



Исследование пространственного распределения ультранизкочастотных волн в магнитосфере Земли при различных геомагнитных условиях: поляризация волн и влияние плазмосферы

Александр Рубцов
avrubtsov@iszf.irk.ru

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

Введение

- Магнитосфера — потоки плазмы управляются магнитным полем Земли. Защищает от солнечного ветра и выбросов из короны Солнца



магнитные бури

суббури

УНЧ-волны

Pc5 Pc4 Pc3 Pc2 Pc1

- Ультранизкочастотные (УНЧ) волны в диапазонах Pc4 (45–150 сек.) и Pc5 (150–600 сек.) являются собственными колебаниями силовых линий магнитного поля Земли
- Проблема прогноза космической погоды

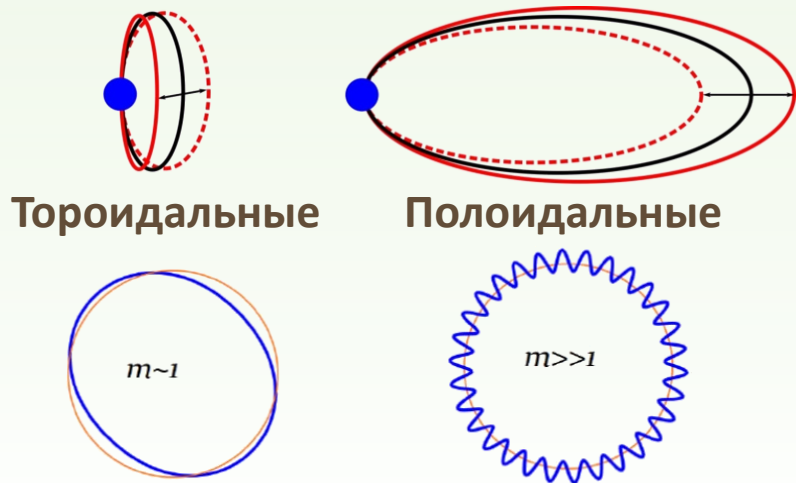


Автор: Роб Рей

Введение

- УНЧ-волны взаимодействуют с плазмой и отвечают за крупномасштабный перенос энергии в магнитосфере, включая ускорение электронов радиационных поясов

[Klimushkin+, 2021]



Движения частиц

- Торoidalные и полоидальные волны считаются альфвеновскими, возбуждаемыми внешними и внутренними источниками, соответственно
- Компрессионные волны наблюдаются редко и описываются кинетикой

О чём эта работа?

Анализ наблюдения УНЧ-волн в магнитосфере спутником Arase в 2017–2020 гг.:

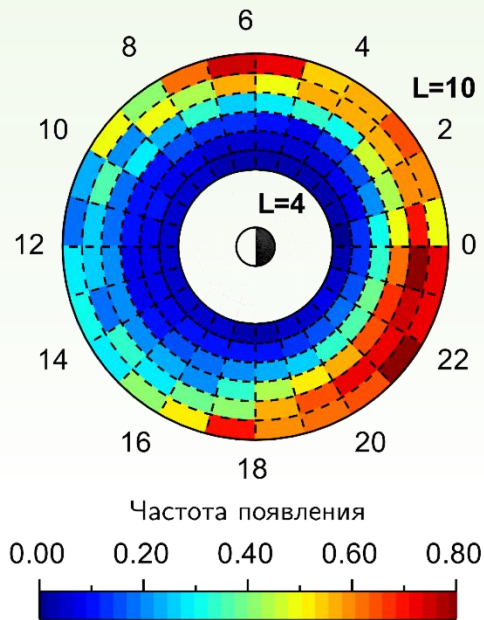
- Пространственные распределения тороидальных, полоидальных и компрессионных волн при возмущённых и спокойных геомагнитных условиях [Rubtsov+, 2023a,b, JGR]
- Исследование поляризации УНЧ-волн, которая может быть связана с разными источниками энергии [Rubtsov+, 2023a, JGR]
- Обнаружение плазмопаузы и её роль в распределениях волны: она действует как барьер для волн или нет? [Rubtsov+, 2023b, JGR; 2023c, JASTP]
- Доказательство генерации дрейфово-компрессионных волн [Yamamoto, Rubtsov+, 2024, GRL]



Пространственные распределения

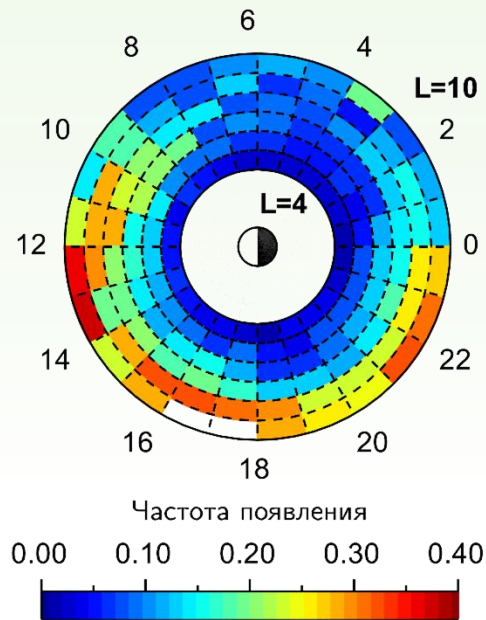
- 3 обзора всей магнитосферы на расстояниях 4–10 R_E и широтах $\pm 40^\circ$

Тороидальные



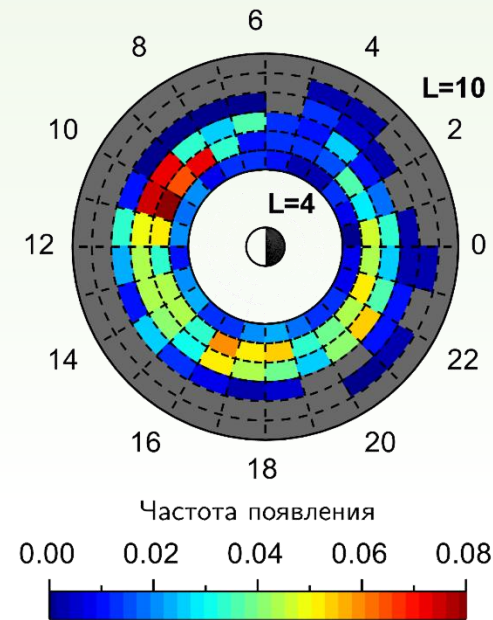
$$\langle b_a \rangle > \langle b_r \rangle, \langle b_{\parallel} \rangle$$

Полоидальные



$$\langle b_r \rangle > \langle b_a \rangle, \langle b_{\parallel} \rangle$$

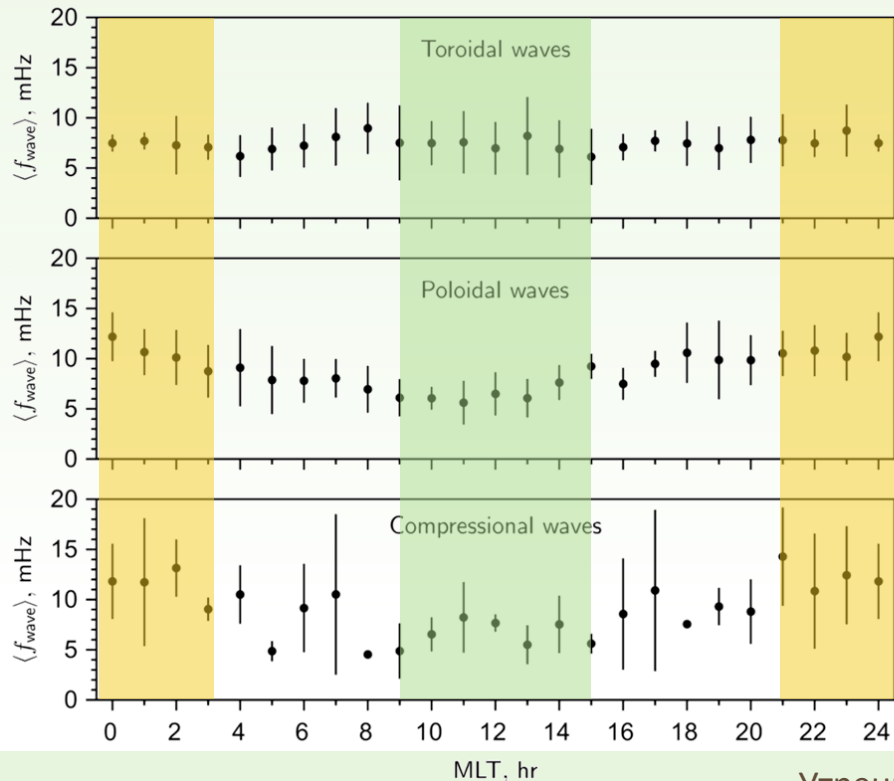
Компрессионные



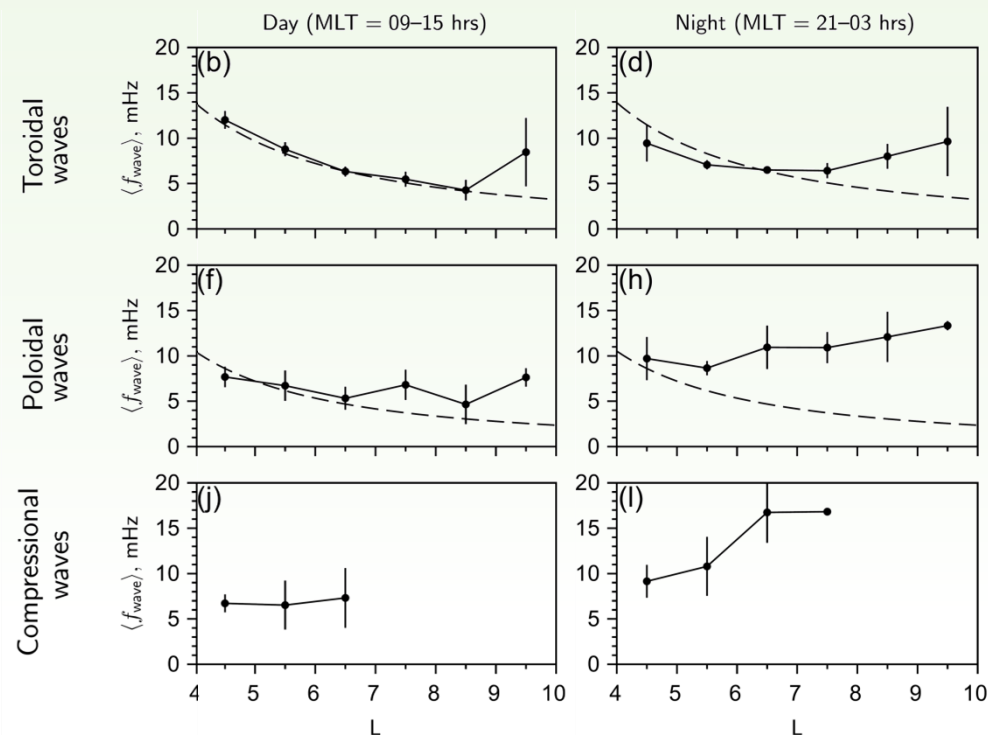
$$\langle b_{\parallel} \rangle > \langle b_r \rangle, \langle b_a \rangle$$

Распределения частоты волны

по MLT для всех L-оболочек

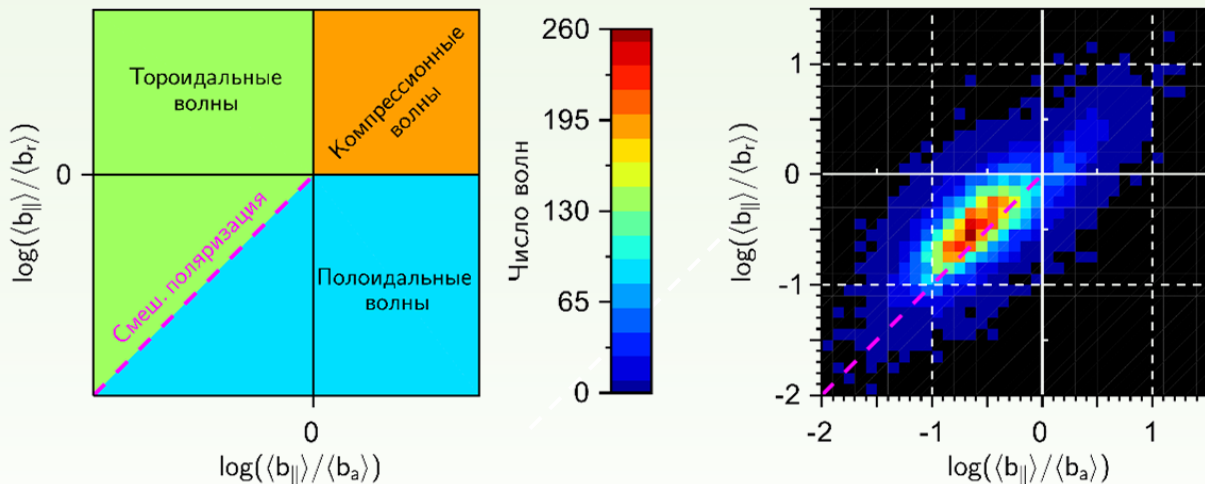


по L-оболочкам для MLT = 09–15 и 21–03

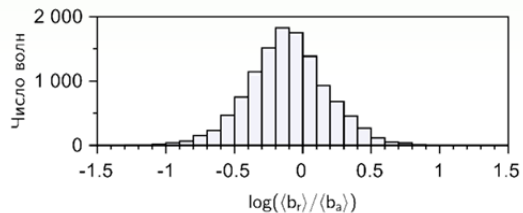


Особенности поляризации

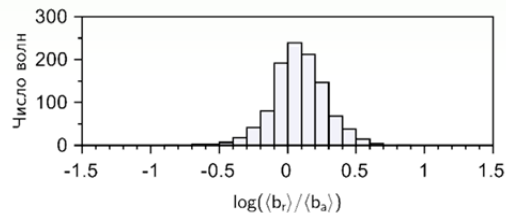
Единый кластер без отдельных групп тороидальных/полоидальных волн.



(в) Поперечные волны, $\langle b_r \rangle, \langle b_a \rangle > \langle b_{||} \rangle$



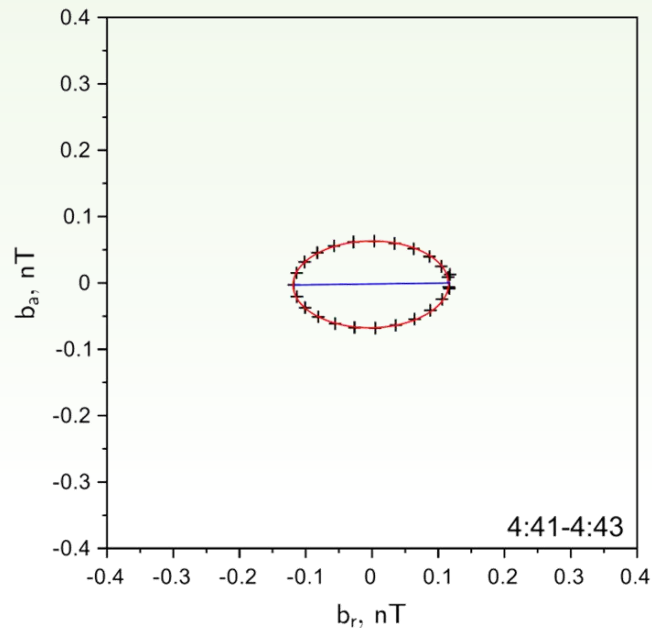
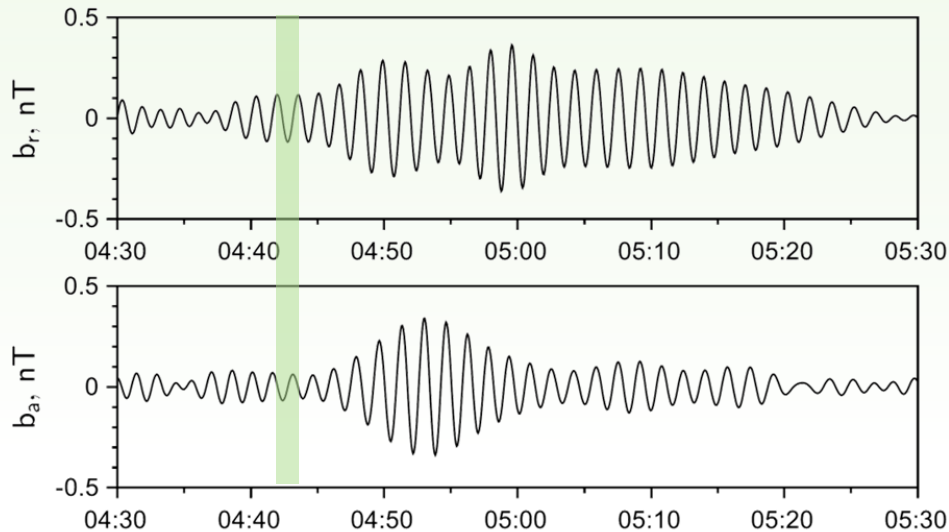
(г) Компрессионные волны, $\langle b_{||} \rangle > \langle b_r \rangle, \langle b_a \rangle$



Особенности поляризации

Изменение поляризации за пролёт спутника: время или пространство?

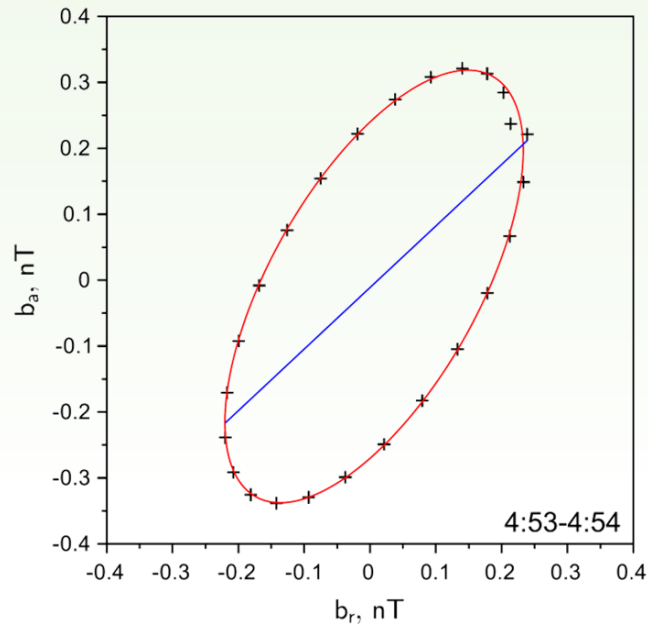
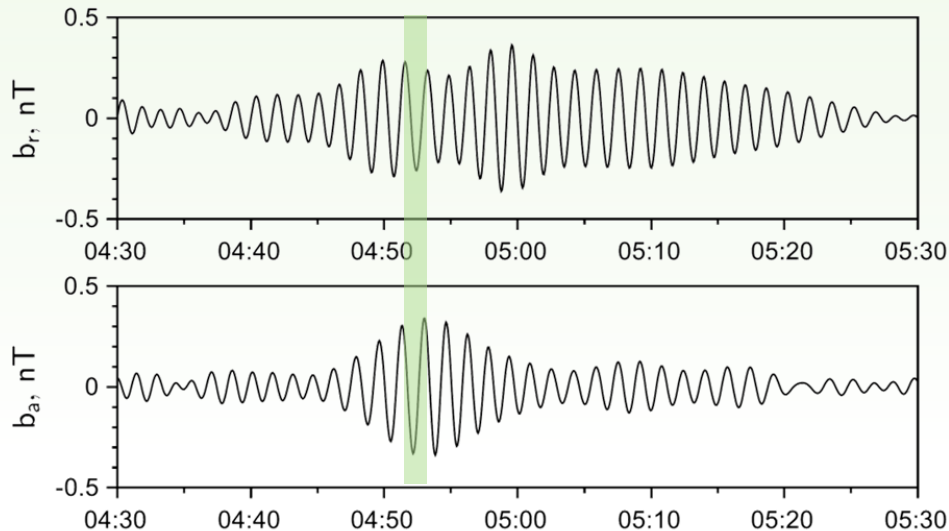
С точки зрения теории возможны оба сценария



Особенности поляризации

Изменение поляризации за пролёт спутника: время или пространство?

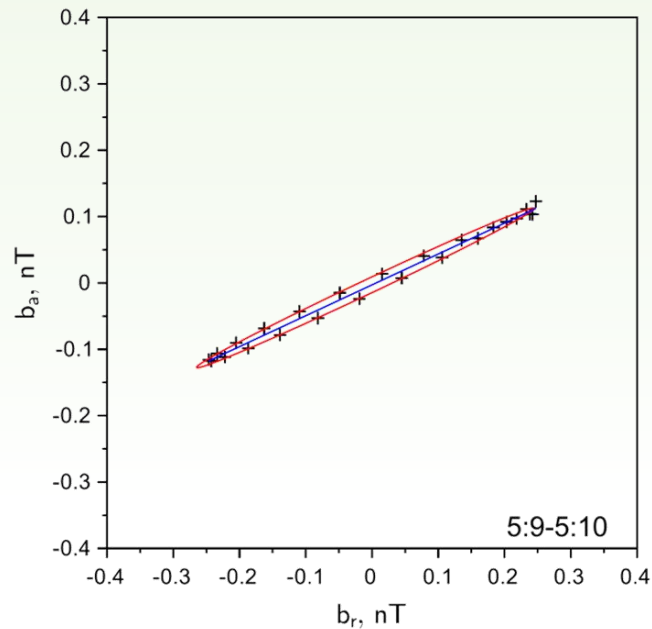
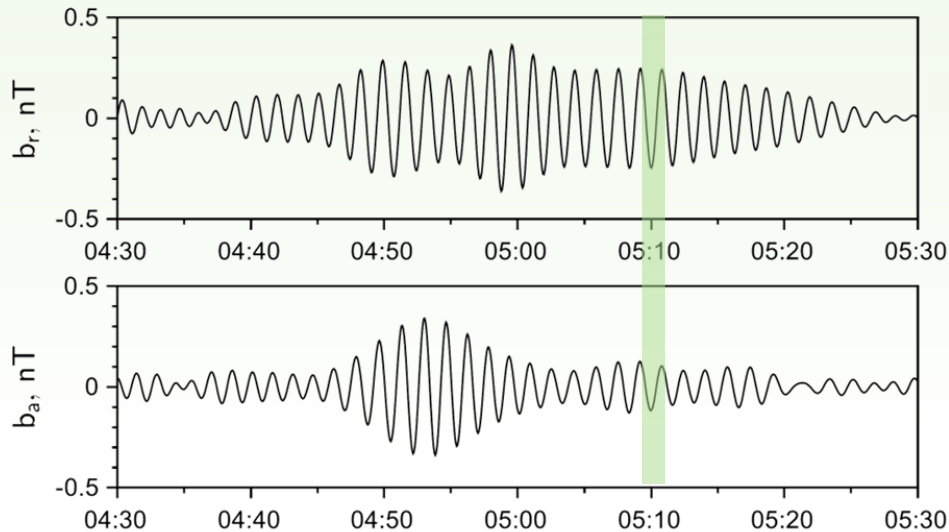
С точки зрения теории возможны оба сценария



Особенности поляризации

Изменение поляризации за пролёт спутника: время или пространство?

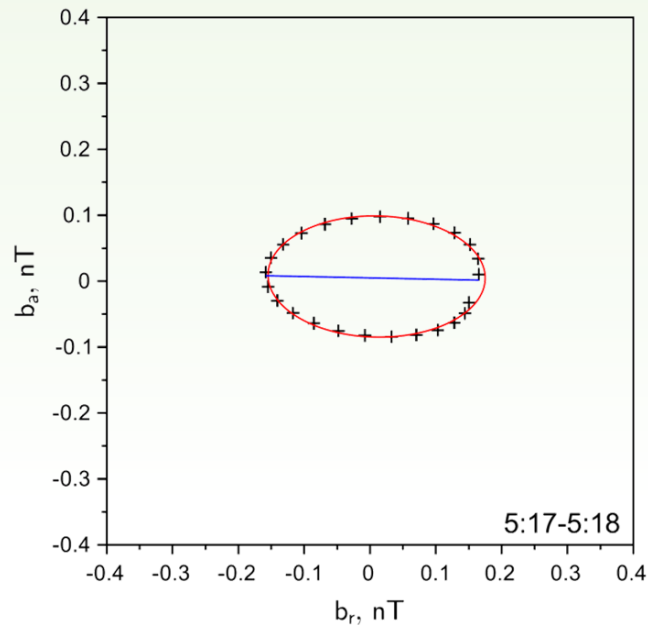
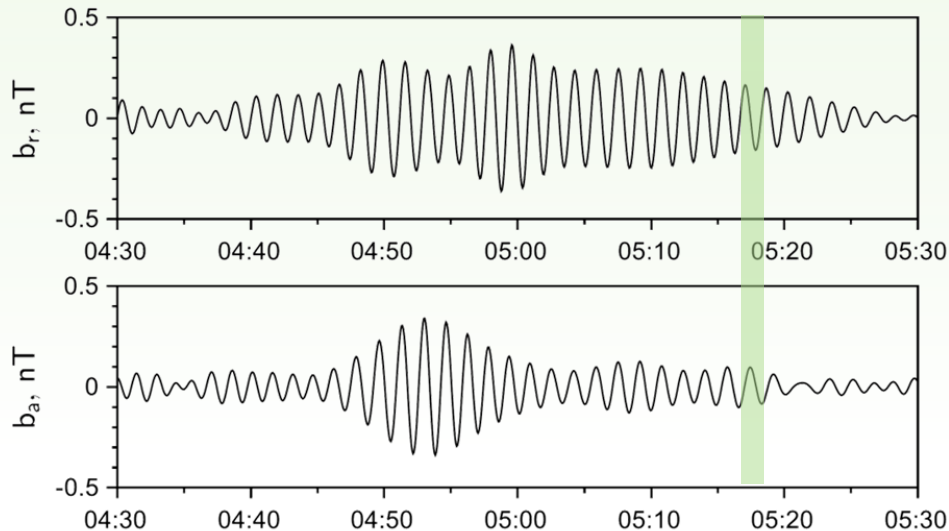
С точки зрения теории возможны оба сценария



Особенности поляризации

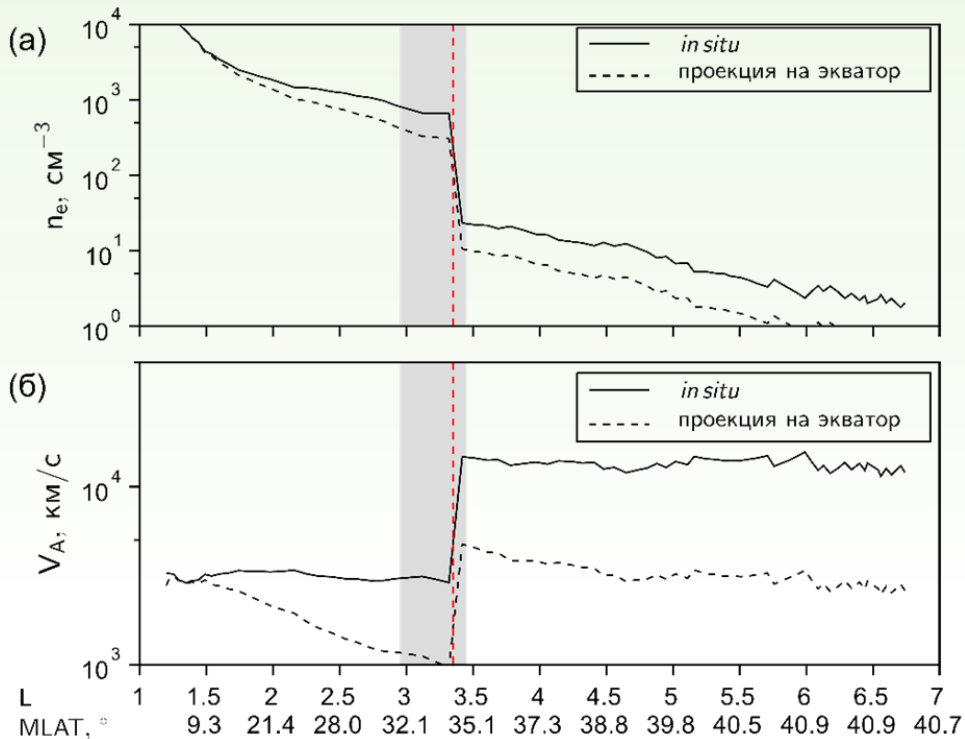
Изменение поляризации за пролёт спутника: время или пространство?

С точки зрения теории возможны оба сценария

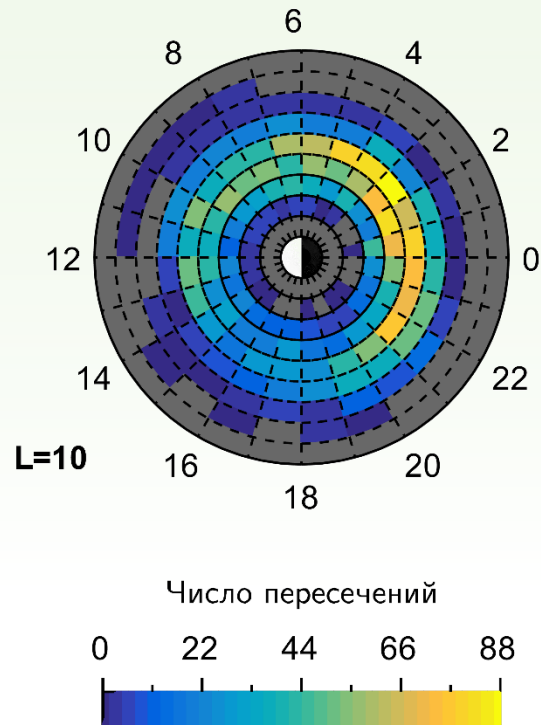


Обнаружение плазмопаузы: падение n_e в 5 раз или более за $0.5 R_E$

17.06.2017 04:58-08:16 UT



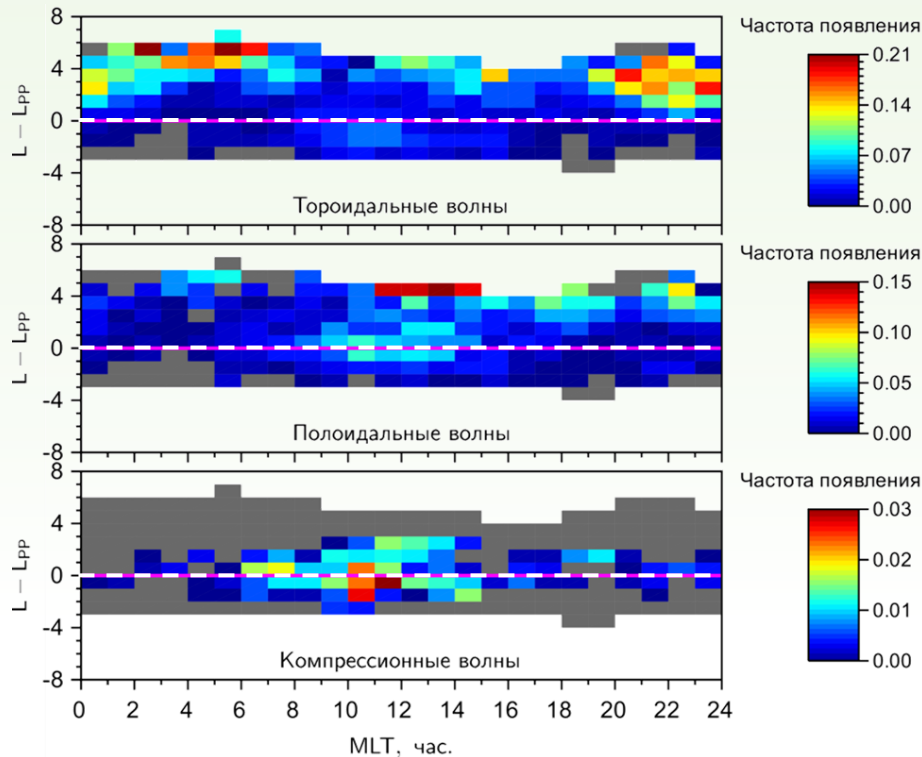
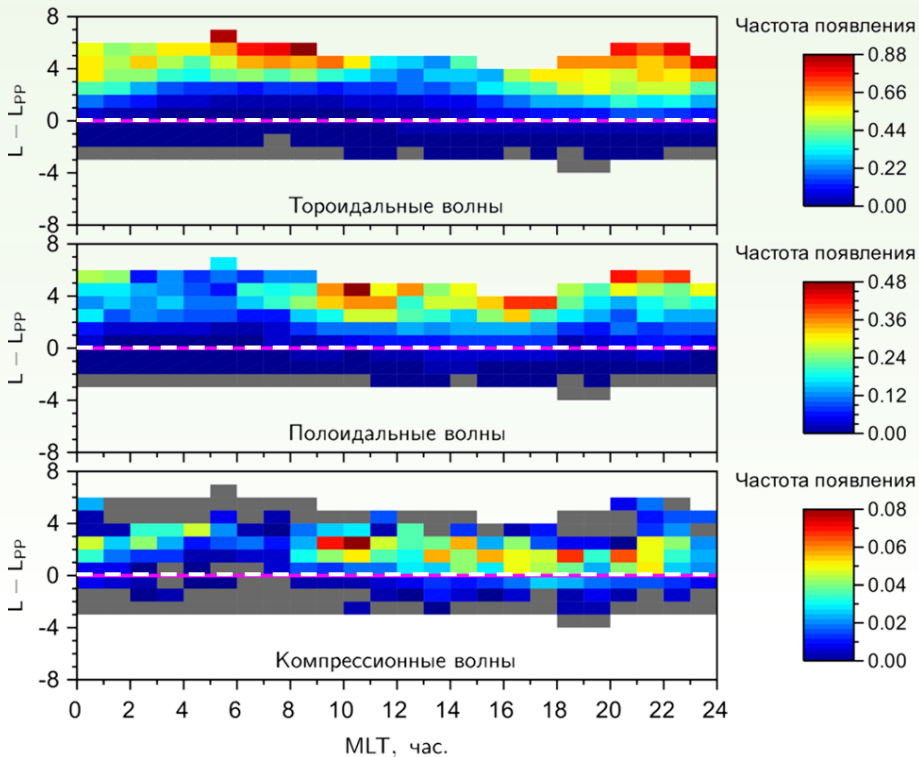
Пересечения плазмопаузы



Распределения относительно положения плазмопаузы

Возмущённые (SME > 100 нТл)

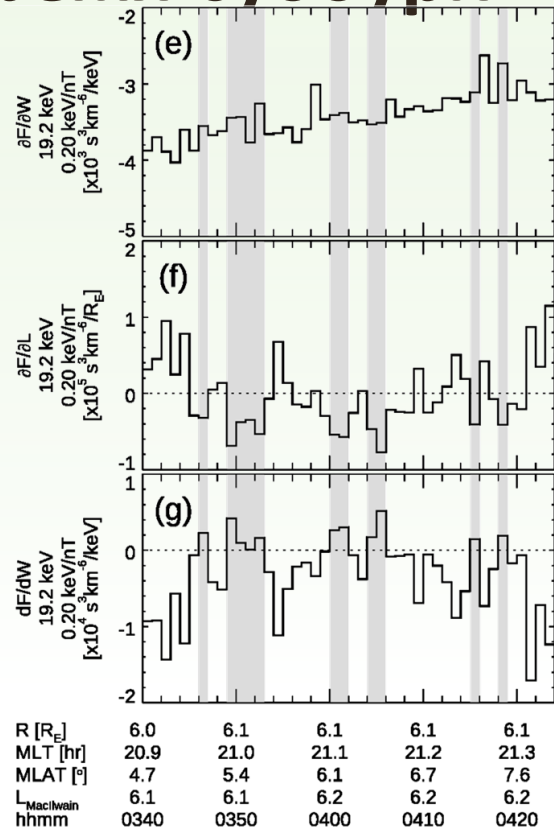
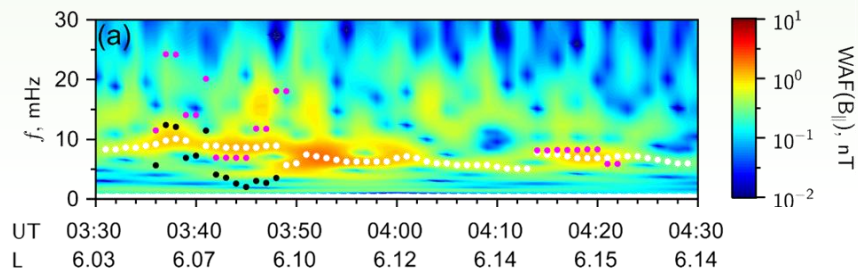
Спокойные (SME ≤ 100 нТл)



Для наблюдений на $L > 4$

Компрессионные волны во время суббури

- Расчёт условия генерации и параметров дрейфово-компрессионной волны
- Дрейфовый резонанс с протонами
- Градиентная неустойчивость



Заключение

- Несмотря на различные распределения в пространстве, тороидальные, полоидальные и компрессионные УНЧ-волны образуют единый кластер с точки зрения поляризации
- Смешанная поперечная поляризация встречается чаще всего.
- Плазмопауза выступает в роли барьера для УНЧ-волн, генерируемых внутренними неустойчивостями
- Показана генерация дрейфово-компрессионных волн градиентной неустойчивостью ионов во время суббурь

Перспективы

- Учёт взаимодействия УНЧ-волн с частицами в моделях для прогноза геомагнитной активности и радиационной обстановки
- Локализация областей наибольшего ускорения/замедления
- Новые представления о роли изменения поляризации волн в динамике магнитосферной плазмы
- Изучение влияния УНЧ-волн на наземную инфраструктуру

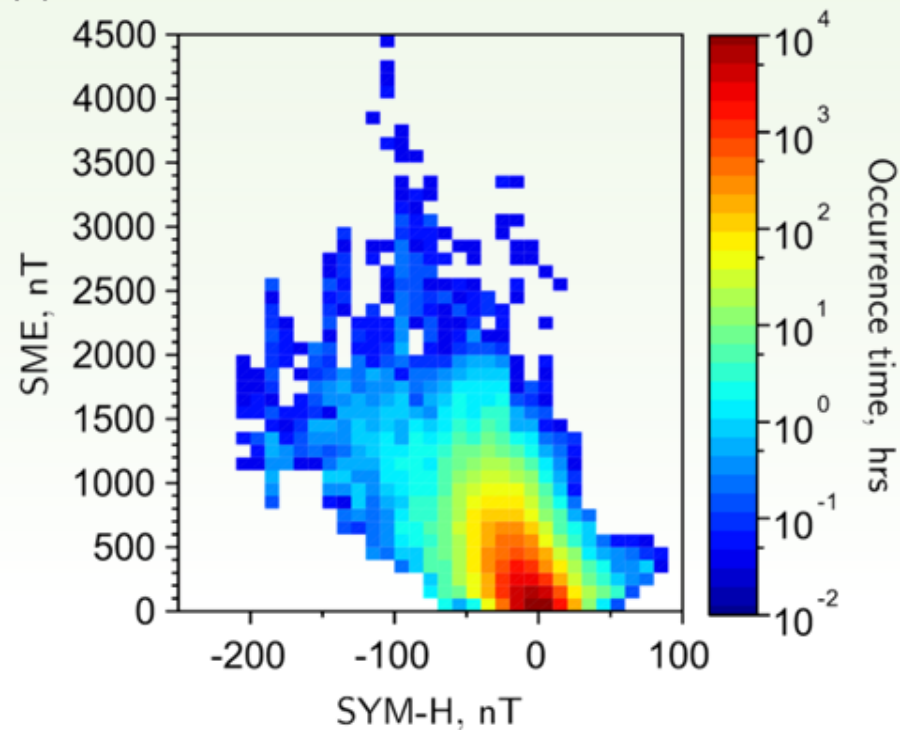
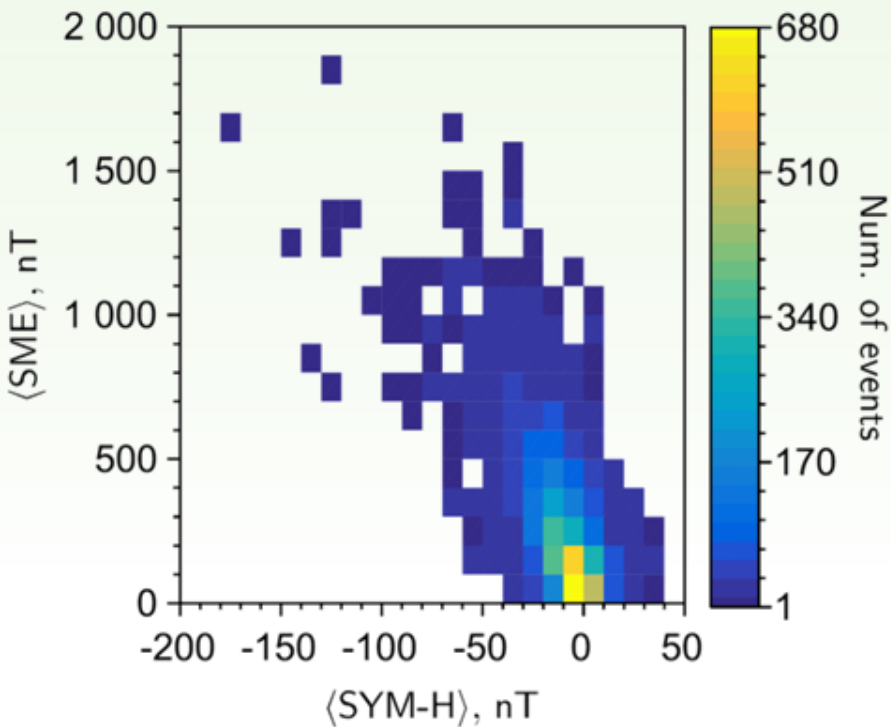
Спасибо за внимание!

avrubtsov@iszf.irk.ru

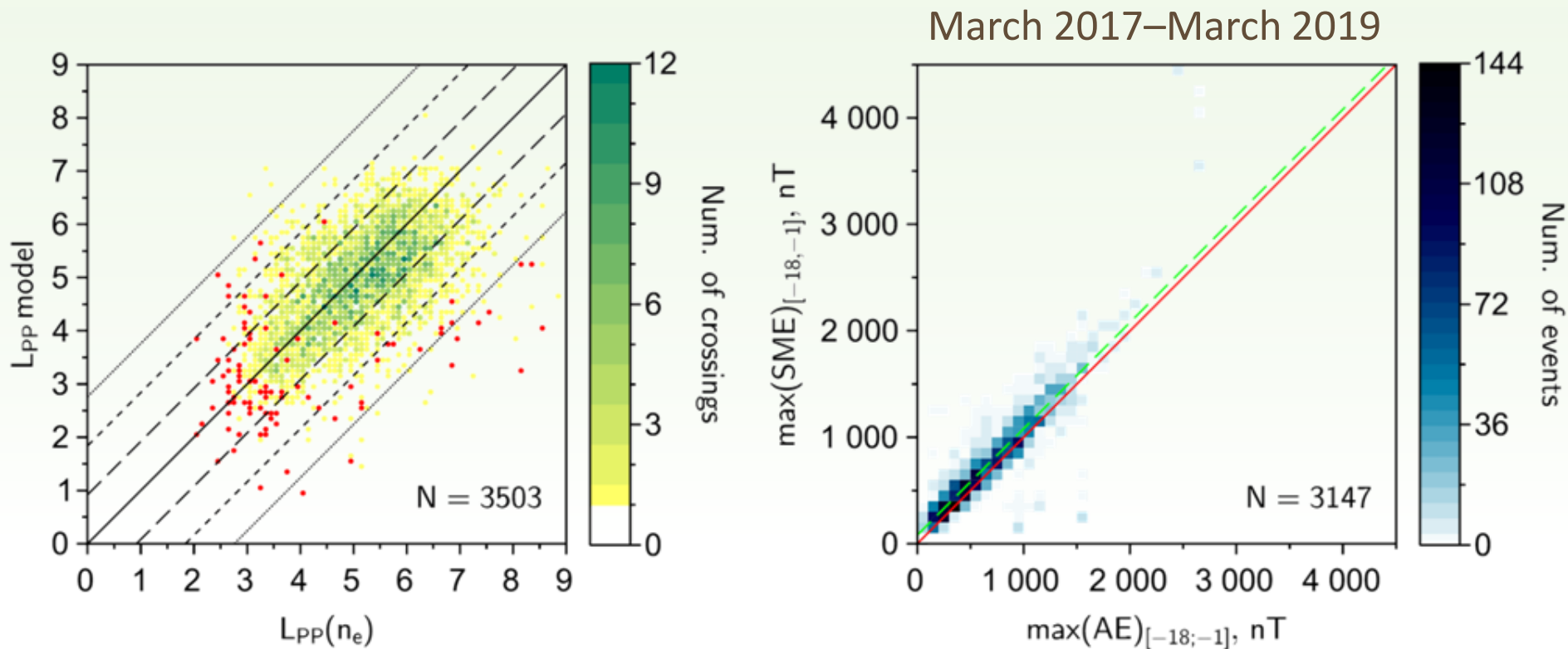


1. **Rubtsov A.V.**, et al. (2023a). Polarization and spatial distribution features of Pc4 and Pc5 waves in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 128, e2023JA031674
2. **Rubtsov A.V.**, et al. (2023b). Plasmasphere control of ULF wave distribution at different geomagnetic conditions. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 128, e2023JA031675
3. **Rubtsov A.V.**, et al. (2023c). Alfvén velocity sudden increase as an indicator of the plasmopause. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 245. 106040
4. Yamamoto K., **Rubtsov A.V.**, et al. (2024). Direct evidence of drift-compressional wave generation in the Earth's magnetosphere detected by Arase. *Geophys. Res. Lett.* 51, e2023GL107707

Распределение SME и SYM-H в 2017–2020 гг.

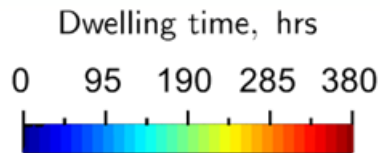
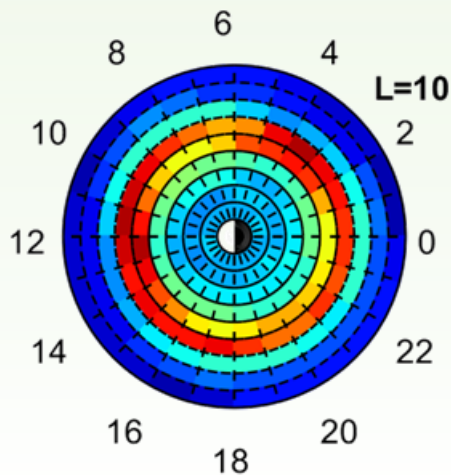


Верификация модели NSW-GDP



Покрытие наблюдений Arase в 2017–2020 гг.

(a)



(b) Day

MLT \in [9, 15] hrs

(c) Night

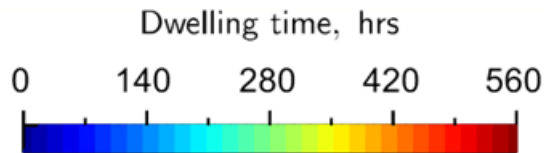
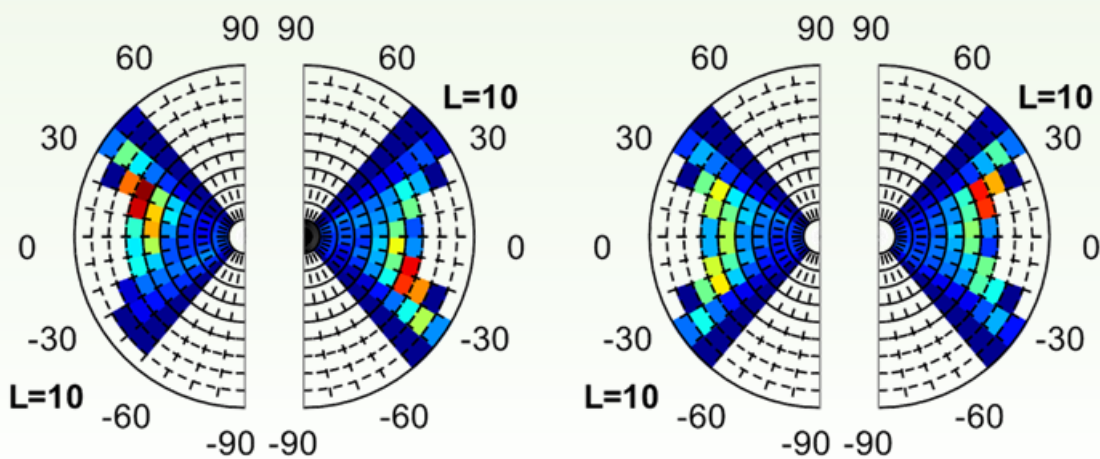
MLT \in [21, 3] hrs

(d) Dawn

MLT \in [3, 9] hrs

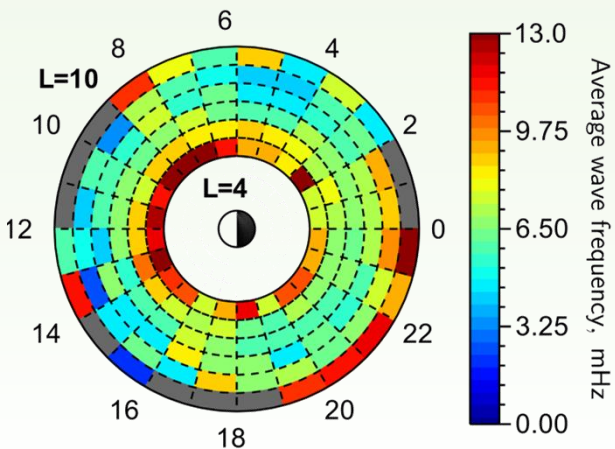
(e) Dusk

MLT \in [15, 21] hrs

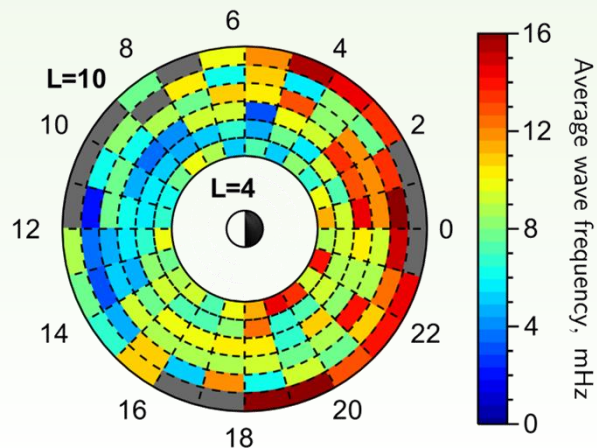


Средняя частота волны на диаграмме L-MLT

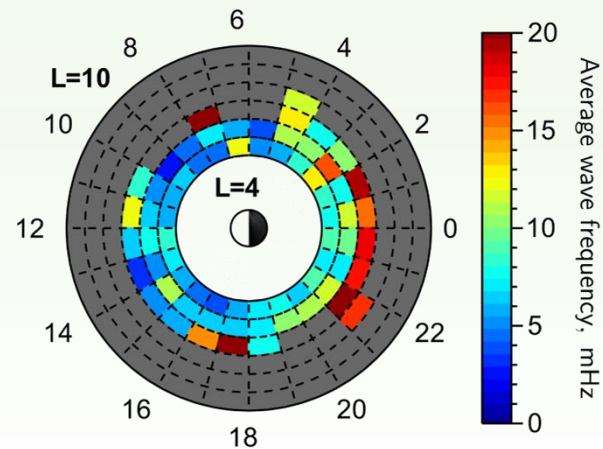
Тороидальные



Полоидальные



Компрессионные



Пространственные распределения

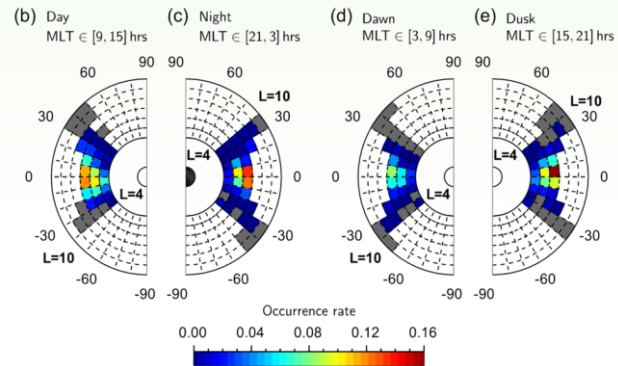
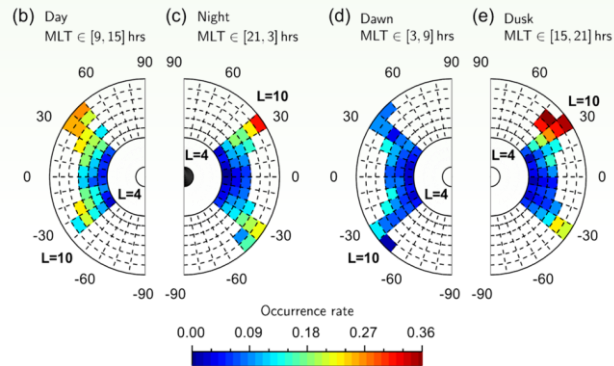
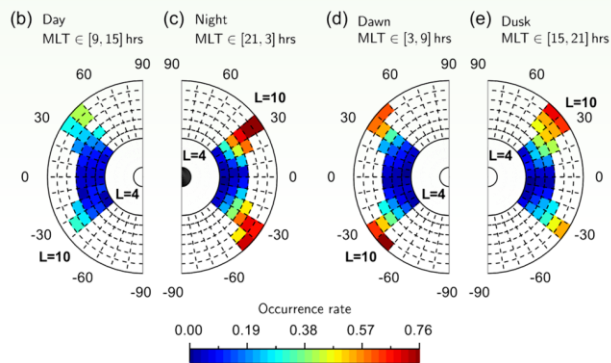
Продольные распределения:

- Высокие гармоники тороидальных волн
- Чётные и нечётные гармоники полоидальных волн
- Все компрессионные волны около экватора

Тороидальные волны

Полоидальные волны

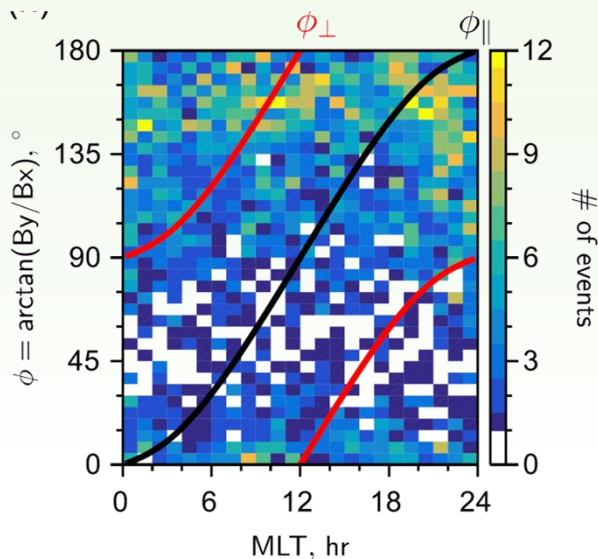
Компрессионные волны



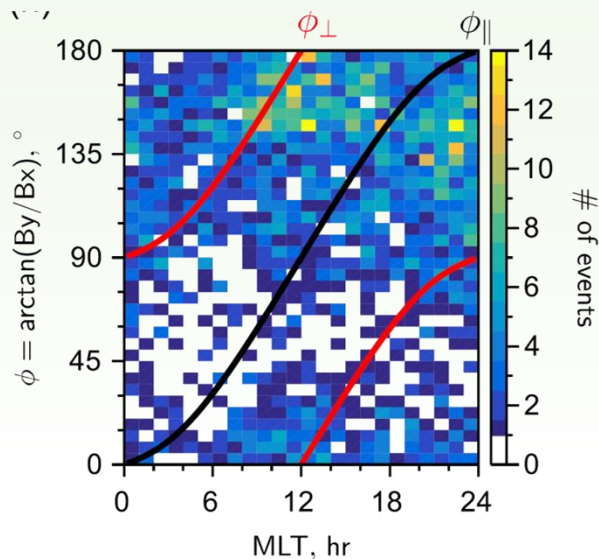
Межпланетное магнитное поле

- Какое направление поля влияет на УНЧ-волны?

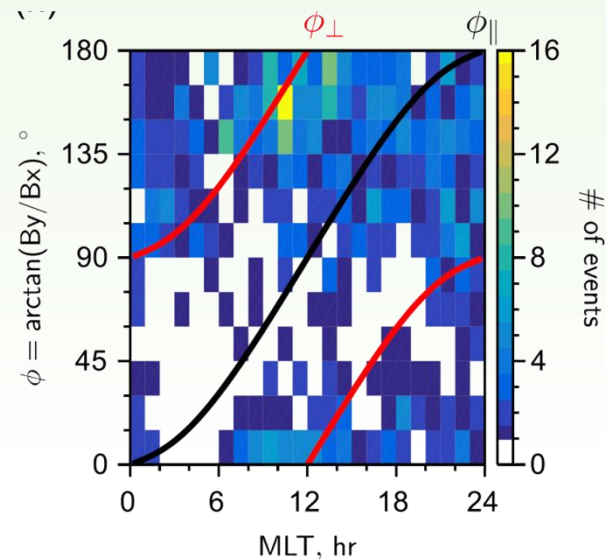
Тороидальные



Полоидальные



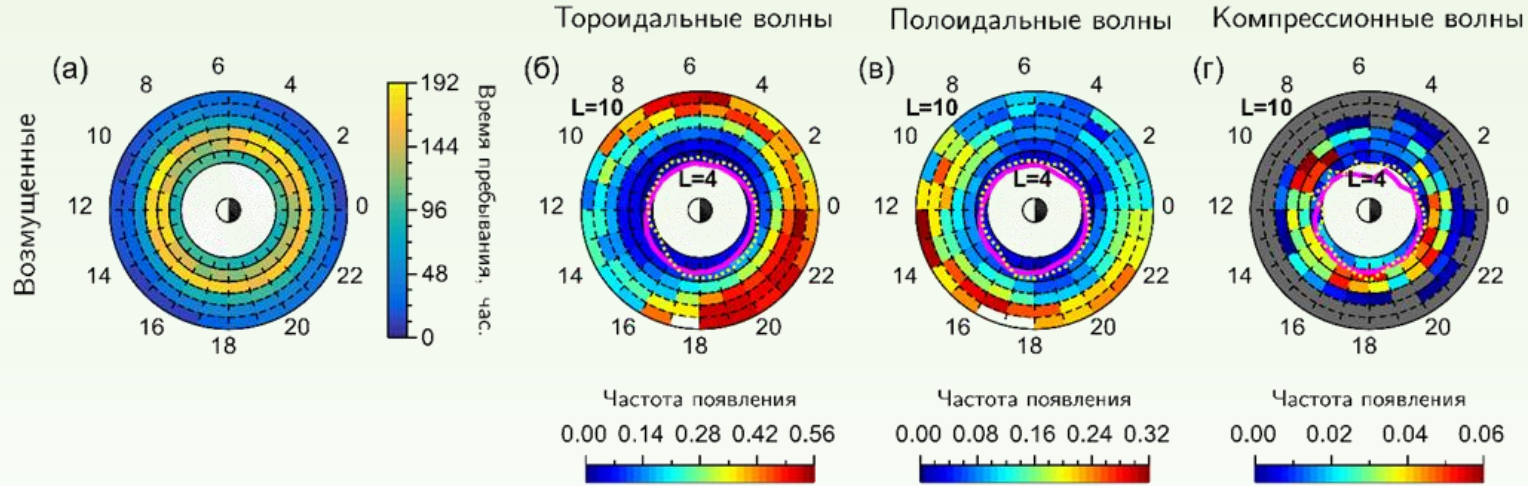
Компрессионные



Модель Shue+ [1997] использовалась для вычисления треков ϕ_{\parallel} и ϕ_{\perp}

Влияние геомагнитных условий

SME > 100 нТл



SME ≤ 100 нТл

