

ЗАВИСИМОСТЬ ВЫСЫПАНИЙ ЭНЕРГИЧНЫХ ПРОТОНОВ ЭКВАТОРИАЛЬНОЕ ГРАНИЦЫ ИЗОТРОПИИ ПОТОКОВ ОТ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

Н.В. Семенова¹, А.Г. Яхнин¹, Т.А. Яхнина¹, А.Г. Демехов^{1,2}

¹Полярный геофизический институт, Апатиты

²Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Аннотация. Построены распределения вероятности наблюдения высыпаний энергичных протонов, связанных с ионно-циклотронной (ИЦ) неустойчивостью, в зависимости от AE-индекса геомагнитной активности. Эти высыпания регистрируются низкоорбитальными спутниками в зоне, где потоки энергичных частиц анизотропны. Показано, что при росте геомагнитной активности от слабой ($AE < 100$ нТл) до умеренной ($100 < AE < 300$ нТл) вероятность наблюдения высыпаний в дневной области за геостационарной орбитой (где наблюдаются максимальные значения вероятности наблюдения) растет, а при высокой активности ($AE > 300$ нТл) - уменьшается. Высказано предположение, что это является следствием двух конкурирующих факторов: 1) роста потока энергичных протонов в результате инъекций частиц во внутреннюю магнитосферу во время возмущений, и 2) уменьшения радиального градиента потока частиц, также связанного с инъекциями. Первый фактор ведет к росту инкремента ИЦ неустойчивости, а второй — к его уменьшению за счет уменьшения поперечной анизотропии в дневном секторе, которая вызвана расщеплением дрейфовых оболочек и поэтому зависит от радиального градиента потока частиц.

Введение

В работе [Семенова и др., 2017] построено глобальное распределение интенсивности протонных высыпаний, которые наблюдаются к экватору от границы изотропных потоков. Согласно общепринятому представлению, такие протонные высыпания обусловлены развитием ИЦ неустойчивости в приэкваториальной магнитосфере [например, Yahnin and Yahnina, 2007]. Особенностью распределения, полученного в работе [Семенова и др., 2017] является то, что наибольшая вероятность наблюдения таких высыпаний (~20%) находится во внешней магнитосфере на дневной стороне. Это согласуется со статистикой наблюдений ионно-циклотронных волн в магнитосфере. Максимум вероятности наблюдений ЭМИЦ волн (~10-20%) также находится на дневной стороне на больших расстояниях от Земли (за геостационарной орбитой - $6.6 R_E$) [Anderson et al., 1992; Usanova et al., 2012; Keika et al., 2013]. На расстояниях 3-5 R_E (в области плазмопаузы) вероятность наблюдения ЭМИЦ волн и протонных высыпаний приблизительно на порядок меньше. Сходство распределений ЭМИЦ волн и протонных высыпаний подтверждает предположение об их общем источнике — ионно-циклотронной неустойчивости, которая развивается в приэкваториальной магнитосфере при наличии поперечной анизотропии температур энергичных ионов [Сагдеев, Шафранов, 1960; Kennel and Petschek, 1966; Cornwall et al., 1970].

Дневной максимум в распределении вероятности наблюдения ЭМИЦ волн и высыпаний протонов естественно связать с наличием на дневной стороне магнитосферы области повышенной анизотропии энергичных протонов [например, Usanova et al., 2012]. Такая область может образоваться в результате расщепления дрейфовых оболочек, которое происходит в асимметричном магнитном поле магнитосферы [Shabansky, 1965; Roederer, 1967; Sibeck et al., 1987]. Частицы с разными питч-углами, стартующие на ночной стороне из одной точки, дрейфуют в магнитном поле Земли по разным дрейфовым оболочкам. Частицы, которые на ночной стороне имели большие питч-углы, на дневной стороне оказываются на больших расстояниях от Земли. При наличии отрицательного радиального градиента концентрации горячих протонов на ночной стороне это приводит к формированию на дневной стороне, на достаточно больших расстояниях от Земли области поперечной анизотропии энергичных заряженных частиц.

Асимметрия магнитного поля обусловлена постоянно существующим динамическим давлением солнечного ветра. Рост давления приводит к росту асимметрии и, как следствие, к увеличению области поперечной анизотропии энергичных частиц на дневной стороне и к росту самой анизотропии. Соответственно на дневной стороне растет вероятность наблюдения ЭМИЦ волн [Usanova et al., 2012] и высыпаний протонов [Семенова и др., 2017].

Кроме зависимости от динамического давления солнечного ветра, авторы работы [Usanova et al., 2012] рассмотрели зависимость вероятности наблюдения ЭМИЦ волн от геомагнитной активности. Сделан вывод, что вероятность наблюдения ЭМИЦ волн в дневной магнитосфере увеличивается с ростом геомагнитной активности. В данной работе мы рассмотрим аналогичную зависимость для высыпаний энергичных протонов и сопоставим полученные результаты с результатами работы [Usanova et al., 2012].

Данные и результаты

В работе [Семенова и др., 2017] использованы наблюдения потоков энергичных протонов на четырех спутниках NOAA POES за июль-август 2005 г. В данной работе для увеличения статистики мы расширили интервал наблюдений на тех же спутниках по декабрь 2005 г. Таким образом, общее число пересечений спутниками субавроральных широт, где наблюдаются рассматриваемые высыпания, составило 42182. Число событий протонных высыпаний к экватору от границы изотропии составило ~ 13000 . Описание методики обработки данных можно найти в работе [Семенова и др., 2017]. Для удобства сопоставления с результатами исследования ЭМИЦ волн в экваториальной магнитосфере, наблюдения низкоорбитальных спутников были спроектированы в магнитосферу с использованием модели IGRF. Вероятность наблюдения определялась в ячейках с размерами 1 час MLT – 0.5 Re как отношение суммарного времени наблюдения протонных высыпаний к общему времени нахождения спутников в ячейке. Данные были разбиты на группы, соответствующие определенным уровням индекса геомагнитной активности и динамического давления солнечного ветра.

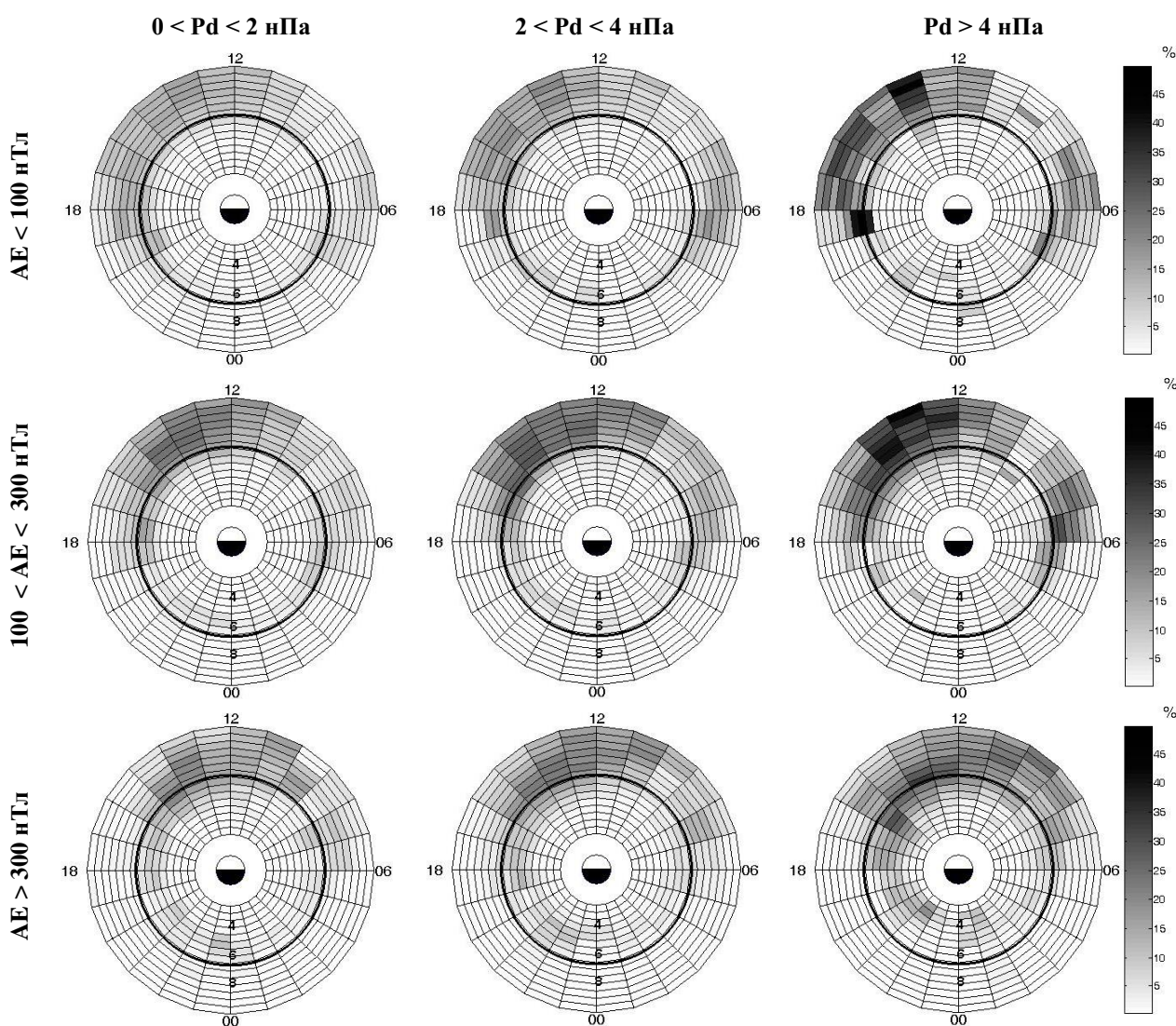


Рисунок 1. Распределение вероятности наблюдения высыпаний энергичных протонов в анизотропной зоне в проекции на экваториальную плоскость для трех уровней динамического давления солнечного ветра и AE-индекса геомагнитной активности. Жирной линией показано положение геосинхронной орбиты ($L=6.6$).

На рис. 1 показаны распределения вероятности наблюдения протонных высыпаний от динамического давления солнечного ветра и AE-индекса геомагнитной активности. Глобальное распределение вероятности наблюдения протонных высыпаний, полученное на большей статистике, показало те же особенности, что и в работе Семеновой и др. [2017]. То же можно сказать о зависимости от динамического давления солнечного

ветра. При увеличении динамического давления вероятность наблюдения протонных высыпаний растет при любой геомагнитной активности. Что касается зависимости от АЕ индекса, то для любого уровня динамического давления при $100 < \text{АЕ} < 300$ нТл вероятность наблюдения высыпаний протонов на дневной стороне больше чем при $\text{АЕ} < 100$ нТл, но при дальнейшем росте геомагнитной активности она уменьшается.

Обсуждение

Глобальная картина высыпаний протонов, как и зависимость от динамического давления солнечного ветра, находится в согласии с данными о распределении ЭМИЦ волн в магнитосфере. В то же время, зависимость от индексов геомагнитной активности несколько отличается от той, что получена для ЭМИЦ волн. Действительно, в работе [Usanova et al., 2012; рис. 8] показано, что вероятность наблюдений ЭМИЦ волн монотонно увеличивается с ростом АЕ индекса. Наш результат показывает, что при умеренной геомагнитной активности аналогичная зависимость существует и для высыпаний энергичных протонов, но дальнейший рост активности приводит к уменьшению вероятности наблюдения высыпаний на дневной стороне и к сокращению пространственных размеров области с повышенной вероятностью протонных высыпаний.

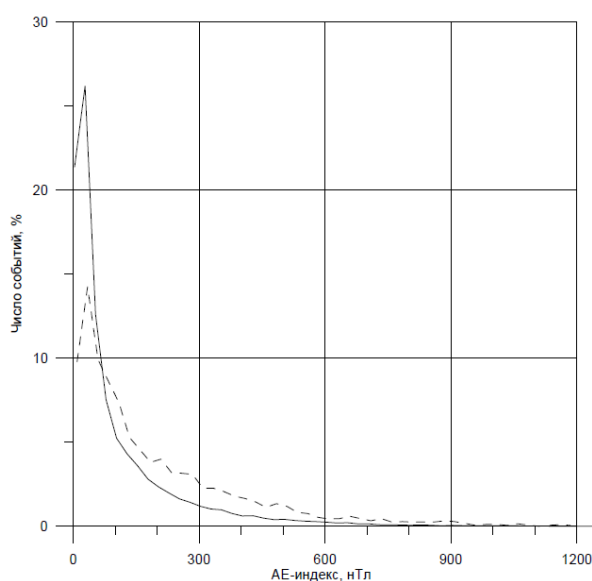


Рисунок 2. Плотность вероятности распределения АЕ-индекса для интервала июль-декабрь 2005 г. (пунктирная линия) и для интервала май-декабрь 2011 г. (сплошная линия).

Уменьшение вероятности наблюдений высыпаний протонов на дневной стороне при большой геомагнитной активности согласуется с наблюдениями дневных высыпаний протонов в анизотропной зоне во время большой геомагнитной бури ноября 2003 г. Было показано [Яхнина и Яхнин, 2014, рис. 2], что во время максимума геомагнитного возмущения число событий высыпаний протонов на дневной стороне резко упало по сравнению с интервалом перед бурей и фазой восстановления бури. Это интерпретировалось как результат инжекций частиц из хвоста во внутреннюю магнитосферу, которые уменьшают радиальный градиент потоков энергичных протонов на ночной стороне. В свою очередь это приводит к уменьшению поперечной анизотропии на дневной стороне (см. рис. 7 и обсуждение в разделе 4.1.3 в работе [Wang et al., 2012]) и, как следствие, к уменьшению инкремента ИЦ неустойчивости, амплитуды ЭМИЦ волн и коэффициента питч-угловой диффузии протонов.

С другой стороны, инжекции на ночной стороне увеличивают поток частиц (протонов), которые дрейфуют на дневную сторону. Рост потока должен приводить к росту инкремента ИЦ неустойчивости (при наличии поперечной анизотропии) [Сагдеев, Шафранов, 1960; Kennel and Petschek, 1966]. Таким образом, инжекции на ночной стороне приводят к двум «конкурирующим» процессам, оказывающим противоположное влияние на инкремент ИЦ неустойчивости.

По-видимому, умеренная геомагнитная активность не приводит к существенному выравниванию радиального распределения потока на ночной стороне и, соответственно, к уменьшению поперечной анизотропии на дневной стороне. Инкремент ИЦ неустойчивости растет за счет увеличения потока протонов. При больших возмущениях, радиальный градиент потока протонов на ночной стороне уменьшается, что приводит к уменьшению поперечной анизотропии на дневной стороне и к уменьшению инкремента ИЦ неустойчивости.

Чтобы ответить на вопрос, в чем причина расхождений результата данной работы с результатом работы [Usanova et al., 2012], мы рассмотрели различия в геомагнитной активности для интервалов наблюдений, использованных в этих работах. На рис. 2 приведено сравнение нормализованных распределений АЕ индекса для интервала 2007-2011 гг. [Usanova et al., 2012] и для интервала июль-декабрь 2005 г. (данная работа). Видно,

что первый интервал был менее возмущенным; медианное значение AE-индекса было равно 74 нТл (в 2005 г. оно составляло 134 нТл). В частности, в 2005 г. доля больших возмущений с $AE > 300$ нТл составляла 23%, в то время как в 2007-2011 гг. только 13% (для $AE > 500$ нТл – 9.2% и 4.8%, соответственно). Таким образом, вклад больших возмущений в характер зависимости вероятности наблюдений ЭМИЦ волн от AE-индекса, приведенной в работе [Usanova et al., 2012], меньше, чем вклад таких возмущений в нашей статистике.

Выводы

Распределение вероятности наблюдения высыпаний протонов, полученное на большей статистике, подтверждает полученный ранее результат о наличии максимума вероятности на дневной стороне. Показано, что максимальная вероятность наблюдения высыпаний протонов растет при увеличении давления солнечного ветра, независимо от уровня геомагнитной активности. Характер зависимости от геомагнитной активности остается подобным при любых значениях давления солнечного ветра, а именно: при переходе от слабой активности к умеренной вероятность растет, а во время больших возмущений – уменьшается. Такое поведение можно объяснить действием двух «конкурирующих» процессов, обусловленных инжекциями энергичных протонов на ночной стороне. С одной стороны, при инжекциях растет поток частиц, что приводит к росту инкремента ИЦ неустойчивости. С другой стороны, уменьшается радиальный градиент потока частиц на ночной стороне, что приводит к уменьшению поперечной анизотропии протонов на дневной стороне.

Благодарности. Авторы благодарят NOAA за свободный доступ к данным спутников POES. Работа Н.В. Семеновой, А.Г. Яхнина и А.Г. Демехова поддержана грантом РФФИ №15-12-20005.

Список литературы

- Anderson B.J., R.E. Erlandson, L.J. Zanetti (1992), A statistical study of Pc1–2 magnetic pulsations in the equatorial magnetosphere, 1. Equatorial occurrence distributions, *J. Geophys. Res.*, 97(A3), 3075–3088, doi:10.1029/91JA02706.
- Cornwall J.M., F.V. Coroniti, R.M. Thorne (1970), Turbulent loss of ring current protons, *J. Geophys. Res.*, 75, 4699.
- Keika K., K. Takahashi, A.Y. Ukhorskiy, Y. Miyoshi (2013), Global characteristics of electromagnetic ion cyclotron waves: Occurrence rate and its storm dependence, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 118, doi:10.1002/jgra.50385.
- Kennel C.F. and H.E. Petschek (1966), Limit of stably trapped particle fluxes, *J. Geophys. Res.*, 71(1), 1–28.
- Roederer J.G. (1967), On the adiabatic motion of energetic particles in a model magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 72, 981–992.
- Sibeck, D.G., R.W. McEntire, A.T.Y. Lui, R.E. Lopez, and S.M. Krimigis (1987), Magnetic field drift shell splitting—Cause of unusual dayside particle pitch angle distributions during storms and substorms, *J. Geophys. Res.*, 92, 13,485–13,497, doi:10.1029/JA092iA12p13485.
- Shabansky, V. P. (1965) On the first phase of a magnetic storm, in: Space Research V, Proc. of the Fifth Space Science Symposium, North-Holland Publishing Company, New York, 1965, p.125.
- Usanova M.E., I.R. Mann, J. Bortnik, L. Shao (2012), Angelopoulos V. THEMIS observations of electromagnetic ion cyclotron wave occurrence: Dependence on AE, SYMH, and solar wind dynamic pressure, *J. Geophys. Res.*, 117, A10218, doi:10.1029/2012JA018049.
- Wang C.P., S.G. Zaharia, L.R. Lyons, V. Angelopoulos (2012), Spatial distributions of ion pitch angle anisotropy in the near-Earth magnetosphere and tail plasma sheet, *J. Geophys. Res.*, 118, 244–255, doi:10.1029/2012JA018275.
- Yahnin, A.G. and T.A. Yahnina (2007), Energetic proton precipitation related to ion-cyclotron waves, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 69, 1690–1706, doi:10.1016/j.jstnp.2007.02.
- Сагдеев Р.З., В.Д. Шафранов (1960), О неустойчивости плазмы с анизотропным распределением скоростей в магнитном поле, *ЖЭТФ*, Т. 39, № 1, 181-184.
- Семенова Н.В., Т.А. Яхнина, А.Г. Яхнин, А.Г. Демехов (2017), Глобальное распределение высыпаний энергичных протонов к экватору от границы изотропных потоков, *Геомагнетизм и аэронавигация*, 57, №4, 433-440.
- Яхнина Т.А., А.Г. Яхнин (2014), Протонные высыпания к экватору от изотропной границы во время геомагнитной бури 20-29 ноября 2003 года, *Космические исследования*, 52, № 1, 82–88.