

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

К 75-ЛЕТИЮ ИЗМИРАН

Магнитные и оптические измерения и признаки пересоединения в области каспа

В.В. Сафаргалеев, Т.И. Сергиенко, А.В. Сафаргалеев, А.Л. Котиков

Изучение процессов в каспе и примыкающих к нему магнитосферных доменах — мантии и низкоширотном плазменном слое — является важным звеном в понимании механизмов реализации солнечно-земных связей. Сопряжённость этих областей с высокоширотной ионосферой позволяет исследовать процесс взаимодействия солнечного ветра с дневной магнитопаузой через ряд ионосферных явлений, наблюдаемых с земной поверхности. Основное внимание уделяется изучению дневных полярных сияний над архипелагом Шпицберген и волн герцевого диапазона, регистрируемых индукционным магнетометром как пульсации класса Pc1. Представлены результаты, позволяющие связать динамику сияний и пульсаций с происходящим при отрицательных значениях B_z -компоненты межпланетного магнитного поля пересоединением, считающимся одним из наиболее вероятных способов поступления энергии солнечного ветра в магнитосферу. Результаты показывают, что оптические и магнитные измерения на Шпицбергене могут использоваться мировым научным сообществом для решения такого важного вопроса космической погоды, как мониторинг восполнения энергии, затраченной в ходе магнитосферной суббури.

Ключевые слова: касп, пересоединение, дневные сияния, пульсации Pc1PACS numbers: 94.05.Sd, **94.20.** – y, **94.30.** – d

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201506j.0655

Содержание

1. Введение (655).
2. Аппаратура и методика (656).
3. Анализ двух пролётов спутников DMSP в пределах поля зрения камеры в Баренцбурге (657).
3.1. Отклик сияний на вариации межпланетного магнитного поля. 3.2. Лучистые структуры в области каспа и связанные с ними высыпания. 3.3. Предполагаемое положение лучистых структур в конце дрейфа. 3.4. Обобщение результатов оптических наблюдений.

В.В. Сафаргалеев. Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН, ул. Ферсмана 14, 184209 Апатиты, Мурманская обл., Российская Федерация

E-mail: Vladimir.Safargaleev@pgia.ru

Т.И. Сергиенко. Swedish Institute of Space Physics, Box 812, SE-98128 Kiruna, Sweden

А.В. Сафаргалеев. Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет,

Университетская наб. 7/9, 199034 С.-Петербург, Российская Федерация

А.Л. Котиков. Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет,

Университетская наб. 7/9, 199034 С.-Петербург, Российская Федерация;

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (Санкт-Петербургский филиал),

Университетская наб. 5, лит. Б, 199034 С.-Петербург, Российская Федерация

Российская Федерация

Статья поступила 14 апреля 2015 г.

4. Высокоширотные геомагнитные пульсации Pc1 как индикатор пересоединения (660).

4.1. Полуденные Pc1 в полярной шапке. Описание отдельного события. 4.2. Полуденные Pc1 в полярной шапке. Статистика и сценарий явления.

5. Заключение (663).

Список литературы (663).

1. Введение

Ключевым звеном формирования космической погоды является передача энергии солнечного ветра во внутреннюю магнитосферу. Накопление энергии в магнитосферном хвосте может стимулировать развитие магнитосферных суббурь и способствовать их повторяемости. Превалирующим способом переноса энергии через магнитопаузу теоретики считают пересоединение формирующих магнитопаузу геомагнитных силовых линий с силовыми линиями межпланетного магнитного поля (ММП) при отрицательных значениях B_z -компоненты ММП (далее — при южном ММП). Пересоединившиеся силовые трубки сносятся солнечным ветром от каспа через полярную шапку на ночную сторону и "скапливаются" в долях хвоста магнитосферы, что приводит к увеличению магнитной энергии в ночной магнитосфере. Взрывообразное высвобождение этой энергии и составляет суть магнитосферной суббури.

Силовые линии геомагнитного поля, формирующие магнитопаузу, упираются в ионосферу в области каспов

(в Северном полушарии — примерно в области на 78° геомагнитной широты), обеспечивая тем самым своеобразную "проекцию" протекающих на магнитопаузе процессов на дневную ионосферу арктических широт. "Проецирование" осуществляется посредством распространяющихся вдоль силовых линий заряженных частиц и волн альвеновского типа, так что наблюдаемые в окрестности каспа полярные сияния и геомагнитные пульсации могут использоваться для изучения механизма пересоединения.

Наблюдение полярных сияний как исследовательский инструмент имеет преимущество перед другими видами наблюдений, поскольку оптическими методами можно исследовать структуру и динамику явления на большом участке ионосферы. Главным недостатком оптических наблюдений является их зависимость от уровня освещённости ионосферы и погодных условий. Возможно, по этой причине слабо изученным остаётся "практический" вопрос солнечно-земных связей: как именно процесс взаимодействия солнечного ветра с магнитопаузой отражается в дневных сияниях?

Расширяющийся арсенал наблюдательных средств даёт возможность привлекать к оптическим исследованиям в дневном секторе высокоширотной ионосферы результаты других видов измерений (магнитных, радарных и спутниковых). В частности, статистика [1] показала, что в дневные часы архипелаг Шпицберген "проходит" под каспом и проекцией прилежащих к нему магнитосферных образований — мантией и плазменным низкоширотным пограничным слоем (Low-Latitude Boundary Layer — LLBL). Первый вопрос, который возникает при попытке связать дневные сияния с процессами на магнитопаузе: в каком магнитосферном домене находится их источник? Если сияния происходят в области высыпаний, характерных для каспа или мантии, и при этом испытывают дрейф к полюсу, то с большой вероятностью можно утверждать, что их источник располагается на дрейфующих в хвост магнитосферы вновь пересоединившихся силовых линиях.

Анализ литературы показывает, что для области каспа и его окрестностей практически отсутствуют прямые сопоставления сияний с областями высыпаний. Дело в том, что в околополуденные часы регистрация слабого свечения технически затруднена из-за подсветки горизонта солнцем, а по причине частой облачности количество интервалов, пригодных для наблюдений, невелико даже в самое тёмное время года. На возможную связь околополуденных сияний с высыпаниями из этих магнитосферных доменов указывает анализ отдельных событий [2–4], но надёжную статистику пока получить не удалось.

В отличие от регистрации сияний, регистрация пульсации Pc1 не затруднена погодными условиями, и временной ряд их непрерывных наблюдений в Баренцбурге (архипелаг Шпицберген) составляет более 15 лет. Однако при поиске источника Pc1 следует иметь в виду, что сгенерированные в магнитосфере волны этого частотного диапазона могут распространяться от места их падения в ионосферу по ионосферному волноводу. Для исключения из рассмотрения волн, источник которых располагается не у магнитопаузы, а в глубине магнитосферы, данные индукционного магнитометра в Баренцбурге анализировались совместно с данными магнитометров в Скандинавии и на Кольском полуострове.

Цель настоящей статьи — продемонстрировать на конкретных примерах возможность измерительного комплекса Полярного геофизического института (ПГИ)

на Шпицбергене регистрировать оптические и магнитные явления, источник которых находится на разомкнутых силовых линиях — в каспе или мантии. Положения границ каспа и мантии в ионосфере определялись по характеру высыпающихся частиц спутниками DMSP (Defence Meteorological Satellite Program), пролетающими над областью наблюдений. Характер ионосферной конвекции во время исследованных событий указывал на то, что источник сносится в хвост магнитосферы, что дало основание связать наблюдаемое явление с пересоединением.

2. Аппаратура и методика

В настоящей статье используются данные регистрации полярных сияний в гидрометеорологической обсерватории ПГИ "Баренцбург" (обозначаемой далее как ВАВ) на архипелаге Шпицберген цифровой камерой "всего неба" (all-sky) на ПЗС-матрице (ПЗС — прибор с зарядовой связью) размером 540×540 пикселей, с помощью которой осуществлялся мониторинг авроральной активности в ноябре 2012 г. Регистрация сияний проводилась в белом цвете (white light, WL) с временным разрешением один кадр в секунду. Для определения границ авроральных вторжений по данным спутников DMSP использовался предложенный в [5] автоматический алгоритм, реализованный для работы в онлайн-режиме на сайте http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/dataset_list.html.

Важным звеном совместного анализа данных является корректное сопоставление сияний с областями спутниковых измерений. Это делается посредством проектирования траектории спутника на высоту нижнего края сияний с указанием границ доменов. Точная привязка сияний к географическим координатам делалась по звёздам с помощью пакета программ, разработанного для шведского проекта Auroral Large Imaging System (ALIS) (<http://www.irf.se/~urban/avh/html/htmlthesis.html>). Для "проецирования" положения спутника на высоту сияний мы использовали модель геомагнитного поля IGRF (International Geomagnetic Reference Field). Для определения высоты сферической поверхности, на которой траектория спутника совмещается с положением сияний, мы оценивали высоту нижнего края свечения, опираясь на расчёты высотного профиля светимости по данным о высыпающихся частицах [6].

К волнам альвеновского типа относятся ионно-циклотронные волны, которые на земной поверхности регистрируются как вариации геомагнитного поля в герцевом диапазоне (пульсации Pc1). В обсерватории ВАВ регистрация пульсаций Pc1 осуществляется индукционным магнитометром, работающим с частотой 40 отсчётов в секунду. Для наглядного представления волновой активности в исследуемой полосе строились динамические спектры (сонограммы), отображающие двумерное распределение интенсивности сигнала в координатах частота–время. Для исключения из рассмотрения волн, источник которых располагается не у магнитопаузы, а проецируется в авроральную или среднеширотную ионосферу, данные индукционного магнитометра в ВАВ анализировались совместно с данными магнитометров в Скандинавии (обсерватория Килписъярви — KIL) и на Кольском полуострове (обсерватория Ловозеро — LOZ).

Оптические и магнитные измерения в ВАВ дополнялись данными радаров EISCAT (European Incoherent Scatter Scientific Association) и SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network) по ионосферной конвекции, ха-

рактор которой в значительной степени определяется ММП. Комплексный подход к анализу явления позволяет снизить неоднозначность его интерпретации [2], но при этом число пригодных для анализа событий оказывается ограниченным. Тем не менее результаты комплексного анализа отдельных событий могут явиться основой для дальнейших исследований. В разделах 3, 4 представлено несколько примеров, демонстрирующих возможности оптических и магнитных наблюдений на Шпицбергене для исследования процессов на магнитопаузе в приложении к задачам космической погоды.

3. Анализ двух пролётов спутников DMSP в пределах поля зрения камеры в Баренцбурге

3.1. Отклик сияний на вариации межпланетного магнитного поля

На рисунке 1 представлены кеогаммы, характеризующие динамику сияний вдоль геомагнитного меридиана, на котором установлена камера, и вариации B_z - и B_y -компонент ММП в гелиоцентрической солнечно-магнитной (Geliocentric Solar Magnetospheric, GSM) системе координат у лобовой точки на фронте ударной волны. Ситуация в межпланетной среде характеризуется подъёмом кривой B_z по направлению к положительным значениям в начале интервалов. В середине интервалов начинается разворот B_z в сторону больших отрицательных значений, после чего B_z -компонента некоторое время остаётся стабильно отрицательной в обоих рассматриваемых событиях. Отрицательная B_z -компонента теоретически должна сдвинуть касп к югу от его статистического положения, и касп окажется в поле зрения камеры в ВАВ. Одновременно с B_z начинает уменьшаться B_y -компонента, и во время пролётов спутников DMSP F16 и F17 над Баренцбургом (см. вертикальные линии на рис. 1) компонента B_y имеет значения, близкие к нулю. В совокупности с большими отрицательными значениями B_z это означает следующее: силовые линии ММП коллинеарны и противоположны по направлению геомагнитным силовым линиям, формирующим околополуденный участок магнитопаузы, что теоретически создаёт благоприятные условия для пересоединения.

В обоих событиях авроральная активность имеет типичный для дневных сияний вид — смещающиеся к полюсу авроральные формы (Poleward Moving Auroral Forms, PMAF). В событии 17 декабря 2012 г. поворот B_z к югу сопровождается отчётливым смещением PMAF как единого целого к экватору. Смещение начинается через 10 мин после того, как B_z меняет знак плюс на минус. В событии 24 ноября 2012 г. момент начала отклика сияний на экскурс B_z в область больших отрицательных значений не столь выражен, что, возможно, обусловлено отсутствием в предыстории продолжительного интервала смещения сияний к полюсу на фоне положительных значений B_z . По данным веб-ресурса OMNI (Offender Management Network Information system) лобовая точка ударной волны в этом случае находилась на два земных радиуса ближе к Земле, чем в рассмотренном выше случае, поэтому время задержки реакции сияний на B_z будет меньше, чем в событии 17 декабря. Судя по динамике сияний, представленной на рис. 1б, можно считать, что их сдвиг к экватору начался около 07:12 UT (этот момент отмечен белой стрелкой на кеогамме).

Общим для обоих событий является появление с последующим дрейфом к полюсу одиночной дуги спустя 10–15 мин после начала дрейфа PMAF к экватору.

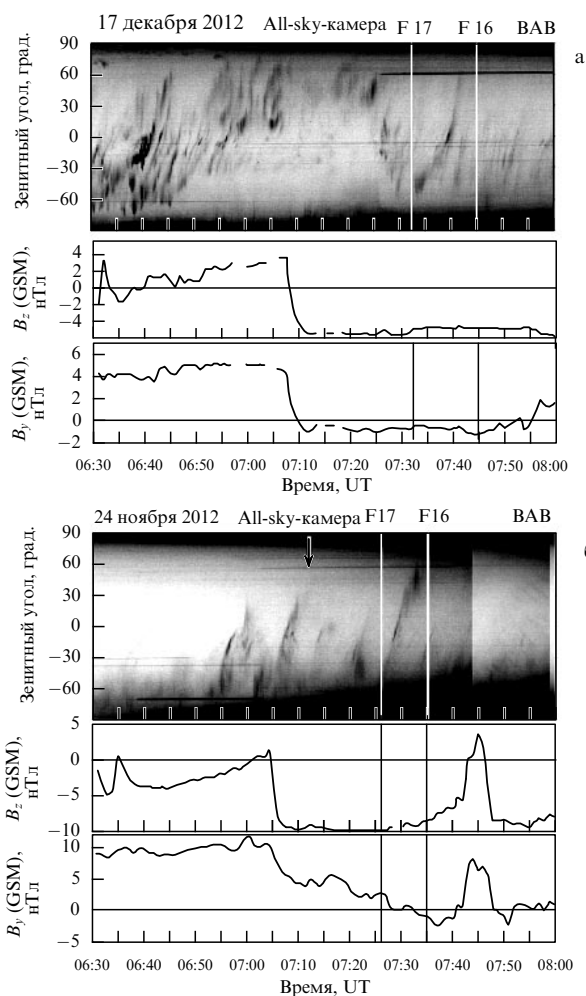


Рис. 1. Отклик сияний на вариации межпланетного магнитного поля. Вертикальными прямыми показаны моменты пролёта спутников в поле зрения камеры в Баренцбурге, белой стрелкой указано начало экваториального сдвига сияний в событии 24.11.2012. UT — универсальное время.

Незадолго до появления одиночной дуги и спустя несколько минут после её исчезновения через поле зрения камеры пролетали спутники DMSP (вертикальные линии на рис. 1). Спектрограммы, отображающие характер высипаний над Баренцбургом, приведены на рис. 2. Видно, что перед появлением одиночной дуги спутник F17 в обоих случаях регистрировал высипания, свойственные каспу. После исчезновения дуги, по данным спутника F16, в поле зрения камеры проецировалась граница между мантией и низкоширотным пограничным слоем (LLBL). Детальный совместный анализ оптических и спутниковых данных приводится далее.

3.2. Лучистые структуры в области каспа и связанные с ними высипания

Для сопоставления спутниковых и оптических данных требуется определить высоту сияний, на которую потом будет проецироваться траектория спутников с нанесёнными на неё границами магнитосферных доменов. Обычно это делается исходя из априорной информации, но в данном случае спутниковые данные позволили рассчитать высотные профили светимости по методике из работы [6] и оценить по ним высоту свечения в момент сопряжения спутника со светящейся областью.

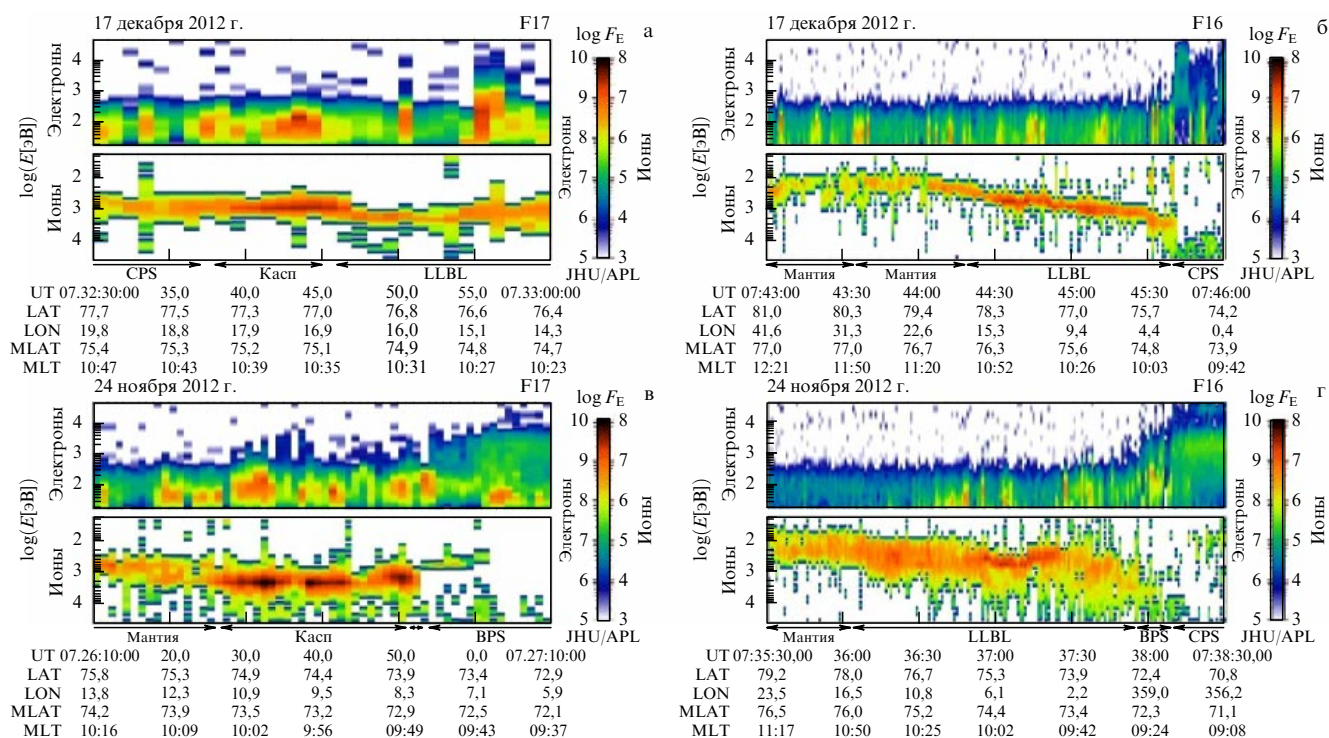


Рис. 2. Распределение величины дифференциального потока энергии высыпавшихся частиц F_E [эВ (эВ см² с ср)⁻¹] вдоль траекторий спутников во время их пролёта над областью оптических наблюдений (по данным сайта <http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/spectrogram/index.html>). CPS — центральный плазменный слой, BPS — пограничный плазменный слой, LAT и LON — соответственно географические широта и долгота подспутниковой точки (проекция спутника на земную поверхность), MLAT — магнитная широта подспутниковой точки, MLT — магнитное местное время, JHU/APL — Johns Hopkins University (JHU) Applied Physics Laboratory (APL).

Данные спутника F17 на рис. 2 показывают, что в событии 17.12.2012 спутник пролетал через свойственные каспу высыпания с 07:32:38 по 07:32:45 UT и непосредственно перед пересечением границы с LLBL зафиксировал всплеск электронных высыпаний. Нижний край обусловленного этим всплеском свечения находился на высоте 240 км. Результат совмещения оптических данных с проекцией спутника на эту высоту показан на рис. 3а. Сплошной линией на рисунке обозначена проекция фрагмента траектории, на котором спутник регистрировал каспенные высыпания. Видно, что в момент всплеска высыпаний спутник (белый кружок на траектории) был сопряжён со слабой лучистой структурой.

Во время пролёта спутника F17 в событии 24 ноября 2012 г. величина B_z была почти в два раза больше, чем 17 декабря, что привело к существенно большему смещению от зенита экваториальной кромки каспа вместе с сияниями. Поэтому при совместном анализе оптических и спутниковых данных мы столкнулись с трудностью надёжной идентификации нижнего края слабых сияний в каспе на фоне протяжённых по высоте интенсивных лучистых структур. Особенно это касается воспроизведения сияний на бумажном носителе. Спектрограмма на рис. 2в показывает, что спутник пролетал через касп с 07:26:27 по 07:26:51 UT и сразу после пересечения границы с мантией, т.е. у полюсной границы каспа, зарегистрировал усиленные электронные высыпания. В качестве нижнего края свечения определена высота 255 км, результат совмещения оптических данных с проекцией спутника на эту высоту показан на рис. 3б. Белой линией обозначен фрагмент траектории в области каспенных высыпаний. Видно, что спутник проецируется в область, "затенённую" свечением одного из лучей яркой авро-

ральной формы у юго-западной кромки поля зрения камеры.

Интересной особенностью высыпаний, связанных с лучистыми структурами в каспе, является то, что, наряду с электронными высыпаниями, не ослабевает поток высыпавшихся ионов (рис. 2а, в). Ранее в работе [2] наблюдалось практически полное "запирание" ионов над дугами, что объяснялось присутствием над дугами области ускоряющего потенциала — двойного слоя или области "аномального" сопротивления. Из сказанного можно сделать вывод, что наблюдаемые в каспе сияния обусловлены скорее рассеянными, чем ускоренными электронами.

В разделе 3.3 проанализировано общее для обоих событий поведение сияний после пролёта спутника F17 через касп, а именно усиление, смещение к полюсу и исчезновение лучистой дуги, при этом особое внимание при анализе уделяется определению положения лучистой дуги относительно границ магнитосферных доменов.

3.3. Предполагаемое положение лучистых структур в конце дрейфа

Как видно из рис. 1, динамика сияний сразу после пролёта спутника F17 через касп развивалась по одинаковому для обоих случаев сценарию: усиление одиночной дуги южнее зенита с последующим её дрейфом к полюсу и затуханием. Началу дрейфа структуры предшествует интервал практически не изменяющегося ММП, так что положение ионосферных проекций магнитосферных доменов, определённое по данным предыдущих пролётов спутника F17, не могло измениться настолько сильно, чтобы движение структуры к полюсу можно было связать со смещением к полюсу границ доменов.

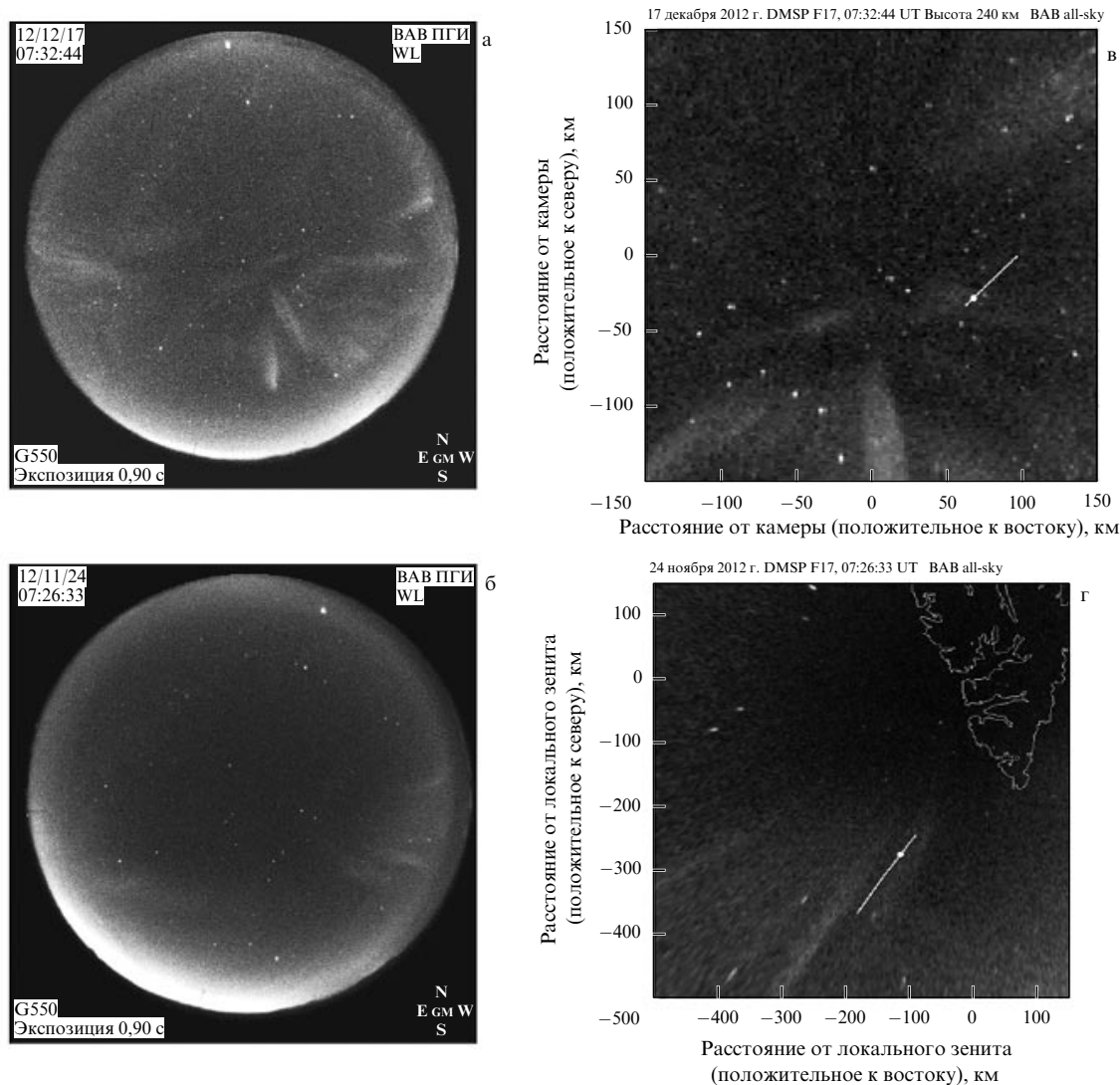


Рис. 3. Оригинальные кадры (а, б), снятые камерой G550, и соответствующие им проекции (в, г) на плоскость вместе с фрагментом траектории спутника DMSP F17 в каспе. Положение спутника в момент регистрации усиления потока высыпающихся частиц показано белым кружком.

Благодаря удачному стечению обстоятельств через область оптических наблюдений вслед за спутником F17 пролетал спутник F16. Ситуация с высыпаниями в момент пролёта F16 отличается от той, которая имела место десятью минутами ранее, во время пролёта F17. Отсутствуют каспенные высыпания, а граница между замкнутыми и разомкнутыми силовыми линиями, определяемая нами как полюсная граница LLBL в событии 17.12.2012 г. и как экваториальная граница мантии в событии 24.11.2012 г., сместилась к полюсу. Поэтому для оценки положения лучистых структур в конце их дрейфа будем пользоваться данными спутника F16, дающими положение границ высыпаний спустя ≈ 2 мин после того, как след структур перестал идентифицироваться на кеограммах.

Результаты сопоставления дуг с границами доменов представлены на рис. 4. Вследствие слабости сияний непосредственно перед их исчезновением, кадры относятся к моменту, когда структура находилась ещё в процессе дрейфа, за 3,5 мин до выхода спутника F16 из области мантийных высыпаний. Более отчётливо форма дрейфующей структуры идентифицируется в событии 24.11.2012 г. Для облегчения идентификации очень слабой дуги в событии 17.12.2012 г. нам пришлось при

совмещении оптических и спутниковых данных прибегнуть к искусственному акцентированию ("подкрашиванию") четырёх её лучей (рис. 4б). Штриховой линией со стрелкой на рис. 4 показаны фрагменты траектории спутника F16, спроецированные вместе с сияниями на плоскость, высота которой принята равной 250 км (нижняя кромка свечения). Напомним, что на снимках, сделанных объективом типа "рыбий глаз", нижней кромке свечения в естественных условиях соответствует дальний (от центра кадра) край светящейся области на снимке. Положение спутника в момент пересечения экваториальной границы мантии показано белым кружком. Проходящая через спутник белая сплошная линия, ориентированная примерно вдоль геомагнитной широты (параллельно дугам), — предполагаемое положение границы между замкнутыми и разомкнутыми силовыми линиями. Учитывая то, что снимки сделаны за 3,5 мин до пересечения спутником экваториальной границы мантии, а дуга в течение этих 3,5 мин продолжала двигаться к полюсу, можно предположить, что в обоих событиях источник дрейфующих сияний располагался на открытых силовых линиях. В разделе 3.4 мы обсудим возможные варианты интерпретации полученного результата.

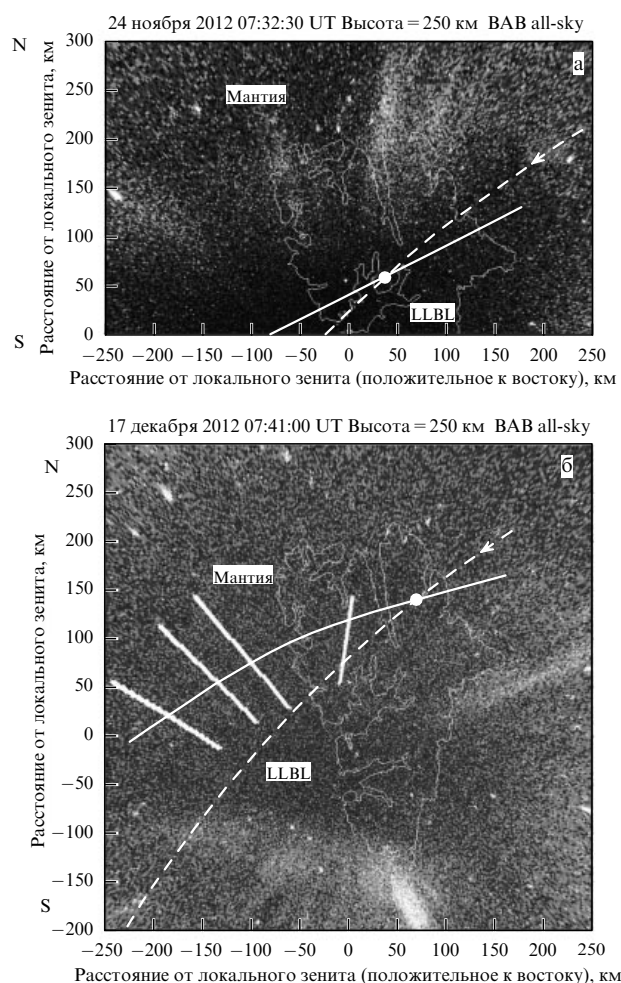


Рис. 4. Положение дрейфующей дуги относительно границы между замкнутыми и разомкнутыми силовыми линиями по данным DMSP F16 24 ноября 2012 г. (а) и 17 декабря 2012 г. (б). Штриховая линия — фрагмент траектории, сплошная линия — геомагнитная широта, по которой проходит граница между мантией и низкоширотным пограничным слоем; на рис. б лучи слабой дуги акцентированы белыми линиями.

3.4. Обобщение результатов оптических наблюдений

Нами проанализированы два случая наблюдения сияний в окрестности дневного каспа совместно с данными спутников DMSP F17 и F16, пролетавшими друг за другом через поле зрения камеры в Баренцбурге с интервалом около 10 мин. Кеогаммы показали, что авроральная активность в обоих событиях развивалась по схожим сценариям, поскольку характер изменения ММП был также схож. Экскурсы B_z -компоненты в область отрицательных значений сопровождался перестройкой дневной части магнитосферы, в результате чего касп оказался в зените обсерватории Баренцбург.

Мы показали, что слабые всплески электронных высываний, регистрируемые спутником внутри каспальных высываний, соответствуют слабым "красным" лучистым структурам, которые находились вблизи полюсной и экваториальной границ каспа и были образованы скорее рассеянными, чем ускоренными электронами.

Ещё один элемент схожести авроральной активности — заметное смещение к полюсу лучистой дуги, начавшееся практически сразу после пролёта первого спутника (F17) и закончившееся за несколько минут до пролёта второго (F16). По данным F16 источник дрейфующих дуг нахо-

дится в области разомкнутых силовых линий, в связи с чем в качестве наиболее вероятного механизма наблюдаемого явления предлагается пересоединение силовых линий ММП с геомагнитными силовыми линиями. В пользу этой гипотезы свидетельствует характер ионных высываний по данным спутника F16 (рис. 2б, г). Высывания имеют выраженную дисперсионную форму, когда энергия частиц увеличивается по мере продвижения спутника из области высоких широт в область более низких, что традиционно связывают с пересечением спутником трубок, дрейфующих в антисолнечном направлении.

Особый интерес представляют дисперсионные структуры, наблюдаемые в интервалы 07:44:05–07:44:35 UT (17 декабря 2012 г.) и 07:35:55–07:36:26 UT (24 ноября 2012 г.). Структуры "пересекают" границу мантия/LLBL, и в свете сказанного выше они могут быть связаны с силовыми трубками, проникающими в мантию из низкоширотного пограничного плазменного слоя.

4. Высокоширотные геомагнитные пульсации Pc1 как индикатор пересоединения

Геомагнитные пульсации диапазона Pc1 (0,1–2 Гц) обычно связывают с волнами альвеновского типа, возникающими в результате развития ионно-циклотронной неустойчивости анизотропной плазмы. Их основная особенность — "привязанность" к силовым линиям геомагнитного поля — даёт принципиальную возможность наземному наблюдателю определить положение источника пульсаций в магнитосфере (при условии, что регистрируемые пульсации пришли к наблюдателю не по ионосферному волноводу).

С точки зрения сформулированной задачи особый интерес представляют высокоширотные Pc1. Например, авторы [7] предложили использовать высокоширотные Pc1 для определения позиции каспа. В межпланетной среде эмиссии этого диапазона наблюдаются в части переходной области, известной как магнитный барьер [8]. Согласно работе [9] существует принципиальная возможность проникновения пульсаций из переходного слоя в магнитосферу. В ходе пересоединения анизотропная плазма из магнитного барьера может появиться на геомагнитных силовых линиях, связанных с ионосферой в области каспа, и распространяющиеся вдоль силовых линий ионно-циклотронные волны могут быть зарегистрированы на земной поверхности в виде Pc1.

Если пересоединение происходит при отрицательной B_z -компоненте, то источник пульсаций остаётся на разомкнутых силовых линиях, увлекаемых потоком солнечного ветра в хвост магнитосферы. Для того чтобы зарегистрировать эти пульсации, магнитометр должен располагаться в полярной шапке. Согласно статистике [1] касп обычно проецируется ближе к полюсу по отношению к Шпицбергену. Когда B_z -компонента ММП отрицательна и велика по абсолютной величине, касп смещается к экватору (пример экстремального случая приведён на рис. 1б) и Шпицберген оказывается внутри полярной шапки в области открытых силовых линий. Магнитометры на материке всё ещё могут оставаться на замкнутых силовых линиях. Несколько таких ситуаций проанализировано в работе [10]. Ниже мы представляем результаты этой работы в кратком изложении.

4.1. Полуденные Pc1 в полярной шапке.

Описание отдельного события

Выбранное для демонстрации событие произошло во время главной фазы умеренной магнитной бури, начав-

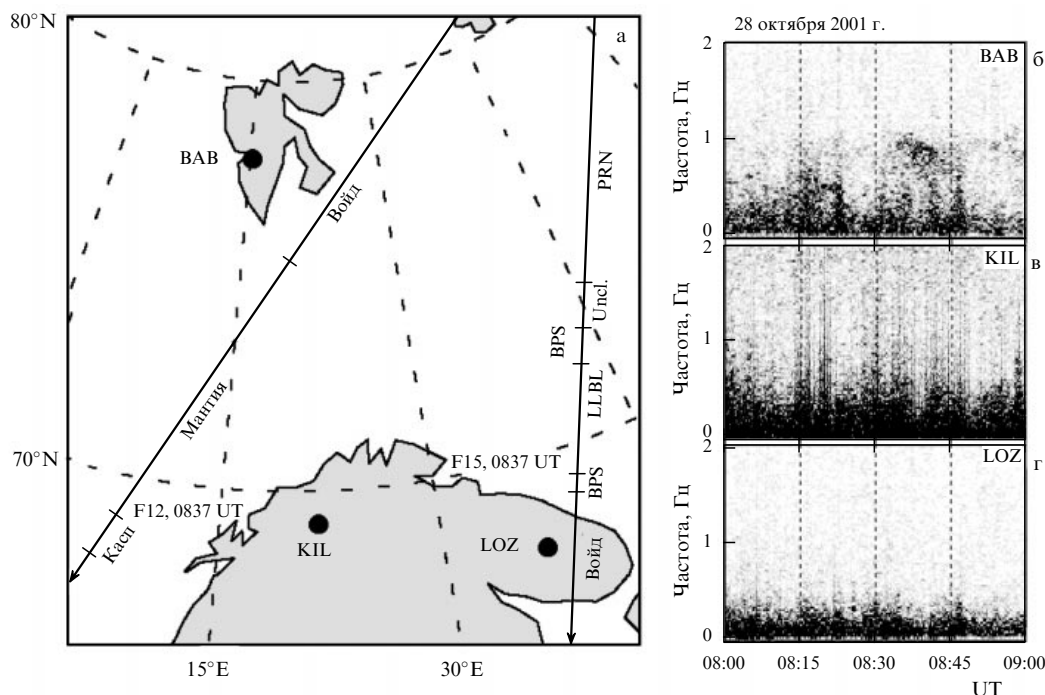


Рис. 5. (а) Положение обсерваторий BAB, KIL и LOZ относительно границ магнитосферных доменов по данным спутников DMSP F12 и F15; PRN — полярный дождь, Unci. (unclassified) означает, что онлайн-программа распознавания не смогла по характеристикам частиц соотнести источник высываний с каким-либо магнитосферным доменом. (б–г) Форма ULF-активности на этих обсерваториях.

шейся в результате прохождения Земли через магнитное облако, которое характеризовалось, в частности, большими отрицательными значениями B_z -компоненты ММП. Измерения вариаций геомагнитного поля в диапазоне частот 0–40 Гц проводились в трёх обсерваториях: Баренцбург (архипелаг Шпицберген), Килписъярви (север Финляндии) и Ловозеро (центр Кольского полуострова). В течение времени рассматриваемого события два спутника серии DMSP пролетали над областью магнитных измерений практически одновременно (рис. 5а). Данные, полученные со спутников, показали, что из-за большой отрицательной B_z -компоненты (–10 нТл) касп сместился приблизительно на 10° к югу относительно его статистической позиции. В результате обсерватория BAB оказалась у подножия разомкнутых силовых линий, в области полярной шапки, в то время как положение KIL можно отождествить с положением каспа или части LLBL к востоку от каспа. Обсерватория LOZ располагалась внутри проекций LLBL или пограничного плазменного слоя — BPS (Boundary Plasma Shift).

Развитие во времени геомагнитной активности в ультранизкочастотном (Ultra Low Frequency, ULF) диапазоне представлено на рис. 5б–г в форме сонограмм. Видно, что пульсации Pc1 наблюдались только в BAB (рис. 5б), которая в это время находилась в полярной шапке. На станциях KIL (рис. 5в) и LOZ (рис. 5г), располагающихся у подножия замкнутых силовых линий, пульсации отсутствовали. Мы полагаем, что такое пространственное распределение пульсаций Pc1 говорит о том, что эмиссии в BAB не были результатом простого распространения сигнала в ионосферном волноводе. Следовательно, источник Pc1 находился на разомкнутых силовых линиях.

Данные спутника Wind показывают, что перед началом пульсаций в Баренцбурге B_z -компонента уменьшилась почти до нуля. То есть перед началом пульсаций Pc1 область пересоединения на магнитопаузе сместилась по

направлению к полуденному меридиану, где u -компонента земного поля также незначительна и условия для пересоединения (противонаправленность полей) наиболее благоприятны.

Ионосферные условия над Шпицбергом отслеживались радарной системой SuperDARN. На диаграммах рис. 6 показаны основные особенности поведения крупномасштабной конвекции в течение рассматриваемого промежутка времени, включая интервал активности Pc1. Перед началом пульсаций конвекция над Шпицбергом имела азимутальное направление (вдоль широты), так что обсерватория находилась на пути магнитных силовых трубок, дрейфующих из хвоста магнитосферы (рис. 6а, г). Появление пульсаций совпадает по времени с изменением характера конвекции. На диаграммах, приведённых на рис. 6б, д, видно, что дрейф над Шпицбергом приобрёл меридиональное направление. Штриховой линией показана траектория спутника DMSP F12 на высоте 300 км. Белым кружком на рис. 6б отмечено положение каспа. Поток плазмы вдоль меридиана может означать, что теперь BAB находится на пути только что пересоединившихся магнитных силовых трубок. Значит, Pc1-активность в полярной шапке могла стать результатом проникновения в магнитосферу анизотропной плазмы из переходной области (точнее, из магнитного барьера). Диаграммы на рис. 6в, е соответствуют моменту окончания пульсаций. Видно, что конвекция над BAB вновь приобрела азимутальное направление.

4.2. Полуденные Pc1 в полярной шапке.

Статистика и сценарий явления

Нами были просмотрены данные спутника Wind с октября 2001 г. по октябрь 2002 г. и выделены случаи, когда вблизи местного полудня в BAB B_z -компонента ММП принимала большие отрицательные значения.

Анализ всех событий выявил следующие основные закономерности (более подробно результаты изложены в работе [10]).

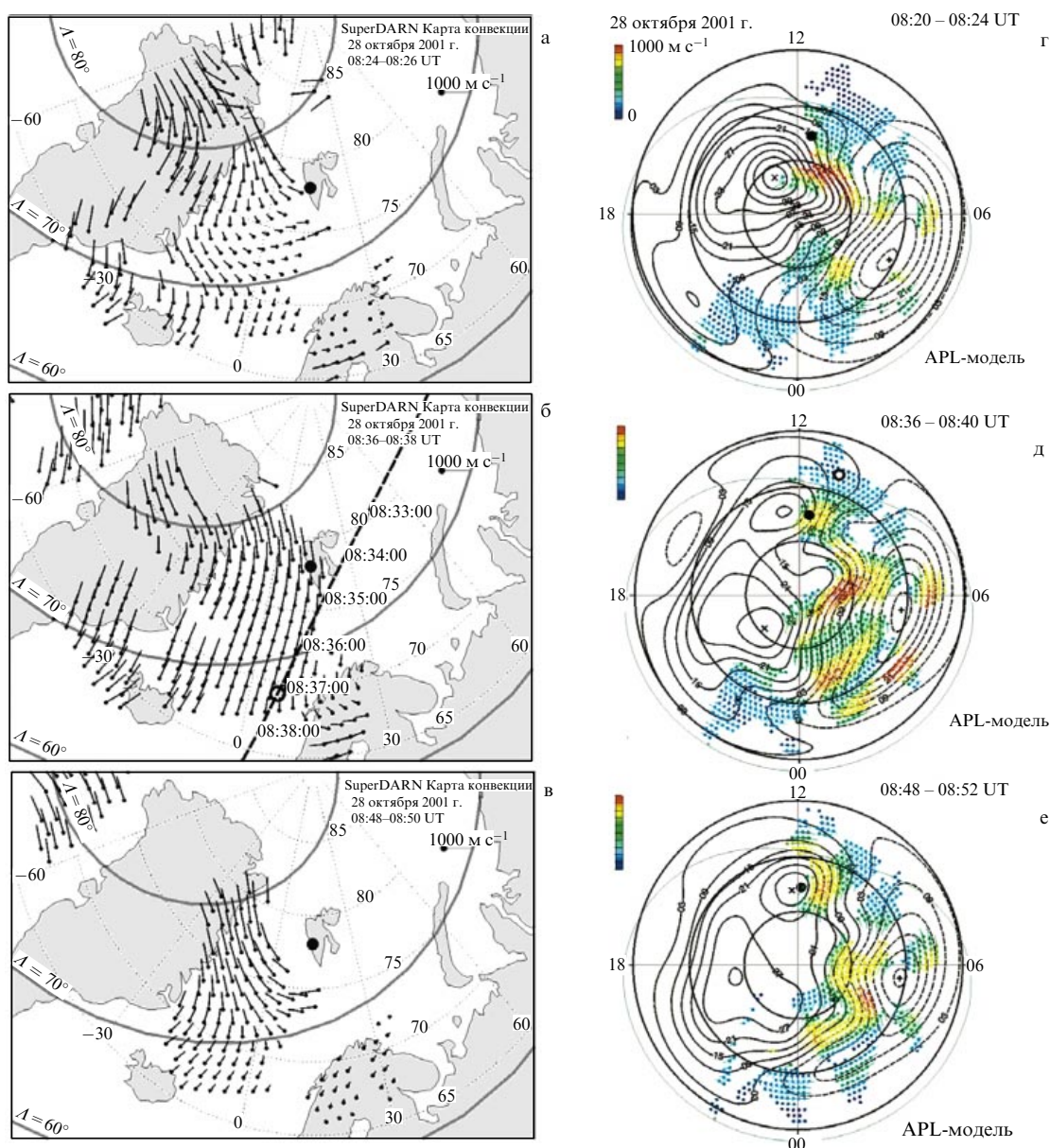


Рис. 6. (В цвете онлайн.) Характер ионосферной конвекции над Шпицбергом перед (а, г), во время (б, д) и после (в, е) интервала пульсаций в Баренцбурге по измерениям SuperDARN (а–в) и реконструкция этой конвекции по данным SuperDARN с учётом ММП (г–е). Штриховая линия — траектория спутника DMSP, белый кружок на траектории — положение каспа, чёрный кружок — обсерватория Баренцбург. Стрелками показано направление скорости конвекции. Λ — географическая широта.

— Для всех случаев данные спутников DMSP показывают, что магнитометр ВАВ находился в полярной шапке, тогда как два других магнитометра (KIL и LOZ) находились в области замкнутых силовых линий.

— Во всех случаях ни в KIL, ни в LOZ пульсаций не наблюдалось.

— В течение 10-минутного интервала, включающего в себя момент наблюдения пульсаций, B_z -компонента ММП уменьшалась почти до нуля.

— В трёх случаях были доступны данные радара SuperDARN, которые показывали, что перед началом Pc1 направление конвекции над Шпицбергом менялось на антисолнечное.

— Приблизительно за 10 мин до начала Pc1 на сети магнитометров IMAGE (International Monitor for Auroral Geomagnetic Effect) наблюдались пульсации диапазона Pc5 с возрастающей амплитудой. Большей интенсивности пульсации достигали на границе между зам-

нутыми и разомкнутыми силовыми линиями. К полюсу от границы пульсаций не наблюдалось.

Таким образом, в рассмотренных семи случаях пульсаций Pc1, наблюдавшихся в высоких широтах в дневные часы в периоды больших отрицательных значений B_z -компоненты ММП, высокоширотная обсерватория (ВАВ) находилась в это время в полярной шапке, а обсерватории авроральной зоны (KIL и LOZ) оставались в области замкнутых силовых линий. Пульсации были обнаружены только в полярной шапке. (Подобный результат ранее был получен в работах [11, 12].) Причиной этого могло быть очень сильное убывание амплитуды Pc1 с увеличением расстояния (порядка 10 дБ на 100 км по оценкам, сделанным в работе [11]). Принимая во внимание возможность такого ослабления пульсаций, авторы [12] пришли к выводу, что наблюдаемые Pc1 должны генерироваться в пространственно ограниченной области. Таким образом, отсутствие пульсаций к югу от ВАВ

может означать, что пульсации не могли прийти из низких широт по ионосферному волноводу и их источник должен располагаться на разомкнутых силовых линиях и иметь ограниченные пространственные размеры.

Широко распространённой является точка зрения, что источником Pc1 может быть анизотропная протонная плазма. Поскольку доли хвоста магнитосферы характеризуются невысоким содержанием плазмы вообще, возникает вопрос: откуда она появилась в рассмотренных нами случаях? Мы полагаем, что анизотропную плазму "принесли" с собой из переходной области (области солнечного ветра непосредственно перед дневной магнитопаузой) только что пересоединившиеся силовые линии, дрейфующие через полярную шапку от каспа на ночную сторону. Специфическое влияние ММП на режим Pc1 в данных BAV, а именно их связь с уменьшением B_y -компоненты ММП, подтверждает эту гипотезу.

5. Заключение

Перенос энергии и вещества через дневную магнитопаузу находит своё отражение в разнообразных ионосферных возмущениях, наблюдаемых над Шпицбергом в дневные часы. Поэтому размещённый здесь наблюдательный комплекс, включающий в себя оптическую, магнитометрическую аппаратуру, может эффективно использоваться для исследования целого ряда важных вопросов космической погоды. В данной статье на конкретных примерах продемонстрирована возможность использования оптических и магнитных явлений для диагностики пересоединения.

Мы подчёркиваем важность именно комплексного ("мультиинструментального") подхода к анализу дневных ионосферных возмущений и необходимость в связи с этим более тщательного сопоставления разных измерений в пространстве. В случае сияний — это привязка сияний по звёздам, позволяющая минимизировать погрешность при определении положения сияния относительно границ магнитосферных доменов. В случае пульсаций Pc1 — это исключение ситуаций распространения пульсаций в область наблюдений по ионосферному волноводу.

Существенным дополнением к оптическим и магнитным данным являются данные со спутников DMSP по высыпавшимся частицам, позволяющие определить положение в ионосфере границ каспа и, следовательно, положение границы между замкнутыми и разомкнутыми силовыми линиями геомагнитного поля, а также данные радаров относительно характера ионосферной конвекции в области измерений. "Моноинструментальный" подход может привести к неверной интерпретации наблюдаемых явлений (см. работу [2]).

Авторы благодарны сотрудникам ПГИ, чья профессиональная деятельность способствовала развитию обсерватории Баренцбург и получению данных высокого качества, а также Н.Н. Сафаргалиевой (ПГИ) за помощь в отборе интервалов оптических наблюдений. Авторы благодарят П.Т. Ньюела (P.T. Newell) (Johns Hopkins University, APL US) за подготовку и размещение в Интернете данных наблюдений со спутников серии DMSP. Детекторы частиц для спутников DMSP разработаны Д. Харди (D. Hardy) (Air Force Research Laboratory). Пакет программ для привязки сияний по звёздам подготовлен Б. Густавсоном (B. Gustavsson) (Swedish Institute of Space Physics) в рамках проекта ALIS. Данные по межпланетному магнитному полю получены через базу OMNI CDAWeb.

Список литературы

1. Newell P T, Meng C-I *Geophys. Res. Lett.* **19** 609 (1992)
2. Safargaleev V et al. *Ann. Geophys.* **26** 517 (2008)
3. Sandholt P E et al. *Ann. Geophys.* **19** 487 (2001)
4. Jacobsen B et al. *J. Geophys. Res.* **100** 8003 (1995)
5. Newell P T et al. *J. Geophys. Res.* **96** 5877 (1991)
6. Sergienko T I, Ivanov V E *Ann. Geophys.* **11** 717 (1993)
7. Menk F W et al. *J. Atmos. Terr. Phys.* **54** 1021 (1992)
8. Anderson B J, Fuselier S A *J. Geophys. Res.* **98** 1461 (1993)
9. Ляцкий В Б, Сафаргалиев В В *Геомагнетизм и аэронавтика* **29** 665 (1989)
10. Safargaleev V et al. *Ann. Geophys.* **22** 2997 (2004)
11. Neudegg D A et al. *Geophys. Res. Lett.* **22** 2965 (1995)
12. Sato M et al. *J. Geophys. Res.* **104** 19971 (1999)

Magnetic and optical measurements and signatures of reconnection in the cusp and vicinity

V.V. Safargaleev. Polar Geophysical Institute, Kolsky Scientific Center, Russian Academy of Sciences, ul. Fersmana 14, 184209 Apatity, Murmansk region, Russian Federation. E-mail: Vladimir.Safargaleev@pgia.ru

T.I. Sergienko. Swedish Institute of Space Physics, Box 812, SE-98128 Kiruna, Sweden

A.V. Safargaleev. Physical Faculty, St. Petersburg State University, Universitetskaya nab. 7/9, 199034 St. Petersburg, Russian Federation

A.L. Kotikov. Physical Faculty, St. Petersburg State University, Universitetskaya nab. 7/9, 199034 St. Petersburg, Russian Federation; N.V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation (St. Petersburg Branch), Universitetskaya nab. 5, lit. B, 199034 St. Petersburg, Russian Federation

The study of geophysical processes in the cusp and its nearby magnetospheric regions — the mantle and the low-latitude boundary layer — is a crucial link in the chain of understanding the mechanism of solar-terrestrial relations. The magnetic conjugation of these regions with the high-latitude ionosphere permits the study of the solar wind-dayside magnetopause interaction via ground-observed ionospheric phenomena. The major topics covered are the dayside aurora in Spitsbergen, and the Alfvén waves detected by an induction magnetometer as high-latitude geomagnetic Pc1 pulsations. The results presented establish a relation between the aurora and pulsation dynamics and the reconnection phenomenon which occurs at negative IMF B_z values and which is commonly accepted to be the most likely way for the solar wind energy to penetrate into the inner magnetosphere. The results also suggest that the Spitsbergen optical and magnetic measurements provide the possibility for the world scientific community to solve the major space weather problem of monitoring the replenishment of the energy expended in the course of magnetospheric substorms.

Keywords: cusp, reconnection, dayside auroras, pulsation Pc1

PACS numbers: 94.05.Sd, **94.20.** – y, **94.30.** – d

Bibliography — 12 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **185** (6) 655–663 (2015)

DOI: 10.3367/UFNr.0185.201506j.0655

Received 14 April 2015

Physics – Uspekhi **58** (6) (2015)