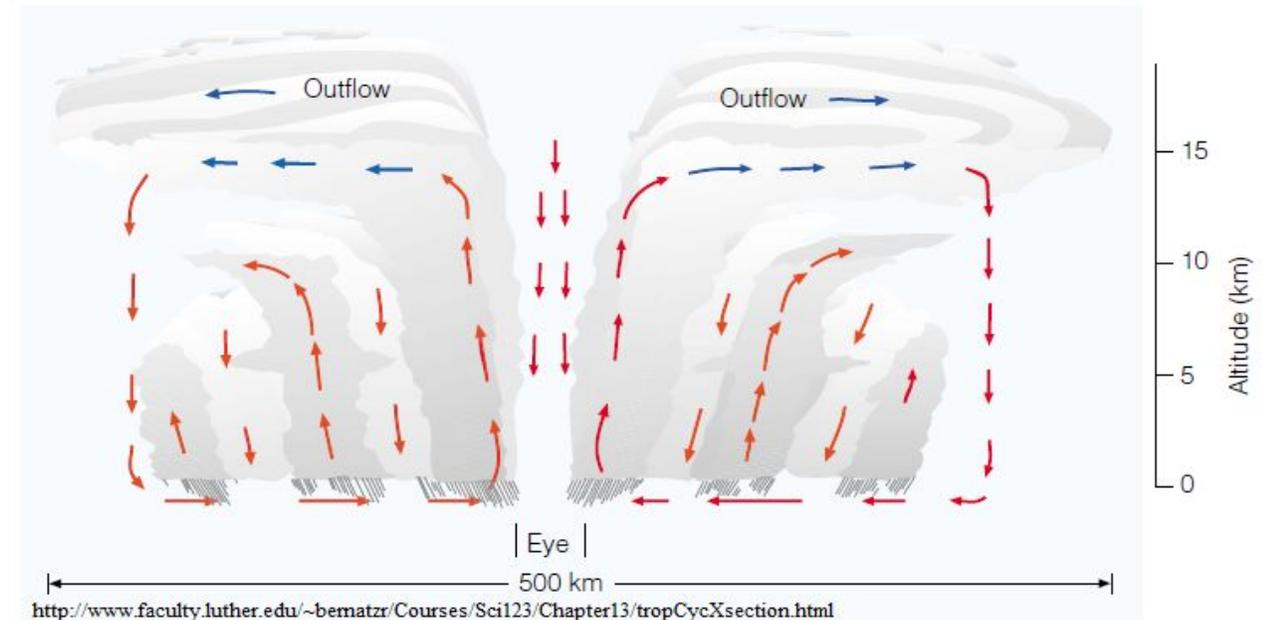
ТЦ в ИК диапазоне

ХАРАКТЕРНЫЕ РАЙОНЫ ОБРАЗОВАНИЯ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ И ВНУТРЕННЯЯ СТРУКТУРА



Области между широтами 5° – 20° обеих полушарий являются зоной образования значительного количества ТЦ. Стоит отметить, что основное количество ТЦ образуется между 10° и 20° от экватора, однако около $2/3$ всех ТЦ возникает в северном полушарии.

Одной из основных причин образования глаза является вынужденное динамическое оседание в его центре. Диаметры глаза варьируются в достаточно широких пределах от 18 километров, до 40 и больше в особых случаях.



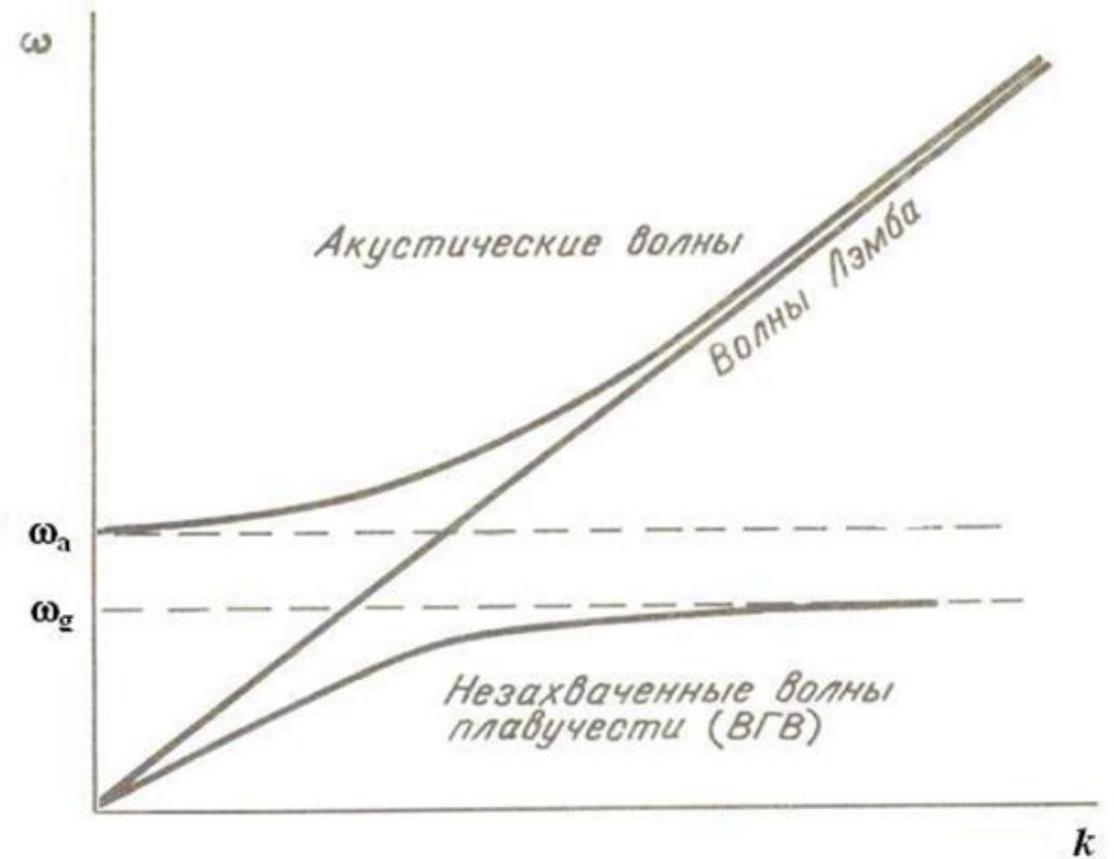
Волновой механизм заключается в генерации акустико-гравитационных волн **мощными атмосферными событиями**. Распространяясь вверх АГВ возбуждают периодические колебания ОСО и ВРО, а затем, достигая высот ионосферы, модулируются в качестве **перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ)**.

Генерация ВГВ развивающимся ТЦ может быть обусловлена тремя физическими механизмами:

возникновением и усилением струи оттока как элемента мезомасштабной структуры ТЦ на стадии его интенсификации

быстрым ростом облаков в активной зоне ТЦ и прорывом тропопаузы «горячими башнями»

деформацией воздушного потока при его набегании на изолированный от верхней тропосферы циклонический вихрь, имеющий место в развивающихся ТЦ.



Шалимов С.Л. Атмосферные волны в плазме ионосферы (с геофизическими примерами). - М.:ИФЗ РАН, 2018. - 390 с.

ВГВ возбуждаются как в нижней части тропосферы, так и выше поскольку, было обнаружено, что максимум источника генерации волн приходился на слой z (9-12) км, возбуждались волны с горизонтальными фазовыми скоростями $v_{ph} \sim (150 - 210)$ м/с и периодами колебаний соответственно $T \sim (2 - 5)$ ч.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ТЦ

- ▷ Теория генерации АГВ была первоначально разработана – Дробязко И. Н. Красильников В. Н. – Генерация акустико-гравитационных волн атмосферной турбулентностью// Изв. вузов. Радиофизика – 1985г.
- ▷ Описанные подходы были использованы в работе – Черногор Л. Ф. – Тропический циклон как элемент системы Земля – Атмосфера-Ионосфера-Магнитосфера// Космическая наука и технологии – 2006г.
- ▷ Основные этапы оценки амплитуды пульсаций давления воздуха, которая характеризуется её средним квадратичным значением:

$$\delta p_m(R) = \frac{C_0^{\frac{1}{2}} k_v}{8 \sqrt{2\pi}} \frac{\rho_0 h \varepsilon^{\frac{19}{12}} R_0}{v_0^{\frac{3}{4}}} \frac{R_0}{R} \left(\frac{V_0}{l}\right)^{1/3} I^{1/2}, \text{ где } I - \text{интеграл вида } I = \int_{x_1}^{x_2} \left(\frac{\alpha_0 - x^2}{1 - x^2}\right)^{2/3} \frac{dx}{(1 - x^2)x^{7/3}}$$

- ▷ Здесь $x_1 = \Omega_1 / \omega_b$ и $x_2 = \Omega_2 / \omega_b$, Ω_1 и Ω_2 – минимальные и максимальные частоты в спектре излучения ВГВ. При стремлении Ω к ω_b эффективность излучения резко увеличивается, но одновременно с этим сильно увеличивается и затухание ВГВ.

$$\delta p_m = A_p \frac{R_0}{R} \frac{\tilde{v}^{19/4} V_0^{-1/3}}{l^{5/4}},$$

$$A_p = \frac{\sqrt{3} C_0^{1/2} \alpha_0^{1/3} k_v}{16 \sqrt{12} \pi k_w^{2/3}} \frac{\rho_0 h}{v_0^{3/4} c_{s0}^{2/3} \omega_b}, \quad \tilde{v} \approx 0.1 V_0,$$

- ▷ где $k_w = \Omega_1 l / V_0$.

- ▶ Зная максимальное падение давления в наблюдаемом циклоне, не трудно подставить его на место δp_m и затем определить искомую Ω_1 :

$$\Omega_1 = \left(\frac{\sqrt{3} C_0^{\frac{1}{2}} \alpha_0^{\frac{1}{3}} k_v}{f_p v_0^{\frac{3}{4}} c_{s0}^{\frac{2}{3}} w_b} \frac{V_0^{\frac{2}{3}} \rho_0 h}{16 \sqrt{12} \pi l^{\frac{3}{2}}} \right)^{3/2}$$

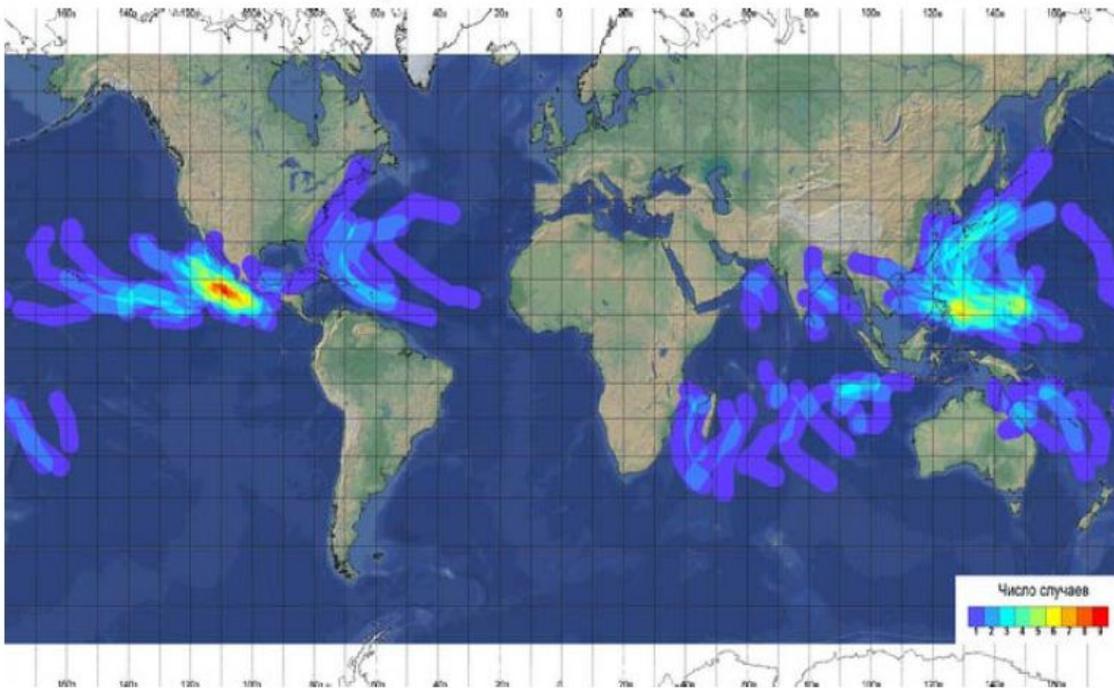
- ▶ где $f_p = \frac{\delta p_m R l^{5/4}}{\tilde{v}^{19/4} V_0^{-1/3} R_0}$, эмпирический коэффициент, зависящий от параметров циклона ;

- ▶ C_0 - универсальная постоянная;
- ▶ V_0 - скорость потока (получено из спутниковых данных);
- ▶ ρ_0 - невозмущенная плотность воздуха;
- ▶ h - толщина циклона (получено из спутниковых данных);
- ▶ R_0 - внешний радиус ТЦ (получено из спутниковых данных);
- ▶ l – внешний масштаб турбулентности (получено из спутниковых данных);
- ▶ c_{s0} - скорость акустических волн в воздухе;
- ▶ w_b - частота Брента-Вяйсяля;

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Крупнейшие ТЦ 2014г

Всего 112 суток активности **Cyclone-5 GILLIAN** 21-25 MAR 2014



Hurricane-5 GENEVIEVE

25 JUL-11 AUG 2014

Hurricane-5 MARIE

22-29 AUG 2014

Super Typhoon-5

HAGUPIT*

01-12 DEC 2014

Super Typhoon-5

HALONG

28 JUL-10 AUG 2014

Super Typhoon-5 NURI*

31 OCT-06 NOV 2014

Super Typhoon-5

VONGFONG*

02-14 OCT 2014

ТЦ 4 категории

Cyclone-4 COLIN 09-15 JAN 2014 **Cyclone-4 HELLEN** 28 MAR-01 APR

Cyclone-4 HUDHUD 08-12 OCT 2014 **Cyclone-4 IAN** 05-13 JAN 2014

Cyclone-4 ITA 04-14 APR 2014 **Cyclone-4 NILOFAR** 25-30 OCT 2014

Hurricane-4 GONZALO 11-20 OCT 2014 **Hurricane-4 ISELLE** 31 JUL-09 AUG 2014

Hurricane-4 ODILE 10-17 SEP 2014 **Super Typhoon-4 RAMMASUN** 12-19 JUL 2014

Super Typhoon-4 PHANFONE 28 SEP-06 OCT **Hurricane-4 SIMON** 01-08 OCT 2014

Оценка толщины циклона, радиуса глаза циклона, радиуса ядра была проведена с использованием спутниковых снимков с сайта <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>

Синоптические данные по падению давления, осадкам и другим характеристикам были взяты с сайта earthobservatory.nasa.gov/

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЦ 5-Й КАТЕГОРИИ

	Радиус глаза	Радиус ядра	Внешний радиус	Толщина	Макс. Падение давления	Макс. скорость	Wb	Wa	Ω
	(km)	(km)	(km)	(km)	(hPa)	(m/s)	(mHz)	(mHz)	(mHz)
Cyclone-5 GILLIAN (21-25 MAR 2014)	11	73,5	200	14	927	72	5,90	9,8	8.3...12
Hurricane-5 GENEVIEVE (25 JUL-11 AUG 2014)	12	66,5	180	15	915	72	5,8	9,6	7.6 ... 13
Hurricane-5 MARIE (22-29 AUG 2014)	13	118	320	15	918	72	5,8	9,6	2 ... 15
Super Typhoon-5 HAGUPIT (01-12 DEC 2014)	13	111	300	15	905	80	5,8	9,6	2 ... 12
Super Typhoon-5 HALONG (28 JUL-10 AUG 2014)	14	109,8	298	14	920	72	5,90	9,6	4.7 ... 18
Super Typhoon-5 NURI (31 OCT-06 NOV 2014)	13	94	255	15	910	80	5,8	9,5	5.6 ... 16
Super Typhoon-5 VONGFONG (02-14 OCT 2014)	24	112,5	305	15	900	80	5,8	9,6	4.2 ... 12

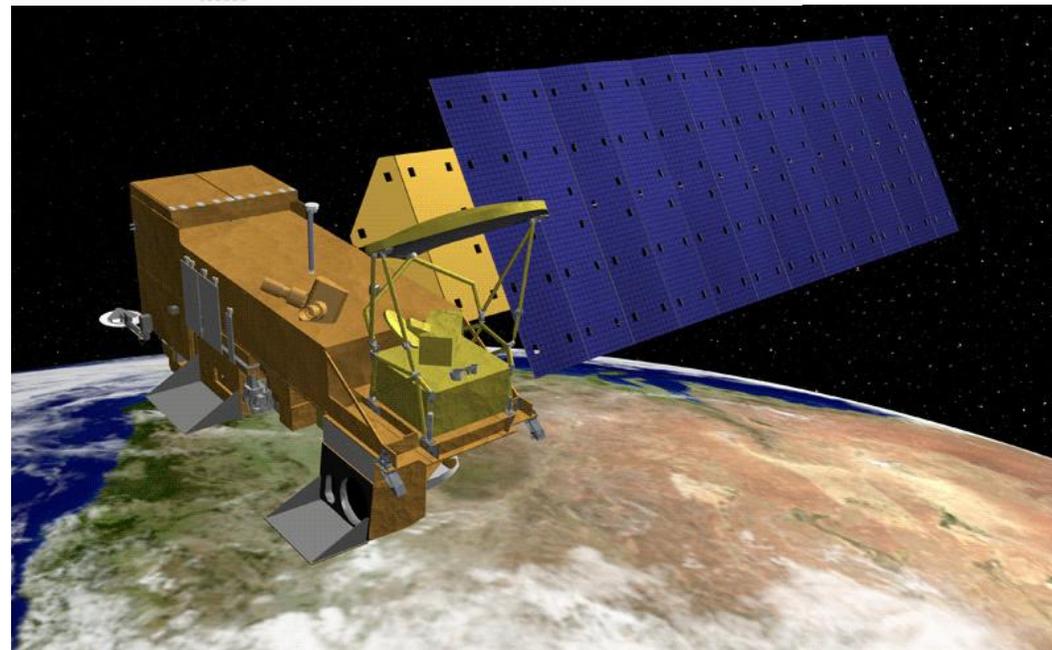
ВОЗМУЩЕНИЯ ОСО

Для анализа возмущений ОСО использован прибор AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), установленный на спутнике Aqua.

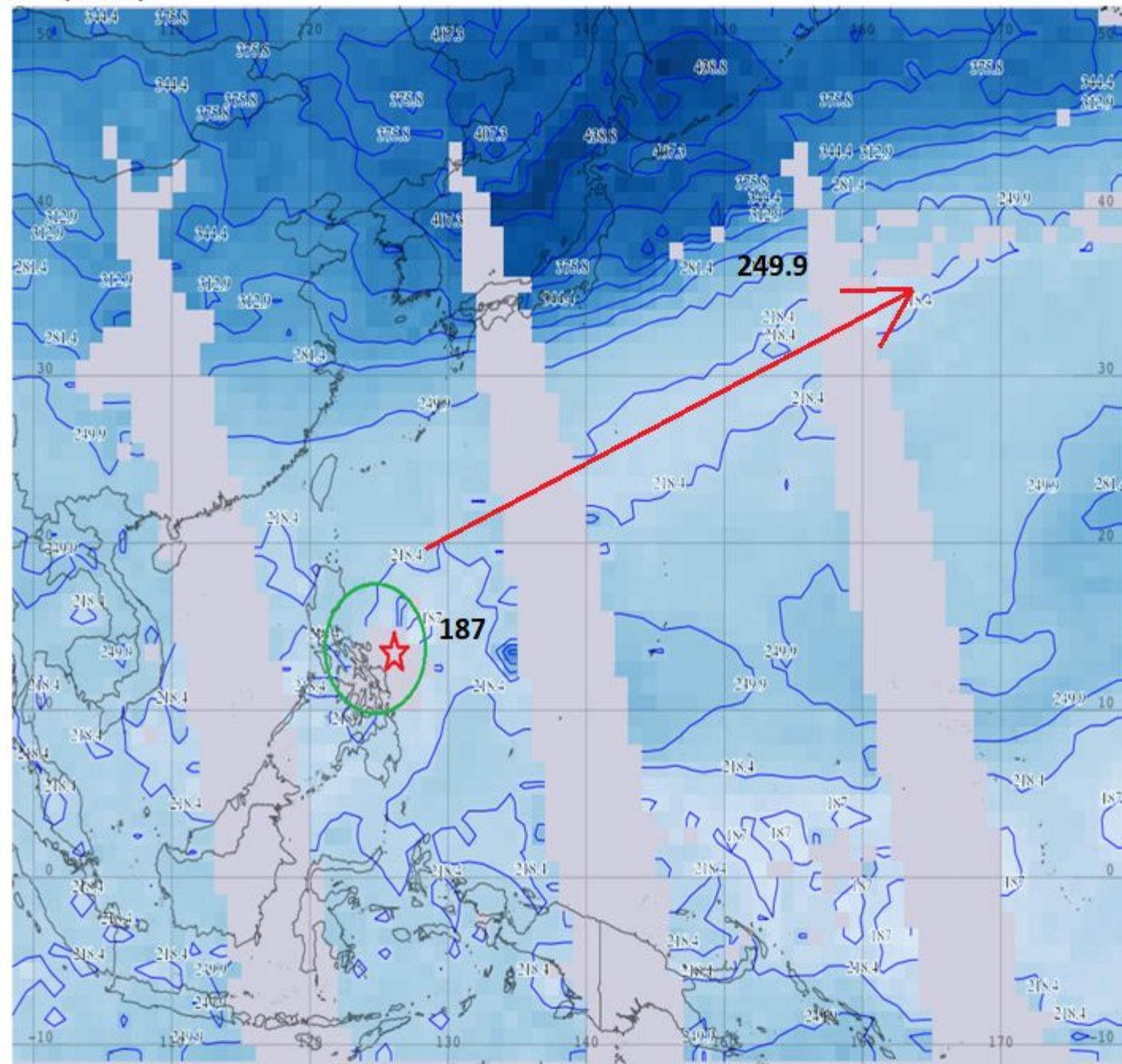
Набор инструментов AIRS состоит из гиперспектрального прибора AIRS с 2378 инфракрасными каналами и 4 видимыми / ближними инфракрасными каналами, а также прибора AMSU-A с 15 микроволновыми каналами. AIRS — это инфракрасный спектрометр / радиометр, который покрывает спектральный диапазон 3,7–15,4 мкм / м с 2378 спектральными каналами. AMSU — это 15-канальный микроволновый радиометр, работающий в диапазоне от 23 до 89 ГГц.

AIRS подходит для исследования ОСО, так как обеспечивает ежедневное глобальное трехмерное изображение озонового слоя Земли, показывающее пути перераспределения озона в атмосфере

Orbital parameters	
Reference system	Geocentric
Regime	Low Earth
Semi-major axis	7,080.6 kilometers (4,399.7 mi)
Eccentricity	0.0000979
Perigee altitude	702 kilometers (436 mi)
Apogee altitude	703 kilometers (437 mi)
Inclination	98.1987°
Period	99 minutes
RAAN	95.2063°
Argument of perigee	120.4799°
Mean anomaly	351.4268°
Mean motion	14.57116559
Epoch	02 June 2016, 10:25:37 UTC
Revolution no.	74897



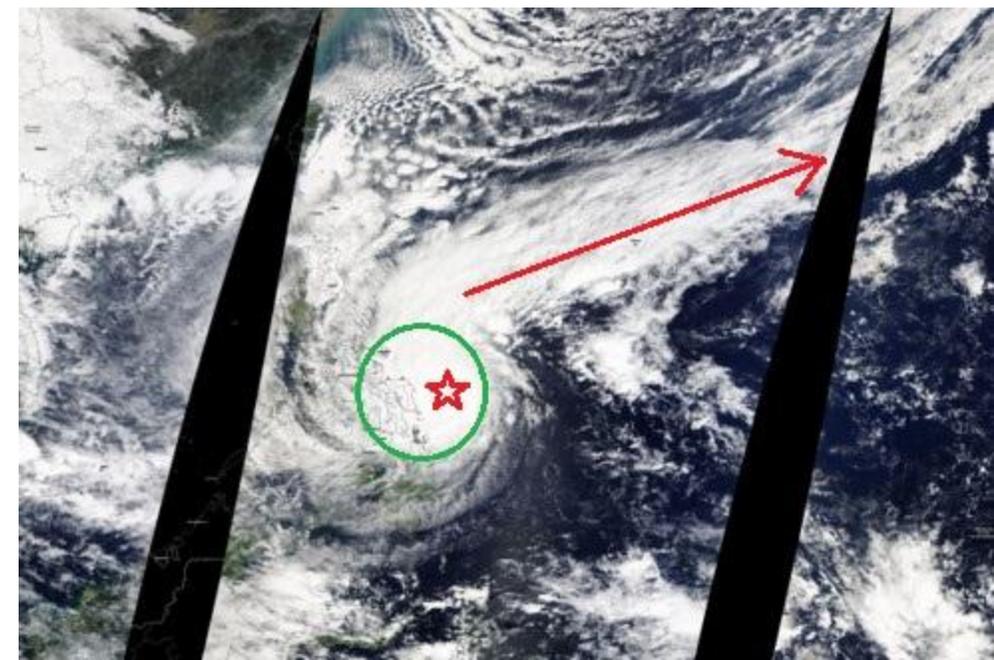
Вариации общего содержания озона (ОСО) над ТЦ 5 категории HALONG за 08.08.14 по данным спектрометра AIRS (AQUA)



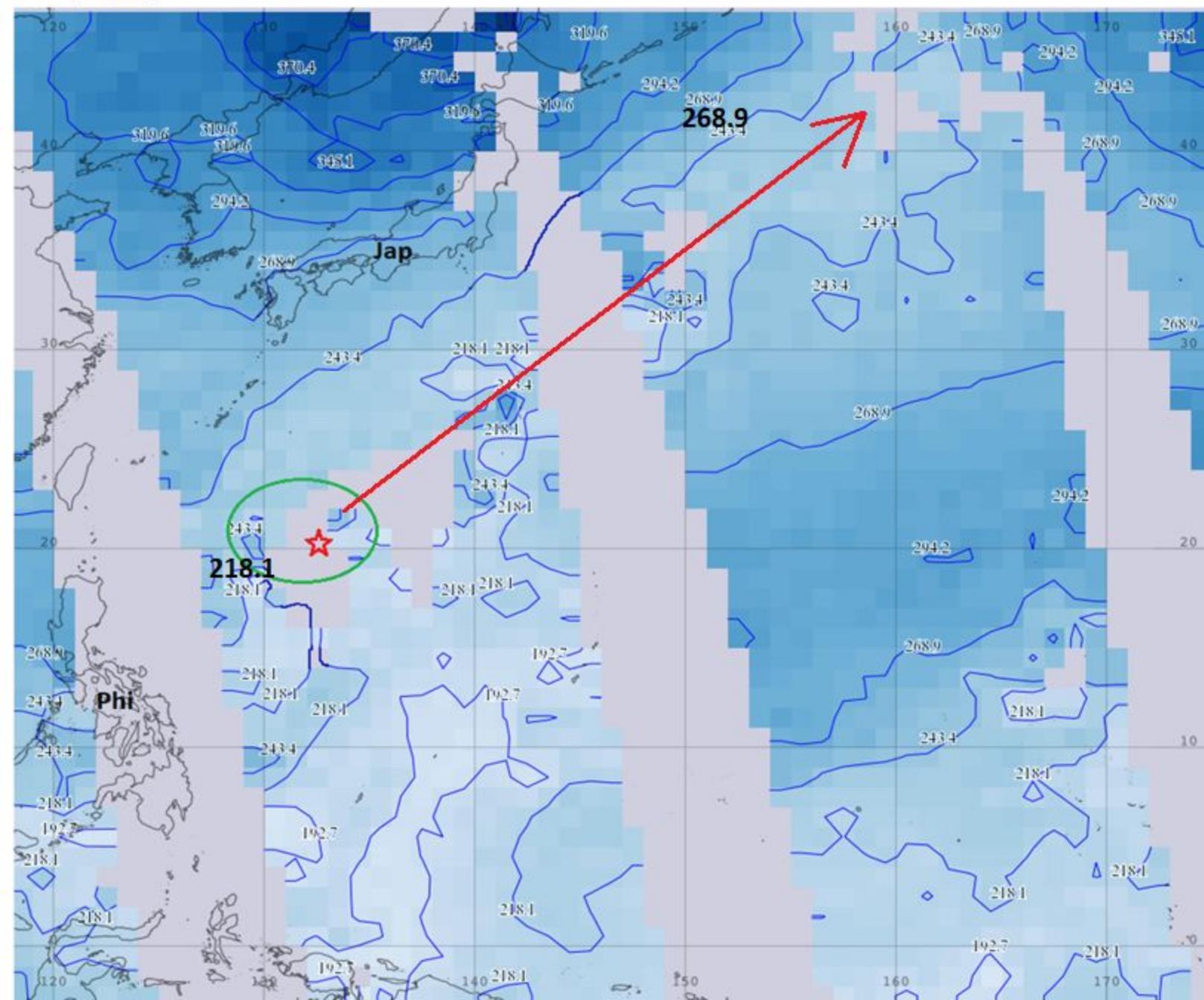
ОБЛАСТЬ ПОНИЖЕНИЯ

ОСО, ХАРАКТЕРИЗУЮЩАЯСЯ ЗНАЧЕНИЯМИ В ДИАПАЗОНЕ ОТ 218 ЕД. Д. ДО 268 Е. Д. ТЯНЕТСЯ ЗА ОСНОВНЫМ ФРОНТОМ ОБЛАЧНОСТИ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОНА. СЛЕДУЕТ ОТМЕТИТЬ, ЧТО **НАИБОЛЬШАЯ АНОМАЛИЯ** НАБЛЮДАЕТСЯ **В ЦЕНТРЕ ТЦ** (ОБОЗНАЧЕН ЗВЕЗДОЙ), ЧТО МОЖЕТ БЫТЬ ОБУСЛОВЛЕНО ОТСУТСТВИЕМ ЗАПОЛНЕНИЯ ВСЕЙ ТРОПОСФЕРЫ ОБЛАЧНОСТЬЮ.

SUPER TYRHOON - 5 HALONG 08.08.14

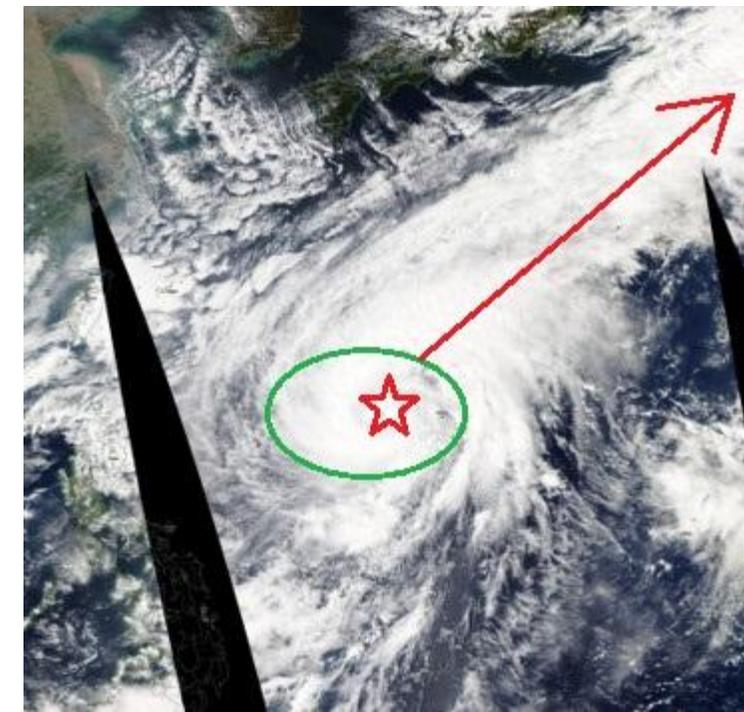


Вариации общего содержания озона (ОСО) над ТЦ 5 категории NURI за 03.11.14 по данным спектрометра AIRS (AQUA)



Падение значений ОСО достигает в **особо мощных случаях 40%**, а области расположения отрицательных аномалий позволяют оценить протяжённость воздействия ТЦ на озоновый слой и проследить его трек.

**SUPER TYPHOON - 5
NURI 03.11.14**



В ионосфере присутствует заряженная компонента - ионосферная плазма, которая и изучается радиофизическими (обычно) или **контактными (в данных исследования) методами.**

Для анализа эффектов мы использовали **данные плазменных измерений на низкоорбитальных спутниках SWARM**

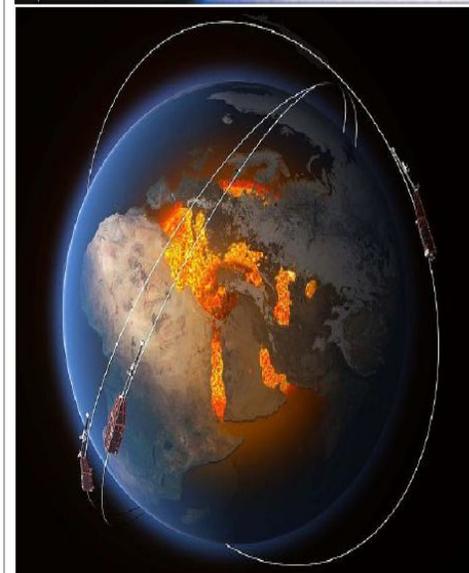
Сложности подхода – пролет спутника в нужном месте в благоприятный по геофизическим условиям период является довольно редким событием.

Проект Swarm состоит из трех спутников (А, В и С), расположенных на двух околополярных орбитах: Спутники С и А летают в одной плоскости наклонения 87.4° практически на одной высоте двигаются по сходным орбитам с разницей эпох обращения 2–10 сек. Третий спутник имеет иные параметры движения и носит контрольный характер. В настоящем исследовании используются данные о пространственном распределении электронной концентрации, независимо измеренные ленгмюровскими зондами на борту спутников с частотой 2 Hz и относительной ошибкой не более 1%.



SWARM project

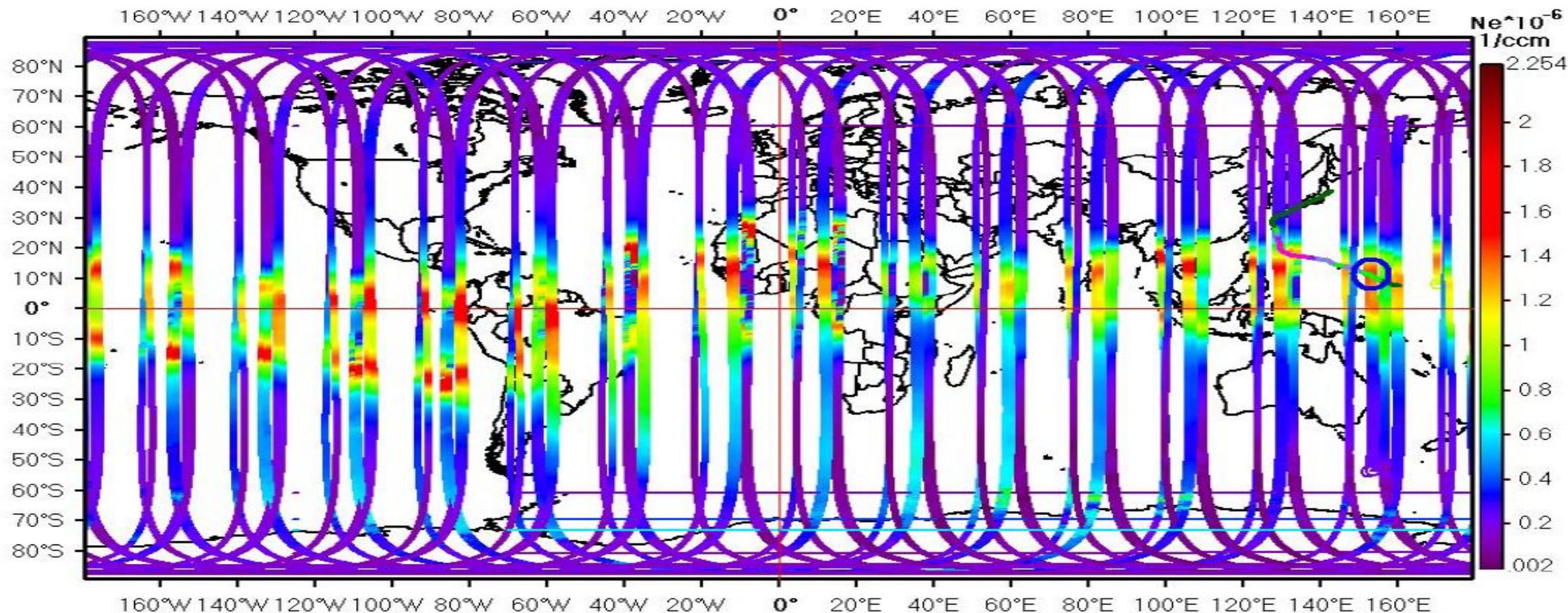
Total mass = 468 kg
 Length: 9.1 m; width: 1.5 m;
 height: 0.85 m;
 Boom length 5.1 m
 ram surface: ~0.7 m²



Parameter	Swarm-A (Alpha)	Swarm-C (Charlie)	Swarm-B (Bravo)
Orb. Altitud	≤ 460 km (initial altitude of satellite pair)		≤ 530 km
Orb.inclinat	87.4°		88°
Δ RAAN	1.4 $^\circ$ difference between A and B		~ 0 -135 $^\circ$
Mean anomaly at epoch	$\Delta t = 2$ -10 s difference between A and B		-

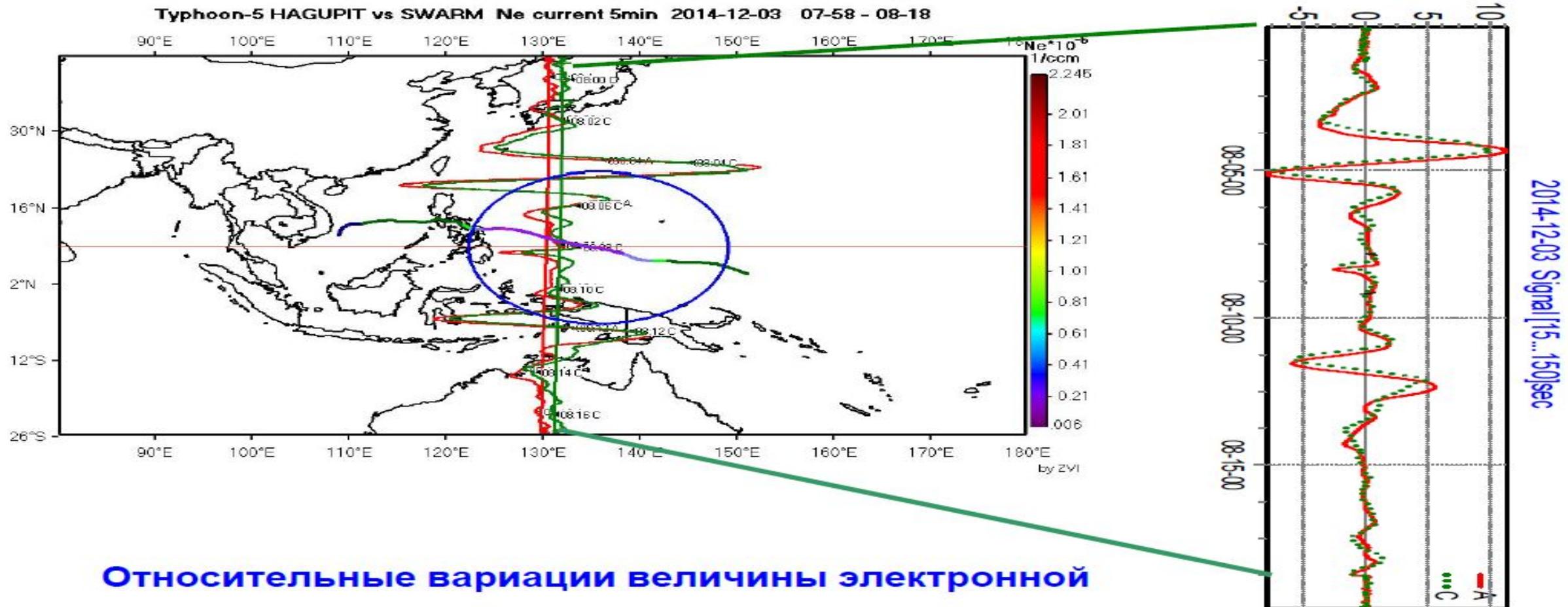
Пример ежедневных данных

Super Typhoon-5 VONGFONG vs SWARM Ne current 1min 04-10-2014 00-00 - 23-59



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

Ионосферный отклик – пример пролета над областью шторма ТЦ



Относительные вариации величины электронной концентрации в полосе собственных частот, соответствующих периодам волновых структур (15-18 ... 150-180 сек)

ВЫВОДЫ

Проведено исследование параметров генерации крупных ТЦ 4-5 категории 2014 года с использованием результатов анализа спутниковых данных о параметрах ТЦ.

На основе экспериментальных данных спектрометра AIRS (спутниковая миссия Aqua) вариаций общего содержания озона в стратосфере проведена оценка области аномалий, показывающая динамику общего содержания озона в области действия тропических циклонов. Наблюдаемые аномалии согласуются с результатами, полученными ранее в экспериментах и объясняемыми волнами от ТЦ, которые проявляются на высотах озонового слоя.

С использованием методик, разработанных на физическом факультете (кафедра физики атмосферы) изучены отклики от ТЦ на ионосферных высотах. Оценки пространственно-временных вариаций отклика находятся в согласии с теоретическими оценками, полученными для атмосферных моделей.

Волновые возмущения были зарегистрированы более чем в 60% случаев, для времени, когда действовали ТЦ 5-й категории. Для ТЦ 4-й категории волновые возмущения были выделены менее чем в 50% случаев. Анализ показывает большую вероятность выделения волновых структур в утренние и дневные часы.

ДОКЛАДЫ И ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

- 1) Захаров В.И., Пилипенко В.А., Сигачев П.К., Механизмы передачи тропосферных возмущений в ионосферу в случаях крупных тропических циклонов 2014г по in-situ данным об электронной концентрации (Устный доклад) // «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, Россия, 11-15 ноября 2019
- 2) Zakharov V.I., Sigachev P.K., Pilipenko V.A 2020 The Effect of Tropical Cyclones in the Ionosphere According to the SWARM Satellite Mission 2014 data // URSI GASS 2020, Rome, Italy, 2020, SIDES, с. G11, Постер
- 3) Захаров В.И., Пилипенко В.А., Сигачев П.К., Механизмы передачи тропосферных возмущений в ионосферу в случаях крупных тропических циклонов 2014г по in-situ данным об электронной концентрации // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», серия 11–15 ноября 2019, место издания Москва, тезисы, с. 472 DOI (привести)
- 4) Захаров В. И., Сигачев П. К. Ионосферные эффекты от тропических циклонов // Материалы научной конференции «ЛОМОНОСОВСКИЕ ЧТЕНИЯ». Секция физики. Апрель 2021. Сборник тезисов докладов под ред. Н.Н. Сысоева. — М., Физический факультет МГУ, 2021 г. 328 с. ISBN 978-5-8279-0204-1, стр 266-273.
- 5) Zakharov V. I., Sigachev P. K. Ionospheric disturbances from Tropical cyclones // Adv. In Space Research doi: [10.1016/j.asr.2021.09.025](https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.09.025)