

УДК 550.385

О ВОЗМОЖНОСТИ СОПРЯЖЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В ОБЛАСТИ ПУЛЬСИРУЮЩИХ СИЯНИЙ

¹В.В. Сафаргалеев, ²Д.Н. Шibaева, Т.И. ³Сергиенко, ¹И.А. Корнилов

ON POSSIBILITY OF COUPLING OF SATELLITE AND GROUND-BASED OPTICAL MEASUREMENTS IN A PULSATING AURORA REGION

¹V.V. Safargaleev, ²D.N. Shibaeva, ³T.I. Sergienko, ¹I.A. Kornilov

В работе обсуждается возможность детального сопоставления данных спутника CLUSTER с данными по пульсирующим пятнам, зарегистрированным телевизионной камерой в обсерватории Ловозеро во время пролета спутника через область магнитосферы, связанную с полем зрения камеры. Ионосферные проекции спутника рассчитывались по моделям T89, T96 и T01. Показано, что в ситуации, когда априори известны лишь уровень геомагнитной активности и характеристики межпланетной среды, проектирование позволяет определенно судить только о том, попадает спутник в область пульсирующих сияний или нет. Разброс при проектировании в разных моделях не меньше характерных размеров пульсирующих пятен и может достигать 100 км. Соответствующее этому расстоянию время полета спутника составляет ~4 мин. Такая большая пространственная и временная неопределенность не позволяет произвести детальное сопоставление спутниковых данных с наземными оптическими измерениями без априорной информации, например, о характере высыпаний над пятном, как это делалось другими авторами в случае авроральных дуг. Ситуация еще более осложняется, если спутник находится в области сильно вытянутых магнитных силовых линий.

The paper discusses a possibility of detailed comparison between CLUSTER data and data on pulsating spots recorded by the TV camera at Lovozero Observatory when the satellite was flying through the magnetospheric region associated with the camera's field of view. Ionospheric projections of the satellite are calculated using T89, T96, and T01 models. It is shown that when one does know only a geomagnetic activity level and interplanetary medium characteristics, the projection provides a certain insight only into whether the satellite will get into the pulsating aurora region or not. The spread in the projection in various models is not less than sizes of pulsating spots and can reach 100 km. The satellite flight time corresponding to this distance is ~4 min. Such a large spatial and time uncertainty does not allow a detailed comparison between satellite and ground-based measurements to be made without a priori information on, say, the character of precipitations over a spot, as was done by other authors in case of auroral arcs. The situation becomes still more complicated if the satellite is in the region of highly-extended magnetic field lines.

Введение

Информация со спутников, производящих измерения параметров плазмы и геомагнитного поля в различных областях околоземного космического пространства, открывает широкие возможности для всестороннего исследования происходящих здесь геофизических явлений. Особенно перспективны мультиспутниковые проекты (CLUSTER и THEMIS), поскольку одновременные измерения в разнесенных точках идентичными инструментами позволяют успешно разделять пространственные и временные вариации. Ценность спутниковых данных будет еще выше, если удастся сопрячь измерения не только по времени, но и в пространстве. Как известно, в космической плазме часть информации переносится вдоль магнитного поля заряженными частицами и волнами альфвеновского типа. Поэтому здесь и далее под пространственным сопряжением понимается нахождение сопрягаемых объектов на одной и той же геомагнитной силовой линии.

Геомагнитные силовые линии обеспечивают связь магнитосферы с ионосферой. Сопоставление ионосферных явлений со спутниковыми измерениями может существенно расширить арсенал методов и средств изучения явлений, протекающих в магнитосферно-ионосферной системе. Поскольку альфвеновские волны, попадая из магнитосферы в ионосферу, имеют свойство «растекаться» по ионосферному волноводу, наиболее перспективным представляется использование для совместного анализа явлений, вызванных высыпанием заряженными частицами. В отличие от волн, производимые высы-

паниями эффекты привязаны к конкретным силовым трубкам и могут быть легко идентифицированы при помощи ионосферных радаров или оптическими методами. В данной работе речь пойдет об оптических явлениях – полярных сияниях.

Сопоставить спутниковые и наземные оптические данные несложно, если речь идет о низкоорбитальных аппаратах. В качестве примера приведем работы [Sandholt, Farrugia, Cowley, et al., 2000; Sato, Wright, Carlson, et al., 2004.; Safargaleev, Kozlovsky, Sergienko, et al., 2008]. Спутники типа DMSP и FAST пролетают над сияниями на относительно небольшой высоте – от нескольких сотен до первых тысяч километров. На этих расстояниях основной вклад в геомагнитное поле вносит собственное поле Земли, так что форма силовой линии здесь слабо подвержена плохо учитываемому влиянию магнитосферных токов. Логично предположить, что в магнитосфере это влияние велико. При этом форма силовой линии зависит не только от расстояния до Земли (чем дальше в хвост магнитосферы, тем вытянутее силовые линии), но и от уровня геомагнитной активности. Оба фактора затрудняют определение положения подошвы силовой линии, на которой находится спутник (далее по тексту – «проекции спутника»), относительно участка ионосферы, где в это время производятся измерения. Тем не менее, с момента запуска проекта CLUSTER было предпринято небольшое число попыток совместного использования данных наземных оптических и спутниковых наблюдений.

В работе [Figueiredo, Marklund, Karlsson, et al., 2005] исследовалось распределение продольных

электрических полей в окрестности вытянутых в азимутальном направлении авроральных структур шириной около 50 км. Спутники CLUSTER находились на относительно небольшом удалении от ионосферы (3–5 R_E), и авторы сочли возможным ограничиться учетом только собственного поля Земли, взяв за основу модель IGRF (International Geomagnetic Reference Field). По оценкам авторов, погрешность при проектировании спутника могла достигать 3–4° по широте (около 400 км). Поэтому наиболее важные заключения о связи областей ускоренных вверх или вниз электронов с областями ослабленного или усиленного свечения носили предположительный характер.

Еще один случай сопряжения наземных оптических и спутниковых измерений представлен в работе [Aikio, Mursula, Buchert, et al., 2004]. Для проекции спутников CLUSTER, пролетавших на высоте 22 000 км (~4.4 R_E), применялась модель Цыганенко T89. В течение нескольких минут спутники пересекли две дуги. Для того чтобы добиться лучшего соответствия со спутниковыми данными при пересечении второй дуги, авторам пришлось изменить входной параметр модели (увеличить значение индекса K_p с 3 до 5), мотивируя это тем, что вторая дуга появилась в результате развития псевдобрейкапа. Отметим, что в работе [Amm, Aikio, Bosqued, et al., 2003], посвященной тому же случаю пролета CLUSTER над северной частью Скандинавского полуострова, проектирование осуществлялось также по модели T89, но при неизменном $K_p=3$. В результате совместного анализа наземных радарных и спутниковых данных в этой работе был обнаружен сдвиг границы между замкнутыми и разомкнутыми силовыми линиями относительно области обращения конвекции.

Таким образом, в обеих процитированных выше работах положение CLUSTER относительно области ионосферы, где проводились оптические измерения, определялось сначала посредством проектирования вдоль силовой линии, а затем корректировалось исходя из априори известной информации о характере высыпаний, продольных полей и токов над структурами типа дискретных дуг полярных сияний. Априорные знания привлекались также в работе [Pitout, Escoubet, Lucek, 2004], где анализировался случай сопряжения CLUSTER с радаром EISCAT на Шпицбергене.

Правомерен вопрос: можно ли обойтись без априорной информации? Ситуация, когда априорные знания отсутствуют, может возникнуть, например, при попытке сопряжения спутника с пульсирующими сияниями. По сравнению с дискретными дугами, это явление представляется практически не исследованным не только из космоса, но даже с поверхности Земли. Насколько соответствуют пульсирующим образованиям те характеристики плазмы и полей, которые будут выделены из спутниковых данных исходя исключительно из результатов проектирования? Попытка ответить на этот вопрос принята в настоящей статье.

Цель работы формулируется следующим образом: используя современные модели магнитосферы, произвести максимально корректное сопоставление

положения спутника CLUSTER с пульсирующими полярными сияниями в окрестности подошвы силовой трубки, на которой в этот момент находится спутник. Оценить количественно и качественно, насколько отличаются проекции в различных моделях и скажется ли существенно эта разница на однозначности интерпретации спутниковых данных. При исследовании использовались данные телевизионных наблюдений субавроральной обл. Ловозеро. Мы сознательно не привлекали к анализу данные спутников CLUSTER, ограничившись лишь их пространственными координатами.

Методика

В работе [Figueiredo, Marklund, Karlsson, et al., 2005] среди факторов, влияющих на точность сопоставления спутниковых и оптических измерений, отмечалась удаленность дуги полярных сияний от зенита камеры. Действительно, при использовании широкоугольного объектива типа «рыбий глаз» пространственные искажения тем больше, чем ближе сияния к горизонту. Несмотря на то, что в рассмотренном случае траектория спутника проходила вблизи зенита обсерватории, для повышения точности сопоставления мы провели так называемую геометрическую калибровку камеры для конкретного интервала наблюдений.

Под геометрической калибровкой камеры здесь подразумевается комплекс процедур, которым подвергается не само физическое устройство, а полученный с его помощью снимок участка неба. Для калибровки выбирается кадр с максимально видимым количеством звезд. При помощи специально разработанного пакета программ добиваются наилучшего совмещения звезд на снимке со звездами из входящего в состав пакета звездного атласа. Результатом совмещения является формула, которая, будучи примененной к любому другому кадру, ставит в соответствие каждому пикселю изображения точку на координатной плоскости. Знание координат каждого пикселя позволяет с большой точностью совместить сияния с любым другим объектом, координаты которого также известны. Мы использовали пакет программ, подготовленный для калибровки камер скандинавской оптической сети ALIS (Auroral Large Imaging System). С методикой калибровки можно ознакомиться на сайте ALIS (<http://www.alis.irf.se/ALIS/?item=publications#mainref>).

Координаты пикселя зависят от предполагаемой высоты сияний. В данной работе нас не интересовало абсолютное значение этого параметра. Важно было лишь то, чтобы и сияния, и проекция спутника располагались на одной высоте. Зная координаты всех пикселей изображения и подошвы силовой линии спутника на высоте сияний, несложно совместить сияния и проекцию спутника на одном изображении, не ограничивая себя областью зенита. Пример совмещения на высоте 100 км приводится на рис. 1. Фрагмент траектории соответствует интервалу 22:20–22:38 UT, форма сияний соответствует моменту времени 22:33:55 UT, положение проекции спутника в этот момент показано черным кружком, стрелка указывает направление движения. Здесь же для наглядности нанесен контур

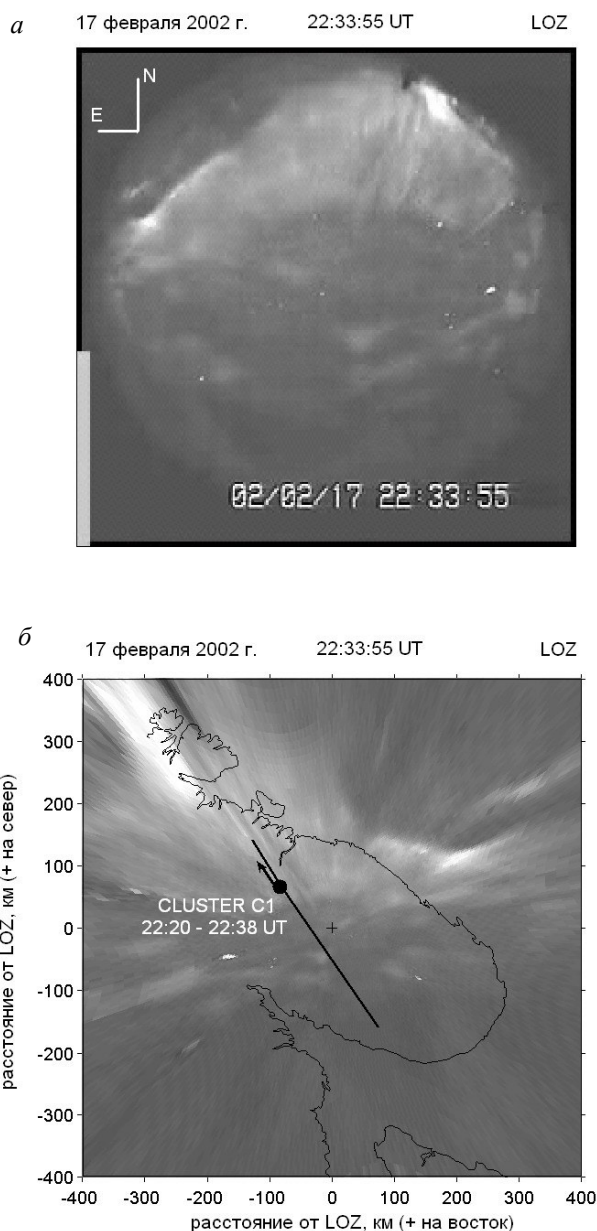


Рис. 1. Оригинальный кадр (*a*) и его проекция на горизонтальную плоскость с учетом результатов геометрической калибровки (*б*). Отрезок прямой – спроектированный на сияния фрагмент траектории спутника C1. Черным кружком отмечена проекция спутника в момент времени, когда сделан снимок. Стрелка показывает направление движения.

береговой линии Кольского полуострова.

На следующем этапе исследования рассчитывались координаты подошвы силовой линии, на которой в данный момент времени находится спутник. Положение спутника в пространстве определяется при помощи спутниковых навигационных систем высокой точностью. Неопределенность возникает при проектировании спутника на ионосферу (в нашем случае – на плоскость, где происходят сияния) вдоль геомагнитной силовой линии и обусловлена произволом выбора модели геомагнитного поля.

Для проектирования спутника мы пользовались пакетом OVT (Orbit Visualization Tool), разработанным участниками проекта CLUSTER. Пакет включает постоянно пополняемую базу данных о фактиче-

ских траекториях спутников CLUSTER и комплект программ, рассчитывающих форму магнитной силовой линии в магнитосфере (см. пример на рис. 2) и координаты ее подошвы на высоте 100 км для разных моделей геомагнитного поля. Поле предполагается суммой собственного поля Земли (дипольное или IGRF) и поля, создаваемого внешними источниками. Последнее рассчитывается из моделей Цыганенко T89, T98 или T01. Входными параметрами являются дата и время, а также K_p - и D_{st} -индексы, величины компонент межпланетного магнитного поля и динамического давления солнечного ветра, коэффициенты G1 и G2 (для модели T01 [Tsyganenko, 2002]). «Расчетная» часть пакета OVT допускает также возможность обновления. Подробная информация о пакете находится на сайте OVT (<http://ovt.irfu.se>).

Краткая характеристика геомагнитной и авроральной обстановки

В работе проанализирован случай пролета спутников CLUSTER через область магнитосферы, сопряженную с полем зрения телевизионной установки ПГИ в obs. Ловозеро (LOZ, географические координаты 67.97° N, 35.02° E, $L \sim 4.5$). Ситуация имела место 17 февраля 2002 г. с 22:20 до 22:40 UT и характеризовалась наличием в небе над Ловозером сияний в форме пульсирующих пятен (рис. 1, *б*). Траектория спутника проходила в послеполуночном секторе магнитосферы (рис. 2, нижняя панель).

На рис. 3, *a* приводятся кеограмма и магнитограммы, характеризующие геомагнитную и авроральную обстановку в целом. Интервал пролета выделен на кеограмме двумя вертикальными линиями, а на магнитограммах отмечен серым цветом. Наблюдения относятся к взрывной фазе и началу восстановительной фазы авроральной суббури, развивавшейся

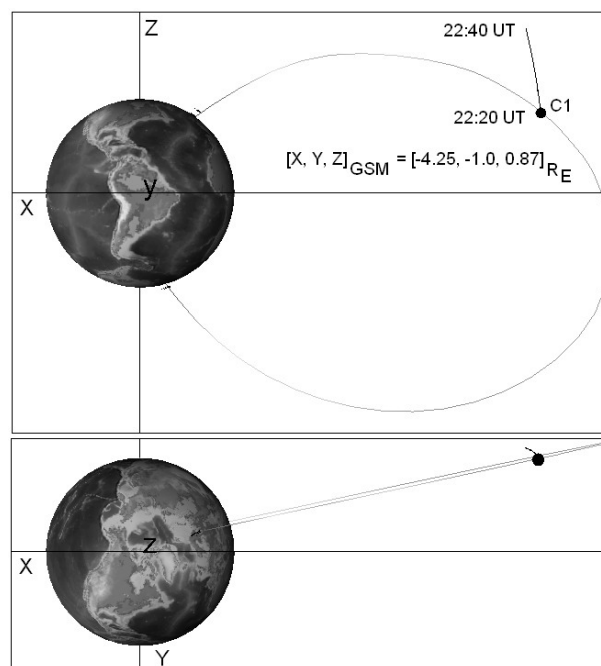


Рис. 2. Положение спутника в магнитосфере и конфигурация силовой линии геомагнитного поля, рассчитанная при помощи пакета OVT.

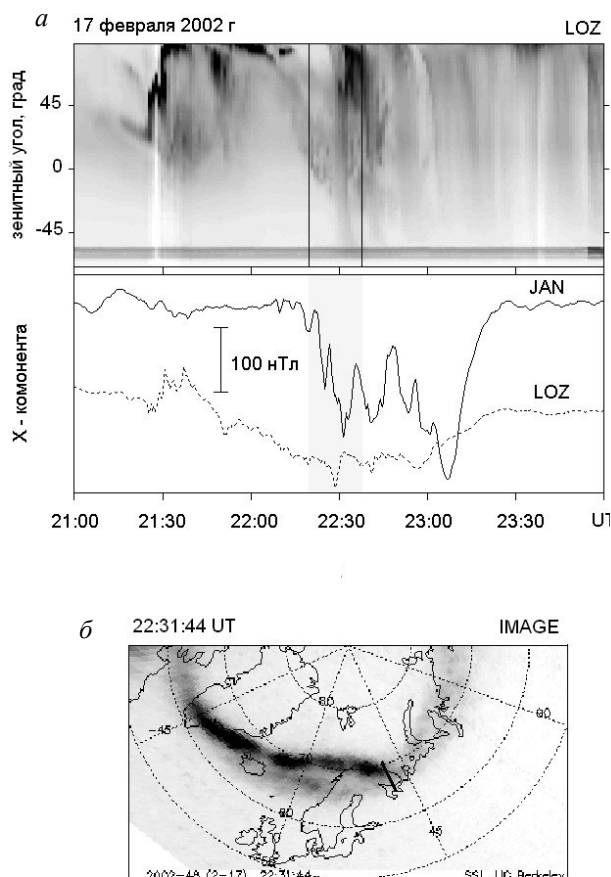


Рис. 3. Кеограмма и магнитограммы, характеризующие авроральную и геомагнитную обстановку во время рассматриваемого события (выделенный временной интервал соответствует фрагменту траектории на рис. 1) (а); положение авроральной выпуклости относительно траектории спутника C1 (отрезок прямой) (б).

шейся по классическому сценарию: медленный дрейф дискретных авроральных форм к экватору был прерван резким броском сияний к полюсу около 22:30 UT, после чего LOZ оказалась под участком ионосферы, заполненным пульсирующими формами.

Амплитуда магнитного возмущения в обсерватория Jan Mayen (JAN, 70.9° N, 8.7° W), расположенной западнее области наблюдений, больше, чем в Ловозере. По данным спутника IMAGE (рис. 3, б) суббуревая авроральная выпуклость также располагалась к западу от Кольского полуострова. Можно поэтому предположить, что очаг суббури находился в полуночном секторе магнитосферы, и развитие выпуклости не сопровождалось заметным искажением формы силовых линий в сопряженной с LOZ области. Иначе правомерность применения всех упомянутых выше моделей была бы под вопросом, поскольку не ясно, насколько адекватно эти глобальные статистические модели описывают конкретные локальные особенности поля (см. работы [Figueiredo, Marklund, Karlsson, et al., 2005; Woodfield, Dunlop, Holme, et al., 2007]).

В заключение раздела приведем значения параметров, использовавшихся для расчета положения подошвы магнитной силовой линии спутника в различных моделях Цыганенко. Индексы геомагнитной активности: $K_p=2$, $D_{st}=-10$ нТл; компоненты межпланетного магнитного поля $[B_x, B_y, B_z]_{GSM}=[3, -4.5, -2]$ нТл; дина-

мическое давление солнечного ветра $P_{sw}=1.8$ нПа; дополнительные коэффициенты: $G1=4$ и $G2=6$.

Результаты проектирования спутника CLUSER C1 в область пульсирующих сияний

В рассматриваемой ситуации в области магнитосферы, сопряженной с рабочей частью поля зрения ТВ-камеры, в течение ~20 мин находились четыре спутника. Это позволило нам найти момент, наиболее отчетливо демонстрирующий неопределенность, с которой может столкнуться исследователь, не имея априорных представлений о том, что должен «видеть» спутник, пролетая над исследуемой авроральной формой.

На рис. 4, а представлена проекция ТВ-кадра на горизонтальную плоскость, располагающуюся на высоте 100 км над земной поверхностью. Цифрами 1, 2 и 3 обозначены два пульсирующих пятна и фрагмент лучистой дуги соответственно. Черным кружком, квадратом и ромбом показаны проекции спутника CLUSTER C1 на эту же высоту, сделанные в одно и то же время (совпадающее с моментом снимка), но с использованием трех различных моделей силовой линии геомагнитного поля. Общим в этих моделях было внутреннее поле. Оно рассчитывалось по модели IGRF образца 2005 г. Поле внешних источников задавалось различными моделями Цыганенко. Следует отметить, что в нашем случае варьирование коэффициентов $G1$ и $G2$ в интервале ± 1 практически не влияло на результат проектирования по модели T01, что обусловлено, вероятно, малыми значениями параметра L для Ловозера.

Независимо от выбранной модели, спутник проектировался в непосредственной близости зенита камеры, отмеченного на рисунке крестиком. При этом он все время оставался в пределах области, заполненной пульсирующими формами, протяженность которой в меридиональном направлении по нашим оценкам составляла ~300 км. Однако для каждой проекции это были разные формы. Если в модели внешнего поля T96 (ромб на рис. 4, а) спутник проектировался на область экваториальной границы пятна 1, то в модели T01 (квадрат на рис. 4, а) измерения спутника должны быть соотнесены с пятном 2, причем с его западной оконечностью. В модели T89 (кружок на рис. 4, а) спутник проектировался на область, вообще не занятую свечением. Эта область располагается между полюсной кромкой пульсирующего пятна 2 и лучистой дугой, ограничивающей пульсирующие сияния с севера. Заметим, что пятна 1 и 2 пульсировали несинхронно, так что спутниковые измерения в моделях T96 и T01 могут относиться к различным этапам их развития. Лучистая дуга 3 представляла квазистационарное образование. Спустя некоторое время проекция спутника, двигаясь в северном направлении, попадет либо внутрь (между) лучей, формирующих эту дугу 3 (в модели T89), либо внутрь пятна 2 (в модели T96), что, по сути, представляет разные типы сияний.

Как видно из рис. 4, а, расстояние между проекциями в моделях T89 и T96 составляет ~100 км. Расхождение в других парах моделей примерно в 2 раза меньше и сопоставимо с поперечными размерами

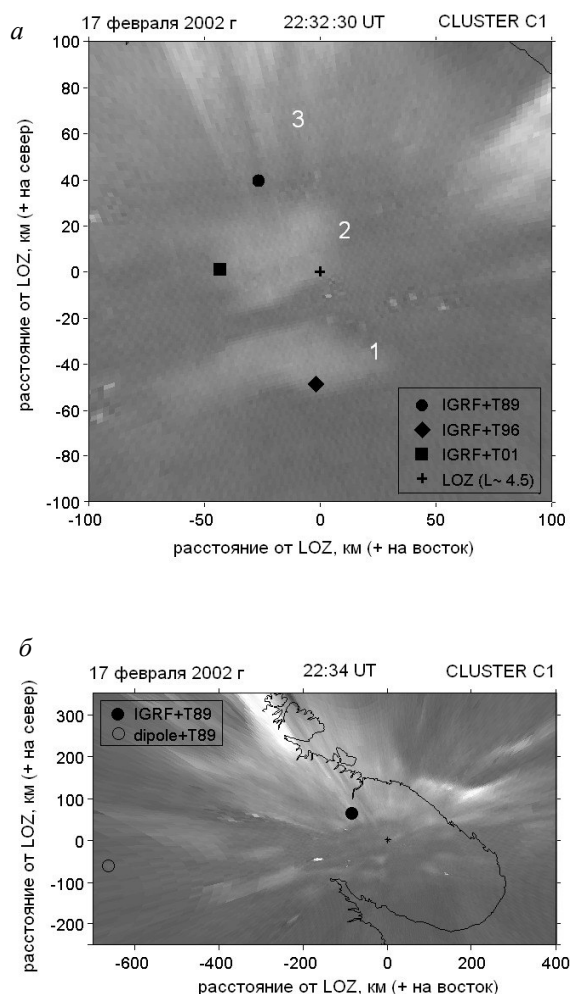


Рис. 4. Положение подшвы силовой линии в указанный момент времени относительно пульсирующих сияний в различных моделях внешнего (а) и внутреннего (б) поля. Цифрами отмечены формы сияний.

пульсирующих пятен. Двигаясь в модели T96 из позиции, соответствующей ромбу на рис. 4, а, спутник попадет на широту проекции, определяемой по модели T89 (круг на рис. 4, а), примерно через четыре минуты. Очевидно, что авроральная ситуация за это время изменится. В магнитосфере за это время спутник пролетит 1000 км, двигаясь под углом $\sim 45^\circ$ к силовым линиям (см. рис. 2, а). На таких пространственных масштабах можно ожидать заметного изменения параметров среды.

Обсерватория LOZ находится у подножья замкнутых силовых линий, пересекающих экваториальную плоскость магнитосферы недалеко от Земли (радиальное расстояние около $4.5R_E$). В некоторых исследованиях предполагается, что влияние токового слоя магнитосферного хвоста здесь относительно невелико и на этих широтах форма силовых линий близка к дипольной. Дипольное приближение удобно, например, при аналитических или численных расчетах. Рисунок 4, б показывает, насколько сильно отличается положение проекции спутника в моделях, где внешнее поле одинаково, а в качестве внутреннего берется либо поле диполя (окружность на рис. 4, б), либо модель IGRF (черный кружок на рис. 4, б). Видно, что расстояние между проекциями порядка

600 км, и спутниковые измерения в дипольной модели относятся к сияниям вне рабочего поля зрения камеры, т. е. у самого горизонта, где очень велики и практически не учитываемы искажения, вносимые используемым объективом.

Обсуждение

Авроральная дуга является наиболее тщательно исследованным объектом. Связанные с дугой выпячивания, поля и токи измерялись разными методами. В настоящее время распределение этих параметров в окрестности дуги имеет статус статистически достоверного и может использоваться в дальнейших исследованиях как априорная информация. Например, в работе [Aikio, Mursula, Buchert, et al., 2004] априорные сведения позволили уточнить момент сопряжения с дугой спутника CLUSTER. Пульсирующие сияния являются менее изученной формой авроральной активности, чем дуга, так что для них информация такого рода практически отсутствует.

В данной работе сделана попытка максимально корректного сопоставления положения спутника с пульсирующими пятнами. Полученные нами результаты проектирования высокоорбитального спутника CLUSTER C1 с высоты $\sim 4.5R_E$ в ионосферу на широте Ловозера ($\sim 68^\circ$ N) свидетельствуют о следующем. В ситуации, когда априори известны лишь уровень геомагнитной активности и характеристики межпланетной среды, даже в условиях умеренной возмущенности ($K_p=2$, $D_{st}=-10$ нТл) проектирование позволяет определенно судить только о том, вне или внутри участка магнитосферы, сопряженного в ионосфере с областью пульсирующих сияний, находится в данный момент спутник. Не зная истинного положения проекции спутника, мы не можем оценить ошибку, которую дает та или иная модель внешнего поля. Отметим только, что разброс при проектировании в разных моделях составлял от 40 до 100 км, что того же порядка или больше характерных размеров пульсирующих пятен. Максимальной разнице между проекциями 100 км соответствует сдвиг по времени ~ 4 мин. В условиях, когда авроральная ситуация быстро меняется (а именно так обстоит дело с пульсирующими сияниями), такая пространственная и временная неопределенность не позволяет произвести детальное сопоставление спутниковых данных с наземными оптическими измерениями.

Кроме задач сопоставления наземных и спутниковых данных, проектирование вдоль силовых линий геомагнитного поля может применяться для отождествления источника наблюдаемых в ионосфере эффектов с той или иной областью магнитосферы. Традиционно такая задача решается при помощи низкоорбитальных спутников типа DMSP [Newell, Meng, 1992]. Однако ситуации, когда DMSP оказывается в нужном месте и в нужное время, случаются редко. Поэтому в ряде подобного рода исследований именно проектирование являлось ключевым, а иногда и единственным методом анализа.

В работе [Pulkkinen, Pellinen, Koskinen, et al., 1991] при помощи модели Цыганенко было показано, что специфическая форма сияний – Ω -сияния

– проектируется на хвост магнитосферы на расстоянии $6\text{--}12R_E$, т. е. на область токового слоя. Позже, анализируя аналогичную ситуацию, автор [Tagirov, 1993] спроектировал Ω -сияния на $5\text{--}6R_E$ и связал положение их источника с внутренней границей плазменного слоя. Разное положение источника предполагает разные механизмы генерации этой формы сияний. В работе [Ober, Maynard, Burke, et al., 2000] проектирование вдоль силовых линий использовалось для того, чтобы определить, в каком из дневных магнитосферных доменов располагается источник исследуемой дуги полярных сияний. Ширина ионосферной проекции дневных доменов может достигать первых сотен километров, и такой подход в целом выглядит оправданным. Действительно, наши исследования показали, что спутник проектируется на занятую сияниями трехсоткилометровую зону вне зависимости от модели. Однако при обсуждении механизма генерации конкретной дуги следует принимать во внимание, что для части предполуденных дуг источник может располагаться не внутри, а на границах домена [Safargaleev, Kozlovsky, Sergienko, et al., 2008].

Отдельное внимание в контексте проблемы проектирования сияний хочется обратить на вторую часть работы [Sato, Wright, Carlson, et al., 2004], где авторами была предпринята попытка исследовать сопряженность пульсирующих сияний в Северном и Южном полушариях. Для определения координат сопряженной точки использовались модель Цыганенко T01 и ее буре́вая модификация. Наблюдения проводились в условиях сильной возмущенности ($K_p=6$). Обе модели показывали, что силовая линия, у подножия которой находились обсерватории, вытянута в хвост вплоть до $15 R_E$. Расхождение при проектировании разными моделями составляло 200–300 км, так что в одной из моделей сопряженная точка проектировалась на край поля зрения камеры всего неба. Авторы пришли к выводу, что в сопряженных областях сияния носят пульсирующий характер, но в Южном полушарии это пульсирующие дуги, а в Северном – структуры типа аврорального факела. Наше исследование, по сути, не противоречит этому результату: все модели проектируют спутник в пульсирующие сияния, форма которых может быть различной для различных моделей. Однако мы думаем, что использовать обнаруженную несопряженность как один из аргументов в пользу предложенной интерпретации следует с большой оговоркой в силу неопределенностей, на которые мы указывали выше. Отметим также, что сильная вытянутость магнитных силовых линий может неадекватно передаваться моделью Цыганенко [Blockx, Gérard, Coumans, et al., 2007].

Еще одним направлением исследования, в котором сопоставление спутниковых измерений с ионосферными эффектами происходит в отсутствие априорной информации, является искусственная модификация ионосферы нагревными стендами HAARP и EISCAT. Размеры пятна нагрева на уровне F-слоя ионосферы составляют несколько десятков километров, что сравнимо с размерами пульсирующих пятен. В работе [Cash, Davies, Kolesnikova, et

al., 2002] с положением пятна сопоставлялись данные спутника FAST (высота около 3000 км), геометрия эксперимента напоминала ситуацию, описанную в первой части работы [Sato, Wright, Carlson, et al., 2004], и корректность сопоставления проекции спутника с пятном не вызывала сомнения. В работе [Platino, Inan, Bell, et al., 2004] анализировались данные спутника CLUSTER (высота около 30 000 км) в момент его предполагаемого сопряжения с нагревной установкой HAARP ($L\sim 4.9$). Геометрия эксперимента близка к исследованной нами ситуации, и мы считаем, что результаты [Platino, Inan, Bell, et al., 2004], так же как и результаты второй части работы [Sato, Wright, Carlson, et al., 2004], надо принимать с оговоркой на неопределенность, вносимую использованием модели внешнего поля.

Заключение

В работе обсуждается возможность детального сопоставления данных спутника CLUSTER с пульсирующими пятнами, зарегистрированными телевизионной камерой в обсерватории Ловозеро во время пролета спутника через сопряженную с полем зрения камеры область магнитосферы. Положение ионосферных проекций спутника получено в трех разных моделях внешнего геомагнитного поля – T89, T96 и T01.

Показано, что в анализируемой ситуации, когда априори известны лишь уровень геомагнитной активности и характеристики межпланетной среды, даже в условиях умеренной возмущенности ($K_p=2$, $D_{st}=-10$ нТл) проектирование позволяет определенно судить только о том, попадает спутник в область пульсирующих сияний или нет. Разброс при проектировании в разных моделях больше или того же порядка, что и характерные размеры пульсирующих пятен. Максимальной разнице между проекциями 100 км соответствует время полета спутника ~4 мин.

Сделан вывод, что в условиях, когда авроральная ситуация быстро меняется во времени (а именно так обстоит дело с пульсирующими сияниями), пространственная и временная неопределенность не позволяют произвести детальное сопоставление спутниковых данных с наземными оптическими измерениями. Неопределенность может быть еще больше, если спутник проектируется из области сильно вытянутых геомагнитных силовых линий (удаленный плазменный слой или доли хвоста).

Данные по параметрам межпланетной среды взяты из базы CDAWeb, а индексы геомагнитной активности – из базы WDC Kyoto (Япония). Магнитограмма обсерватории JAN предоставлена В. Holmeslet (Геофизическая обсерватория Тромсе, Норвегия). Данные спутника IMAGE взяты с веб-ресурса университета Беркли, провайдер S. Mende. Пакет OVT разработан К. Stasiewicz, М. Khotyaintsev и Y. Khotyaintsev (Институт радиофизики Упсала, Швеция). Пакет для геометрической калибровки камер ALIS разработан при участии В. Gustavson (Университет Тромсе, Норвегия). Авторы благодарны I. Sandahl и Н. Nilsson (ИРФ Кируна, Швеция) за интерес к работе. Исследование выполнено при финансовой поддержке Шведской академии наук и Совета министров Северных стран (грант NordAurOpt).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Aikio A., Mursula K., Buchert S., et al. Temporal evolution of two auroral arcs as measured by the Cluster satellite and coordinated ground-based instruments // *Ann. Geophys.* 2004. V. 22, N 12. P. 4089–4101.
- Amm O., Aikio A., Bosqued J.-M., et al. Mesoscale structure of a morning sector ionospheric shear flow region determined by conjugate Cluster II and MIRACLE ground-based observations // *Ann. Geophys.* 2003. V. 21, N 8. P. 1737–1751.
- Blockx C., Gérard J.-C., Coumans V., et al. A comparison between FUV remote sensing of magnetotail stretching and the T01 model during quiet conditions and growth phases // *Ann. Geophys.* 2007. V. 25, N 1. P. 161–170.
- Cash S.R., Davies J.A., Kolesnikova E., et al. Electron acceleration observed by the FAST satellite within the IAR during a 3 Hz modulated EISCAT heater experiment // *Annales Geophys.* 2002. V. 20, N 9. P. 1499–1507.
- Figueiredo S., Marklund G.T., Karlsson T., et al. Temporal and spatial evolution of discrete auroral arcs as seen by Cluster // *Ann. Geophys.* 2005. V. 23, N 7. P. 2531–2557.
- Newell P.T., Meng C.-I. Mapping the dayside ionosphere to the magnetosphere according to particle precipitation characteristics // *Geophys. Res. Lett.* 1992. V. 19, N 6. P. 609–612.
- Ober D.M., Maynard N.C., Burke W.J., et al. Mapping prenoon auroral structures to the magnetosphere // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105, N 12. P. 27519–27530.
- Pitout F., Escoubet C., Lucek E. Ionospheric plasma density structures associated with magnetopause motion: a case study using the Cluster spacecraft and the EISCAT Svalbard Radar // *Ann. Geophys.* 2004. V. 22, N 7. P. 2369–2379.
- Pulkkinen T.I., Pellinen R.J., Koskinen H.E.J., et al. Auroral signatures of substorm recovery phase: A case study // *Magnetospheric Substorms, Geophys. Monogr. Ser.*, V. 64 / Ed. J.R. Kan et al. AGU, Washington, D.C. 1991. P. 333–342.
- Platino M., Inan U., Bell T., et al. Cluster observations of ELF/VLF signals generated by modulated heating of the lower ionosphere with the HAARP HF transmitter // *Ann. Geophys.* 2004. V. 22, N 7. P. 2643–2653.
- Sandholt P.E., Farrugia C.J., Cowley S.W.H., et al. Dynamic cusp aurora and associated pulsed reverse convection during northward interplanetary magnetic field // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105, N 6. P. 12869–12894.
- Sato N., Wright D.M., Carlson C.W., et al. Generation region of pulsating aurora obtained simultaneously by the FAST satellite and a Syowa – Iceland conjugate pair of observatories // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109, N 10. doi: 10.1029/2004JA010419.
- Safargaleev V., Kozlovsky A., Sergienko T., et al. Optical, radar, and magnetic observations of magnetosheath plasma capture during a positive IMF Bz impulse // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26, N 3. P. 517–531.
- Tsyganenko N.A. A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry – 2. Parameterization and fitting to observations // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107, N 7. doi: 10.1029/2001JA000220.
- Tagirov V. Auroral torches: results of optical observations // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1993. V. 55, N 14. P. 1775–1787.
- Woodfield E.E., Dunlop M.W., Holme R., et al. A comparison of Cluster magnetic data with the Tsyganenko 2001 model // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112, N 6. doi: 10.1029/2006JA012217.

¹Полярный геофизический институт КНЦ РАН, Апатиты

²Кольский филиал Петрозаводского университета, Апатиты

³Шведский институт космической физики, Кируна