

## **Ночные спорадические слои во время восхода Солнца в магнитосопряженной ионосфере**

Ю.Я Ружин, В.Ю Ким, В.А.Панченко, В.П. Полиматиди

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, Троицк, E-mail: [ruzhin@izmiran.ru](mailto:ruzhin@izmiran.ru)*

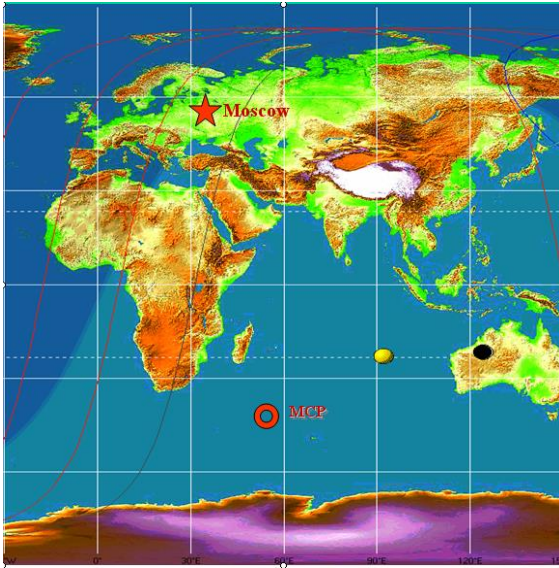
*Рассмотрены примеры регистрации и механизм генерации спорадического E-слоя на средних широтах альфвеновскими волнами, возбуждёнными сверхзвуковым движением терминатора в сопряжённой полусфере. Экспериментальные данные подтверждают предложенный механизм.*

*The experimental data and mechanism of mid-latitude sporadic E-layer generation by the Alfvén waves excited due to supersonic motions of terminator in conjugate hemisphere is examined. Experimental data confirm the mechanism proposed.*

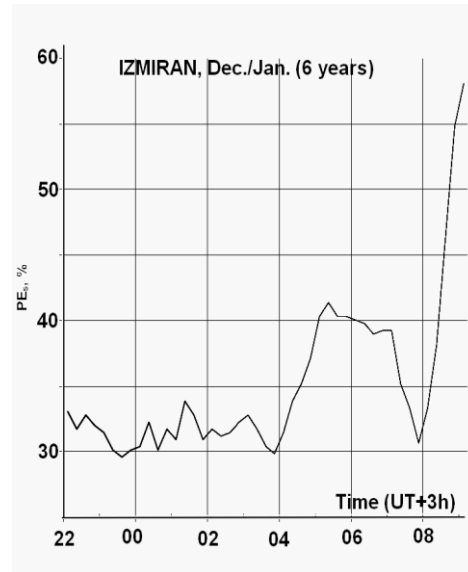
Десятки статей написаны о наблюдаемой взаимосвязи между возмущениями ионосферы и магнитно-сопряженным восходом Солнца [1-7]. Во время периодов солнцестояния появляется возможность исследовать эффекты в магнитно-сопряженных областях ионосферы, когда одна из них находится в ночной полусфере, а другая в дневной. Потоки фотоэлектронов из освещенной части устремляются в ночную [1] и приводят к нагреву плазмы в ночном F2-слое ионосферы [2-3]. Электрические поля спокойной солнечно-суточной вариации ( $S_q$  – вариация геомагнитного поля) переносятся из освещенной полусферы в ночную и могут приводить к дрейфу и неустойчивости плазмы F2-слоя ночной ионосферы [4-5], вызывая интенсивные периодические вариации (десятки процентов) полного электронного содержания.

На рис.1 представлена ситуация для магнитной сопряженности Москвы и области сверхзвукового перемещения солнечного терминатора в освещенной атмосфере южного полушария (MCP - магнитно-сопряженная точка в Индийском океане: 43.5S / 55.6E). Линия терминатора соответствует моменту восхода Солнца в Москве 15 января – 08:50 LT. Разность времен восхода Солнца в магнитно-сопряженных областях для этой пары (в декабре-январе) достигает 5 часов.

В результате статистической обработки массива ионограмм ИЗМИРАН за 6 лет [6] получена вероятность появления спорадического E-слоя над ночной Москвой, представленная на рис.2. Видно наличие максимума в период 4-8 часов московского времени. В работах [6-7] представлен возможный механизм наблюдаемого явления. Показано, что спорадические слои имеют облачную структуру и агентом для сгонки выступают электрические поля волчков кинетических возмущений (появляющихся случайно и мозаично) альвеновского типа. Источником МГД волновых возмущений, переносимых вдоль геомагнитных силовых линий в ночную ионосферу может быть существование ячейковой циркуляции в E-области освещенной ионосферы [8-10], вызванной турбулентностью в нейтральной атмосфере сверхзвуковым перемещением солнечного терминатора [11].



**Рис.1** Магнитная сопряженность для ионосферы над ИЗМИРАН



**Рис.2** Вероятность ночного спорадического E слоя во время восхода в магнитносопряженной области ионосферы

Для выявления конкретных особенностей таких спорадических образований в E-слое проводились эксперименты [12] на базе доплеровских измерений в режиме вертикального зондирования одновременно на четырех частотах, которые осуществлялись ионосферной установкой "Базис-М" (ИЗМИРАН, широта 56 град) при наличии отражения сигналов от Es- и F2-слоев ионосферы. Чтобы иметь вариации полного электронного содержания ионосферы использовались данные GPS net.

В данной работе представлены результаты зимнего эксперимента 2007г. Исследованы когерентные импульсные последовательности двух зондирующих частот 1,70 и 2,16 МГц. Отстроены импульсы, отраженные от выбранного диапазона высоты слоя Es. Построены динамические спектры в районе основной частоты зондирования. Доплеровские сдвиги частоты сигналов были основой для оценок амплитудного поведения. Для полупрозрачных слоев Es такая амплитуда сигналов может служить фоном для оценки порядка прозрачности или плотности этих слоев.

В течение одного часа измерения производились четыре раза по 12 минут. 3-минутная пауза использовалась для вертикального зондирования ионозондом IZMIRAN. На рисунках 3-4 представлено поведение усредненной (по 12мин) амплитуды сигналов Es за две зимние ночи 2007 года. Общей чертой обоих ночных экспериментов является некоторый минимум амплитуды сигнала для глубоких ночных часов.

Более интересным является случай 19 января 2007. Минимальная амплитуда Es-сигналов четко наблюдается с 4:30 до 5:00 для обеих частот и сопровождается хорошо выраженным пиком в течение примерно 1,5 часа в районе 6-7 часов LT. Необходимо отметить, что повышение амплитуды Es - сигналов сопровождается модификацией их спектров, рис. 5. Доплеровские спектры сигналов низкой амплитуды с частотой 2,16 МГц не имеют ярко выраженных форм или носят случайный характер (см., левую часть рис.5). Но во время нарастания интенсивности возвращающихся сигналов появляются отдельные треки (правая часть рис.5 и рис.6). Такое поведение доплеровских динамических спектров легко объяснить с помощью модели движения плазменных ионизированных облаков над объектом наблюдения. Таким образом, отчетливо видно, что восход Солнца в магнитно-сопряженной области ионосферы приводит к активации специфической структуры облаков полупрозрачного слоя Es.

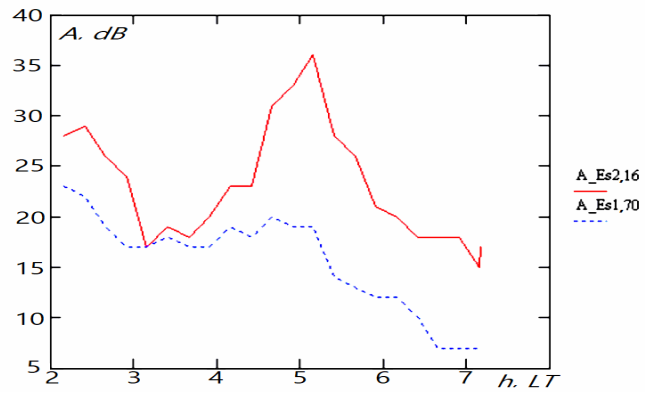


Рис.3. Амплитуды сигналов Es на частотах 1.7 МГц и 2.14 МГц 12 января 2007г.

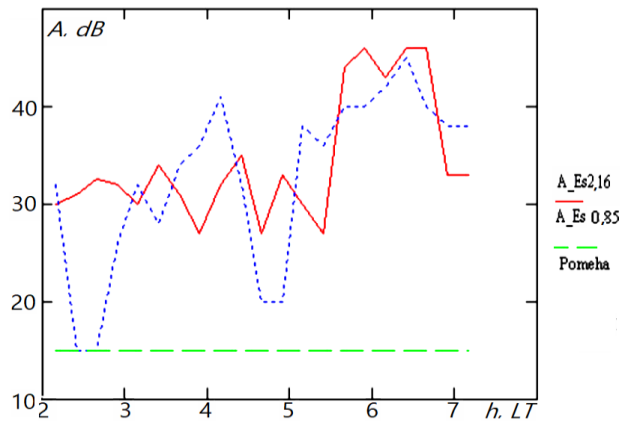
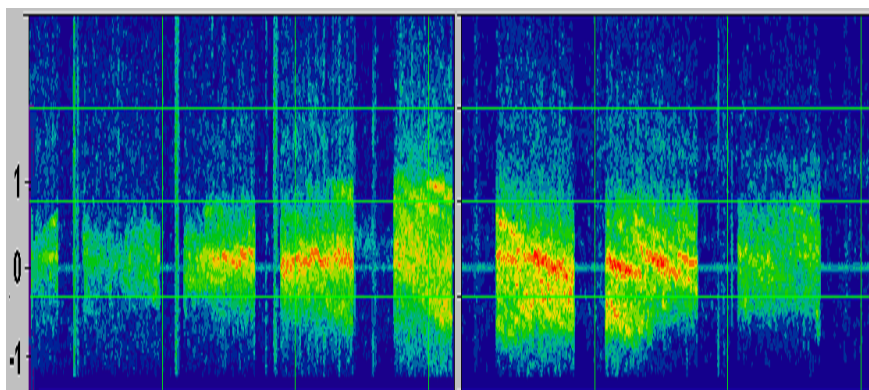
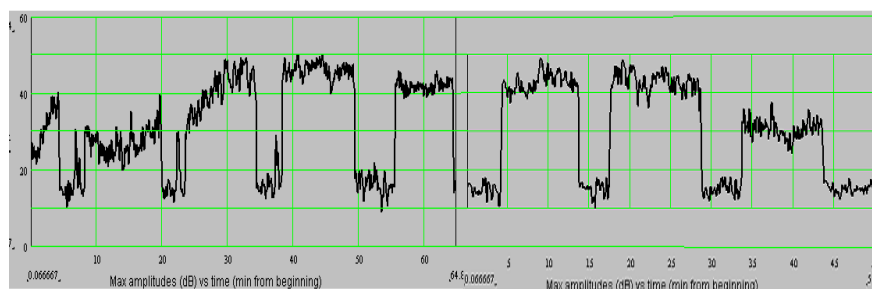


Рис. 4. Амплитуды сигналов Es на частотах 0.85 МГц и 2.14 МГц 19 января 2007г.



Доплеровский спектр отражений с дальности 90 - 110 Км (от слоя Es) в зависимости от времени. 19 января 2007 г.

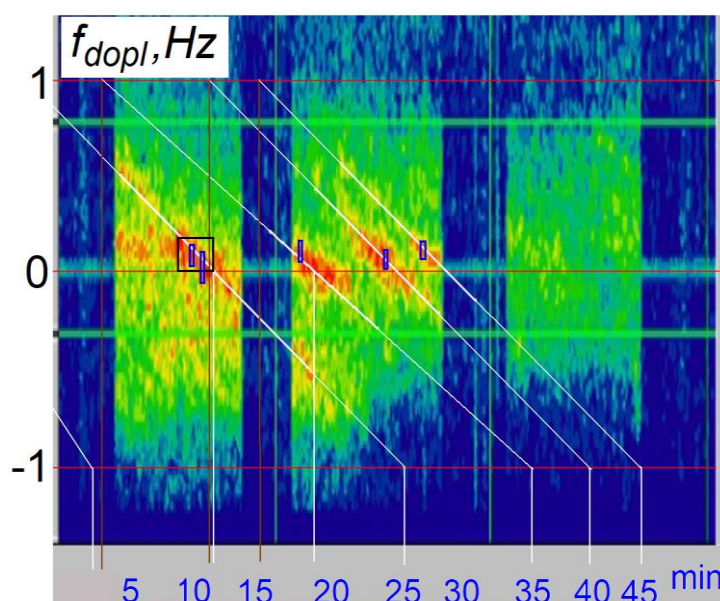


Амплитуда сигнала, отражённого от слоя Es в зависимости от времени. Начало сеанса 03 часа 50 мин.

Рис. 5. Доплеровский спектр сигналов Es на частоте 2,14 МГц 19 января 2007г.

Если движения слоя Es преимущественно горизонтальные и слой Es движется с постоянной скоростью  $V_{hor}$ , то скорость изменения доплеровской частоты тоже будет постоянной и доплеровские треки от Es будут иметь постоянный наклон, как на рисунке 6. Этот наклон однозначно определяет скорость дрейфа неоднородностей, а ширина доплеровского спектра зависит ещё и от характерного размера проплывающих облаков ионизации, ведь в данном случае не наблюдается экранирующего слоя Es. Рассмотрим подробнее рисунок 6.

Частотные треки имеют почти постоянный наклон. Это говорит о преобладании горизонтальной компоненты скорости движения неоднородностей. Считаем высоту слоя Es равной  $Z = 105$  км. Теперь оценка скорости изменения частоты  $df/dt = const$  вместе с шириной спектра  $\Delta f_{dopl}$  (отмечена на рисунке синими прямоугольничками) позволяет определить как саму скорость,  $V_{hor} = 88$  м/с, так и размер проплывающих «облаков ионизации»  $D_{hor} = 9$  км - 16 км.



**Рис. 6.** Доплеровский спектр (фрагмент) сигналов Es на частоте 2,14 МГц 19 января 2007г. Скорость изменения доплеровской частоты от времени практически постоянна.

В заключение, отметим, что анализ данных зимнего солнцестояния 2007г. для ионосферы Москвы показал, что в ночное время (с 04 LT до 06 LT - Рис.5) амплитуда сигнала Es увеличивается примерно на 10 – 15 дБ и пропорционально растёт электронная плотность плазмы. Динамические спектры в районе основной частоты зондирования показали горизонтальные перемещения компактных плазменных облаков спорадического E-слоя со скоростью до 100 м/с. Полученные данные, безусловно, поддерживают гипотезу [7] о частично отраженном приходе альвеновской волны, генерируемой в магнитной сопряженной ионосфере турбулентностью из-за сверхзвукового движения терминатора. МГД природа возмущений ионосферы (для более короткой силовой линии геомагнитного поля), возникающих в Японии при восходе Солнца в магнитно-сопряженной области подтверждается и в работах [13-14] Афраймовича и его коллег. Представленные здесь результаты являются существенным дополнением работы [15] о сезонных особенностях среднеширотного спорадического E-слоя ионосферы.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17–55–45094\_а).*

## Литература

1. Shepherd, G. G., J. F. Pieau, T. Ogawa, T. Tohmatsu, K. Oyama, and Y. Watanabe (1978), Direct measurement of conjugate photoelectrons and predawn 630 nm airglow, *Planet. Space Sci.*, 26, 211–217
2. Petelski E.F. Real height variations of the ionosphere F2 layer above some pairs of geomagnetically conjugate stations. - *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1972, v. 34, No 7, pp. 1163 - 1170.
3. Kakinami, Y., N. Balan, J. Y. Liu, and K.-I. Oyama (2010), Predawn ionospheric heating observed by Hinotori satellite, *J. Geophys. Res.*, 115, A01304, doi:10.1029/2009JA014334.
4. Ружин Ю.Я., Смирнов В.М., Важеркин В.А, Панченко В.А. Предвосходные вариации ПЭС зимней ионосферы над Москвой. VII Всероссийские Армандовские чтения [Электронный ресурс], Муром, 2017, стр.60-67. ISSN 2304-0297 (CD-ROM)
5. Ружин Ю.Я., Смирнов В.М., Важеркин В.А. Аномальные вариации ПЭС при мониторинге зимней ионосферы средних широт. V Всероссийская научная конф. «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды»: СПб., ВКА имени А.Ф.Можайского, 2018. – 529-532 с.
6. Абрамчук В.П., Ружин Ю.Я. Некоторые особенности ночного среднеширотного спорадического Es-слоя в зимний период. М.: ИЗМИРАН, Препринт №11 (544), 1985. – 21 с.
7. Abramchuk V.P., Oraevsky V.N., Ruzhin Yu.Ya. Sporadic E-layer in the twilight period during winter and its relation to sun rise in the conjugate area. *Acta Geod. Geoph. Mont. Hung.*, Vol. 22 (1-2), pp. 199-209 (1987)
8. Гершман Б.Н., Игнатъев Ю.А., Каменецкая Г.Х. Механизм образования ионосферного спорадического слоя Es на различных широтах. М., Наука, 1976. – 108с.
9. Овезгельдыев О. О возможности существования ячейковой циркуляции в E-области ионосферы. - *Изв. АН ТССР. Серия физ.-техн., хим. и геол. наук*, 1960, №2, с. 40 – 47
10. Гершман Б.Н., Овезгельдыев О. Турбулентная диффузия и спорадический слой E. – *Изв. АН ТССР. Серия физ.-техн., хим. и геол. наук*, 1973, №4, с. 35 – 42.
11. Сомсиков В.М. Генерация возмущений в нейтральной атмосфере сферическим терминатором - *Геомагнетизм и аэрономия*, 1982, т.22, №1, с.75-80.
12. Ruzhin Y., Shagimuratov I., Kim V., Panchenko V., Polimatidi V., Berchadskaya I. Doppler investigation of night sporadic Es-layer during Sunrise in conjugated ionosphere. 37th COSPAR Scientific Assembly. 2008, in Montréal, Canada., p.2676, [2008cosp...37.2676R](https://doi.org/10.1029/2008cosp...37.2676R)
13. Afraimovich, E.L., I.K. Edemskiy, S.V. Voeykov, Yu.V. Yasukevich, and I.V. Zhivetiev, Spatio-temporal structure of the wave packets generated by the solar terminator, *Adv. Space Res.*, 44, 824–835, DOI: 10.1016/j.asr.2009.05.017, 2009.
14. Afraimovich, E.L., I.K. Edemskiy, A.S. Leonovich, L.A. Leonovich, S.V. Voeykov, and Ya.V. Yasyukevich, The MHD nature of night-time MSTIDs excited by the solar terminator, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L15106, 2009
15. Haldoupis, C., Pancheva, D., Singer, W., Meek, C., MacDougall, J., 2007. An explanation for the seasonal dependence of midlatitude sporadic E layers. *J. Geophys. Res.* 112, A06315. <http://dx.doi.org/10.1029/2007JA012322>.