

С «ИЗРЕЗАННЫМ» ГЕОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Жаравина П.Д.¹, Савина О.Н.², Беспалов П.А.^{1,2}

¹ ИФФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, pdzharavina@edu.hse.ru

² НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия



Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова
Российской академии наук

1 Аннотация

В работе представлена обнаруженная нами зависимость вероятности возбуждения ОНЧ электромагнитных излучений с хоровой структурой динамического спектра от «изрезанности» магнитного поля, представляющей собой резкие колебания величины магнитного поля вблизи его локальных минимумов. Именно в этой области, вне плазмосферы, возбуждаются изучаемые излучения. При наличии «изрезанности» вероятность обнаружения хоров более 70%, а при отсутствии или очень низкой «изрезанности» вероятность отсутствия каких-либо излучений около 80%. Эти выводы сделаны в результате обработки данных, накопленных при выполнении миссии Van Allen Probes. Собрана большая база данных с динамическими спектрами излучений в условиях, когда аппарат Van Allen Probe A находился в зоне возможного возбуждения хоров вблизи локального минимума магнитного поля. Например, за январь 2015 года было проанализировано 78 событий, для которых имеются данные высокого разрешения. Из этих событий 95% согласуются с установленной закономерностью. Для некоторых событий зависимость вероятности возбуждения хоров от «изрезанности» магнитного поля была проверена по данным наблюдений с космического аппарата Van Allen Probe B. В работе предложен способ количественного определения степени «изрезанности» магнитного поля. Отмечена возможность объяснения установленной закономерности в условиях реализации BPA (beam pulse amplifier) механизма возбуждения хоров.

2 Введение

Хорошо известно, что за плазмопаузой при $\omega_p/\omega_B \approx 5$ обычно в утреннем и предполуденном секторах средней магнитосферы возбуждаются хоровые излучения свистового диапазона с частотами порядка нескольких килогерц и периодами повторения дискретных спектральных элементов в десятые доли секунды. Согласно экспериментальным данным с космических аппаратов CLUSTER, THEMIS и Van Allen Probe хоры возбуждаются в области, имеющей форму вытянутой вдоль магнитного поля «сигары» длиной порядка 2000 км и средним диаметром 300 км (Bell et al., 2009; Agapitov et al., 2017) вблизи локального минимума магнитного поля. Обычно хоры в области возбуждения представляют собой дискретные излучения в двух спектральных полосах с центром несколько ниже половины минимальной электронной циклотронной частоты для рассматриваемой магнитной трубки. Согласно морфологическим исследованиям, хоры возбуждаются сравнительно низкоэнергичными (10–20 кэВ) электронами радиационных поясов (Kasahara et al., 2009).

Полученные в работе результаты согласуются с выводами BPA (beam pulse amplifier) модели возбуждения хоров (Bespalov and Savina, 2021), согласно которой основной причиной их возбуждения является не слишком малое значение электронного плазменного параметра $\beta_e = 8\pi P_e/B^2$ в разреженной магнитосфере.

4 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.

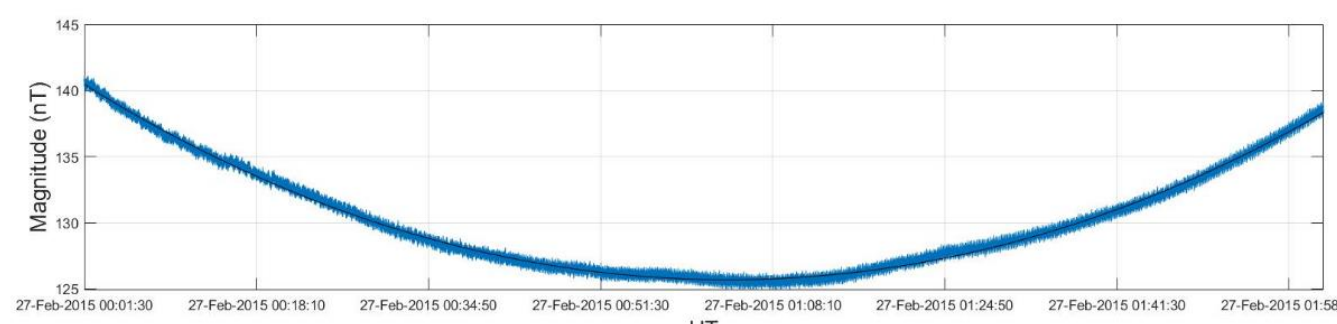
Показатель «изрезанности» i можно разделить на два промежутка: $0 < i \leq 0.5$, где наименьшая вероятность обнаружения излучений и $i \geq 0.5$, где более вероятно обнаружить хоровые излучения.

На рисунке (2a) степень «изрезанности» по предложенному алгоритму равна $i = 5.7210$, а на рисунке (2b) – $i = 0.2360$. Следовательно, можно предположить, что событие (2a) вероятнее имеет излучения, а событие (2b) имеет маленькую вероятность наблюдения хоровых излучений.

(2 a)

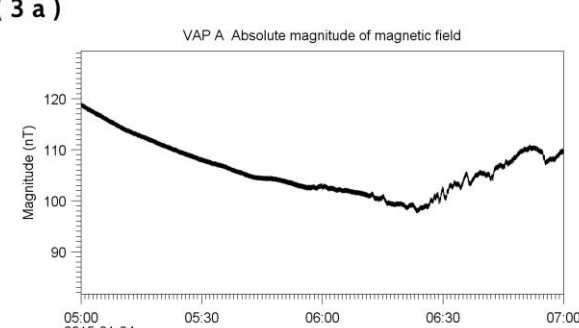


(2 b)

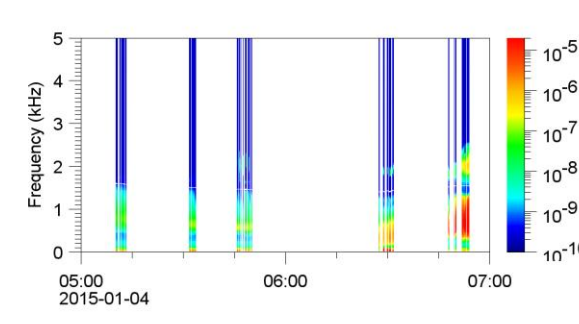


5 Результаты статистической обработки данных наблюдений

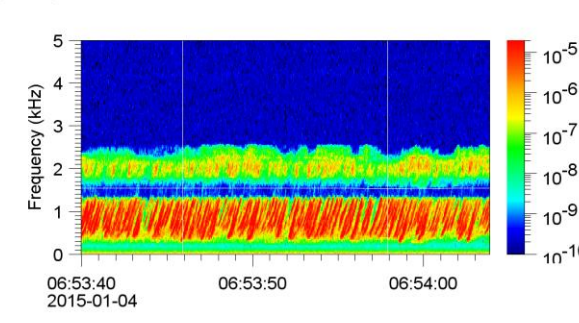
(3 a)



(3 b)



(3 c)



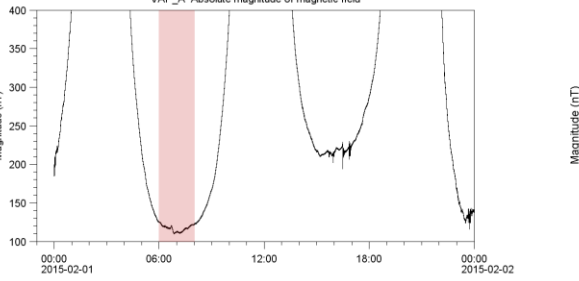
Для проверки и совершенствования теории было проанализировано 152 события за январь, февраль и ноябрь 2015 года, для которых доступны волновые данные прибора EMFISIS высокого разрешения. События представляют собой данные за 2 – 4 часа вблизи локального минимума магнитного поля: 58 не имеют «изрезанности» из которых 81% имеют спектр вида (1f), 94 имеют «изрезанность» из которых 66% имеют излучения разного вида.

На рисунке представлен пример, описывающий предполагаемую теорию. На графике (3a) 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).

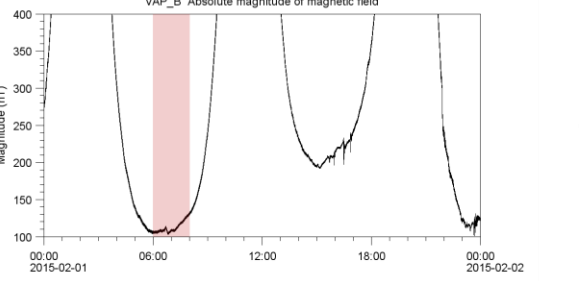
6 Сопоставление данных наблюдений космических аппаратов Van Allen Probe A, B

Сопоставление данных двух космических аппаратов полезно по двум причинам. Во-первых, оно позволяет сделать вывод о том, что «изрезанность» магнитного поля не волновая, а обусловлена квазистационарными токами в плазме. Во-вторых, она расширяет базу данных для статистической обработки связи «изрезанности» с вероятностью возбуждения хоров. 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.

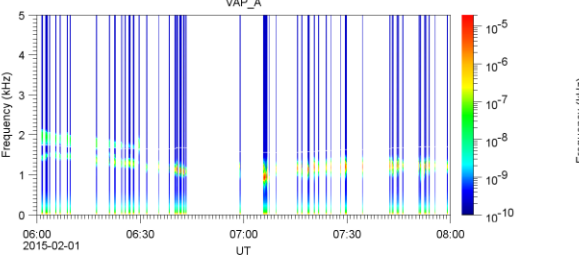
(4 a)



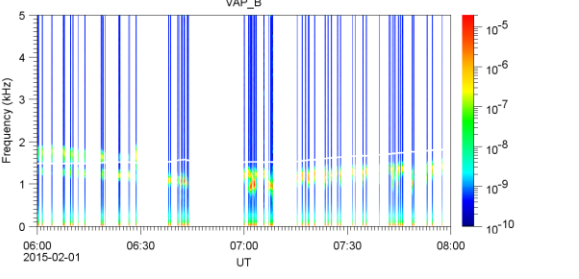
(4 b)



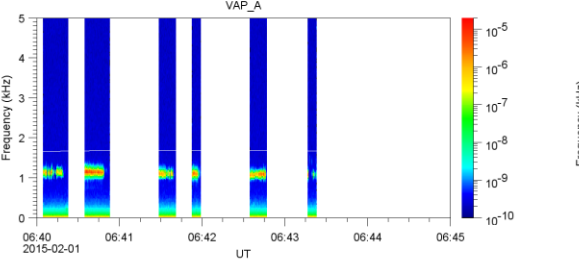
(4 c)



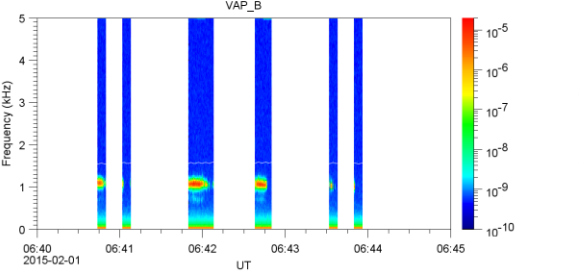
(4 d)



(4 e)



(4 f)



На рисунке пример события с хоровыми излучениями, зафиксированными космическими аппаратами Van Allen probe A и Van Allen probe B 2 января 2015 года между 6:40 и 6:45 UT. Событие наблюдалось в полосе частот ниже $F_{ce}/2$. Временные интервалы у подобных графиков соответствуют одновременным измерениям двумя аппаратами.

7 Предлагаемая модель и некоторые доводы в ее поддержку

По нашему мнению, как «изрезанность», так и хоры, возникающие после магнитных возмущений, имеют общий источник в виде электронов с энергиями порядка 10 кэВ, дрейфующих с утренней стороны магнитосферы на вечернюю в неоднородном изогнутом геомагнитном поле. Можно предположить, что поток электронов имеет мелкомасштабные неоднородности в поперечном к магнитному полю направлении. При такой неволновой «изрезанности» в сравнительно спокойных условиях выполняется баланс давлений в поперечном направлении

$$P = P_e + P_i + \frac{B^2}{8\pi} = const.$$

Отсюда $\delta P_e + 2 \frac{B}{8\pi} \delta B = 0$ и следовательно

$$\delta \beta_e = \frac{8\pi \delta P_e}{B^2} - 2 \frac{8\pi P_e \delta B}{B^3} = -2(1 + \beta_e) \frac{\delta B}{B}.$$

Для макроскопической устойчивости средней магнитосферы должно быть $\beta_e \ll 1$. Поэтому мы получаем простую оценку для вариации

$$\delta \beta_e = -2 \frac{\delta B}{B},$$

обусловленной наличием в магнитосфере системы квазистационарных токов. Отсюда можно сделать заключение, что величина плазменного параметра неоднородна поперек трубки магнитного поля, и его максимальные значения не слишком маленькие $\beta_e \approx 0.1$. При этом можно объяснить величину скачков магнитного поля и возбуждение хоров посредством реализации BPA механизма усиления коротких электромагнитных импульсов электромагнитных волн (Bespalov and Savina, 2021) за пределами плазмопаузы при не слишком малых значениях электронного плазменного параметра. Отметим, что для заметно больших значений плазменного параметра магнитосферная конфигурация теряет устойчивость, и условия возбуждения хоров перестают выполняться.

8 Заключение

При работе с данными наблюдений, полученными в результате миссии Van Allen Probe, нами была обнаружена связь наличия ОНЧ электромагнитных излучений с хоровой структурой динамического спектра и «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.
- Проведена оценка величины электронного плазменного параметра, ответственного за «изрезанность» геомагнитного поля на уровне $\beta_e \approx 0.1$.
- Полученные результаты подтверждают реализацию BPA механизма возбуждения хоров посредством усиления коротких шумовых электромагнитных импульсов.

9 Список литературы

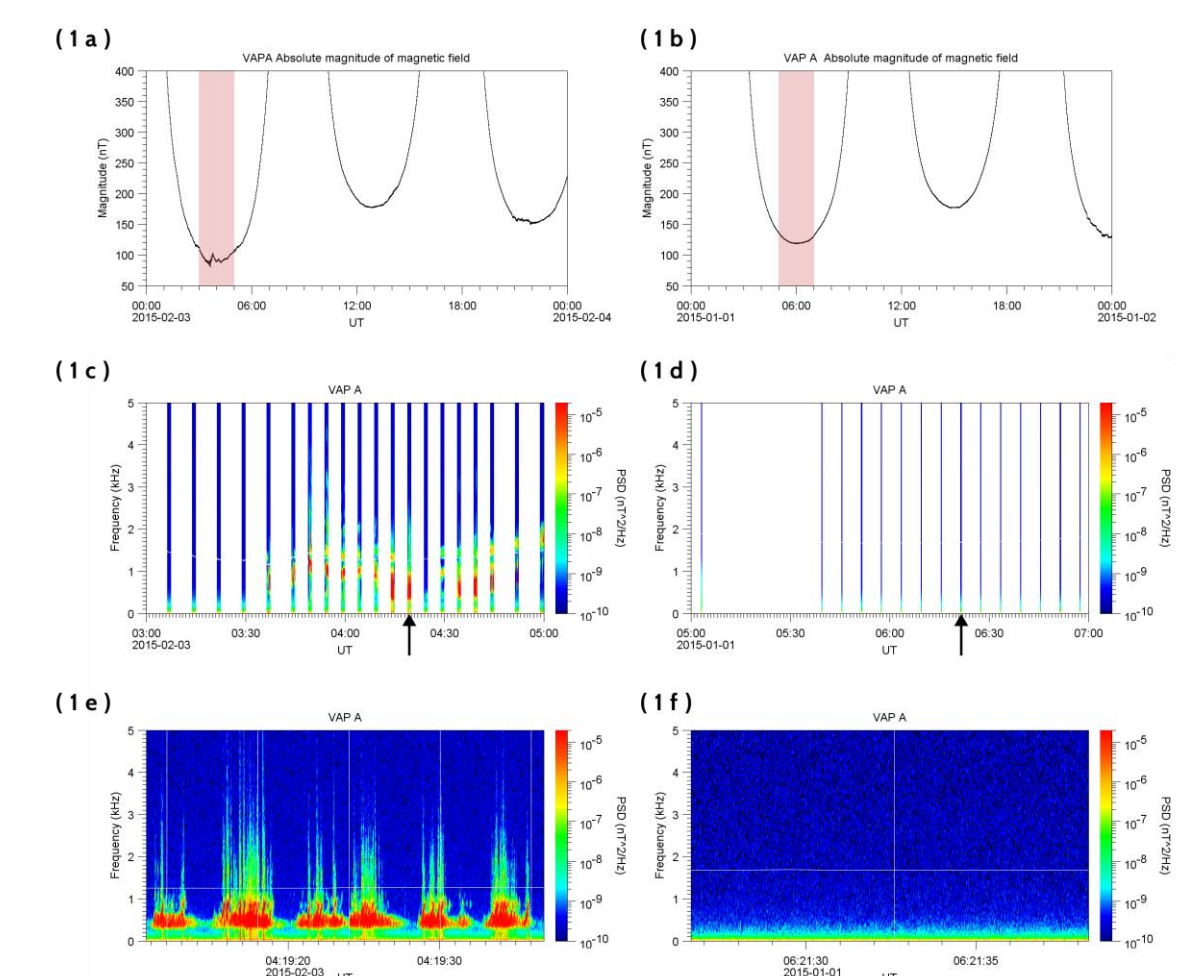
Bell T.F., Inan U.S., Hague N., Pickett J.S. Source regions of banded chorus // Geophys. Res. Lett. V 36. L11101. 2009, doi: 10.1029/2009GL037629

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

3 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, которые согласуются с выводами BPA модели возбуждения хоров. На графике (1a) в промежуток времени с

3:00 до 5:00 UT магнитное поле имело «изрезанность», и в это же время наблюдались четкие периодические хоровые спектральные элементы (1c, 1e). На графике (1b) представлена ситуация, когда магнитное поле со временем менялось плавно и хоровые излучения не наблюдались.