

СВЯЗЬ ДИСКРЕТНЫХ АВРОРАЛЬНЫХ СТРУКТУР, ДРЕЙФУЮЩИХ К ЭКВАТОРУ ВО ВРЕМЯ ВЗРЫВНОЙ ФАЗЫ СУББУРИ, С ИНЖЕКЦИЯМИ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

Н.П. Дмитриева¹, М.М. Белошкурская¹, Т.А. Корнилова², И.А. Корнилов²

¹*Санкт-Петербургский Государственный Университет, г. Санкт-Петербург*

²*Полярный геофизический институт, КНЦ РАН, г. Апатиты*

Введение

Исследование поведения сияний во время взрывной фазы суббури показывает, что наряду с резким сдвигом к полюсу кромки авроральной выпуклости наблюдается сложная динамика дискретных форм сияний внутри нее. Дискретные сияния в этой области имеют вид пятен или дуг ориентированных как в меридиональном, так и в зональном (вдоль зоны сияний) направлении. При этом часто наблюдается быстрый дрейф сияний в экваториальном направлении. Для определения магнитосферного источника этих авроральных форм необходимо установить их взаимосвязь с объектами, наблюдаемыми в плазменном слое, такими как нестационарные струйные течения (НСТ) плазмы, распространяющиеся от источника взрыва к Земле. Движение дискретных форм сияний часто имеет вихревой характер – от полярной кромки выпуклости к экватору в первые минуты после брейкапа с последующим разворотом к востоку или западу.

В этой связи в [1] была высказана гипотеза о связи динамики сияний с движением плазмы в плазменном слое в окрестности НСТ, которое также имеет вихревой характер. Однако для подтверждения этой гипотезы необходимо установить пространственно-временную связь между двумя явлениями, наблюдаемыми в пространственно разнесенных областях магнитосферы – экваториальным дрейфом дискретных сияний на уровне ионосферы и движением к Земле плазменных струй в плазменном слое.

Такое сопоставление было сделано в работе [2], где было исследовано поведение дискретных авроральных структур во время двух суббурь с использованием телевизионных записей сияний обсерваторий Лопарская и Ловозеро, данных спутника NOAA_POES по высypаниям энергичных частиц и наблюдений магнитного поля и плазмы в плазменном слое спутниками THEMIS. На основании анализа приведенного материала было показано, что область дискретных сияний имеет отчетливую экваториальную границу, которая смещается к экватору со скоростью 30-50 км/мин во время взрывной фазы. При этом проекция этой границы в магнитосферу движется к Земле со скоростью порядка 100 км/с на расстоянии около 7 радиусов Земли. Ранее было показано [3], что с такой скоростью во время взрыва движутся к Земле фронты диполизации, связанные с НСТ. В одном из двух изученных в [2] событий действительно наблюдается пространственно-временное совпадение фронта диполизации, связанного с движением к Земле плазменной струи, с проекцией экваториальной границы авроральной выпуклости. Если это совпадение не случайно и подтвердится при дальнейших исследованиях, то появляется возможность определения глубины проникновения НСТ во внутреннюю магнитосферу по наблюдениям полярных сияний.

Большое внимание в последнее десятилетие уделяется исследованию авроральных стримеров – дискретных структур в полярных сияниях, которые наблюдаются внутри ночного аврорального овала спутниками POLAR и IMAGE (см., например, [4] и ссылки в ней). В результате статистического исследования, проведенного в работе [5], установлена пространственно-временная (и, по-видимому, причинно-следственная) связь между стримерами и инъекциями энергичных частиц во внутреннюю магнитосферу. С другой стороны, имеются данные, свидетельствующие о связи стримеров с НСТ в плазменном слое магнитосферы [6]. И, наконец, одновременные наблюдения НСТ тремя спутниками на расстояниях от 40 Re до 6.6 Re а также инъекций энергичных частиц на геостационарной орбите (двумя спутниками LANL) в одном и том же секторе MLT [7] позволили установить причинно-следственную связь стримера и инъекций на геостационарной орбите с движением НСТ во внутреннюю магнитосферу.

Авроральные структуры, исследованные в [2], имеют меньшие размеры, чем стримеры, наблюдаемые со спутников, но, возможно, представляют собой объекты, аналогичные стримерам.

Задача данной работы — изучить пространственно-временную связь между дрейфующими к экватору дискретными авроральными структурами и инъекциями на геостационарной орбите, а также проанализировать взаимное азимутальное положение авроральных структур, инъекций и токового клина суббури.

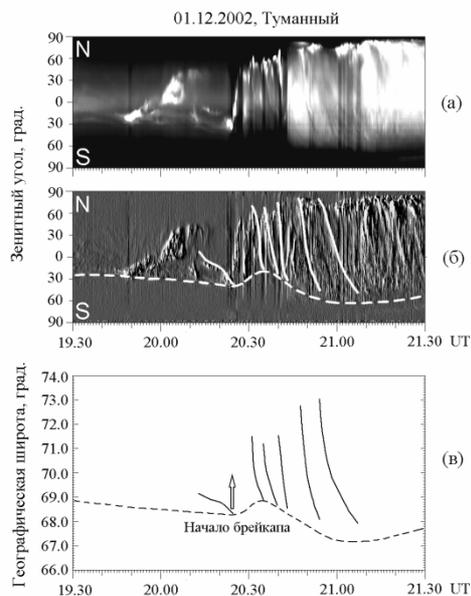


Рис. 1

более поздней стадии развития картина сияний становится слишком сложной для надежного сопоставления кеограммы со снимками. Для всех отобранных авроральных структур, после их оцифровки, была построена зависимость их географической широты от времени. Такая же зависимость строилась для общей экваториальной границы дискретных сияний. В большинстве исследованных нами событий авроральные структуры в конце дрейфа оказывались вблизи зенита (± 100 км), поэтому при определении конечной широты, достигаемой структурами, ошибка не превышала 1 градуса.

Пример обработанного таким образом события приведен на Рис. 1. Здесь приведена исходная кеограмма, по данным станции Туманный (Рис. 1а), та же кеограмма после фильтрации, где отдельные структуры, а также экваториальная граница выпуклости выделены линиями (Рис. 1б) и график зависимости широты положения структур и границы сияний от времени (Рис. 1в).

Все дрейфующие дискретные структуры, а также их общая экваториальная граница были спроецированы на экваториальную плоскость хвоста магнитосферы для сопоставления их с инъекциями энергичных частиц на геостационарной орбите по данным спутников LANL (± 5 часов от полночи). Для проецирования использовалась модель магнитосферы Цыганенко Т96 и пакет подпрограмм GEORACK_2005. Сопоставление показывает, что в большинстве случаев наблюдаются всплески в потоках энергичных частиц: электронов - к утру от области проекции структур сияний, протонов - к вечеру от нее, и в потоках обоих сортов частиц, если спутник расположен вблизи этой области, что согласуется с характером дрейфа частиц. Если всплески потоков энергичных частиц фиксируются на утренней (электроны) или вечерней (протоны) стороне, в них наблюдается дисперсия времени вступления в разных энергетических каналах, связанная с различием в скорости дрейфа. В этих случаях был выполнен расчет дрейфовых траекторий для определения азимутального положения границы бездисперсной инъекции по методике,

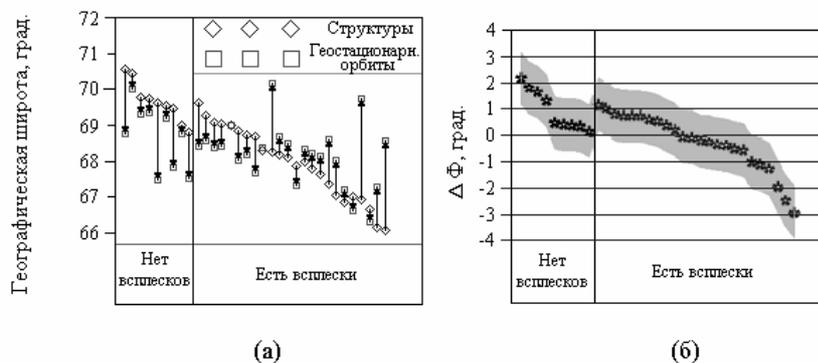


Рис. 2

описанной в [8]. Расчет проводился на основе магнитосферных моделей Т89 и Т96 для параметров, соответствующих времени наблюдения инъекций.

Для каждой из 33-х структур сияний мы сопоставили достигаемую ими при дрейфе минимальную широту с проекцией геостационарной орбиты в соответствующий момент времени в данном долготном секторе (Рис. 2а). Сравнение показывает, что инъекции на геостационарной орбите не наблюдаются в тех случаях (указанны в левой колонке), когда минимальная широта сияний оказывается выше широты проекции спутника, то есть когда инъекция не достигает геостационарной орбиты. На Рис. 2б для всех

событий нанесена разность между минимальной широтой сияний и широтой проекции геостационарной орбиты. Приведенные данные показывают, что в случае наблюдения всплесков энергичных частиц минимальная широта сияний в среднем ниже широты спутника. В тех случаях, когда эта разница оказывается положительной, она не превышает 1 градуса, то есть погрешности проецирования. Во всех случаях отсутствия инжекций минимальная широта сияний оказывается выше широты проекции геостационарной орбиты. Из 33 исследованных дискретных структур сияний оказалось 9 таких случаев, что составляет менее одной трети всех событий.

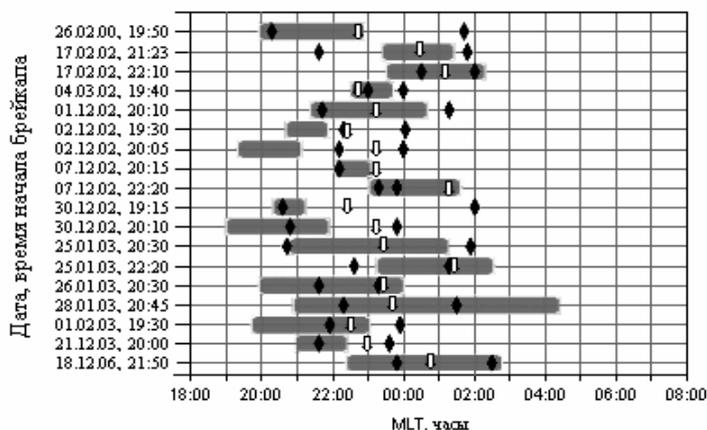


Рис. 3

Азимутальное положение области инжекций было сопоставлено также с положением токового клина суббури (Рис. 3). Для численного определения азимутальных границ токового клина суббури (SCW) в ионосфере использовалась процедура восстановления продольных токов с помощью программы, разработанной в лаборатории физики магнитосферы кафедры физики Земли СПбГУ [17]. Положение токового клина (заштрихованная полоса) нанесено на Рис. 3 в зависимости от местного магнитного времени (MLT). Здесь же ромбами показано расчетное положение границ бездисперсных инжекций, а белыми стрелками – MLT станции, на которой наблюдаются соответствующие структуры сияний. Как видно из Рис. 3, практически во всех случаях (кроме одного) дрейфующие структуры сияний располагаются внутри или на границе области инжекций. Однако, взаимное положение сияний и токового клина оказывается неоднозначным: в 1/3 случаев сияния наблюдаются вне границ токового клина. Также видно, что долготные сектора, соответствующие токовому клину и границам инжекции, хотя и пересекаются в большинстве случаев (кроме двух событий), но не совпадают.

Обсуждение и выводы

Количественный анализ, проведенный на основании обработки кеограмм для 33-х дискретных авроральных структур по данным камер Кольского полуострова, показывает, что время дрейфа дискретных структур от полярной границы выпуклости до экваториальной составляет от 1-2 минут до 10 и более минут (в зависимости от скорости дрейфа). Оценка скорости меридионального смещения структур сияний в ионосфере дает величины (80 ± 48) км/мин для структур, появляющихся сразу после брейкапа и (63 ± 28) км/мин через 10-15 минут и позже.

Более медленное (в среднем) движение структур на позднем этапе развития суббури свидетельствует, возможно, об изменении условий распространения их источника, таких, например, как возросшие за счет предшествующих вторжений частиц магнитный поток и давление плазмы в ближней области. Об этом же свидетельствуют и результаты МГД моделирования движения ускоренных потоков вблизи области квазидипольного поля на границе внутренней магнитосферы. В работе [9] показано, что плазменные струи, образовавшиеся в результате первых актов пересоединения создают дополнительную область диполизации вблизи Земли при торможении на границе области дипольного поля. В этой узкой дополнительной области диполизации происходит разворот последующих струйных течений к утренней и вечерней стороне. Первые приходящие струйные течения проникают ближе к Земле, что может отражаться в сдвиге экваториальной границы авроральной выпуклости, который наблюдается в связи с приходом первых дискретных структур. Плазменные струи, приходящие позже, тормозятся дальше от Земли, что отражается в меньшей средней скорости меридионального смещения структур сияний на более поздней стадии развития суббури. Схожесть динамики дискретных дрейфующих сияний внутри авроральной выпуклости с динамикой плазменных струй вблизи границы внутренней магнитосферы свидетельствует в пользу их причинно-следственной связи, предположенной в [1] и подтвержденной при изучении двух аналогичных авроральных объектов в [2].

Для возникновения сияний необходим механизм рассеяния электронов в конус потерь или их продольного ускорения, например в области продольных токов. Наиболее благоприятные для этого условия создаются на флангах струйных течений, где наблюдается сдвиг скоростей движения плазмы - вне тела струи скорость существенно меньше или даже имеет обратное направление. В результате здесь формируется пара продольных токов типа R1 с вытекающим из ионосферы током на вечерней стороне плазменной струи. При этом в ионосфере возникает дополнительная двухвихревая система конвекции с центрами вихрей в области втекающего и вытекающего токов, что находит подтверждение в наблюдениях [7], а также в результатах МГД моделирования [10].

Таким образом, дискретные структуры сияний могут вызываться высыпанием электронов, ускоренных направленным вверх продольным электрическим полем на вечернем краю нестационарных струйных течений. По мере движения к Земле плазменная струя тормозится и разворачивается в области сильных градиентов давления. Если при этом на ее границе сохраняются условия рассеяния и/или ускорения электронов, то вызываемые ими сияния будут повторять характер движения струйного течения. В работе [11] показано, что движущиеся к Земле плазменные струи, достигая геостационарной орбиты, вызывают здесь всплески потоков энергичных частиц. При этом вероятность достигнуть внутренней магнитосферы увеличивается с ростом величины параметра pV^{γ} , имеющего смысл энтропии. Согласно результатам [11] из всех струйных течений, зарегистрированных на расстояниях 8-13 Re в плазменном слое, геостационарной орбиты достигают только около одной трети. Данные, приведенные на Рис.2, показывают, что проекции геостационарной орбиты достигают более 2/3 структур сияний, движущихся к экватору, что отличается от цифры (1/3), полученной в [11]. Причина несогласия может заключаться в следующем. Область наблюдения сияний в нашей работе ограничена широтным диапазоном ($64.2^{\circ} - 65.2^{\circ}$ MLat) вблизи экваториального края аврорального овала. На таких, достаточно низких широтах брейккап наблюдается при сильно вытянутой конфигурации магнитного поля в хвосте. При этом увеличивается объем силовых трубок и вместе с этим растет фоновая величина параметра энтропии что, согласно результатам [11], повышает вероятность наблюдения инъекций на геостационарной орбите. Таким образом, сопоставление минимальных широт, достигаемых дрейфующими к экватору структурами сияний, с инъекциями энергичных частиц на геостационарной орбите также свидетельствует в пользу наличия причинно-следственной связи сияний со струйными течениями в плазменном слое.

Проведенное исследование не дает однозначного ответа на вопрос о привязке дискретных структур сияний к положению токового клина. В 1/3 случаев долгота наблюдения сияний оказывает вне токового клина, а именно восточнее. Это объясняется, скорее всего, неточностью определения долготной локализации утреннего края клина из-за отсутствия в рассматриваемый период (2002-2003 гг.) цифровых данных среднеширотных станций на территории России. В настоящее время накоплен обширный материал наблюдений сияний и геомагнитных вариаций на сети наземных станций в рамках проекта THEMIS, на основании которого в будущем может быть проведено более основательное изучение данной проблемы.

Заключение

Сопоставление результатов нашего исследования с приведенными выше [2-7] данными о взаимосвязи ускоренных потоков в плазменном слое, стримеров и инъекций на геостационарной орбите, а также с данными МГД моделирования [9, 10] свидетельствует о том, что дрейфующие дискретные сияния внутри авроральной выпуклости являются визуальным проявлением на уровне ионосферы нестационарных струйных течений плазмы, движущихся от очага взрыва к Земле.

Работа выполнена при поддержке гранта СПбГУ и программ Президиума РАН 22 и 4. Авторы благодарят В.А. Сергеева за полезные обсуждения, а также М.В. Холеву и И.В. Кубышкина за помощь в оформлении.

Список литературы

1. Nakamura R., et al. Equatorward and poleward expansion of the auroras during auroral substorms // J Geophys. Res. 1993. V. 98. № A4. doi: 10.1029/92JA02230.
2. Sergeev V.A., Kornilova T.A., et al., Auroral signatures of the plasma injection and dipolarization in the inner magnetosphere // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. doi:10.1029/2009JA014522.
3. Apatenkov S.V. et al., Multi-spacecraft observation of plasma dipolarisation/injection in the inner magnetosphere // Ann. Geophys. 2007. V. 25. № 3. P. 801-814.
4. Sergeev V.A. Bursty bulk flows and their ionospheric footprints. / Multiscale processes in the Earth's Magnetosphere: From Interball to Cluster. Ed. by J.-A. Sauvaud and Z. Nemecek, Kluwer Acad.Publ. 2004. 289-306.
5. Sergeev V.A., Yahnin D.A., Narrow plasma streams as a candidate to populate the inner magnetosphere / The Inner Magnetosphere: Physics and Modeling. Ed. by T.I. Pulkkinen, N.A. Tsyganenko, and R.H. W. Friedel. Geophys.Monogr. 2005. V. 155, 10.1029/155GM07. P. 55-60.
6. Kauristie K., et al., Bursty bulk flow intrusion to the inner plasma sheet as inferred from auroral observations // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № A1. doi:10.1029/2002JA009371.
7. Sergeev V.A., et al., Multiple-spacecraft observation of a narrow transient plasma jet in the Earth's plasma sheet // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27, № 6, P. 851-854.
8. Шухмина М.А., Сергеев В.А. Моделирование дрейфов энергичных частиц в реальной магнитосфере вблизи геостационарной орбиты // Геомаг. Аэрон. 1991. Т. 31. №5. С. 775-780.
9. Birn J., et al., Bursty bulk flows and dipolarization in MHD simulations of magnetotail reconnection // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. doi:10.1029/2010JA016083.
10. Yang J., et al., Large-scale current systems and ground magnetic disturbance during deep substorm injections // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. doi:10.1029/2011JA017415.
11. Sergeev V.A., Chernyaev I.A., Dubyagin S.V., et al., Energetic particle injections to geostationary orbit: Relationship to flow bursts and magnetospheric state // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. doi:10.1029/2012JA017773.