

# ПРОТОННЫЕ СИЯНИЯ К ЭКВАТОРУ ОТ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА КАК ПРОЯВЛЕНИЕ ИОННО-ЦИКЛОТРОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ (КРАТКИЙ ОБЗОР)

А.Г. Яхнин<sup>1</sup>, Т.А. Яхнина<sup>1</sup>, Н.В. Семенова<sup>1</sup>, Т.А. Попова<sup>1</sup>, А.Г. Демехов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Полярный геофизический институт, Апатиты

<sup>2</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

**Аннотация.** Представлен краткий обзор различных форм протонных сияний к экватору от аврорального овала. Эти сияния вызваны высыпаниями энергичных протонов из земной магнитосферы при развитии ионно-циклотронной неустойчивости. Кроме описанных ранее форм сияний (пятен, дуг на вечерней стороне, дневных вспышек) представлен новый вид – долгоживущие протонные сияния на дневной стороне. Приведена схема взаимосвязи различных протонных сияний к экватору от овала с распределением холодной плазмосферной плазмы.

## 1. Введение

Одним из важнейших результатов миссии космического аппарата IMAGE является обнаружение с помощью прибора FUV (Far UltraViolet imager) различных форм протонных сияний, которые представляют собой излучение возбужденных атомов водорода, образовавшихся в результате процесса обмена зарядом между высыпающимися энергичными (10-100 кэВ) протонами и атмосферными молекулами [Frey, 2007]. Сам «протонный» овал является проекцией зоны изотропных потоков энергичных протонов в магнитосфере, а его экваториальная граница – проекцией границы изотропии потоков [Blockx et al., 2005]. Особый интерес представляют протонные сияния, наблюдаемые к экватору от овала, которые вызваны высыпанием протонов из зоны, где обычно потоки захваченных частиц существенно больше, чем высыпающихся. Высыпания из этой области магнитосферы связаны с рассеянием частиц при взаимодействии с волнами. Связь электромагнитных ионно-циклотронных (ЭМИЦ) волн и высыпаний протонов была показана ранее по данным низкоорбитальных спутников [Soraas et al., 1980; Yahnina et al., 2003; Safargaleev et al., 2002]. Преимущество наблюдений протонных сияний с высоко-апогейного спутника состоит в том, что они позволяют видеть двумерную картину высыпаний протонов на уровне ионосферы, контролировать их динамику и, соответственно, осуществлять мониторинг развития ионно-циклотронной неустойчивости в магнитосфере. За время после первого обзора [Frey, 2007], обобщающего результаты миссии IMAGE, опубликовано большое количество работ, о связи протонных сияний с развитием ионно-циклотронной неустойчивости в магнитосфере Земли, что делает актуальным их систематизацию. Этому и посвящен данный краткий обзор.

## 2. Различные формы протонных сияний и ЭМИЦ волны

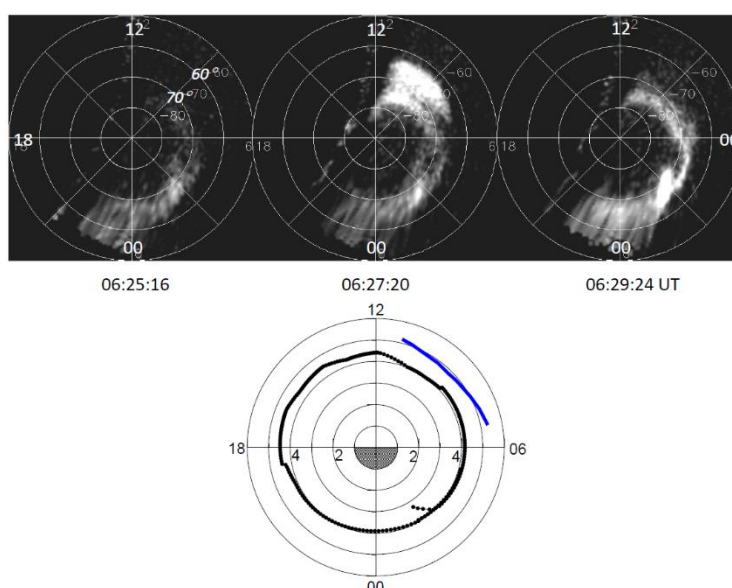
В обзоре [Frey, 2007] на основе наблюдений со спутника IMAGE выделены три характерных вида протонных сияний к экватору от овала: долгоживущие пятна, вращающиеся вместе с Землей приблизительно вдоль одной широты [Frey et al., 2004], относительно неподвижные дуги на вечерней стороне со временем жизни около часа [Immel et al., 2002], и короткоживущие (~1-10 минут) вспышки на дневной стороне [Zhang et al., 2002; Hubert et al., 2003]. Пятна протонного свечения связаны с геомагнитными квазимонохроматическими пульсациями Pc1 [Yahnin et al., 2007]. Эти пульсации известны как наземный индикатор ЭМИЦ волн, которые генерируются в экваториальной околоземной магнитосфере в результате развития ионно-циклотронной (ИЦ) неустойчивости [например, Kangas et al., 1998]. Индикатором ЭМИЦ волн являются также другие геомагнитные пульсации диапазона Pc1 (0.2-5 Гц), например, колебания убывающего периода (КУП или IPDP) и так называемые всплески Pc1 (или всплески гидромагнитных эмиссий) [Fukunishi et al., 1981]. В дальнейшем, Yahnin et al. [2009] показали, что протонные сияния в форме дуг на вечерней стороне связаны с пульсациями IPDP. Yahnina et al. [2008] и Zhang et al. [2008] привели примеры связи вспышек протонных сияний на дневной стороне со всплесками пульсаций Pc1 и ЭМИЦ волнами в магнитосфере. Вспышки протонного сияния наблюдаются в связи с резкими усилениями давления солнечного ветра и, соответственно, со сжатием магнитосферы [Hubert et al., 2003; Fusilier et al., 2004; Попова и др., 2010]. Было показано [Попова и др., 2010], что геомагнитные пульсации в диапазоне Pc1 всегда наблюдаются на субавроральной наземной станции, если она располагается в долготном секторе вспышки протонного сияния, которая развивается на дневной стороне.

### 3. Связь с плазмосферой

Одним из важных параметров плазмы, влияющих на развитие ИЦ неустойчивости является плотность холодной плазмы. Чтобы определить, как связаны различные области развития неустойчивости в магнитосфере с холодной плазмой, можно сопоставить проекцию протонных сияний в экваториальную плоскость магнитосферы с положением плазмопаузы и других плазменных структур.

*Frey et al.* [2004] сопоставили проекции пятен протонного свечения с распределением холодной плазмы в магнитосфере по данным прибора EUV (Extreme UltraViolet imager) на спутнике IMAGE для двух событий и нашли, что источник протонных высыпаний связан с азимутальными неоднородностями плазмопаузы. *Yahnin et al.* [2013] использовали для такого сопоставления динамическую модель плазмопаузы, основанную на квази-перестановочной неустойчивости [Lemaire and Gringauz, 1998; Lemaire and Pierrard, 2008], и также пришли к выводу, что пятна протонного свечения имеют тенденцию проектироваться в окрестность градиентов концентрации холодной плазмы. *Soraas et al.* [2013] использовали модель плазмосферы [Pierrard and Stegen, 2008] для определения положения источника узкой полосы протонного свечения в утреннем секторе на  $L=2.5$  во время геомагнитной бури 11 ноября 2004 г. и показали, что источник протонных высыпаний находится в окрестности плазмопаузы. Расположение плазмопаузы на столь небольших расстояниях от Земли в период этой бури подтверждается измерениями прибора RPI и измерениями прибора EUV на спутнике IMAGE (*M. Spasojevic*, личное сообщение). Наличие ЭМИЦ волн с источником на аномально низких широтах для этого случая подтверждено в работе *Ермаковой и др.* [2015].

*Spasojević et al.* [2004, 2005] и *Spasojević and Fuselier* [2009] провели сопоставление вечерних дуг протонного сияния с распределением холодной плазмы в экваториальной магнитосфере, которое было определено по данным IMAGE EUV. Авторы пришли к заключению, что дуги связаны с холодной плазмой плазмосферного хвоста и часто оказываются в окрестности внешнего края плазмосферного хвоста. Это согласуется с результатами работы [Yahnina et al., 2003], в которой была обнаружена корреляция локализованных высыпаний энергичных протонов в вечернем секторе с признаками плазмосферного хвоста на геостационарной орбите, и с результатами работы [Яхнин и др., 2006], в которой анализировались локализованные высыпания энергичных протонов и электронов и их связь со структурой плазмосферного хвоста. Данные работы [Яхнин и др., 2006] позволяют предположить, что ИЦ неустойчивость развивается на краях мелкомасштабных структур плазмосферного хвоста и совокупность областей протонного свечения от этих источников образует наблюдаемую «дугу» в районе ионосферной проекции плазмосферного хвоста.



**Рисунок 1.** (Вверху) Последовательность изображений протонных сияний, показывающих вспышку на дневной стороне в 0627 UT 4 ноября 2003 г. (заметим, что сектор 11-22 MLT был недоступен для наблюдений).

(Внизу) Положение плазмопаузы в 0630 UT согласно расчетам по динамической модели. Линия на  $L \sim 5$  и  $MLT \sim 7-11$  показывает проекцию в магнитосферу экваториального края вспышки сияний.

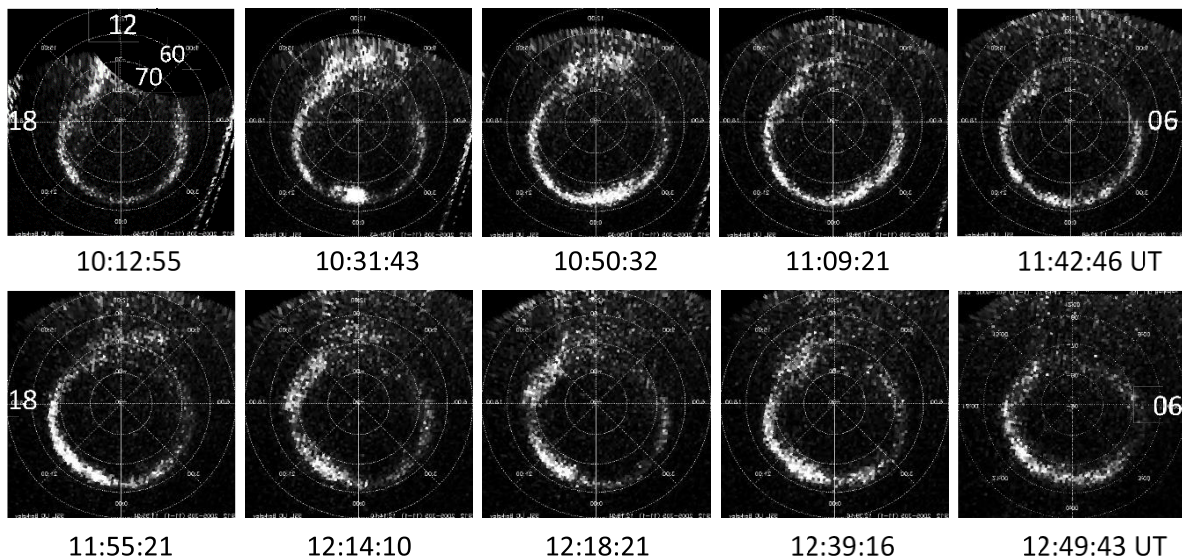
*Fuselier et al.* [2004] сопоставили положение двух вспышек протонного свечения на дневной стороне с радиальным распределением концентрации холодной плазмы по данным EUV. В одном случае проекция вспышки сияний находилась значительно дальше от Земли, чем плазмопауза; в другом – непосредственно за плазмосферой на градиенте концентрации холодной плазмы.

На рис. 1 (вверху) показан пример вспышки протонного сияния в 0627 UT 4 ноября 2003 г. Внизу показано взаимное расположение проекции экваториального края вспышки в экваториальную плоскость магнитосферы и положения плазмопаузы, полученное с использованием динамической модели [Lemaire and Gringauz, 1998; Lemaire and Pierrard, 2008]. Очевидно, что источник вспышки находится за плазмопаузой. Анализ 25 подобных случаев вспышек протонного сияния на дневной стороне показал, что вспышка за плазмопаузой - типичное явление. В работе [Яхнин и др., 2015] для семи из этих событий были рассмотрены измерения концентрации холодной плазмы на геостационарных спутниках LANL, которые находились в области магнитосферной проекции вспышки. Концентрация холодной плазмы в области источника вспышки во всех случаях оказалась меньше (а для шести из семи рассмотренных событий - существенно меньше) типичных для плазмосферы значений.

#### 4. Протонные сияния на дневной стороне, не связанные со скачками давления солнечного ветра

Во время резкого сжатия магнитосферы происходит резкий рост инкремента циклотронной неустойчивости (например, [Olson and Lee, 1983; Anderson and Hamilton, 1993]), связанный, в основном, с ростом поперечной анизотропии горячих ионов. Это и приводит к интенсификации рассеяния ионов в конус потерь.

В то же время, в магнитосфере постоянно существует асимметрия магнитного поля Земли в направлении «день-ночь». На дневной стороне магнитное поле сжато постоянно существующим давлением солнечного ветра (в экваториальной плоскости это соответствует увеличению магнитного поля), а на ночной стороне силовые линии вытянуты в хвост магнитосферы (соответственно, в экваториальной плоскости поле ослаблено). Асимметрия магнитного поля приводит к эффекту расщепления дрейфовых оболочек [Roederer, 1967; Shabansky, 1971], в результате которого частицы с разными питч-углами, стартующие на ночной стороне из одной точки, дрейфуют вокруг Земли по разным траекториям. На дневной стороне частицы с большими питч-углами оказываются на больших расстояниях от Земли, что приводит к появлению на дневной стороне области повышенной поперечной анизотропии энергичных протонов. Наличие такой области подтверждено статистически в работе [Wang et al., 2012] по данным измерений энергичных протонов на спутнике THEMIS. Это означает, что на дневной стороне магнитосферы перманентно существуют благоприятные условия для генерации ЭМИЦ волн.

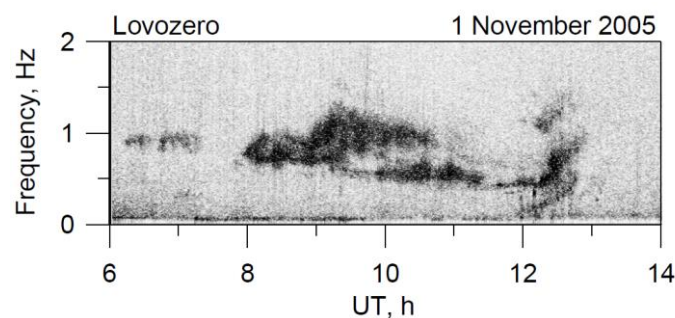
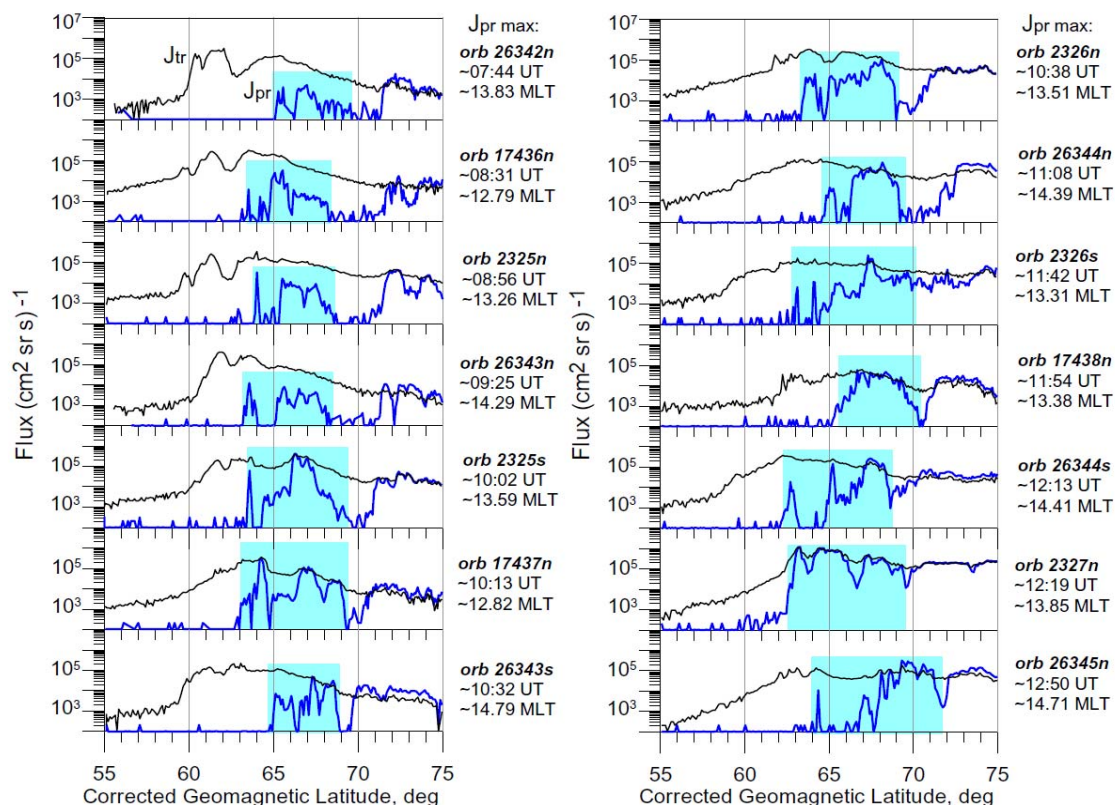


**Рисунок 2.** Последовательность изображений протонных сияний в течение интервала 1012 -12:50 UT 1 ноября 2005 г.

С этим согласуется статистика наблюдений ЭМИЦ волн в магнитосфере. Максимум вероятности наблюдения ЭМИЦ волн обнаружен в дневной магнитосфере на расстояниях более 6 RE от Земли [Anderson et al., 1992; Usanova et al., 2012; Keika et al., 2013]. Здесь же наблюдается максимум вероятности наблюдений высыпаний энергичных протонов к экватору от границы изотропии [Семенова и др., 2017].

Инкремент неустойчивости (и, соответственно, интенсивность волн и скорость диффузии частиц по питч-углам) в «спокойных» условиях, очевидно, ниже, чем во время резкого сжатия, и чувствительность прибора IMAGE FUV может быть недостаточной для того, чтобы уверенно регистрировать протонные сияния в дневной области. Однако, в некоторых случаях, эти протонные сияния видны. На рис. 2 показан пример такого события (~10-13 UT 1 ноября 2005 г.). Давление солнечного ветра в это время существенно не менялось

(данные не показаны). Сияния часто трудно различить на фоне шума, но их присутствие подтверждается измерениями потоков протонов на низкоорбитальных спутниках POES, которые отчетливо показывают наличие высыпаний энергичных протонов, сопряженных с этими сияниями (рис. 3, сверху). Высыпания протонов приведены начиная с 0744 UT (данные о сияниях имеются только с ~10 UT). Высыпания сопровождалась регистрацией геомагнитных пульсаций Pc1 в течение интервала ~08-13 UT на наземной станции Ловозеро, которая в это время находилась в секторе ~11-16 MLT (рис. 3, внизу). Как следует из представленного примера, дневные сияния (и связанные с ними высыпания протонов) могут наблюдаться в течение нескольких часов и занимать довольно обширные области; их широтные размеры достигают нескольких градусов, а долготные – нескольких часов MLT.



**Рисунок 3.** (Вверху) Данные о потоках захваченных (Jtr) и высыпающихся (Jpr) протонов на последовательных пролетах спутниках NOAA POES, пересекающих область долгоживущих протонных сияний в секторе ~13-15 MLT.

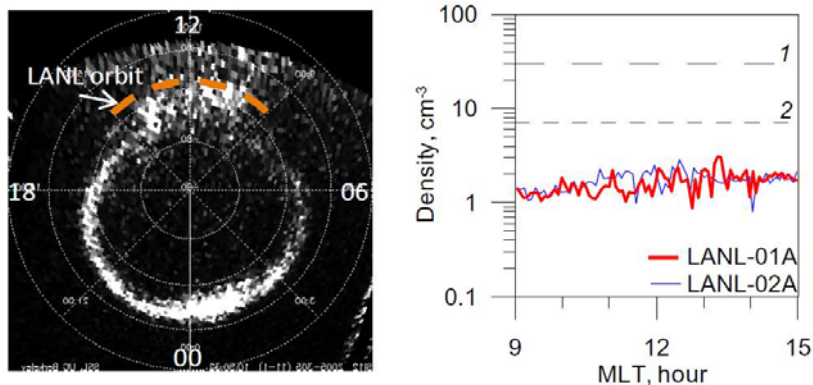
(Внизу) Спектрограмма геомагнитных пульсаций в диапазоне Pc1 по данным обс. Ловозеро.

Дневные сияния, также, как и вспышки во время сжатия магнитосферы, наблюдаются за плазмопаузой. Это следует как из сопоставления сияний с положением плазмопаузы, полученной из динамической модели [Lemaire and Gringauz, 1998; Lemaire and Pierrard, 2008], так и из данных о концентрации холодной плазмы, полученных прибором MPA на спутниках LANL, проекция траектории которых пересекала область дневных протонных сияний (рис. 4).

Наличие долгоживущих и протяженных протонных высыпаний к экватору от овала на дневной стороне в последнее время отмечалось в литературе. В работе [Яхнина и Яхнин, 2014] были рассмотрены высыпания



протонов по данным низкоорбитальных спутников серии POES во время геомагнитной бури 20-29 ноября 2003 г. На дневной стороне были обнаружены практически непрерывно регистрировавшиеся высыпания протонов на широтах  $60^{\circ}$ - $70^{\circ}$  к экватору от границы изотропии потоков. При этом одновременные пролеты спутников NOAA-15 и NOAA-17 на MLT= 9 и MLT=13, соответственно, показали, что область протонных высыпаний имеет большую долготную протяженность. *Engebretson et al.* [2015] рассмотрели событие (23 февраля 2014 г.), когда в течение нескольких часов спутники POES на последовательных пролетах через дневной сектор регистрировали высыпания энергичных протонов на широтах  $60^{\circ}$ - $70^{\circ}$ , в то время когда спутники Van Allen Probes регистрировали ЭМИЦ волны на  $L>4$  в секторе 9-14 MLT. Волны регистрировались за плазмосферой, положение которой было определено по данным тех же спутников. *Яхнин и др.* [2015] рассмотрели последовательные пролеты спутников серии POES до и после момента вспышки протонного сияния на дневной стороне в  $\sim 0515$  UT 5 июля 2005 г., которая была обусловлена мощным сжатием магнитосферы. После сжатия магнитосферы поток высыпающихся протонов с энергией 30-80 кэВ составил  $10^5$ - $10^6$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> стер<sup>-1</sup>. Интересно, что до вспышки в той же области также наблюдались потоки протонов, но меньшей интенсивности ( $10^3$ - $10^4$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> стер<sup>-1</sup>). Эти результаты подтверждают, что развитие ИЦ неустойчивости в дневной области возможно и без сильного импульсного сжатия магнитосферы.



**Рисунок 4.** (Слева) Проекция траектории спутников LANL, нанесенная на изображение протонных сияний в  $\sim 10:50$  UT 1 ноября 2005 г.

(Справа) Данные прибора MPA со спутников LANL-01A и LANL-02A в секторе 09-15 MLT во время наблюдения протонных сияний к экватору от овала.

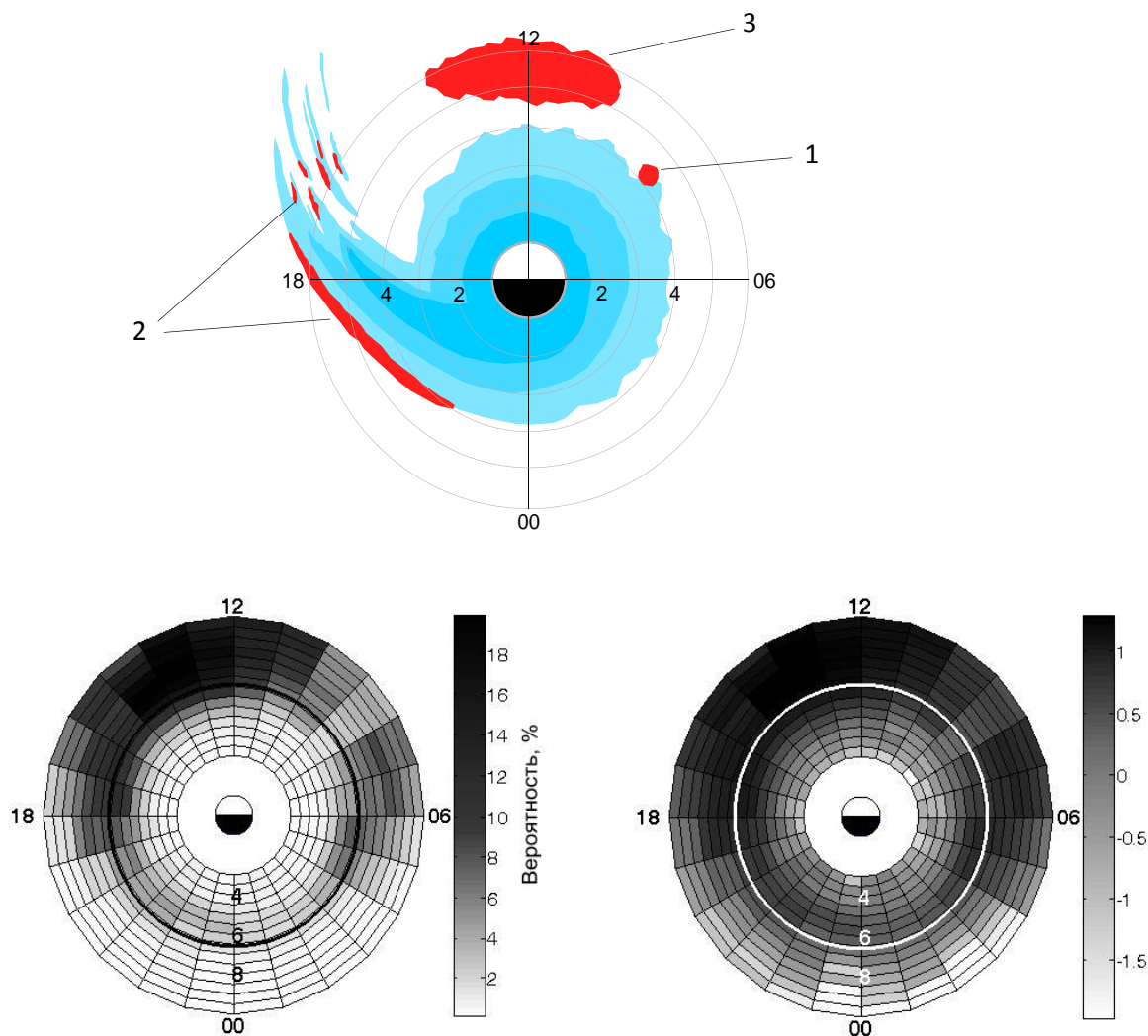
Горизонтальные линии 1 и 2 показывают, соответственно, среднее значение концентрации холодной плазмы в плазмосфере, в случаях, когда она наблюдается на геостационарной орбите, и среднее значение концентрации холодной плазмы на геостационарной орбите сразу за плазмопаузой [*Sheeley et al.*, 1981].

## 5. Схема областей генерации ИЦ неустойчивости в приземной экваториальной магнитосфере

На верхней части рис. 5 схематично показаны области в магнитосфере, где, согласно наблюдениям различных типов протонных сияний, развивается ИЦ неустойчивость, а также положение этих областей по отношению к распределению холодной плазмосферной плазмы в магнитосфере. Источники пятен протонного сияния связаны на этой схеме с градиентами концентрации холодной плазмы в окрестности плазмопаузы. Источники дуг протонного сияния на вечерней стороне связаны с плазмосферным хвостом и его мелкомасштабной структурой. Наконец, источником квазистационарных дневных протонных сияний, а также вспышек протонного сияния, обусловленных сжатием магнитосферы, является область низких значений концентрации холодной плазмы за плазмопаузой.

Хотя дуги на вечерней стороне и пятна генерируются, очевидно, при контакте дрейфующих к западу энергичных протонов с областями азимутального градиента холодной плазмы, их связь, соответственно, с плазмопаузой и плазмосферным хвостом, обуславливает существенные морфологические различия как самих протонных сияний, так и свойств, соответствующих им геомагнитных пульсаций. Источник пятна протонного сияния (и соответствующих ЭМИЦ волн), вращается вместе с Землей и плазмосферой, оставаясь приблизительно на одном и том же расстоянии от Земли. Поэтому частота соответствующих ЭМИЦ волн остается приблизительно постоянной, а наземные станции, положение которых почти не меняется относительно проекции источника волн, регистрируют волны Pc1 в течение всего времени жизни источника, зависящего от медленных вариаций потока протонов и времени жизни неоднородности на плазмопаузе [*Frey et al.*, 2004; *Yahnin et al.*, 2007]. Источник вечерней дуги относительно малоподвижен, поскольку в области плазмосферного хвоста поле коротации компенсируется полем конвекции. Вариации частоты соответствующих ЭМИЦ волн и время жизни источника определяется характеристиками дрейфующего с

ночной стороны облака протонов, образованного в результате импульсной инжекции плазмы во внутреннюю магнитосферу [Yahnin et al., 2009]. Источник долгоживущих протонных сияний (т.е. высыпаний энергичных протонов) и соответствующих ЭМИЦ волн на дневной стороне не связан с присутствием холодной плазмы и определяется постоянно существующей областью повышенной анизотропии энергичных протонов. Интенсивность этого источника модулируется давлением постоянно существующего солнечного ветра, определяющего степень асимметрии магнитосферы в направлении «день-ночь»; резкие импульсные возрастания давления солнечного ветра приводят к кратковременному росту анизотропии и к вспышке сияний.



**Рисунок 5.** Вверху: Схематическое представление областей развития ионно-циклотронной неустойчивости (источников протонных сияний различных типов) относительно распределения холодной плазмосферной плазмы в экваториальной магнитосфере. 1 – источники пятен протонного сияния находятся на азимутальных неоднородностях концентрации холодной плазмы в окрестности плазмоспаузы, 2- источники дуг протонных сияний связаны с восточной кромкой плазмосферного хвоста и его тонкой структурой, 3 – источники дневных протонных сияний располагаются в широкой области за плазмосферой.

Внизу: распределение вероятности наблюдения протонных высыпаний к экватору от овала (проявлений ИЦ неустойчивости) в линейной (слева) и логарифмической (справа) шкале.

Окружность с радиусом 6.6 RE показывает геостационарную орбиту.

Схему на верхней панели рис. 5 интересно сравнить с распределением вероятности наблюдения высыпаний энергичных протонов к экватору от овала. На нижней панели рис. 5 показано распределение, полученное из анализа данных спутников POES за период июль-декабрь 2005 г. Хотя такое распределение не позволяет разделить высыпания протонов по типам, дневная область явно выделяется как большей вероятностью наблюдения, так и более удаленным от Земли расположением высыпаний. На типичных для плазмоспаузы L-оболочках вероятность наблюдения высыпаний протонов составляет ~1%, а за геостационарной орбитой в

дневном секторе - ~20%. Это еще раз подчеркивает тот факт, что в дневной высокоширотной области существуют преимущественные условия (повышенная поперечная анизотропия горячих протонов) для развития ИЦ неустойчивости.

### Заключение

Протонные сияния к экватору от аврорального овала связаны с ЭМИЦ волнами. Это, очевидно, означает, что они порождены рассеянием протонов кольцевого тока и плазменного слоя в конус потерь в процессе развития ИЦ неустойчивости в магнитосфере. Различия форм протонных сияний, их динамики, времени жизни, характера их связи с распределением холодной плазмы, а также различия спектров, связанных с этими сияниями ЭМИЦ волн в магнитосфере и соответствующих геомагнитных пульсаций на Земле, тесно связаны с различиями условий, в которых ИЦ неустойчивость может развиваться в магнитосфере.

**Благодарности.** Авторы благодарят Харальда Фрея (Harald Frey) за возможность использовать сервер данных прибора FUV на спутнике IMAGE и Вивиан Пиера (Viviane Pierrard) за возможность моделирования плазмопаузы на сайте (<http://www.spaceweather.eu>). Данные геостационарных спутников LANL получены через CDAWeb (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov>). Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-12-20005).

### Список литературы

- Ермакова Е.Н., А.Г. Яхнин, Т.А. Яхнина, А.Г. Демехов, Д.С. Котик (2015), 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, *Изв. вузов. Радиофизика*, 58(8), 607–622. English translation: Ermakova E.N., D.S. Kotik, A.G. Yahnin, N.A. Yahnina, A.G. Demekhov (2016), Sporadic geomagnetic pulsations at frequencies of up to 15 Hz in the magnetic storm of November 7–14, 2004: Features of the amplitude and polarization spectra and their connection with ion-cyclotron waves in the magnetosphere, *Radiophysics and quantum electronics*, 58 (8), 547–560.
- Попова Т.А., А.Г. Яхнин, Т.А. Яхнина, Х. Фрей (2010), Взаимосвязь между резкими увеличениями динамического давления солнечного ветра, вспышками протонных сияний и геомагнитными пульсациями в диапазоне Pc1, *Геомагнетизм и аэрномия*, 50(5), 595–602. English translation: Popova T.A., A.G. Yahnin, T.A. Yahnina, H. Frey (2010), Relation between sudden increases in the solar wind dynamic pressure, auroral proton flashes, and geomagnetic pulsations in the Pc1 range, *Geomagnetism and Aeronomy*, 50(5), 568–575, doi:10.1134/S0016793210050038.
- 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 аэрномия*, 57(4), 433–440. English translation: Semenova N.V., T.A. Yahnina, A.G. Yahnin, A.G. Demekhov (2017), Global distribution of energetic proton precipitations equatorward of the boundary of isotropic fluxes, *Geomagnetism and Aeronomy*, 57(4), 398–405, doi: 10.1134/S001679321704017X.
- Яхнин А.Г., Т.А. Попова, Т.А. Яхнина (2015), Некоторые характеристики магнитосферного источника дневных субавроральных протонных высыпаний во время сжатия магнитосферы, *Космические исследования*, 53(1), 85–92. English translation: Yahnin A. G., T. A. Popova, and T. A. Yahnina (2015), Some characteristics of the magnetospheric source of dayside subauroral proton precipitations during magnetospheric compression, *Cosmic Research*, 53(1), 80–87.
- Яхнин А.Г., Т.А. Яхнина, А.Г. Демехов (2006), Взаимосвязь локализованных высыпаний энергичных частиц и неоднородностей холодной плазмы в магнитосфере, *Геомагнетизм и аэрномия*, 46(3), 349–356. English translation: Yahnin A.G., T.A. Yahnina, A.G. Demekhov (2006), Interrelation between localized energetic particle precipitation and cold plasma inhomogeneities in the magnetosphere, *Geomagnetism and Aeronomy*, 46(3), 332–338.
- 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.
- Anderson B.J. and D.C. Hamilton (1993), Electromagnetic ion cyclotron waves stimulated by modest magnetospheric compressions, *J. Geophys. Res.*, 98, 11369–11382.
- Blockx C., J.-C. Gerard, M. Meurant, B. Hubert, V. Coumans (2005), Far ultraviolet remote sensing of the isotropy boundary and magnetotail stretching, *J. Geophys. Res.*, 110, A11215, doi:10.1029/2005JA011103.
- Frey H.U. (2007), Localized aurora beyond the auroral oval, *Rev. Geophys.*, 45, RG1003, doi:10.1029/2005RG000174.
- Frey H.U., G. Haerendel, S.B. Mende, W.T. Forrester, T.J. Immel, and N. Østgaard (2004), Subauroral morning proton spots (SAMPS) as a result of plasmopause-ring-current interaction, *J. Geophys. Res.*, 109, A10305, doi:10.1029/2004JA010516.
- Fuselier S.A., S.P. Gary, M.F. Thomsen, E.S. Claflin, B. Hubert, B.R. Sandel, and T. Immel (2004), Generation of transient dayside subauroral proton precipitation, *J. Geophys. Res.*, 109, A12227, doi:10.1029/2004JA010393.

- Hubert B., J.-C. Gerard, S.A. Fuselier, and S.B. Mende (2003), Observation of dayside subauroral proton flashes with the IMAGE-FUV imagers, *Geophys. Res. Lett.*, 30(3), 1145, doi:10.1029/2002GL016464.
- Immel T.J., S.B. Mende, H.U. Frey, L.M. Peticolas, C.W. Carlson, J.-C. Gerard, B. Hubert, S.A. Fuselier, and J.L. Burch (2002), Precipitation of auroral protons in detached arcs, *Geophys. Res. Lett.*, 29(11), 1519, doi:10.1029/2001GL013847.
- Kangas J., A. Guglielmi, and O. Pokhotelov (1998), Morphology and physics of short-period magnetic pulsations (a review), *Space Sci. Rev.*, 83, 435–512.
- 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.* 118, doi:10.1002/jgra.50385.
- Lemaire J.F., K.I. Gringauz (1998), *The Earth's Plasmasphere*. Cambridge University Press, New York.
- Lemaire J.F. and V. Pierrard (2008), Comparison between two theoretical mechanisms for the formation of the plasmopause and relevant observations, *Geomagnetism and Aeronomy* 48(5), 553–570.
- Olson J.V. and L.C. Lee (1983), Pc1 wave generation by sudden impulses, *Planet. Space Sci.*, 31, 295–302.
- Pierrard V., K. Stegen (2008), A three-dimensional dynamic kinetic model of the plasmasphere. *J. Geophys. Res.*, 113, A10209, doi:10.1029/2008JA013060.
- Roederer J.G. (1967), On the adiabatic motion of energetic particles in a model magnetosphere, *J. Geophys. Res.* 72, 981–992.
- Safargaleev V., J. Kangas, A. Kozlovsky, and A. Vasil'ev (2002), Burst of ULF noise excited by sudden changes of solar wind dynamic pressure, *Ann. Geophys.*, 20, 1751–1761.
- Shabansky V.P. (1971), Some processes in magnetosphere, *Space Sci. Rev.*, 12(3), 299–418.
- Sheeley B.W., M.B. Moldwin, H.K. Rassoul, and R.R. Anderson (2001), An empirical plasmasphere and trough density model: CRRES observations, *J. Geophys. Res.*, 106(25), 631.
- Soraas F., K.M. Laundal, and M. Usanova (2013), Coincident particle and optical observations of nightside subauroral proton precipitation, *J. Geophys. Res.* 118, doi:10.1002/jgra.50172.
- Soraas F., J.A. Lundblad, N.F. Maltseva, V.A. Troitskaya, V. Selivanov (1980), A comparison between simultaneous IPDP groundbased observations and observations of energetic protons obtained by satellites, *Planet. Space Sci.* 28, 387–405.
- Spasojević M., S.A. Fuselier (2009), Temporal evolution of proton precipitation associated with the plasmaspheric plume, *J. Geophys. Res.*, 114, A12201, doi:10.1029/2009JA014530.
- Spasojević M., H.U. Frey, M.F. Thomsen, S.A. Fuselier, S.P. Gary, B.R. Sandel, and U.S. Inan (2004), The link between a detached subauroral proton arc and a plasmaspheric plume, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L04803, doi:10.1029/2003GL018389.
- Spasojević M., M.F. Thomsen, P.J. Chi, and B.R. Sandel (2005), Afternoon subauroral proton precipitation resulting from ring current–plasmasphere interaction, in *Inner Magnetosphere Interactions: New Perspectives from Imaging*, *Geophys. Monogr. Ser.*, V. 159, edited by J. Burch, M. Schulz, and H. Spence, pp. 85–99, AGU, Washington, D. C.
- Usanova M.E., I.R. Mann, J. Bortnik, L. Shao, V. Angelopoulos (2012), 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., T.A. Yahnina, H.U. Frey, T. Bösinger, J. Manninen (2009), Proton aurora related to intervals of pulsations of diminishing periods, *J. Geophys. Res.*, 114, A12215, doi:10.1029/2009JA014670.
- Yahnin A.G., T.A. Yahnina (2007), Energetic proton precipitation related to ion–cyclotron waves, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 69, 1690–1706.
- Yahnin A.G., T.A. Yahnina, H.U. Frey (2007), Subauroral proton spots visualize the Pc1 source, *J. Geophys. Res.*, 112, A10223, doi:10.1029/2007JA012501.
- Yahnina T.A., H.U. Frey, T. Bösinger, and A.G. Yahnin (2008), Evidence for subauroral proton flashes on the dayside as the result of the ion cyclotron interaction, *J. Geophys. Res.*, 113, A07209, doi:10.1029/2008JA013099.
- Yahnina, T.A., A.G. Yahnin, J. Kangas, J. Manninen, D.S. Evans, A.G. Demekhov, V.Yu. Trakhtengerts, M.F. Thomsen, G.D. Reeves, B.B. Gvozdevsky (2003), Energetic particle counterparts for geomagnetic pulsations of Pc1 and IPDP types, *Ann. Geophys.*, 21(12), 2281–2292.
- Zhang Y., L.J. Paxton, T.J. Immel, H.U. Frey, and S.B. Mende (2002), Sudden solar wind dynamic pressure enhancements and dayside detached auroras: IMAGE and DMSF observations, *J. Geophys. Res.*, 108(A4), 8001, doi:10.1029/2002JA009355.
- Zhang Y., L.J. Paxton, and Y. Zheng (2008), Interplanetary shock induced ring current auroras, *J. Geophys. Res.*, 113, A01212.