



XXVIII научная конференция по
радиофизике

Нижний Новгород
16.05.2024

Количественные характеристики условий наблюдения ОНЧ хоров в областях их возбуждения с «изрезанным» геомагнитным полем по данным с космического аппарата

П.Д. Жаравина¹⁾, О.Н. Савина²⁾, П.А. Беспалов¹⁾

1) ИФФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, pollyllyzh@gmail.com

2) НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия

Работа поддержана Фондом развития теоретической физики и математики «Базис» (проект № 23-1-1-67-1).



Количественные характеристики условий наблюдения ОНЧ хоров в областях их возбуждения с «изрезанным» геомагнитным полем по данным с космического аппарата

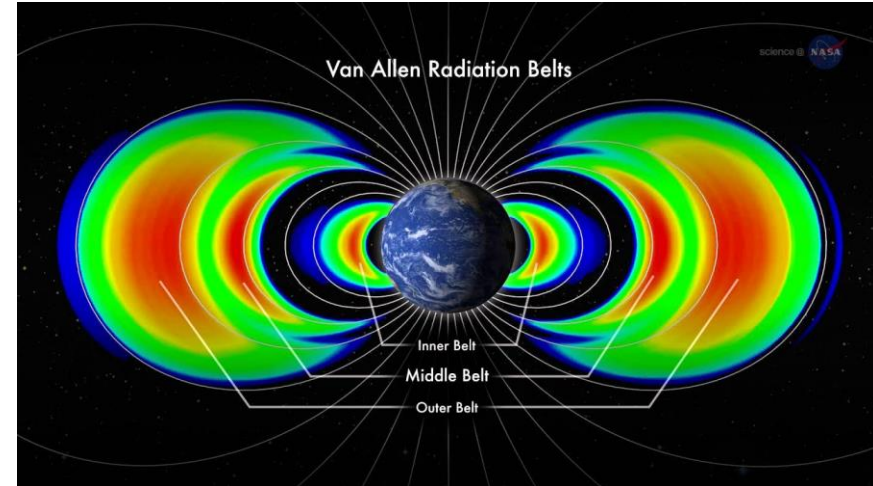
Введение

2

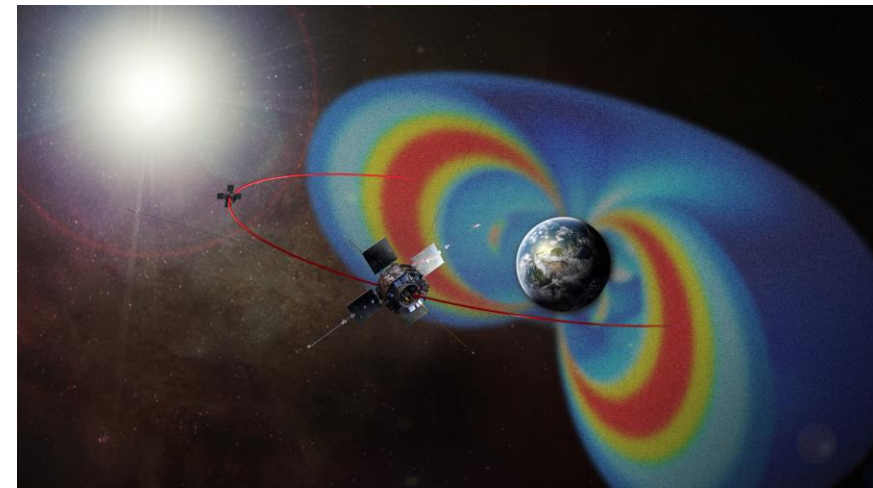
Миссия Van Allen probe

- Van Allen probes, ранее известные как Radiation Belt Storm Probes (RBSP). Их миссия в рамках программы Living With a Star была направлена на изучение радиационных поясов Ван Аллена, которые окружают Землю.
- На них были установлены следующие наборы инструментов: Energetic Particle, Composition, and Thermal Plasma (ECT), Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science (EMFISIS), Electric Field and Waves Instrument (EFW), Radiation Belt Storm Probes Ion Composition Experiment (RBSPICE) и Relativistic Proton Spectrometer (RPS).
- Кроме основной задачи, изучения радиационных поясов, Van Allen probes имеют еще несколько научных целей. Одна из них - изучение процессов, связанных с солнечными вспышками и геомагнитными бурями. Другая - изучение магнитного поля Земли и его взаимодействия с радиационными поясами.

<https://emfisis.physics.uiowa.edu/Flight/>



Радиационные пояса Земли.



Орбита спутников Van Allen probes.



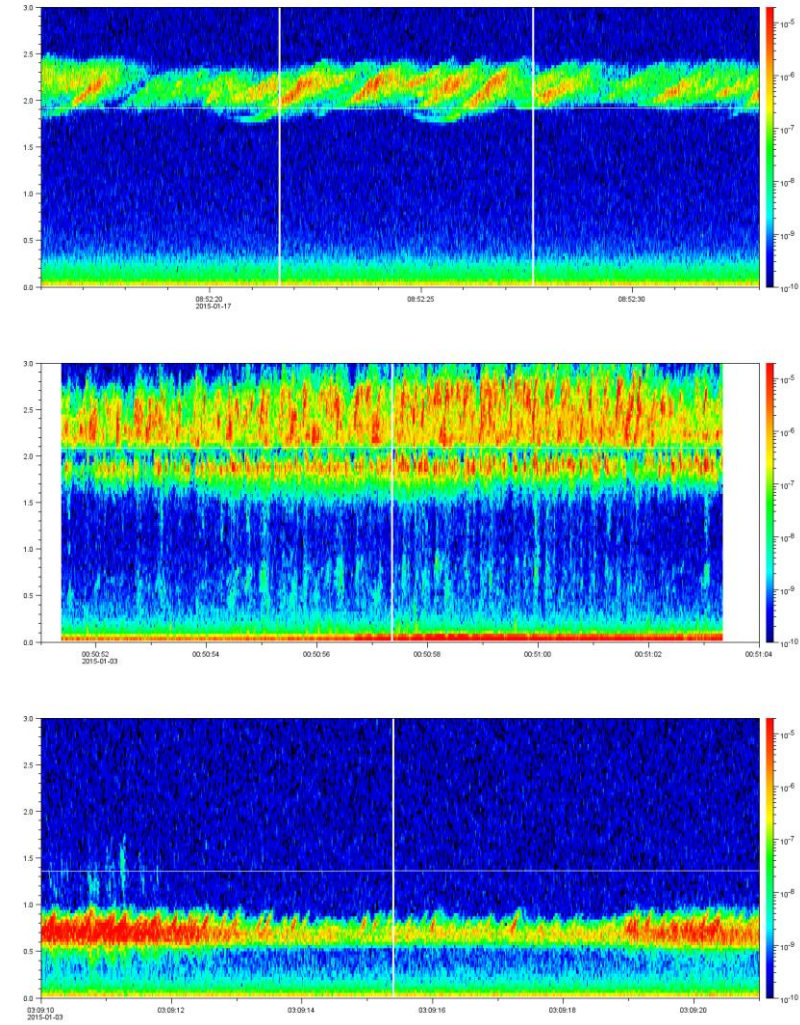
Количественные характеристики условий наблюдения ОНЧ хоров в областях их возбуждения с «изрезанным» геомагнитным полем по данным с космического аппарата

Введение

3

Хоровые излучения

- Хоры — представляют собой последовательности низкочастотных электромагнитных дискретных импульсов. Хоры возбуждаются сравнительно низкоэнергичными (10–20 кэВ) электронами внешнего радиационного пояса.
- Хоровые излучения возбуждаются в области «сигары» длиной порядка 2000 км и средним диаметром 300 км вблизи локального минимума магнитного поля. Обычно спектрограмма хорового излучения наблюдается в двух основных спектральных полосах с центром несколько ниже половины минимальной электронной циклотронной частоты для рассматриваемой магнитной трубки.
- В области возбуждения выделяют несколько видов хоровых излучений, которые возбуждаются в двух полосах частот: выше линии половины локальной гирочастоты электронов $\frac{f_{ce}}{2}$, ниже $\frac{f_{ce}}{2}$ и в обеих полосах.



Спектры высокого разрешения.

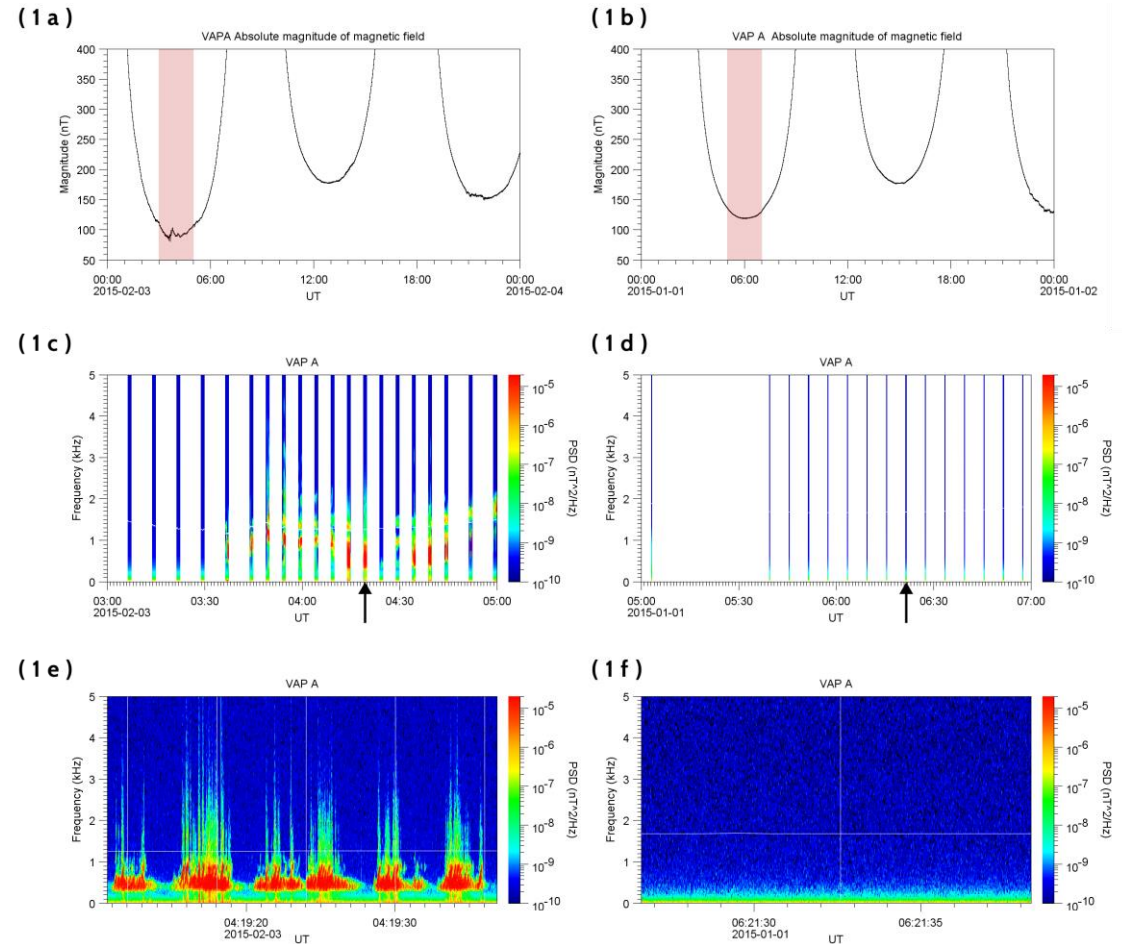


Количественные характеристики условий наблюдения ОНЧ хоров в областях их возбуждения с «изрезанным» геомагнитным полем по данным с космического аппарата

Область возбуждения хоровых излучений и "изрезанность" магнитного поля по данным наблюдений космических аппаратов Van Allen Probes

Конкретные примеры связи «изрезанности» геомагнитного поля с возбуждением хоров

- При работе с данными наблюдений, полученными в результате миссии Van Allen probe, нами была обнаружена зависимость наличия хоров от наличия "изрезанности" (тонкой структуры с резкими скачками в несколько γ) геомагнитного поля вблизи его локальных минимумов. Ниже приведены два характерных примера, поясняющих эту закономерность.
- На рисунке представлены примеры, четко поясняющие отмеченную закономерность. На графике (1a) в промежуток времени с 3:00 до 5:00 UT магнитное поле имело «изрезанность», и в соответствии с этим наблюдались четкие периодические хоровые спектральные элементы (1c, 1e). На графике (1b) представлена противоположная картина, когда магнитное поле со временем менялось плавно.



Два примера одновременного наблюдения магнитного поля и динамического спектра в частотном диапазоне хоровых излучений.



Количественные характеристики условий наблюдения ОНЧ хоров в областях их возбуждения с «изрезанным» геомагнитным полем по данным с космического аппарата

Область возбуждения хоровых излучений и "изрезанность" магнитного поля по данным наблюдений космических аппаратов Van Allen Probes

5

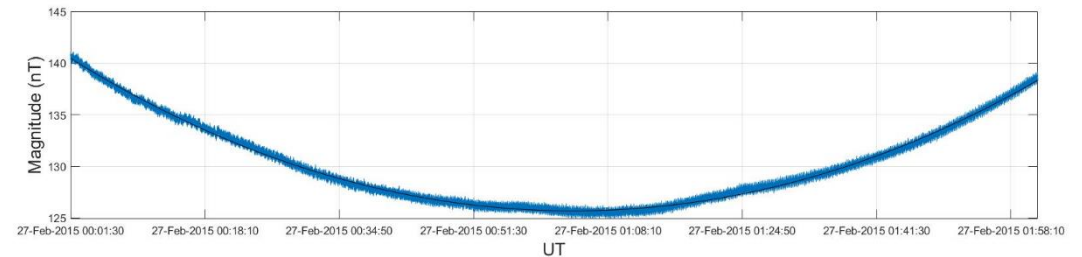
Количественная оценка «изрезанности» магнитного поля

- Для определения степени «изрезанности» магнитного поля $i > 0$ (irregularity), мы строили аппроксимационную кривую для каждого события и вычисляли среднеквадратическое отклонение экспериментальных данных от соответствующей им аппроксимации.
- Показатель «изрезанности» i (размерная величина, в нано Теслах) можно разделить на два промежутка: $0 \text{ нТл} < i \lesssim 5 \text{ нТл}$, где наименьшая вероятность обнаружения излучений и $i \gtrsim 5 \text{ нТл}$, где более вероятно обнаружить хоровые излучения.
- На рисунке (2а) степень «изрезанности» по предложенному алгоритму равна $i = 5.7210 \text{ нТл}$, а на рисунке (2б) – $i = 0.2360 \text{ нТл}$. Следовательно, можно предположить, что событие (2а) вероятнее имеет излучения, а событие (2б) имеет маленькую вероятность.

(2 а)



(2 б)



Примеры зависимости магнитного поля от времени, поясняющие алгоритм вычисления показателя нерегулярности.



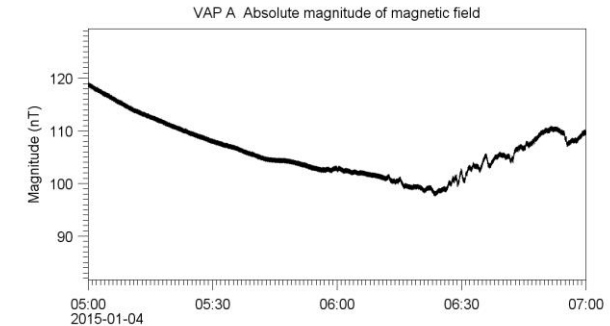
Количественные характеристики условий наблюдения ОНЧ хоров в областях их возбуждения с «изрезанным» геомагнитным полем по данным с космического аппарата

Область возбуждения хоровых излучений и "изрезанность" магнитного поля по данным наблюдений космических аппаратов Van Allen Probes

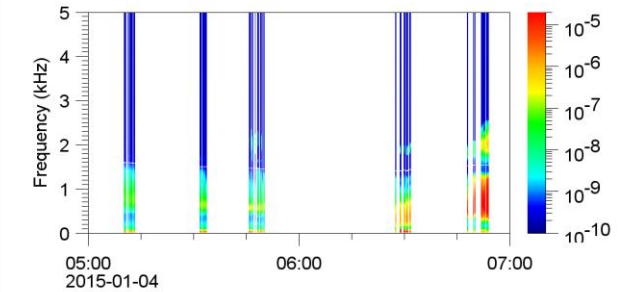
Результаты статистической обработки данных наблюдений

- Для проверки и совершенствования теории было проанализировано 152 событий за январь, февраль и ноябрь 2015 года, для которых доступны волновые данные прибора EMFISIS высокого разрешения. События представляют собой данные за 2 – 4 часа вблизи локального минимума магнитного поля: 58 не имеют «изрезанности» из которых 81% имеют спектр вида (1f), 94 имеют «изрезанность» из которых 66% имеют излучения разного вида.
- На рисунке представлен пример, подтверждающий установленную закономерность. На графике (3а) в промежуток времени приблизительно с 5:00 до 6:00 UT магнитное поле изменялось без резких перепадов, а после этого с 6:00 до 7:00 UT – наблюдалась «изрезанность», и в соответствии с этим наблюдались четкие периодические хоровые спектральные элементы (3b, 3c).

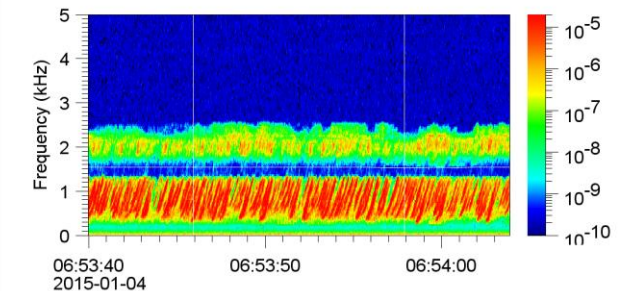
(3 а)



(3 б)



(3 в)





Количественные характеристики условий наблюдения ОНЧ хоров в областях их возбуждения с «изрезанным» геомагнитным полем по данным с космического аппарата

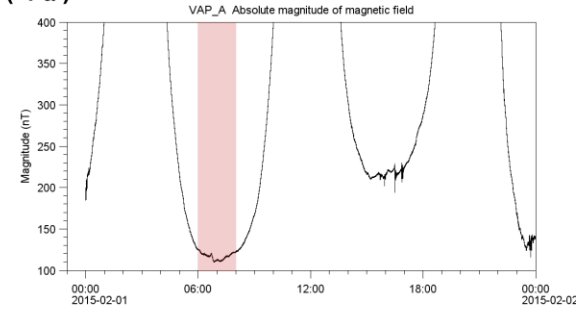
Сопоставление данных наблюдений космических аппаратов Van Allen probe A, B

7

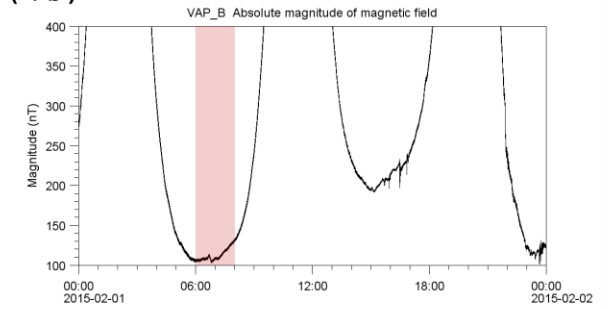
Сопоставление данных наблюдений космических аппаратов Van Allen probe A, B

- На рисунке приведен пример всплеска хоров, зарегистрированного аппаратами Van Allen probe A и B 2 января 2015 года между 6:40 и 6:45 UT. Всплеск наблюдался в нижней полосе с частотами ниже половины минимальной электронной циклотронной частоты. Приведенные графики магнитного поля имеют сходные детали, что указывает на неволновую природу «изрезанности» геомагнитного поля и показывает большую пространственную область одновременного возбуждения хоров.

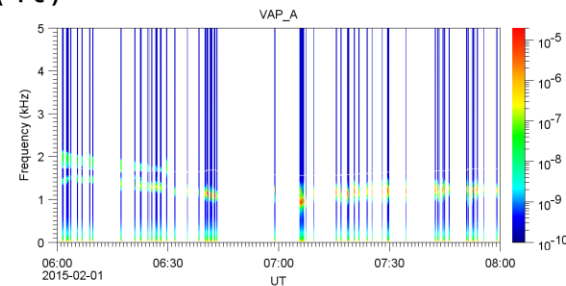
(4 a)



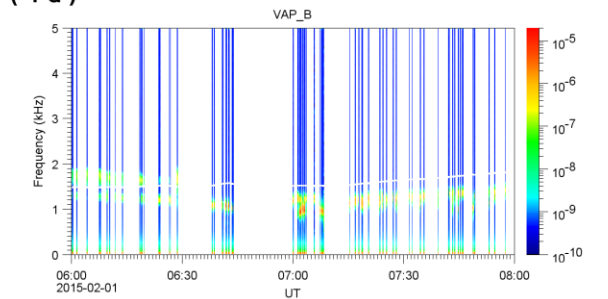
(4 b)



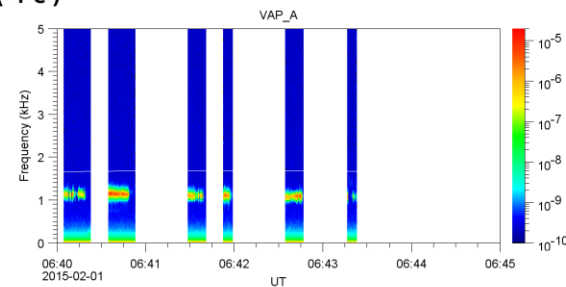
(4 c)



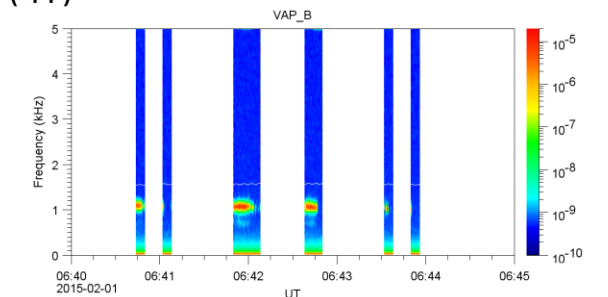
(4 d)



(4 e)



(4 f)



Пример события с хоровыми излучениями, зафиксированными космическими аппаратами Van Allen probe A и B 2 января 2015 года между 6:40 и 6:45 UT



Предлагаемая модель и некоторые доводы в ее поддержку

- По нашему мнению, как «изрезанность», так и хоры после магнитных возмущений имеют общий источник - электроны с энергиями порядка 10 кэВ, дрейфующие с ночной стороны на вечернюю в неоднородном изогнутом геомагнитном поле. Можно предположить, что поток электронов имеет мелкомасштабную неоднородности в поперечном направлении из-за развития дрейфовой неустойчивости. При этом в плазме возникает система квазистационарных направленных в азимутальном направлении токов

$$\vec{j} = \frac{\beta_e c}{8\pi} \left[\frac{\vec{B}}{B}, \nabla B \right]$$

- Величина плазменного параметра неоднородна поперек трубки магнитного поля, а ее максимальные значения не слишком маленькие $\beta_e \approx 0.1$. При этом можно объяснить величину скачков магнитного поля и возбуждение хоров посредством реализации ВРА механизма усиления коротких электромагнитных импульсов электромагнитных волн (Bespalov and Savina, 2021).



Заключение

- При работе с данными наблюдений, полученными в результате миссии Van Allen probe нами была обнаружена зависимость наличия ОНЧ электромагнитных излучений с хоровой структурой динамического спектра от наличия «изрезанности» геомагнитного поля вблизи его локальных минимумов. При наличии «изрезанности» вероятность обнаружения хоров более 70%, а при отсутствии или очень низкой «изрезанности» вероятность отсутствия каких-либо излучений около 80%. Кроме того, сделаны следующие выводы:
- Анализ данных с двух космических аппаратов показал, что «изрезанность» имеет не волновой, а структурный характер и, вероятно, связана с квазистационарными токами.
- Предложена модель, которая объясняет общую природу «изрезанности» и причины возбуждения хоров.
- Сделана оценка величины электронного плазменного параметра, ответственного за «изрезанность» геомагнитного поля на уровне $\beta_e \geq 0.1$.



Список литературы

- Bell T.F., Inan U.S., Hague N., Pickett J.S. Source regions of banded chorus // *Geophys. Res. Lett.* V 36. L11101. 2009, doi: 10.1029/2009GL037629;
- Agapitov O., Blum L.W., Mozer F.S., Bonnell J.W., Wygant J. Chorus whistler wave source scales as determined from multipoint Van Allen Probe measurements // *Geophys. Res. Lett.* V. 44. P. 2634–2642. 2017, doi: 10.1002/2017GL072701
- P.A. Bespalov, O.N. Savina. Electromagnetic pulse amplification in a magnetized nearly stable plasma layer. *Results in Physics* 28 (2021) 104607. doi:10.1016/j.rinp.2021.104607
- Kasahara, Y., Miyoshi, Y., Omura, Y., Verkhoglyadova, O.P., Nagano, I., Kimura, I., Tsurutani, B.T., 2009. Simultaneous satellite observations of VLF chorus, hot and relativistic electrons in a magnetic storm "recovery" phase. *Geophysical Research Letters*. 36, L01106. doi: 10.1029/2008GL036454.