

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОСЫХ АЛЬВЕНОВСКИХ ВОЛН С ИОНОСФЕРОЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА «ИКБ-1300»**

**Геннадий Беляев, Владимир Костин, Елена Трушкина, Ольга Овчаренко**

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН  
e-mail: belyaev@izmiran.ru*

**Бойчо Бойчев, Николай Банков**

*Институт космических исследований - Болгарская академия наук  
e-mail: boytchev@bas.bg*

**Ключевые слова:** спутник "Интеркосмос-Болгария-1300" (ИКБ-1300), авроральная ионосфера, квазипостоянное электрическое поле, электромагнитные скачки, потоки частиц, альвеновские колебания

**Абстракт:** Анализируются сильные скачки электрического поля и потоки частиц с энергией 1 кэВ в полярной ионосфере по данным спутника «Интеркосмос-Болгария-1300». Привлекаются результаты по измерениям плазменных структур в магнитосфере на высокоапогейных спутниках и результаты наблюдений структур полярных сияний. Уточняется самосогласованная модель прохождения косой альвеновской волны из магнитного слоя и отражения ее от нижней ионосферы, которая логически связывает последовательность аномальных пиков электромагнитных полей, наблюдавшихся со спутника ИКБ-1300 при прохождении авроральной зоны.

## **INTERACTION OF OBLIQUE ALFVEN WAVES WITH IONOSPHERE BY MEASUREMENTS OF THE "INTERCOSMOS BULGARIA-1300" SATELLITE**

**Gennady Belyaev, Vladimir Kostin, Elena Trushkina, Olga Ovcharenko**

*Institute of Terrestrial Magnetism Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS  
e-mail: belyaev@izmiran.ru*

**Boycho Boychev, Nikolay Bankov**

*Space Research Institute – Bulgarian Academy of Sciences  
e-mail: boytchev@bas.bg*

**Keywords:** „INTERCOSMOS-BULGARIA-1300” satellite, auroral ionosphere, dc electric field, electromagnetic shocks, particle fluxes, Alfvén waves

**Abstract:** This paper analyzes the strong jumps of the electric field and particle fluxes with energies around 1 keV in the polar ionosphere according to the satellite "Intercosmos-Bulgaria-1300". The results of measurements of plasma structures in the magnetosphere at satellites with high apogee and observations of auroral structures are used. We improve the self-consistent model of the oblique passage of the Alfvén waves from the magnetic layer and the reflection from the lower ionosphere, which is logically linked sequence of anomalous peaks in the electromagnetic fields observed by satellite SDS-1300 during the passage of the auroral zone.

### **Введение**

В результате многочисленных исследований околоземного космического пространства существенный вклад внесли данные, полученные в 80-х годах со спутника Интеркосмос-Болгария-1300 (ИКБ-1300). На нем впервые была применена стабилизация спутника по трем

осям, а в состав комплекса аппаратуры входили приборы, имеющие параметры существенно лучшие, чем на предыдущих спутниках, что позволило проводить более качественные измерения. Одним из таких приборов являлся комплекс измерения шести компонент электромагнитного поля в диапазоне  $0,1 \div 8$  Гц ИЭСП-ИМПМ [1].

Важнейшим вопросом солнечно-земных связей до настоящего времени является изучение деталей физических механизмов, обуславливающих прохождение энергии солнечного ветра в авроральную ионосферу. Обычно выделяют усредненную структуру конвективных движений (см., например, [2]) и наиболее принципиальную задачу - формирование тонкой структуры электромагнитных полей и их связь с полярными сияниями. Эта задача рассматривается в настоящей работе.

В ранних работах [3,4] в авроральной верхней ионосфере и магнитосфере были обнаружены структуры с аномально большими электрическими полями ( $E \geq 100$  мВ/м). Измерения с помощью спутника ИКБ-1300 и коррелированные с ними наземные наблюдения [5÷8] позволили уточнить взаимосвязь скачков электрического и магнитного полей, потоков частиц, оптических эмиссий с полярными сияниями.

В проекте ИНТЕРБОЛ детально исследовались процессы в авроральной зоне и ближней к Земле области хвоста магнитосферы. Наиболее важные результаты, представлены в работах [9÷11]. Большой статистический материал по данным, полученным со спутников DMSP F6 и F7 за 1986 год по потокам частиц в зонах высыпания (более 30000 пересечений) был использован авторами работы [12] для построения модели развития авроральных высыпаний в периоды развития суббурь в каждой из фаз. Эти результаты позволяют уточнить механизм передачи возмущений магнитного слоя в ионосферу, предложенный в работе [8].

### Экспериментальные результаты

Наиболее характерные особенности авроральной ионосферы над зоной полярных сияний были получены со спутника ИКБ-1300 на высотах 800-900 км с помощью комплекса ИЭСП-ИМПМ [1] и дифференциального электростатического спектрометра [5], который измерял энергетическое распределение потоков частиц с трех направлений в 16 энергетических каналах диапазона  $0,39 \div 15$  кэВ.

Конвективные течения в полярной шапке зависят от межпланетного магнитного поля (см. например [2]), а потоки энергичных электронов - от фазы магнитной суббури и геомагнитных координат [12]. Ниже для иллюстрации типичной структуры электромагнитных скачков (ЭМС) при прохождении овала полярных сияний среди сотни обработанных витков выбраны случаи касательного и поперечного движения к овалу в утреннем и вечернем секторах. Такой выбор позволяет использовать тракт непрерывной (с дискретностью 80 мс) регистрации электронов с фиксированной энергией 1 кэВ для идентификации зоны высыпания аврорального овала – AOP (auroral oval precipitation) и зоны диффузного аврорального свечения - DAZ (diffuse auroral zone). Здесь средняя энергия высыпающихся электронов близка к 1 кэВ [12]. В зоне мягких диффузных высыпаний – SDP (soft diffuse precipitation), примыкающей к области AOP с приполюсной стороны, средняя энергия высыпающихся электронов  $\sim 0,2$  кэВ.

На рис.1 представлена в геомагнитных координатах горизонтальная проекция электрического поля с усреднением  $\sim 10$  с. вдоль орбиты 1926 при пролете через полярную область северного полушария. Электромагнитный скачок - резкое усиление поля до 150 мВ/м и его вращение зарегистрировано в 19.08.30 UT. В это время геомагнитные условия 21 декабря 1981 г. были спокойные  $K_p=2$ ,  $Dst=-11$  нТл.

На рис.2 в интервале 30 с., охватывающим ЭМС, представлены:  $E_x$  – компонента электрического поля вдоль вектора скорости,  $E_y$  – горизонтальная компонента, перпендикулярная вектору скорости,  $E_z$  – вертикальная составляющая,  $J_e$  – усредненный (за 1 с.) поток электронов в канале 1 кэВ (вниз - сплошная линия, вверх - пунктирная линия, по скорости - точки),  $S_z$  – вертикальная составляющая вектора Пойнтинга. Это событие рассматривалось в работе [8]. В отличие от [8], в представленной работе использовались данные по электрическому полю с удаленным индуцированным полем путем фильтрации, что позволяет выделить фоновые конвективные движения. Вертикальными линиями и буквой **S**

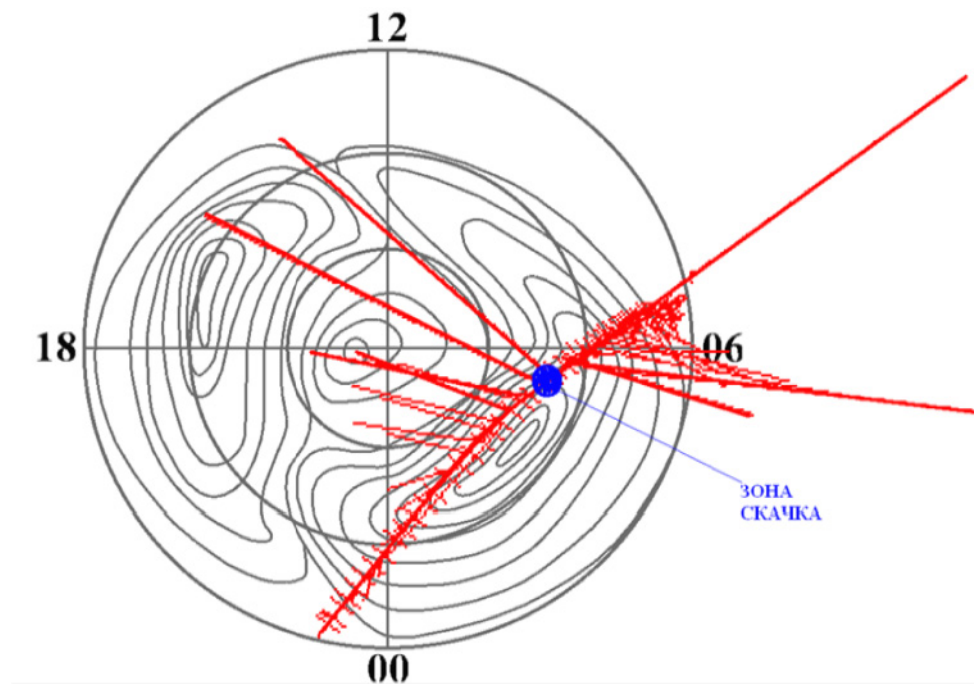


Рис.1. Вращение модуля вектора горизонтальных компонент электрического поля в зоне ЭМС

(Shock) выделен интервал, где наблюдается падающий ЭМС. Здесь также регистрируется слоистая тонкая структура интенсивных потоков ионов  $\geq 10^6$  ( $\text{см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{с} \cdot \text{кэВ}$ )<sup>-1</sup>, восходящих с энергией 0,54 кэВ и нисходящих 0,77 кэВ [8].

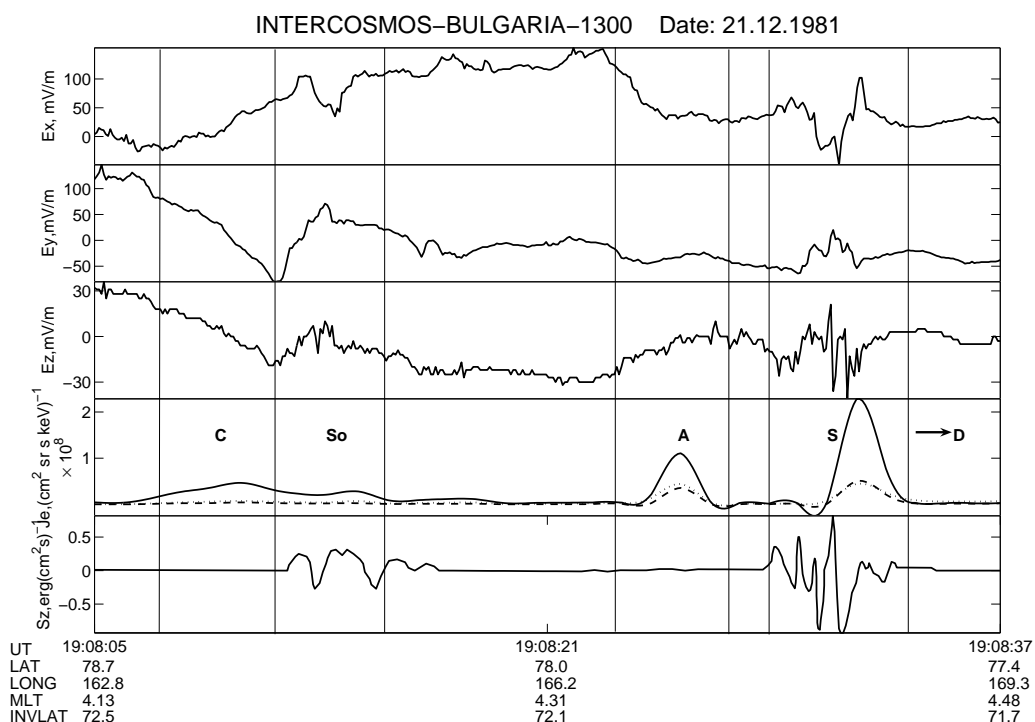


Рис. 2. Три компоненты электрического поля, поток электронов в канале 1 кэВ и вектор Пойнтинга в диапазоне частот 0.1 – 8 Гц в области ЭМС

Следующая область, отмеченная буквой **A** (Aurora), – область отражения ЭМС от нижней ионосферы, характеризующаяся восходящими потоками ионов. Так как регистрирующая система спектрометра была адаптивной, то в момент прохождения спутником области **A** последовательно включались тракты диапазона 4÷15 кэВ. Максимум потока ионов  $\sim 10^5$  ( $\text{см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{с} \cdot \text{кэВ}$ )<sup>-1</sup> зарегистрирован в канале 7,8 кэВ.

В переходной области между **A** и **S<sub>0</sub>**, где  $E_z \sim -30$  мВ/м с учетом наклона магнитной силовой линии и компоненты  $E_x$  продольное электрическое поле незначительно. Ионосферная плазма здесь выталкивается от области авроральной дуги с дрейфовой скоростью  $\sim 3$  км/с.

Область **S<sub>0</sub>**, где средний вектор Пойнтинга направлен вверх, интерпретируется как область отраженного ЭМС. Область **C** - переходная к зоне полярной шапки, где в движении плазмы выделяется вихревая структура с характерной дрейфовой скоростью  $\sim 0,6$  км/с, а также вместе с небольшим максимумом высыпающихся кэвных электронов наблюдаются восходящие потоки ионов в каналах 0,77 кэВ и 1,06 кэВ. В зоне полярной шапки, перед областью **C**, наблюдается антисолнечная конвекция плазмы с характерными дрейфовыми скоростями  $\sim 3$  км/с.

Следующий ЭМС, который подробно рассмотрим, наблюдался 18 декабря 1981 г. при умеренной магнитной возмущенности  $K_p=3_0$ ,  $Dst=-29$  нТл. Вдоль орбиты 1884 в северном полушарии были зафиксированы две зоны аномальных электрических полей. В 09:30÷09:32 UT при входе в полярную шапку и в 09:39÷09:41 UT при выходе из нее. На рис.3 представлены три компоненты электрического поля и потоки кэвных электронов в центральной части первого ЭМС. Обозначение такие же как и на рис.2.

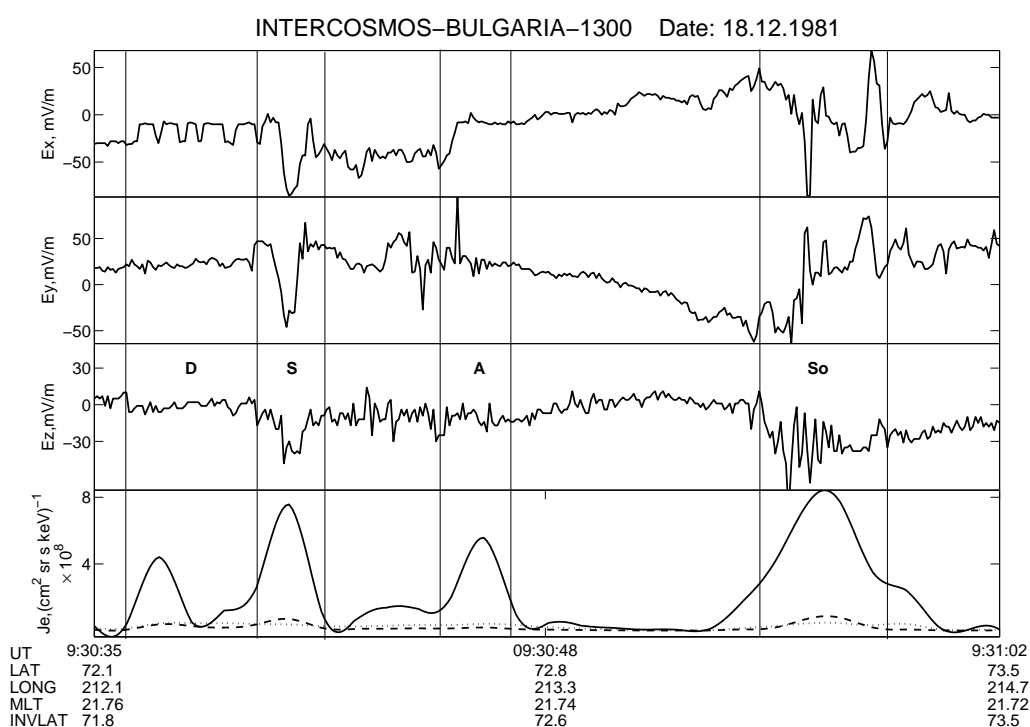


Рис. 3. Три компоненты электрического поля, поток электронов в канале 1 кэВ в диапазоне частот 0.1 – 8 Гц в области ЭМС

Перед входом в область **D** наблюдается конвективное движение плазмы к ночному меридиану с характерными скоростями  $\sim 0,3$  км/с. Область **D** (зона DAZ) начинается с открытия источника высыпающихся кэвных электронов вдоль магнитного поля, который в работе [8] назван предвестником ЭМС. Около пика наблюдается узкий сильный всплеск пучка восходящих ионов в канале 1,5 кэВ. Дальше видно, что источник расположен над спутником и его воздействие проявляется в пульсациях  $E_x$  с характерным периодом  $0,7 \div 0,8$  с.

Зона **S**, где источник по наклонной относительно магнитной силовой линии достигает высоты спутника, характеризуется вихревой структурой. В ней фоновая плазма совершает полный оборот против часовой стрелки за  $\sim 1$  сек, а ионы с энергиями  $1 \div 2,8$  кэВ захвачены, т.к. их потоки вверх и вниз  $\sim 10^6 \div 10^7$  ( $\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}^{-1}$ ) одинаковы. Это соответствует поперечному пересечению структуры падающего ЭМС.

При дальнейшем движении, в области **A** спутник пересекает силовые линии, проходящие через область воздействия ЭМС на нижнюю ионосферу. Здесь наблюдаются узкие слоистые структуры высыпающихся ионов с энергиями 0,5 кэВ, 2,04 кэВ и восходящие пучки с 2,8 кэВ. Это связано с тем, что движение заряженных частиц привязано к магнитным силовым линиям. На границе области **A** наблюдается скачок электрического поля и изменение

дрейфовых движений, которые вне области постепенно разворачиваются к овалу полярных сияний в сторону вечернего сектора.

В области  $S_0$  наблюдается прохождение структур отраженного ЭМС. Основная солитонная структура, большие и широкие пики  $E_x$  и  $E_y$ , имеет высокочастотный хвост с характерным периодом 0,27 с, что легко визуальнo выделяется по параметру  $E_z$ . Для данного события в структурах отраженного ЭМС восходящие пучки ионов и захват энергичных ионов не выделяются, а интенсивность их потоков на порядок меньше чем в области  $S$ . Далее вне области  $S_0$  происходит восстановление антисолнечной конвекции в движениях фоновой плазмы.

Кросскорреляционный анализ электрических и магнитных полей в ЭМС, наблюдавшихся со спутника ИКБ-1300, показал, что здесь выделяются несколько спектральных составляющих [13]. Так на рис.4 представлен квадрат спектра когерентности  $E_x$  и  $E_y$  для ЭМС рис.2 в интервале 28÷32 сек. Видно, что вариации электрического и магнитных полей имеют весьма высокую степень корреляции ( $K^2 \geq 0,7$ ) на частотах вблизи 0,7 Гц и 2,1 Гц. Это указывает на волновой характер процесса с двумя основными спектральными составляющими.

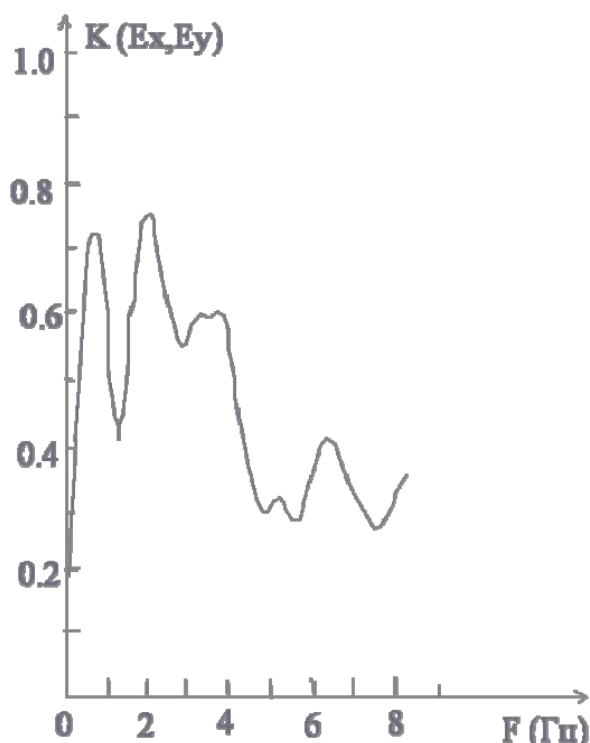


Рис. 4. Квадрат спектра когерентности электрического и магнитного полей в диапазоне частот 0.1 – 8 Гц

Болгарский диагностический комплекс ИЭСП был установлен также на высокоапогейном спутнике АВРОРАЛЬНЫЙ ЗОНД, с помощью измерений которого выделялись аномальные структуры с близкими спектральными составляющими [14].

### Обсуждение результатов

Представленные примеры регистраций ЭМС с ИКБ-1300, а также результаты многих других спутниковых экспериментов по наблюдению аномальных электрических полей на разных высотах в ионосфере и магнитосфере, суммируемые в обзоре [15], дают похожие структурные особенности. Спектральный анализ электромагнитных скачков наблюдаемых с ИКБ-1300, первоначально сделанный в работах [8, 13], позволил утверждать, что это альвеновские структуры. Роль альвеновских волн в динамике магнитосферы и передачи энергии разбирается во многих работах, большая часть которых представлена в фундаментальном обзоре [16]. Однако в этих работах нет механизма, который выделяет характерные частоты в ЭМС и заставляет наблюдаемые структуры самосогласованно эволюционировать. Предлагаемая нами схема, приведенная на рис.5, позволяет ответить на поставленные вопросы.

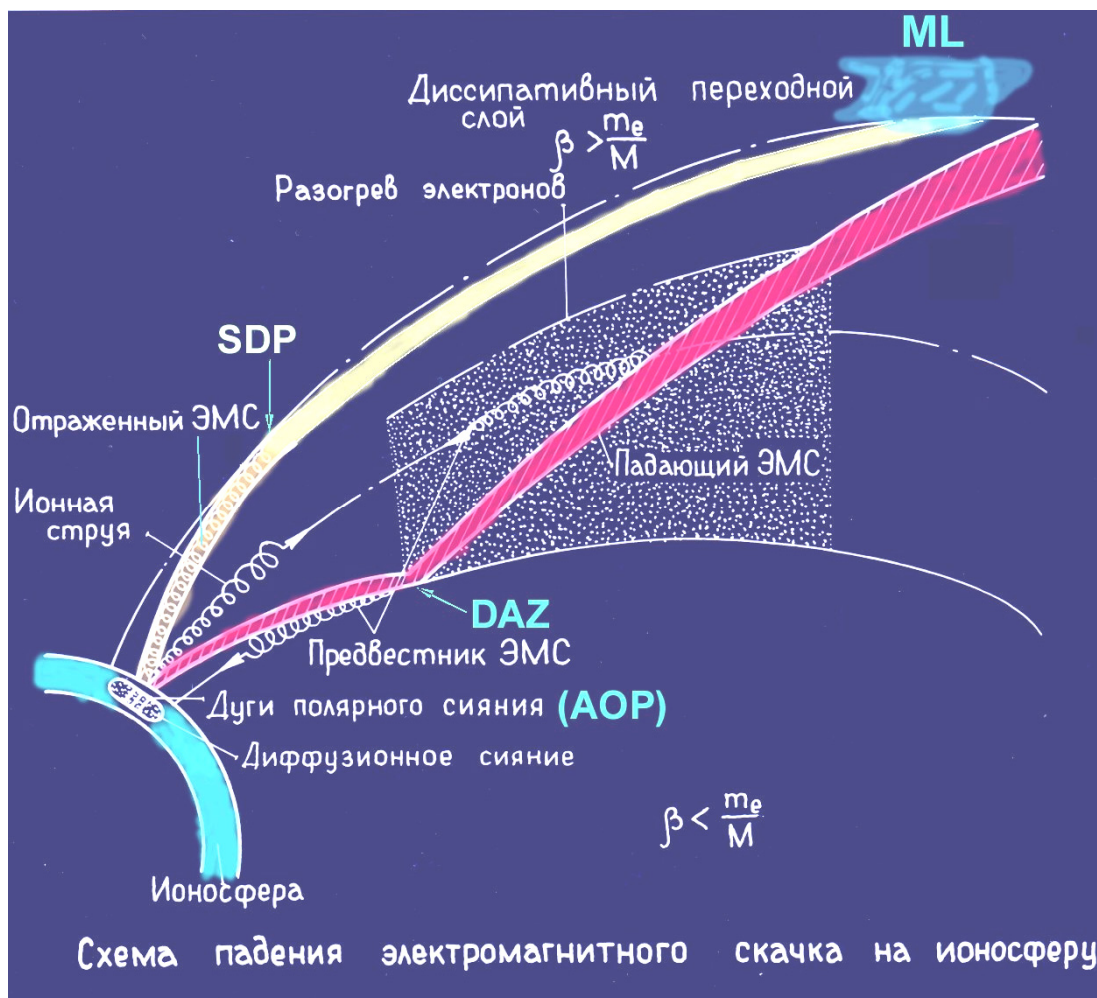


Рис. 5. Схема падения электромагнитного скачка на ионосферу

Энергия взаимодействия солнечного ветра с магнитным полем Земли первоначально передается в магнитный слой. Естественный путь выноса по магнитному полю – это возбуждение альвеновских колебаний. Из широкого спектра колебаний будут усиливаться те моды, в которых поляризация линейна. Этому условию отвечает распространение плоской волны под углом  $\theta$  к магнитному полю, отвечающему соотношению  $\cos \theta = V_S/V_A$ , где  $V_S$  – скорость ионного звука, а  $V_A$  – альвеновская скорость. Так как во внешней магнитосфере отношение давление плазмы к магнитному давлению  $\beta = 8\pi r/B^2 > m_e/M$  (отношение массы электрона к массе протона), то модифицированный альвеновский солитон будет смещаться на внутренние L-оболочки. В глубине магнитосферы, где  $\beta < m_e/M$ , знак дисперсии меняется и солитон будет отклоняться к большим L-оболочкам. После отражения в нижней ионосфере наблюдается та же зависимость. Сначала отклоняется к полюсу, а потом к исходной области формирования солитона. Таким образом, осуществляется обратная связь и выделяется основная характерная частота равная обратному времени пробега солитона. Вторая частота, скорее всего, связана со временем распространения солитона от диссипативного слоя, где  $\beta \approx m_e/M$  и происходит частичный сброс захваченных частиц.

На начальной стадии развития суббури плазма внешней магнитосферы разогревается и диссипативный слой опускается и, соответственно, сдвигаются зона полярных сияний и зоны диффузных высыпаний. Сделанные нами оценки не противоречат предлагаемой самосогласованной картине прохождения ЭМС.

### Заключение

Проведенные исследования приводят к следующим предварительным выводам:

1. Самосогласованная схема передачи энергии из магнитного слоя в ионосферу в виде наклонного альвеновского солитона, меняющего кривизну своей траектории в соответствии с

параметрами магнитосферной плазмы, позволяет увязать и объяснить последовательность многих аномалий электрических полей и потоков энергичных частиц.

2. Зона аврорального овала (АОР) простирается от падающего до отраженного ЭМС.

3. Граница диффузных высыпаний (DAZ) – это проекция на ионосферу вдоль магнитных силовых линий области преломления падающего ЭМС.

4. Граница мягких диффузных высыпаний (SDP) – это проекция на ионосферу вдоль магнитных силовых линий области преломления отраженного ЭМС.

#### Литература:

1. Stanev G., M. Petrunova, D. Teodosiev, I. Kutiev, K. Serafimov, S. Chapkunov, V. Chmyrev, N. Isaev, P. Puschayev, I. Pimenov. An instrument for DC electric field and AG-electric and magnetic field measurements aboard "Intercosmos-Bulgaria-1300" satellite. *Adv. Space Res.* V.2, No 7, 1983, pp. 43-47.
2. Исаев Н., Н. Осипов, Г. Станев, Е. Трушкина. Электрическое поле в высокоширотной ионосфере при больших положительных величинах  $B_z$  – компонент межпланетного магнитного поля (ММП) по данным измерений на ИСЗ «ИК -Болгария-1300». *Bulgarian Geophysical Journal.* V.27, No 1, 1991, pp. 29-36
3. Mozer F., C. Cattell, M. Hudson, R. Lysak, M. Temerin, R. Terbert. Satellite measurements and theories of low altitude auroral particle acceleration. *Space Sci. Rev.*, V.27, No 2, 1980, p. 155.
4. Temerin M., K. Cerny, W. Lotko, F. Mozer. Observations of double layers and solitary waves in the auroral plasma. *Phys. Rev. Lett.*, V.48, 1982, pp. 1175-1179.
5. Isaev N., A. Yachnin, S. Bilichenko, V. Lazarev, G. Stanev, D. Teodosiev, N. Petkov, E. Timofeev, V. Chmyrev. A comparison of satellite measurements of electric and magnetic fields and particle fluxes with ground-based data. *Adv. Space Res.* V.3, No 5, 1985, pp.101-107.
6. Кузьмин А., В. Лазарев, М. Тельцов, С. Школьников. Взаимосвязь потоков авроральных электронов и продольных токов с оптическими эмиссиями высокоширотной ионосферы по наблюдениям на ИСЗ «Интеркосмос-Болгария-1300». *Геомагнетизм и аэронаука.* Т.36, № 2, 1986, сс. 218-224.
7. Тимофеев У., А. Яхнин, Н. Исаев, Е. Трушкина, Г. Станев, Р. Пеллинен. Пространственные профили электрического поля и электронной концентрации в области регистрации аврорального рассеяния радиоволн. *Геомагнетизм и аэронаука.* Т.28, 1988, сс. 871-874.
8. Чмырев В., С. Биличенко, Ю. Казанская, В. Костин, В. Лазарев, М. Тельцов. Авроральные частицы, связанные с нелинейными альвеновскими волнами. *Геомагнетизм и аэронаука.* Т.36, № 2, 1986, сс. 275-281.
9. Шуйская Ф., Ю. Гальперин, Р. Ковражкин, А. Кузьмин, В. Степанов, Л. Горн, Б. Хазанов. Измерения энергичных частиц на высоких широтах: эксперимент СКА-3 на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 (Авроральный зонд). *Космич. исслед.* Т.36, №.1, 1998, сс. 86-97
10. Дюбулоз Н., Ж. Бертелье, М. Малингр, Л. Жирар, Ж. Ковин, Ю. Гальперин др. Наблюдение эффектов нагрева и ускорения ионосферных ионов в полярных широтах масс-спектрометром ГИПЕРБОЛОИД на высотах 2-3 радиуса Земли. *Космические исследования.* Т.36, № 1, 1998, сс. 4-15.
11. Стяжкин В., Г. Застенкер, В. Петров, М. Ноздрачев, А. Лазарус, З. Лепинг. Бодьшие и быстрые изменения параметров в магнитослое: 2. Вариации магнитного поля и сравнение их с вариациями потоков ионов. *Космич. исслед.* Т.37, № 6, 1999, сс. 616-624.
12. Воробьев В., О. Ягодкина, Г. Старков, Я. Фельдштейн. Особенности планетарного распределения характеристик авроральных высыпаний в периоды суббурь. *Геомагнетизм и Аэронаука.* Т.47, № 2, 2007, сс. 206-218.
13. Могилевский М., А. Баубделах, Де ла Порт, Т. Александрова, Т. Романова, О. Лефевр. Измерения электромагнитных УНЧ полей на спутнике АВРОРАЛЬНЫЙ ЗОНД: эксперимент ИЭСР. *Космические исследования,* Т.37, № 2, 1999, сс. 121-129.
14. Marlund G. Electric fields and plasma processes in the auroral downward current region, below, within, and above the acceleration region. *Space Sci. Rev.*, V.142, No 1-4, 2009, pp. 1-21.
15. Keiling A. Alfvén waves and their roles in the dynamics of the earth's magnetotail: a review. *Space Sci. Rev.*, V.142, No 1-4, 2009, pp. 73-156.
16. Keiling A. Alfvén waves and their roles in the dynamics of the earth's magnetotail: a review. *Space Sci. Rev.*, V.142, No 1-4, 2009, pp. 73-156.