

# Долготные особенности неоднородностей среднеширотной ионосферы северного полушария во время магнитных бурь в условиях равенства

Черниговская М.А.<sup>1</sup>, Шпынев Б.Г.<sup>1</sup>, Ясюкевич А.С.<sup>1</sup>, Хабитуев Д.С.<sup>1</sup>,  
Ратовский К.Г.<sup>1</sup>, Белинская А.Ю.<sup>2</sup>, Степанов А.Е.<sup>3</sup>, Бычков В.В.<sup>4</sup>,  
Григорьева С.А.<sup>5</sup>, Панченко В.А.<sup>6</sup>, Д. Коуба<sup>7</sup>, Мелич И.<sup>8</sup>

<sup>1</sup> *Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия;*

<sup>2</sup> *Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия;*

<sup>3</sup> *Институт космофизических исследований и аэронавтики СО РАН, Якутск, Россия;*

<sup>4</sup> *Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,  
Паратунка, Россия;*

<sup>5</sup> *Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия;*

<sup>6</sup> *Институт земного магнетизма и распространения радиоволн, Москва, Россия;*

<sup>7</sup> *Институт физики атмосферы Чешской академии наук, Прага, Чешская Республика;*

<sup>8</sup> *Института атмосферной физики им. Лейбница, Кюлунгсборн, Германия.*

**Восемнадцатая Всероссийская открытая конференция**

**“СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА”**

**Москва, 16 - 20 ноября 2020 г.**

**В предыдущих исследованиях мы анализировали долготные возмущения ионосферы над Евразийским континентом, связанные с воздействием геомагнитной активности, на основе данных измерений цепи ионозондов (Shrynev et al., *EPS*, 2015; Shrynev et al., *JASTP*, 2018; Черниговская и др., *СПДЗЗ*, 2018).**

Далее в работах (Черниговская и др., *СПДЗЗ*, 2019; Chernigovskaya et al., *JASR*, 2020) были исследованы ионосферные эффекты во время двух экстремальных магнитных бурь 24 цикла солнечной активности – в марте и июне 2015 г. – на основе совместного анализа данных цепи среднеширотных евразийских ионозондов и глобальных средне- и высокоширотной цепей приемников GPS/GLONASS.

Использование в этих исследованиях данных глобальных цепей приемников GPS/GLONASS дополнительно к данным евразийских ионозондов позволило подтвердить сделанные ранее предположения о наличии в североамериканском секторе локализаций областей ионосферных неоднородностей в периоды геомагнитных возмущений.

# Цель работы:

- **Мультиинструментальное исследование вариаций ионосферных, геомагнитных и термосферных параметров в северном полушарии на основе анализа данных евразийской среднеширотной цепи ионозондов, средне- и высокоширотных глобальных цепей приемников GPS/ГЛОНАСС и магнитометров сети INTERMAGNET, а также спутниковых измерений спектрометра GUVI TIMED в период сильной магнитной бури в октябре 2016 г.**
- **Сравнение сценариев развития ионосферных возмущений в условиях равноденствия в период сильной бури в октябре 2016 г. и экстремальной бури в марте 2015 г.**

# В работе используются:

- данные о среднечасовых значениях критической частоты foF2 ионосферы по измерениям цепи из 8 среднеширотных ионозондов с 15-минутным разрешением;
- данные о значениях полного электронного содержания (ПЭС) по измерениям на средне- и высокоширотной цепях двухчастотных фазовых приемников GPS/ГЛОНАСС. Расчет вертикального ПЭС из исходных рядов проводился на основе модели "абсолютного" ПЭС с учетом дифференциальных кодовых задержек (Yasyukevich et al., *Results in Physics*, 2015);
- данные о значениях  $H$ - и  $Z$ -компонент напряженности геомагнитного поля (ГМП) с 1-минутным разрешением по измерениям на глобальной сети магнитометров INTERMAGNET (<http://www.intermagnet.org>);
- данные спутниковых измерений отношения  $[O]/[N_2]$  с помощью УФ-спектрометра GUVI TIMED (<http://guvitimed.jhuapl.edu/guvi-gallery13on2>).

# Схемы расположения ионозондов, приемников GPS/ГЛОНАСС и магнитометров INTERMAGNET

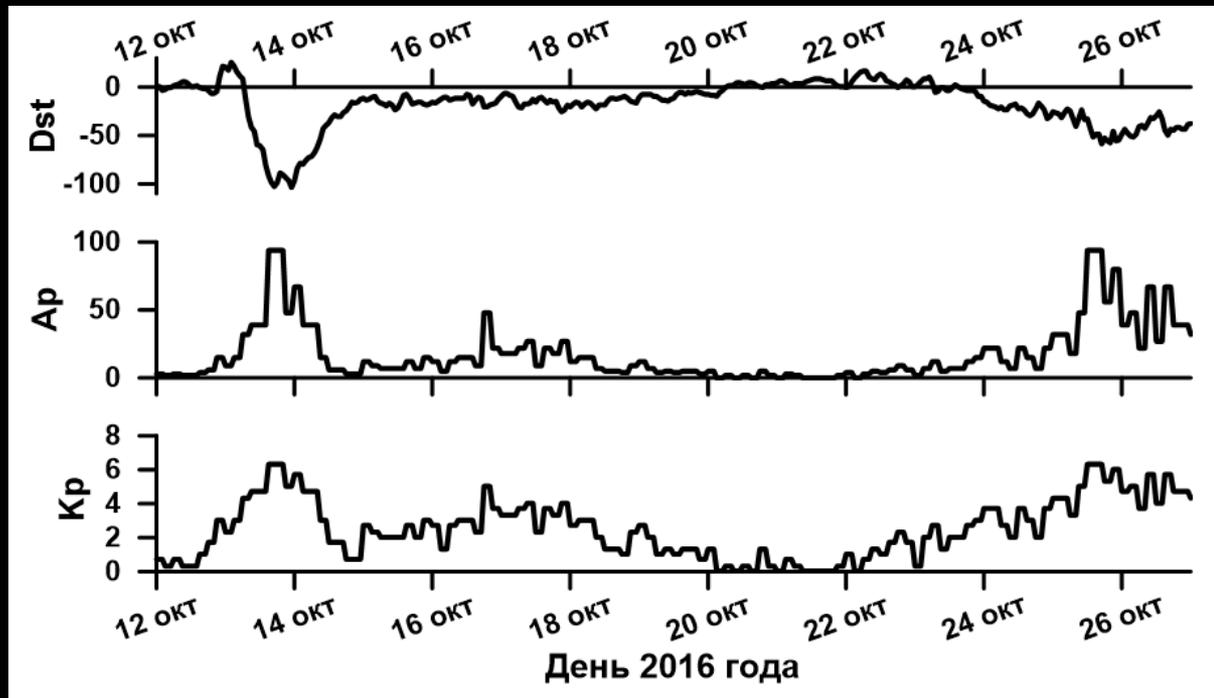


Ионозонды и магнитометры



Приемники GPS/ГЛОНАСС

# Геомагнитная буря в октябре 2016 г.



Магнитная буря была вызвана солнечной вспышкой класса C1 13 октября в 21:05 UTC. Также ей предшествовал выброс корональной массы (СМЕ) 8 октября. 15-16 октября зарегистрирован также высокоскоростной поток из корональной дыры (СН HSS), который обычно слабо влияет на Dst, но отражается в вариациях  $A_p$  и  $K_p$ -индексов.

Магнитная буря 13-20 октября 2016 г. была "сильной" согласно классификации по индексу  $D_{st}$  (Loewe, Prölss, 1997). По классификации NASA буря относилась к классу G2 (средняя).

В максимуме бури  $D_{st}$ -индекс понизился до  $-104$  нТл;  $K_p$ -индекс возрастал от 0- до 6-;  $A_p$ -индекс достиг 94 (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>).

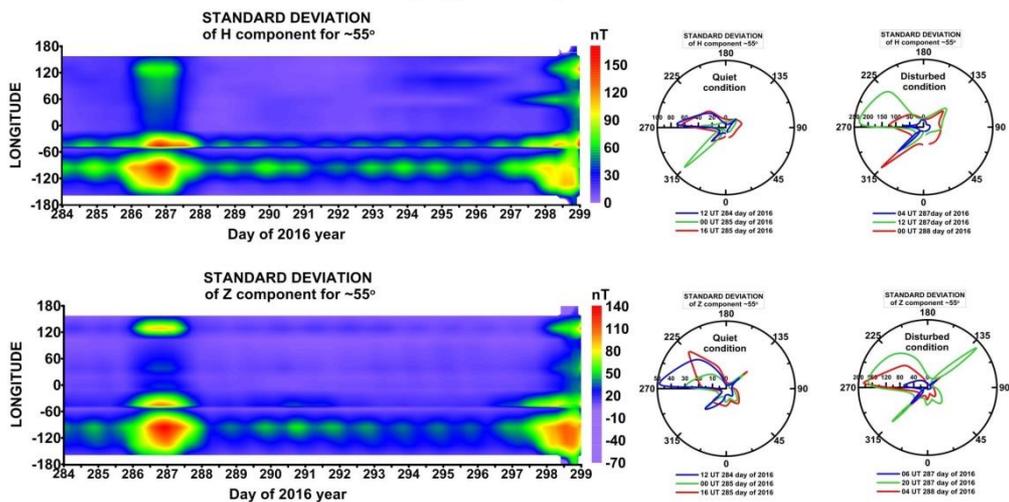
# Анализ геомагнитных данных

■ В качестве основного параметра для анализа вариаций магнитного поля Земли используется дисперсия  $H$ - и  $Z$ -компонент напряженности ГМП, которая рассчитывается как стандартное отклонение относительно фоновых невозмущенных значений  $H$ - и  $Z$ -компонент ГМП.

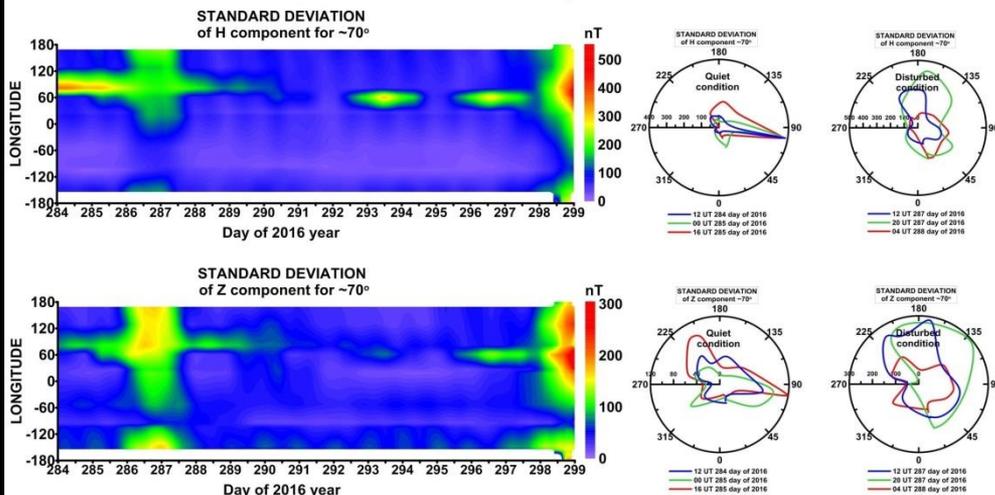
■ Фоновые значения невозмущенных суточных вариаций ГМП рассчитываются как скользящее среднее значение за  $\pm 14$  дней для каждого часа  $LT$ . Такое усреднение позволяет исключить влияние прилива Солнца и Луны в суточных вариациях.

# Анализ вариаций ГМП

## Средние широты



## Высокие широты

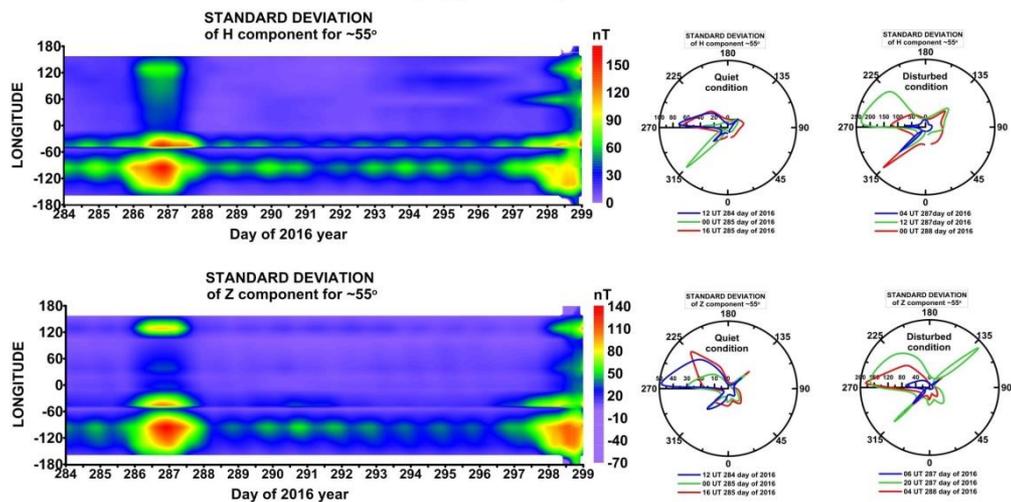


В долготном распределении вариаций компонент ГМП выделяются явно выраженные долготы, на которых интенсивность вариаций имеет максимумы и минимумы.

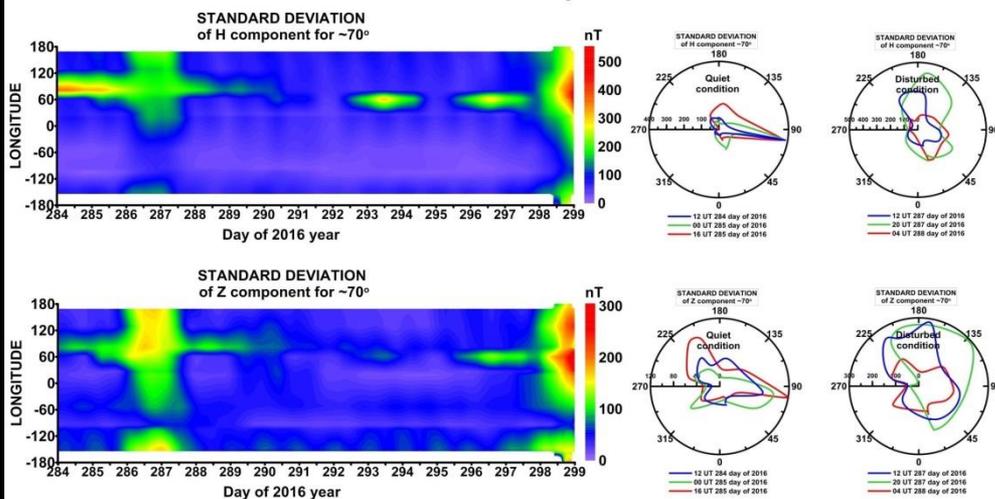
Предполагается, что нерегулярная структура долготной изменчивости компонент ГМП является следствием пространственных аномалий различных масштабов в фоновом магнитном поле Земли, а также несовпадения магнитного и географического полюсов.

# Анализ вариаций ГМП

## Средние широты



## Высокие широты



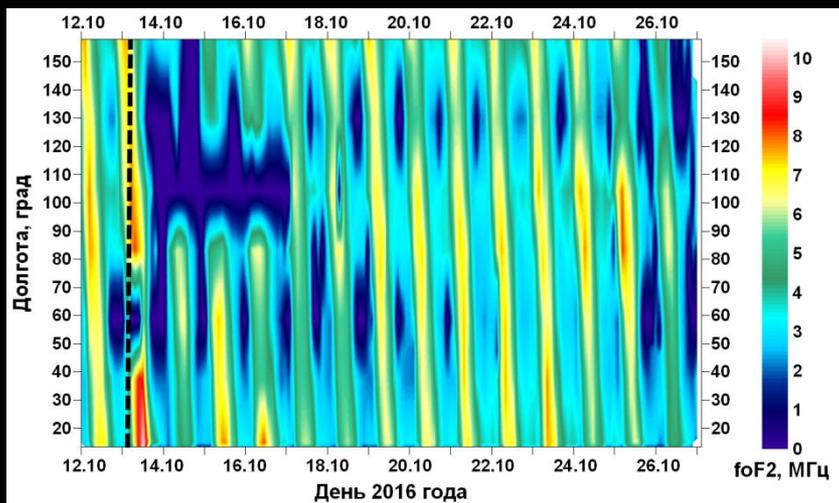
Зона сильных вариаций ГМП формируется в направлении меридиана геомагнитного полюса вблизи  $\sim 270^\circ$  ( $\sim 90^\circ$  з.д. в географических координатах) как в условиях спокойной, так и возмущенной геомагнитной активности. В североамериканском секторе повышенные вариации ГМП отмечаются также на долготах  $\sim 225^\circ$  ( $\sim 135^\circ$  з.д.) и  $\sim 315^\circ$  ( $\sim 45^\circ$  з.д.).

В магнито-возмущенные периоды в средних широтах над Евразией образуются две зоны сильных вариаций ГМП на долготах  $\sim 40^\circ$  и  $\sim 130^\circ$ . В секторе долгот  $80^\circ$ - $110^\circ$  (зона расположения Восточно-сибирской континентальной магнитной аномалии), симметричном расположенному в западном полушарии геомагнитному полюсу, уровень вариаций ГМП всегда самый низкий.

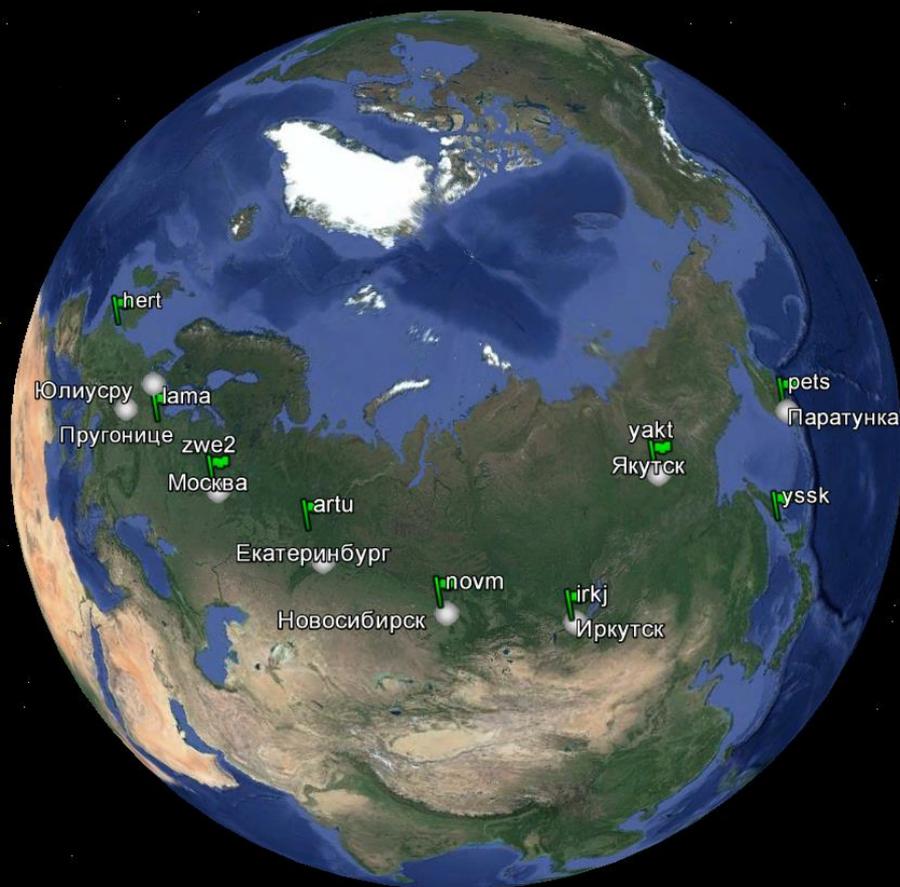
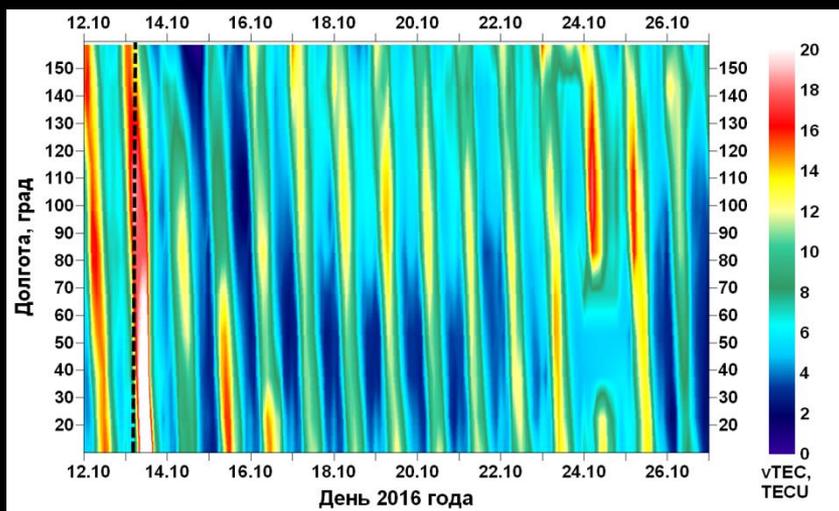
# Неоднородности в ионосфере средних широт восточного полушария

13 октября 2016 г. (равноденствие)

Ионозонды



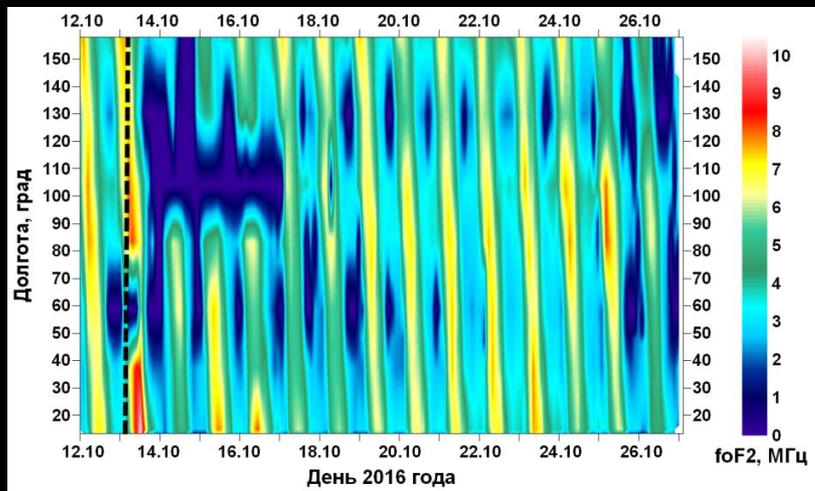
Приемники GPS/ГЛОНАСС



# Неоднородности в ионосфере средних широт восточного полушария в условиях равенства

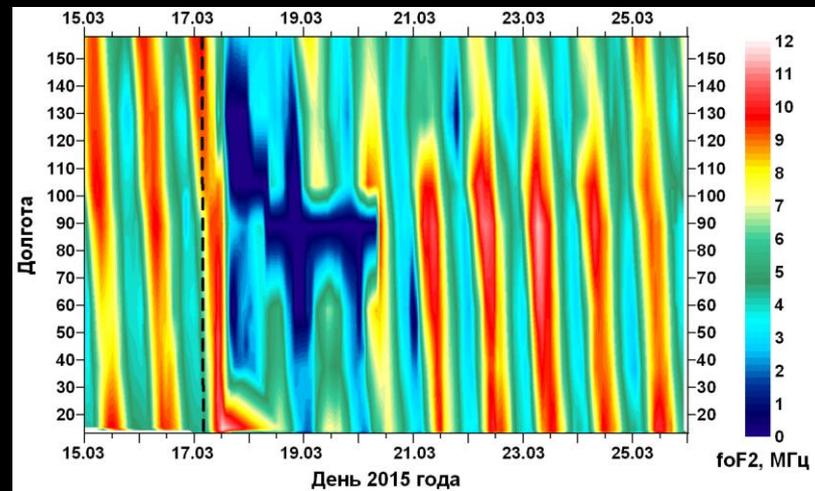
13 октября 2016 г.

Ионозонды

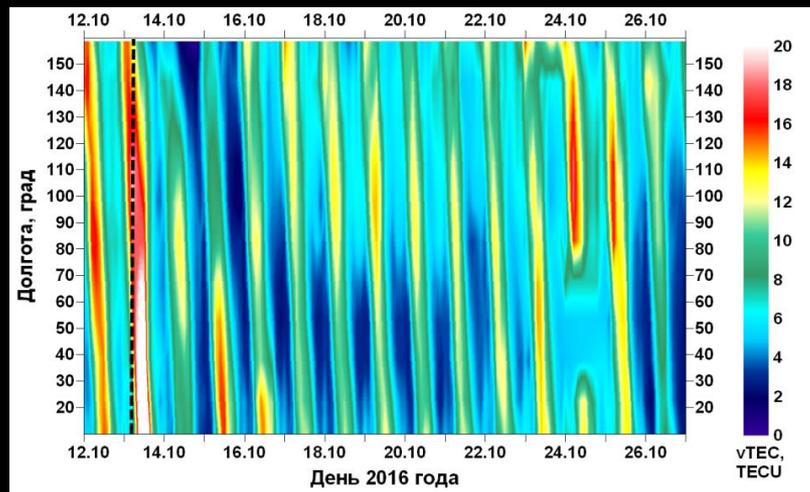


17 марта 2015 г.

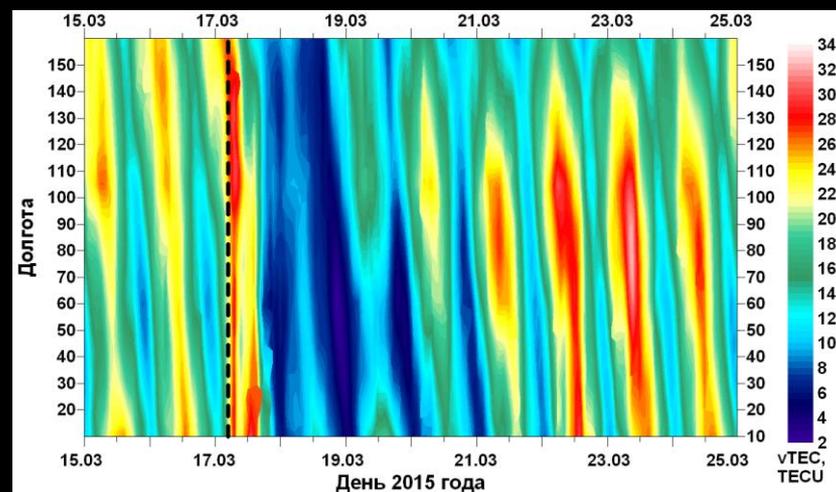
Ионозонды



Приемники GPS/ГЛОНАСС

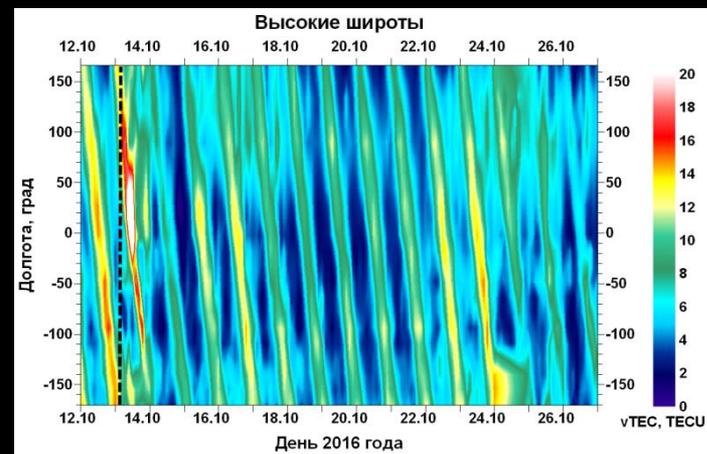
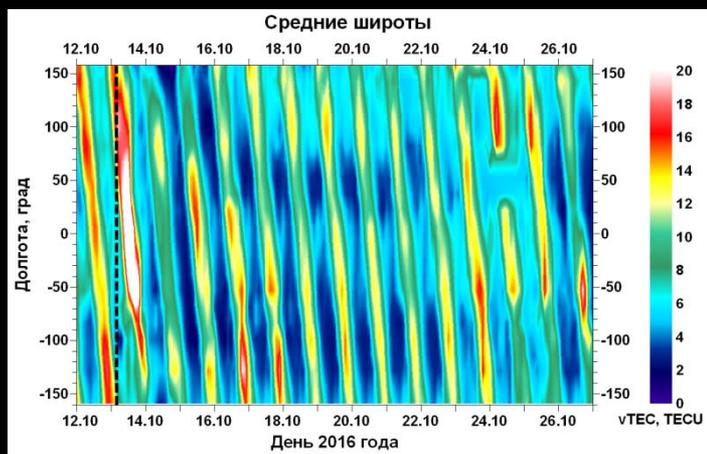


Приемники GPS/ГЛОНАСС



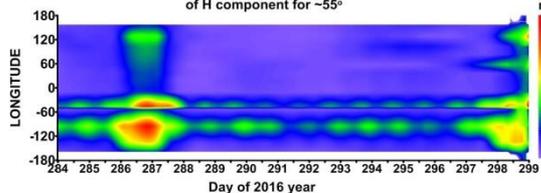
# Долготные неоднородности в ионосфере вдоль средне- и высокоширотного круга по данным приемников GPS/ГЛОНАСС

13 октября 2016 г. (равноденствие)



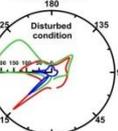
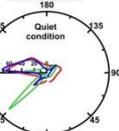
**Средние широты**

STANDARD DEVIATION of H component for  $\sim 55^\circ$

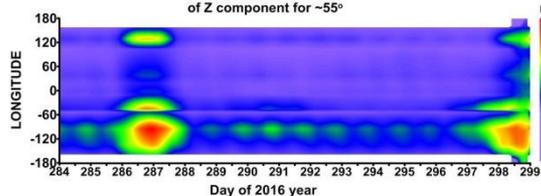


STANDARD DEVIATION of H component  $\sim 55^\circ$

STANDARD DEVIATION of H component  $\sim 55^\circ$

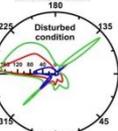
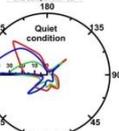


STANDARD DEVIATION of Z component for  $\sim 55^\circ$



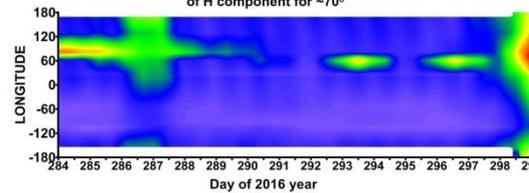
STANDARD DEVIATION of Z component  $\sim 55^\circ$

STANDARD DEVIATION of Z component  $\sim 55^\circ$



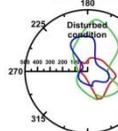
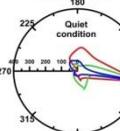
**Высокие широты**

STANDARD DEVIATION of H component for  $\sim 70^\circ$

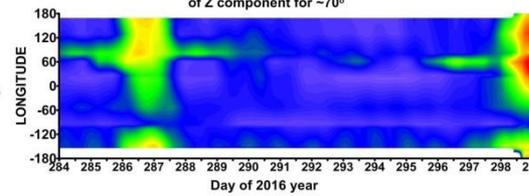


STANDARD DEVIATION of H component  $\sim 70^\circ$

STANDARD DEVIATION of H component  $\sim 70^\circ$

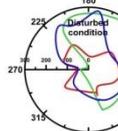
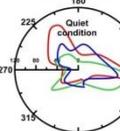


STANDARD DEVIATION of Z component for  $\sim 70^\circ$



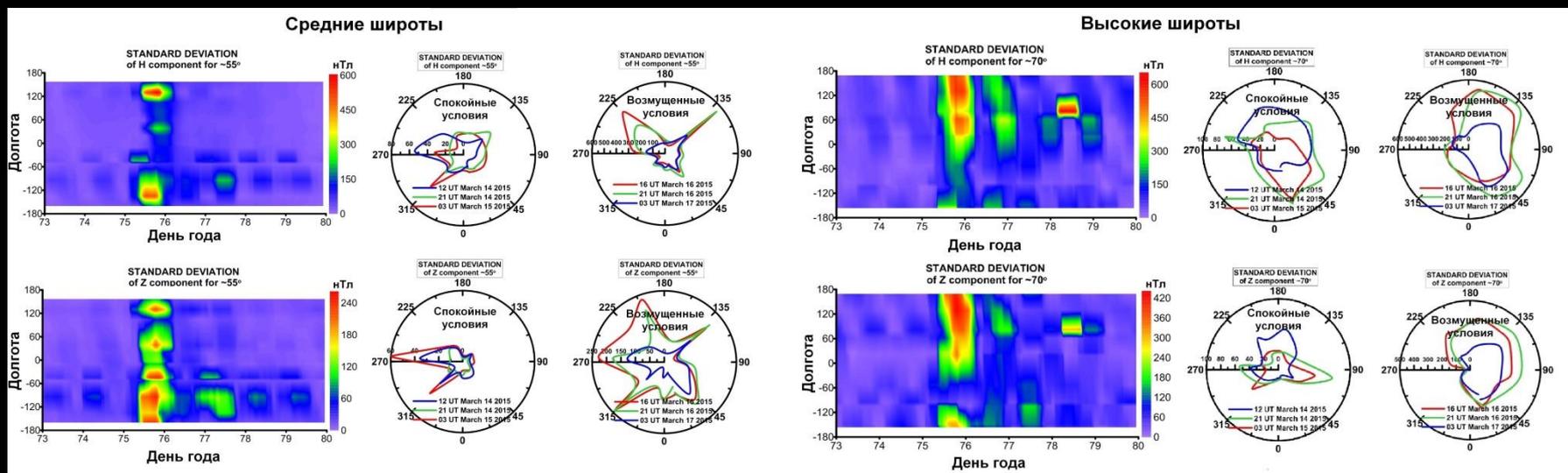
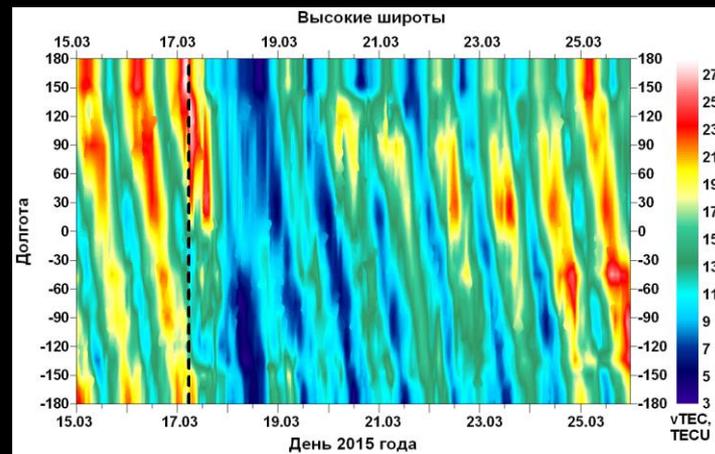
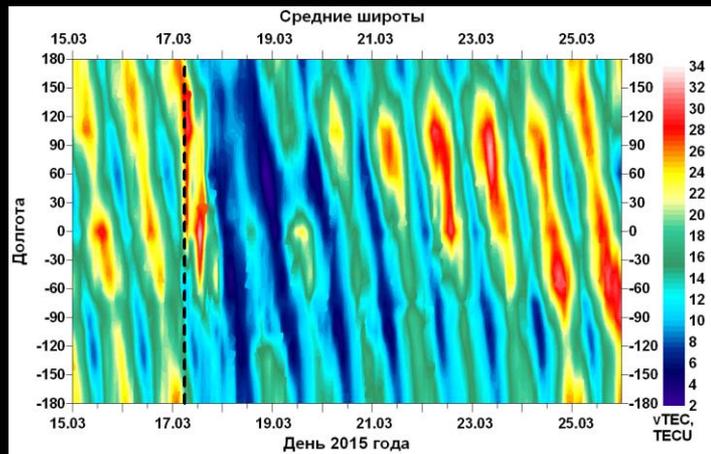
STANDARD DEVIATION of Z component  $\sim 70^\circ$

STANDARD DEVIATION of Z component  $\sim 70^\circ$

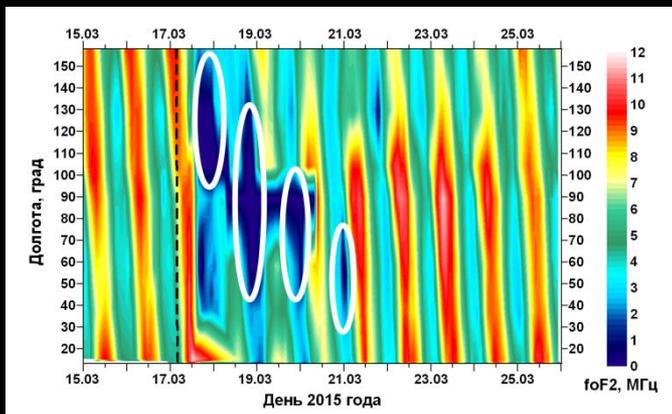
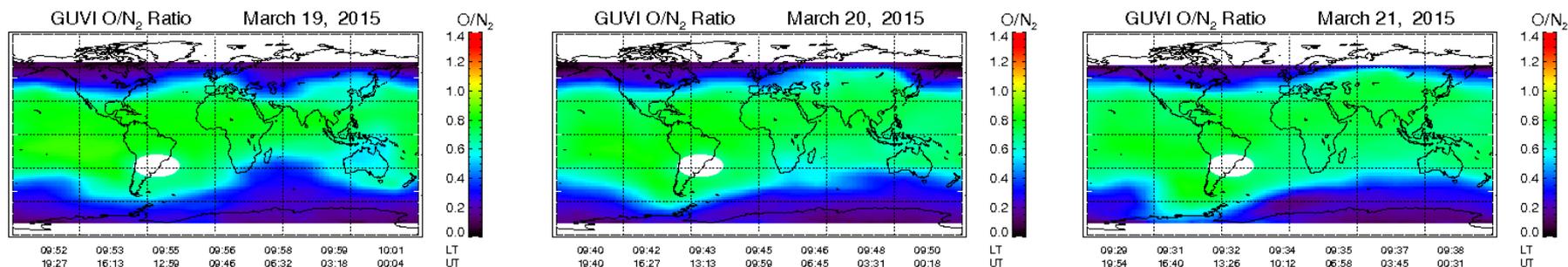
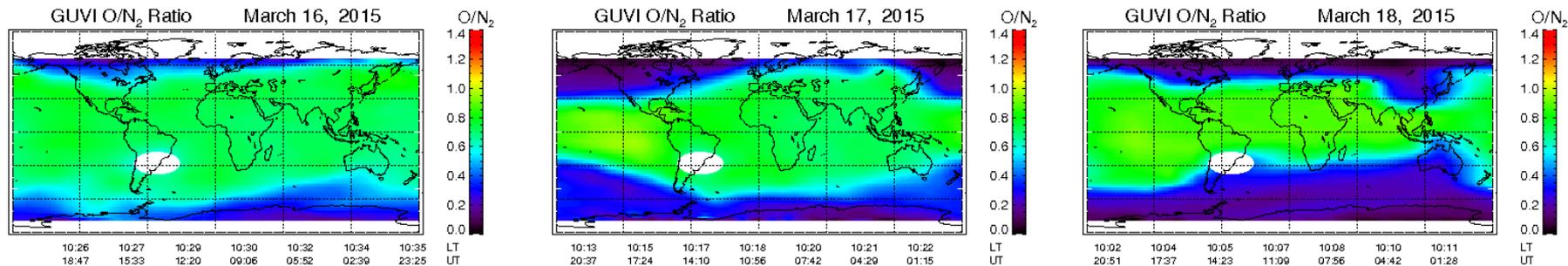


# Долготные неоднородности в ионосфере вдоль средне- и высокоширотного круга по данным приемников GPS/ГЛОНАСС

## 17 марта 2015 (равноденствие)



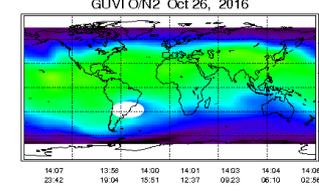
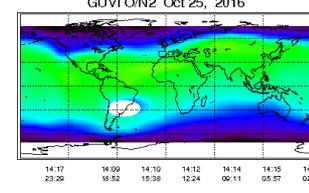
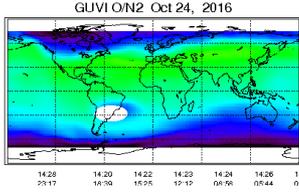
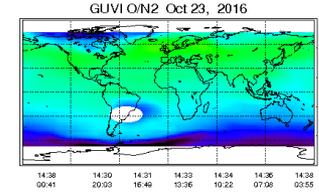
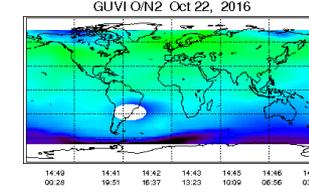
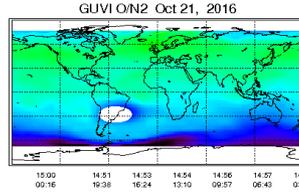
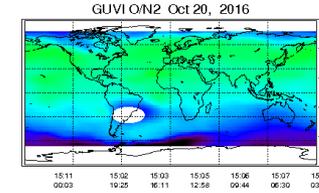
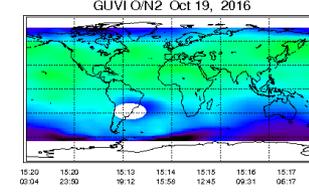
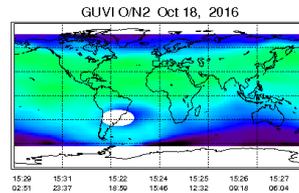
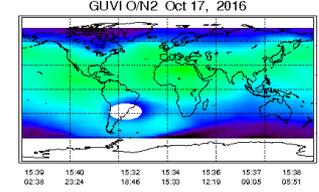
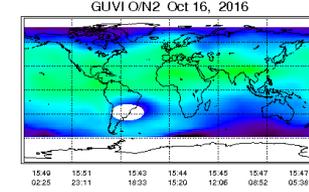
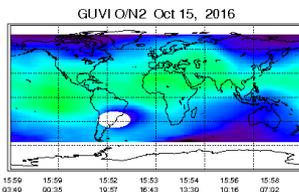
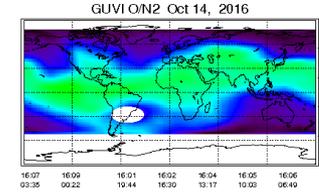
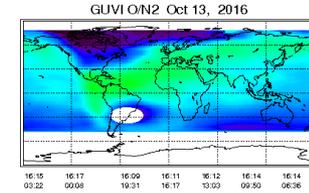
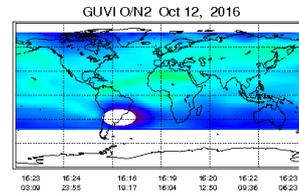
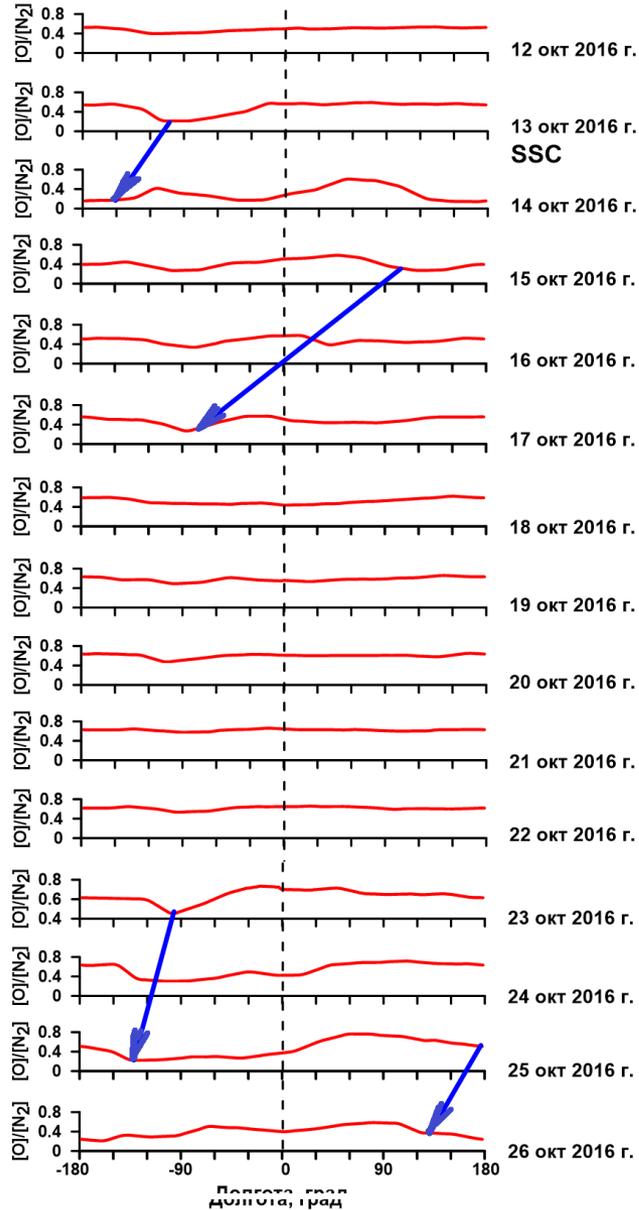
Спутниковые измерения отношения  $[O]/[N_2]$  на высотах термосферы выше ~100 км с помощью УФ-спектрометра GUVI TIMED ([http://guvi.jhuapl.edu/site/data/data\\_fetch/I3\\_on2\\_gif](http://guvi.jhuapl.edu/site/data/data_fetch/I3_on2_gif)) для временного интервала 16-21 марта 2015 г.



Во время главной фазы магнитной бури в марте 2015 г. над регионом средних широт сформировалась область низкой электронной концентрации, которая в течение нескольких дней перемещалась из зоны основного возмущения на долготу ~130° на запад со скоростью 50-70 м/с.

# Спутниковые измерения отношения $[O]/[N_2]$ на высотах термосферы выше ~100 км с помощью УФ-спектрометра GUVI TIMED ([http://guvi.jhuapl.edu/site/data/data\\_fetch/I3\\_on2\\_gif](http://guvi.jhuapl.edu/site/data/data_fetch/I3_on2_gif)) для временного интервала 12-26 октября 2016 г.

GUVI  $[O]/[N_2]$  53.47 с.ш.



# Выводы

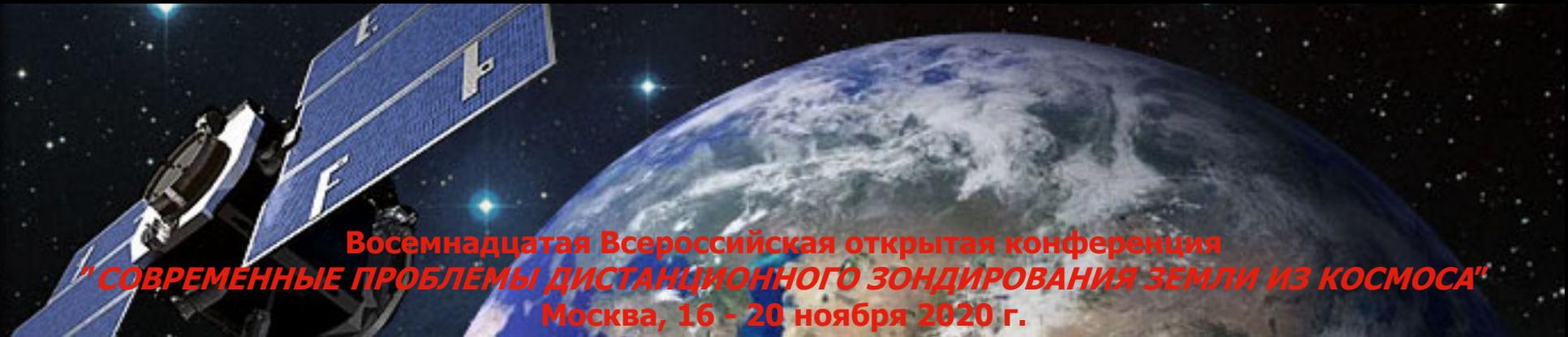
- Проведено комплексное исследование вариаций параметров ионосферы в средних и высоких широтах северного полушария по данным ионозондов, приемников GPS/ГЛОНАСС и магнитометров глобальной сети INTERMAGNET во время сильной геомагнитной бури в октябре 2016 года. Проведенное исследование подтверждает сделанный ранее вывод о том, что **структура магнитосферно-ионосферной токовой системы во время магнитных бурь зависит от пространственных аномалий основного геомагнитного поля, проявляющихся в вариациях параметров ГМП и ионосферы.**
- Подтверждены выводы о нерегулярной структуре долготной изменчивости компонент ГМП в спокойных и возмущенных условиях, обусловленной несовпадением северного географического и геомагнитного полюсов, а также наличием аномалий различных пространственных масштабов в основном магнитном поле Земли.
- Долготно-временные вариации компонент ГМП в возмущенных условиях проявляют сильную зависимость от индивидуальных особенностей развития магнитных бурь.
- Во время главной фазы бури долготная динамика геомагнитных и ионосферных возмущений является почти синхронной в высоких и средних широтах и связана с глобальным перемещением зоны магнитосферной конвекции с высоких широт на средние.

# Выводы

- На фазе восстановления важную роль в динамике ионосферы средних широт могут играть **возмущения в виде термосферных волн молекулярного газа, распространяющихся в юго-западном направлении в течение нескольких суток.**
- В североамериканском секторе наблюдаются **более интенсивные и продолжительные отрицательные ионосферные возмущения в периоды магнитных бурь,** связанные с зоной сильных вариаций ГМП, формирующихся в направлении меридиана геомагнитного полюса вблизи  $\sim 270^\circ$  и на долготах  $\sim 225^\circ$  и  $\sim 315^\circ$ .
- Над регионом средних широт Евразии на долготах  $\sim 80-110^\circ$  ионосфера имеет устойчивую положительную аномалию и раньше всего восстанавливается после геомагнитных возмущений ввиду низкого уровня вариаций ГМП в этом долготном секторе.
- Долготно-временные вариации ионосферных параметров в периоды сильных геомагнитных бурь в марте 2015 г. и октябре 2016 г. в условиях равноденствия, при идентичной фоновой (невозмущенной) ионосфере с выраженным переходом от дневных условий к ночным, имели очень схожую картину с аналогичным ярким проявлением особенностей, связанных с зависимостью от изменчивости вариаций ГМП и влиянием термосферных возмущений молекулярного газа.

# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-05-00681



Восемнадцатая Всероссийская открытая конференция  
*"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"*  
Москва, 16 - 20 ноября 2020 г.