

ОСОБЕННОСТИ МОРФОЛОГИИ ВЫСЫПАНИЙ ЭНЕРГИЧНЫХ ПРОТОНОВ К ЭКВАТОРУ ОТ ГРАНИЦЫ ИЗОТРОПИИ ПО ДАННЫМ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ

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

¹Полярный геофизический институт, г. Апатиты

²Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

e-mail: nadezhda.semenova@gmail.com

Аннотация. По данным спутника NOAA POES впервые построено глобальное распределение вероятности наблюдения высыпаний энергичных протонов ($E > 30$ кэВ) к экватору от границы изотропных потоков. Показано, что частота наблюдения протонных высыпаний внутри зоны анизотропных потоков максимальна в дневные часы на $L=6-9$ и уменьшается в вечерние и утренние часы. Сопоставление полученных результатов о протонных высыпаниях с пространственным распределением вероятности наблюдения электромагнитных ионно-циклотронных (ЭМИЦ) волн в экваториальной магнитосфере демонстрирует их тесную взаимосвязь. Это подтверждает, что высыпания энергичных протонов к экватору от границы изотропии являются следствием развития ионно-циклотронной неустойчивости в экваториальной магнитосфере.

Введение. В магнитосфере Земли можно выделить области с изотропным и анизотропным распределением потоков заряженных частиц по питч-углам. Границы этих областей зависят от сорта и энергии частиц. Изотропные потоки (включая потоки в конусе потерь) формируются на более высоких инвариантных широтах вследствие питч-углового рассеяния частиц в областях слабого магнитного поля с большой кривизной силовых линий [например, Sergeev et al., 1993]. Во внутренних областях магнитосферы движение частиц адиабатическое, а потоки частиц анизотропные (с пустым конусом потерь). Появление высыпающихся частиц к экватору от зоны изотропных потоков (границы изотропии, ГИ) обусловлено рассеянием частиц на волнах [например, Yahnina et al., 2003]. В частности, к эффективной диффузии протонов по питч-углам, которая приводит к заполнению конуса потерь, т.е. к высыпанию частиц, приводит их взаимодействие с электромагнитными ионно-циклотронными (ЭМИЦ) волнами. Генерация этих волн происходит при развитии ионно-циклотронной (ИЦ) неустойчивости, которая возникает вследствие поперечной анизотропии температур ($T_{\perp} > T_{\parallel}$) энергичных протонов, характерной для внутренней магнитосферы.

В работе [Yahnina et al., 2003] авторы рассматривали два типа локализованных ($\sim 1^{\circ}$ широты) высыпаний энергичных (> 30 кэВ) протонов (ЛВЭП) к экватору от ГИ. Используя наблюдения низкоорбитального спутника NOAA, было показано, что высыпания первого типа наблюдаются преимущественно в утреннем секторе; кроме того, в наблюдениях отсутствуют протоны с меньшими энергиями ($E < 20$ кэВ). Такие протоны в дальнейшем условно будем называть низкоэнергичными. Авторы работы [Yahnina et al., 2003] связали этот тип высыпаний с квазимонохроматическими геомагнитными пульсациями Pc1. Высыпания второго типа содержат в спектрах низкоэнергичную компоненту, наблюдаются в вечерние и ночные часы и связаны с колебаниями убывающего периода (КУП или IPDP). И Pc1, и КУП являются проявлениями магнитосферных ЭМИЦ волн в наземных наблюдениях. В целом, корреляция ЛВЭП с ЭМИЦ волнами была найдена почти в 100% событий.

В работе [Ермакова и др., 2015] рассмотрен редкий случай регистрации геомагнитных пульсаций на частотах значительно выше обычного диапазона Pc1, а именно, на частотах до 14 Гц. При этом также наблюдалась корреляция этих пульсаций с «анизотропными» высыпаниями энергичных протонов. Это событие имело место во время сильного геомагнитного возмущения и объясняется генерацией ЭМИЦ волн на необычно низких L оболочках.

Недавно был выделен еще один, третий, тип высыпаний энергичных протонов внутри зоны анизотропных потоков - это протяженные по широте ($> 2^{\circ}$ широты) и долготе (несколько часов MLT) высыпания на широтах $> 65^{\circ}$ на дневной стороне [Яхнина и Яхнин, 2014]. В работе [Яхнина и Яхнин, 2014] связь этих высыпаний с ЭМИЦ волнами не рассматривалась, но указания на то, что эти высыпания также являются результатом ИЦ неустойчивости следуют из результатов работ [Zhang et al., 2008; Engebretson et al., 2015; Попова и др., 2010]. В указанных работах дневные протонные высыпания экваториальнее изотропной границы (определенные либо по данным спутников NOAA, либо по наблюдениям протонных сияний со спутника IMAGE) были сопоставлены с наблюдениями пульсаций диапазона Pc1 или с наблюдениями ЭМИЦ волн в магнитосфере. Таким образом, наблюдения протонных высыпаний к экватору от изотропной границы (как ЛВЭП, так и дневных) могут, по-видимому, служить удаленным индикатором развития ИЦ неустойчивости в магнитосфере, и, соответственно,

могут быть использованы для исследования областей развития неустойчивости с помощью низкоорбитальных космических аппаратов.

В этой работе по данным спутников NOAA мы анализируем глобальное распределение вероятности наблюдения протонных высыпаний к экватору от границы изотропии. Насколько нам известно, подобный статистический анализ для этого явления до сих пор не проводился.

Данные и описание алгоритма обработки. Для анализа высыпаний энергичных ($E > 30$ кэВ) частиц были обработаны данные прибора Space Environment Monitor-2 (SEM-2)/Medium Energy Proton and Electron Detector (MEPED), установленного на спутниках серии NOAA POES, которые имеют достаточно низкую (800-850 км) близкую к круговой полярную орбиту. Этот прибор измеряет потоки высыпающихся и квазизахваченных частиц широкого диапазона энергий. Данные доступны на сайте <http://ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes/> с временным разрешением 2 секунды. Протоны измеряются в нескольких энергетических каналах 30-80 кэВ (P1), 80-250 кэВ (P2), 250-800 кэВ (P3) и т.д. [Evans and Greer, 2004]. В нашей работе использованы данные канала P1. На рис. 1а, б, в приведены примеры измерений энергичных протонов для нескольких пролетов спутника NOAA-18 при пересечении им полярных областей в северном и южном полушариях. Потоки захваченных протонов показаны тонкой линией, высыпающихся – жирной. Область изотропных потоков, где происходит сильное пич-угловое рассеяние энергичных протонов, на рисунке заштрихована. Зона анизотропных потоков не заштрихована. Вертикальной пунктирной линией отмечено положение ГИ. Экваториальнее ГИ можно наблюдать резкое локальное увеличение интенсивности потока «анизотропных» протонных высыпаний. На рисунке эти всплески выделены серым цветом. Узкие изолированные всплески, изображенные на рис. 1а, б, являются типичными локализованными протонными высыпаниями экваториальнее ГИ (ЛВЭП). Представленное на рис. 1в протяженное по широте протонное высыпание, наблюдавшееся в дневном секторе MLT, относится к протонным высыпаниям третьего типа.

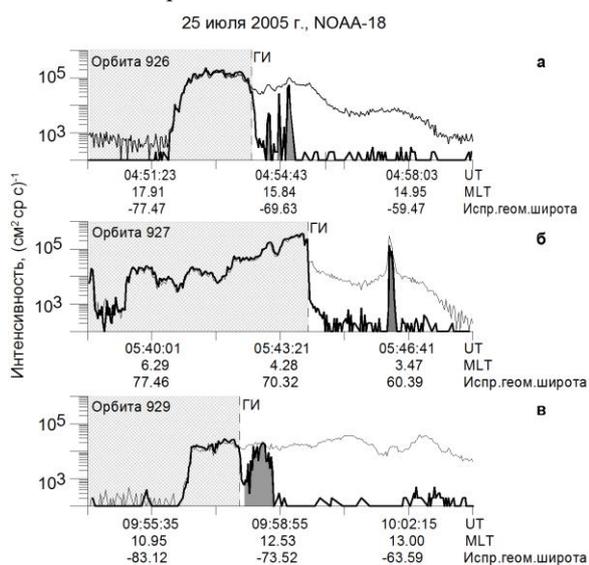


Рисунок 1. Пример наблюдения потоков энергичных протонов для нескольких пролетов спутника NOAA-18. Потоки захваченных протонов показаны тонкой линией, высыпающихся – жирной.

для каждого пролета. Важность визуального определения ГИ обусловлена довольно высокой вероятностью ложного определения этой границы при автоматическом поиске. Чтобы исключить возможное влияние неоднородного магнитного поля на величину конуса потерь, мы не рассматривали события в окрестности Бразильской магнитной аномалии, аналогично тому, как это было сделано в работе [Carson et al., 2012].

Результаты. В рассматриваемом интервале времени было найдено 1173 протонных всплеска экваториальнее ГИ. По этим данным построено пространственное распределение вероятности наблюдения изолированных протонных высыпаний, которое приведено на рис. 2 в проекции на экваториальную плоскость в линейном (рис. 2а) и логарифмическом масштабах (рис. 2б). Вероятность наблюдения определялась как отношение суммарной длительности всплесков, обнаруженных в заданной ячейке, к общему времени нахождения спутников в этой ячейке. Каждая ячейка имеет размеры по радиусу $0.5 R_E$ и 1 час MLT. Черной жирной линией отмечено положение геосинхронной орбиты ($L=6.6$).

Были проанализированы данные измерений энергичных протонов на спутниках NOAA-15, -16, -17, -18 за интервал 25 июля – 23 августа 2005 г. Условия в солнечном ветре для рассматриваемого периода характеризуются небольшими вариациями Vz-компоненты межпланетного магнитного поля (ММП), скорости плазмы и динамического давления солнечного ветра. Геомагнитная активность была умеренной (средние значения индексов $\langle AE \rangle = 227$ нТл, $\langle Kp \rangle * 10 = 21$, $\langle Dst \rangle = -8$ нТл).

Для автоматического поиска анизотропных протонных высыпаний в измерениях спутников был разработан алгоритм, с помощью которого отбирались пики (резкое локальное увеличение амплитуды) в потоках высыпающихся протонов канала P1 в каждом пролете спутника от средних широт до полярной шапки. Для того чтобы сгладить зашумленные данные и выделить узкие пики, рассчитывалось скользящее среднее с окном 10 с (5 точек) для каждого измерения. Изолированным всплеском считался пик длительностью более 4 с, для которого скользящее среднее потока превышало $10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ ster}^{-1}$. Учитывались всплески в обоих полушариях экваториальнее ГИ, которая определялась визуально

Вероятность наблюдения протонных высыпаний внутри зоны анизотропных потоков максимальна (~ 20%) в послеполуденном секторе MLT и уменьшается в вечерние и утренние часы. В околополуденном секторе протонные всплески занимают большую широтную область и чаще всего локализируются за пределами геосинхронной орбиты. Протонные высыпания наблюдаются и в ночные часы, что отчетливо видно на распределении, построенном в логарифмическом масштабе, однако их вероятность не превышает 2%. В ночном секторе MLT высыпания энергичных протонов располагаются внутри геосинхронной орбиты. Найденные протонные всплески покрывают все секторы MLT. Полученная статистическая картина согласуется с долготным распределением числа событий протонных высыпаний (как ЛВЭП, так и дневных) к экватору от ГИ, полученным в работе [Яхнина и Яхнин, 2014] для отдельной бури 18-29 ноября 2003 г.

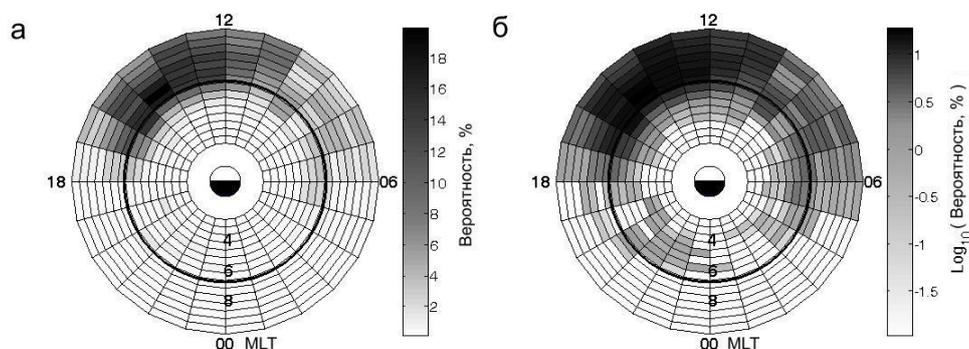


Рисунок 2. Распределение вероятности наблюдения высыпаний энергичных протонов экваториальнее ГИ в проекции на экваториальную плоскость в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабах. Черной жирной линией показано положение геосинхронной орбиты ($L=6.6$).

Обсуждение. Поскольку предполагается связь высыпаний протонов к экватору от ГИ с ЭМИЦ волнами, интересно сопоставить полученное распределение вероятности наблюдения высыпаний с глобальным распределением ЭМИЦ волн в магнитосфере. О последнем, в отличие от глобальной статистики протонных высыпаний, в литературе имеется несколько публикаций. Так, в работе [Usanova et al., 2012] анализируются измерения спутника *THEMIS*. Usanova et al. [2012] показали, что максимум вероятности наблюдения (~ 10%) ЭМИЦ волн находится секторе 12-21 MLT и, преимущественно, на больших L -оболочках (за пределами геосинхронной орбиты). Глобальное распределение вероятности наблюдения ЭМИЦ волн на $L=3-9$ для частот выше и ниже локальной гирочастоты He^+ , построенное по данным спутника *AMPTE/CCE*, представлено в работе Keika et al., [2013]. Это исследование также показало послеполуденный максимум вероятности наблюдения ЭМИЦ волн за геостационарной орбитой. Величина этого максимума составила 25% в полосе между экваториальными значениями гирочастот протонов и ионов гелия (He^+) и < 10% в полосе ниже гирочастоты He^+ . Послеполуденный максимум вероятности наблюдения ЭМИЦ волн был обнаружен в более ранней работе [Anderson et al., 1992], в которой использовались данные с этого же спутника, но за более короткий интервал наблюдений. В работе [Fraser and Nguyen, 2001] по данным спутника *CRRES* также отмечено наличие послеполуденного максимума вероятности наблюдения ЭМИЦ волн в экваториальной магнитосфере и уменьшение вероятности наблюдений в ночные часы. Таким образом, сопоставление морфологии ЭМИЦ волн в экваториальной магнитосфере с полученным нами пространственным распределением протонных высыпаний демонстрирует их подобие и подтверждает связь протонных высыпаний с развитием ИЦ неустойчивости.

Развитие ИЦ неустойчивости в дневном секторе на больших расстояниях от Земли связано, очевидно, с наличием здесь существенной поперечной анизотропии горячих протонов [Wang et al., 2013]. Повышенная поперечная анизотропия энергичных протонов на дневной стороне, по-видимому, обусловлена расщеплением дрейфовых оболочек [Roederer, 1967]. Это явление возникает в асимметричном магнитном поле Земли при наличии радиального градиента потока протонов. Инжектированные на ночной стороне и дрейфующие по азимуту энергичные протоны с большими питч-углами окажутся на дневной стороне на большем расстоянии от Земли, нежели частицы с малыми питч-углами.

Еще одним механизмом, ответственным за повышенную поперечную анизотропию на дневной стороне, является движение энергичных протонов по т.н. орбитам Шабанского [McCollough et al., 2012]. Этот эффект связан с тем, что магнитное поле на дневной стороне может иметь два минимума напряженности магнитного поля вдоль силовой линии из-за поджатия магнитосферы солнечным ветром. Вследствие этого нарушается второй адиабатический инвариант, и дрейфовая оболочка разветвляется на две зоны в южном и северном полушарии, формируя области повышенной поперечной анизотропии [Shabansky, 1971].

Эффекты расщепления дрейфовых оболочек и движения частиц по орбитам Шабанского в развитии поперечной анизотропии сильнее проявляются при высоком динамическом давлении солнечного ветра. С

этим согласуется зависимость вероятности наблюдения ЭМИЦ волн в экваториальной магнитосфере от динамического давления солнечного ветра, которая была показана в работе [Usanova et al., 2012]. Мы также рассмотрели зависимость протонных высыпаний, наблюдаемых экваториальнее ГИ, от величины динамического давления солнечного ветра (эти параметры взяты с сайта базы данных CDAWeb: <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>). На рис. 3 показано распределение частоты наблюдения протонных высыпаний в проекции на экваториальную плоскость для разных MLT и трех уровней динамического давления: $0 < P_{дин} < 2$, $2 < P_{дин} < 4$ и $P_{дин} > 4$ нПа. (Среднее значение уровня динамического давления в исследуемом временном интервале равно 2.4 нПа). Диапазоны давления выбирались таким образом, чтобы количество часов наблюдения событий в каждом интервале было приблизительно одинаковым. Видно, что частота наблюдения высыпаний увеличивается с ростом динамического давления солнечного ветра. В дневные часы (10-15 MLT) за пределами геосинхронной орбиты эта зависимость видна наиболее отчетливо. Так, при $P_{дин} < 2$ нПа максимальная частота наблюдения $\sim 14\%$, а при $P_{дин} > 4$ нПа – $\sim 40\%$. С ростом динамического давления высыпания смещаются в область более низких широт (достигая $L=4$ в полдень и $L=3$ на ночной стороне). Это согласуется с зависимостью вероятности наблюдения ЭМИЦ волн от динамического давления солнечного ветра, исследованной в работе [Usanova et al., 2012].

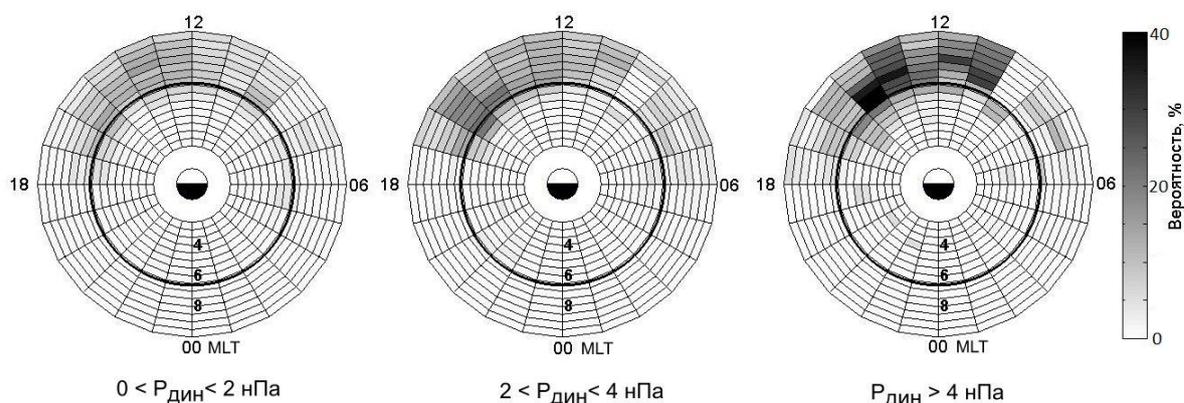


Рисунок 3. Распределение вероятности наблюдения высыпаний энергичных протонов экваториальнее ГИ в проекции на экваториальную плоскость. Черной жирной линией показано положение геосинхронной орбиты ($L=6.6$).

Закключение. На основе данных измерений спутников *NOAA POES* за период 25 июля - 23 августа 2005 г. в данной работе впервые построено глобальное распределение вероятности наблюдения высыпаний энергичных протонов к экватору от границы изотропии потоков. Показано, что частота наблюдения протонных высыпаний максимальна в дневном секторе MLT в протяженной по широте области за пределами геосинхронной орбиты. Сравнение полученных результатов с глобальным распределением вероятности наблюдения ЭМИЦ волн, построенных разными авторами по результатам наблюдений на спутниках *THEMIS*, *AMPTE* и *CRESS*, демонстрирует хорошее соответствие этих распределений. Это подтверждает, что высыпания энергичных протонов к экватору от ГИ являются следствием развития ИЦ неустойчивости в экваториальной магнитосфере. Таким образом, протонные высыпания могут служить индикатором развития ИЦ неустойчивости и могут быть использованы для исследования взаимодействия волн и частиц в магнитосфере с помощью низкоорбитальных космических аппаратов.

Благодарности. Авторы благодарят *NOAA* за доступ к данным спутников серии *POES*. Данные о динамическом давлении солнечного ветра получены через сервис CDAWeb. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-12-20005.

Список литературы

- Ермакова Е. Н., Яхнин А. Г., Яхнина Т. А., Демехов А. Г., Котик Д. С. Спорадические геомагнитные пульсации на частотах до 15 Гц в период магнитной бури 7–14 ноября 2004 года: особенности амплитудных и поляризационных спектров и связь с ионно-циклотронными волнами в магнитосфере // Известия вузов. Радиофизика. Т. 58, №8. С. 607-622. 2015.
- Попова Т.А., Яхнин А.Г., Яхнина Т.А., Фрей Х. Взаимосвязь между резкими увеличениями динамического давления солнечного ветра, вспышками протонных сияний и геомагнитными пульсациями в диапазоне Pc1. // Геомагнетизм и аэронавтика. Т. 50. № 5. С. 595-602. 2010.
- Яхнина Т.А., Яхнин А.Г. Протонные высыпания к экватору от изотропной границы во время геомагнитной бури 20–29 ноября 2003 года // Космические исследования. Т. 52. № 1. С. 1–7. 2014.

- Anderson B.J., Erlandson R.E., Zanetti L.J. A statistical study of Pc 1–2 magnetic pulsations in the equatorial magnetosphere, 1. Equatorial occurrence distributions // *J. Geophys. Res.* V. 97(A3). P. 3075–3088. doi:10.1029/91JA02706. 1992.
- Carson B.R., Rodger C.J., Clilverd M.A. POES satellite observations of EMIC-wave driven relativistic electron precipitation during 1998–2010 // *J. Geophys. Res. Space Physics*. V. 118. P. 232–243. doi:10.1029/2012JA017998. 2012.
- Engebretson, M. J., et al., Van Allen probes, NOAA, GOES, and ground observations of an intense EMIC wave event extending over 12 h in magnetic local time // *J. Geophys. Res. Space Physics*. V. 120. P. 5465–5488. doi:10.1002/2015JA021227. 2015.
- Evans D.S., Greer M.S. Polar orbiting environmental satellite space environment monitor-2: Instrument descriptions and archive data documentation // NOAA Tech. Memo. 1.4. Space Environ. Lab. Boulder. Colo. 2004.
- Fraser B.J., Nguyen T.S. Is the plasmopause a preferred source region of electromagnetic ion cyclotron waves in the magnetosphere? // *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* V. 63(11). P. 1225–1247. doi:10.1016/S1364-6826(00)00225-X. 2001.
- Keika K., Takahashi K., Ukhorskiy A.Y., Miyoshi Y. Global characteristics of electromagnetic ion cyclotron waves: Occurrence rate and its storm dependence // *J. Geophys. Res. Space Physics*, V. 118. doi:10.1002/jgra.50385. 2013.
- McCullough J.P., Elkington S.R., Baker D.N. The role of Shabansky orbits in compression-related electromagnetic ion cyclotron wave growth // *J. Geophys. Res.* V. 117. A01208. doi:10.1029/2011JA016948. 2012.
- Roederer, J.G. On the adiabatic motion of energetic particles in a model magnetosphere // *J. Geophys. Res.* V. 72. P. 981–992. 1967.
- Sergeev V.A., Malkov M.V., Mursula K. Testing of the Isotropic Boundary Algorithm method to evaluate the magnetic field configuration in the tail // *J. Geophys. Res.* V. 98. A5. P. 7609–7620. 1993.
- Shabansky V.P. Some processes in magnetosphere // *Space Sci. Rev.* V. 12(3). P. 299–418. 1971.
- Usanova, M.E., Mann I.R., Bortnik J., Shao L., Angelopoulos V. THEMIS observations of electromagnetic ion cyclotron wave occurrence: Dependence on AE, SYMH, and solar wind dynamic pressure // *J. Geophys. Res.* V. 117. A10218. doi:10.1029/2012JA018049. 2012.
- Wang C.-P., Zaharia S.G., Lyons L.R., Angelopoulos V. Spatial distributions of ion pitch angle anisotropy in the near-Earth magnetosphere and tail plasma sheet // *J. Geophys. Res. Space Physics*. V. 118. P. 244–255. doi:10.1029/2012JA018275. 2013.
- Yahnina, T.A., Yahnin A.G., Kangas J., Manninen J., Evans D.S., Demekhov A.G., Trakhtengerts V.Yu., Thomsen M.F., Reeves G.D., and Gvozdevsky B.B. Energetic particle counterparts for geomagnetic pulsations of Pc1 and IPDP types // *Ann. Geophys.*, V. 21(12). P. 2281–2292. 2003.
- Zhang Y., Paxton L.J., Zheng Y. Interplanetary shock induced ring current auroras // *J. Geophys. Res.* V. 113. A01212. doi:10.1029/2007JA012554. 2008.