

Эффекты в ионосфере вызванные восходом Солнца в магнитосопряженном полушарии

Ю.Я. Ружин

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

Представлены примеры статистического анализа и механизмы генерации спорадического E-слоя на средних широтах альфвеновскими волнами, возбуждёнными сверхзвуковым движением терминатора в сопряжённой полусфере и роста f_0F_2 за счет потоков фотоэлектронов. Анализ результатов радиопросвечивания ионосферы сигналами спутников сети GPS показал заметные квазипериодические вариации ПЭС (до 100%) в декабре над Москвой. Волновая активность периодичностью 10-15 минут наблюдается больше часа в превосходный период. Показано, что это может быть связано с развитием магнитно-сопряженной токовой системы в динамо области южного полушария.

Examples of statistical analysis and mechanisms for generating a sporadic E-layer at mid-latitudes by Alfvén waves excited by the supersonic movement of the terminator in the conjugate hemisphere and the growth of f_0F_2 due to photoelectron fluxes are presented. Analysis of the results of the continuous electromagnetic transmission probing of ionosphere by the satellite signals of the GPS network showed a marked quasi-periodic variations of TEC (up to 100%) in December over Moscow. Wave activity (with a periodicity of 10-15 minutes) there are more hours in sunrise period. It is shown that it may be associated with the development of magnetically-conjugated current system in the dynamo region of the southern hemisphere.

В результате длительных наблюдений за ионосферой с помощью ракет, спутников и другой сложной наземной аппаратуры (вертикального наземного и внешнего радиозондирования, установки некогерентного рассеяния радиоволн, доплеровских установок, использования сложно кодированных сигналов и крупных фазированных антенных систем) установлено, что ионосфера характеризуется большой изменчивостью и широким спектром неоднородностей. В частности было установлено, что на средних широтах неоднородность ионосферы проявляется особым образом в переходное время суток (восход – заход Солнца) и выражается в увеличении интенсивности спорадических образований - неоднородностей.

Десятки статей написаны о наблюдаемой взаимосвязи между возмущениями ионосферы и магнитно-сопряженным восходом Солнца (см. например [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]. Значительная часть фотоэлектронов, образующихся на высоте 300 км с энергией 10-30 эВ, двигается вдоль магнитных силовых линий к магнитно-сопряженной точке. Входя в ионосферу, поток отдает свою энергию окружающим электронам, увеличивая электронную температуру. Затем, опускаясь фотоэлектроны теряют основную часть энергии на неупругие столкновения с атомами кислорода, что приводит к увеличению интенсивности линии 6300Å в предрассветные часы. Так как между электронной температурой и распределением ионизации имеется тесная связь, то фотоэлектроны влияют и на распределение электронной концентрации (плотности плазмы) во время восхода и захода Солнца в сопряженной точке.

Как показали расчеты, для станций России, расположенных в диапазоне геомагнитных широт $30^\circ-65^\circ$, длина силовой линии, соединяющей, магнитно-

сопряженные точки, составляет 10-80 тыс. км. Время перекачки фотоэлектронов с энергиями 10-30 эВ вдоль этих линий оценивается в несколько минут. В то же время разница между восходом Солнца в пункте наблюдения и магнитносопряженной точке для зимних месяцев более 1 часа для низкоширотных станций и увеличивается с ростом широты. На Рис.1 представлена временная ситуация (восход Солнца / декабрь-январь) для магнитной сопряженности Москвы и области сверхзвукового перемещения солнечного терминатора в освещенной атмосфере южного полушария (магнитно-сопряженная точка в Индийском океане: 42.5S / 55.6E). Разность времен восхода Солнца в магнитно-сопряженных областях для этой пары (в декабре-январе) достигает более 5 часов (см. стрелку - 22 декабря на графике). Таким образом, можно ожидать эффекта возрастания f_0F_2 в предрассветные часы, обусловленного перекачкой фотоэлектронов из освещенной области, используя данные стандартных 15-минутных наблюдений.

В результате статистической обработки массива ионограмм ИЗМИРАН за несколько лет получена вариация f_0F_2 (эффект возрастания) в предрассветные часы F-слоя ионосферы над ночной Москвой, представленная для декабря 1980 г. на Рис.2. Видно, что на графике имеет место отчетливый максимум f_0F_2 . Стрелкой указано начало роста критической частоты. Видно, что в максимуме критическая частота превышает значения f_0F_2 , наблюдаемые до момента восхода Солнца в магнитно-сопряженной точке, на 0.2-0.3 МГц (это медианные значения, а в отдельные дни приращение может достигать 0.8 МГц). После максимума начинается спад уровня ионизации, причем иногда критическая частота падает ниже частоты начала роста. Следующее возрастание критической частоты связано с восходом Солнца в пункте наблюдения.

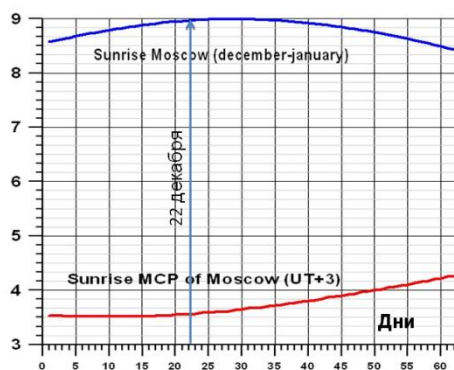


Рис.1. Время восхода в Москве (красная линия) и в магнитносопряженной ионосфере. Время московское по вертикальной оси.

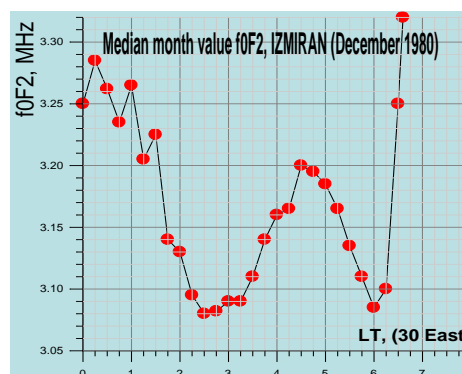


Рис.2. Вариация (эффект возрастания) f_0F_2 в предрассветные часы F-слоя над ночной Москвой.

Кроме предвосходного магнитосопряженного эффекта в слое F2 ионосферы были выявлены и проанализированы статистически значимые максимумы вероятности появления [6-7] слоев ES в предвосходный и послезаходный периоды зимнего времени. Было экспериментально установлено, что в нижней ионосфере, наряду с регулярным слоем E, существуют разнообразные по характерным параметрам неоднородности электронной концентрации, обозначаемые общим термином – спорадический слой ES. Специфичность этого слоя по сравнению с регулярными слоями ионосферы обнаруживается в особенностях его проявления. Как указывалось в работе [7], в предвосходном периоде зимнего времени интенсивность образования спорадических неоднородностей в E-области достаточно жестко контролируется временем восхода Солнца в магнитно-сопряженной области точки наблюдения. Достаточно большой

диапазон полупрозрачности слоя E_s , наблюдаемый в предвосходное время, указывал на то, что значительную роль в образовании неоднородностей играет турбулентность ионосферы [8]. В результате статистической обработки массива ионограмм ИЗМИРАН за 6 лет получена вероятность появления спорадического E-слоя [6] над ночной Москвой, представленная на Рис.3. Видно наличие максимума в период 4-7 часов московского времени. Значком IZ отмечено время восхода Солнца в пункте наблюдения, а значком CP - в его магнитно-сопряженной точке на высоте $H=100$ км.

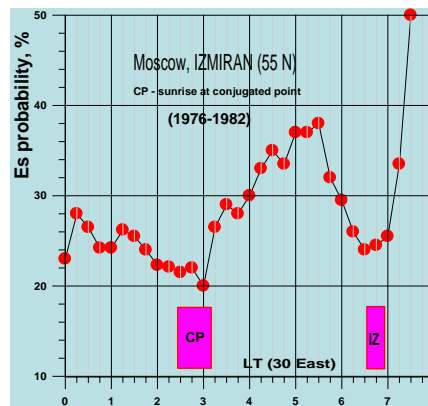


Рис.3. Статистически значимый ночной максимум вероятности появления слоев E_s в период зимнего солнцестояния (время UT+2).

В работах [6-7] представлен возможный механизм наблюдаемого явления. Показано, что спорадические слои имеют облачную структуру и агентом для сгонки ионов 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].

Для выявления конкретного представления о неоднородностях, представляющих такие спорадические слои в предрассветный период, проведен комплексный эксперимент [12] на базе ИЗМИРАН. В работе [13] представлены результаты зимнего эксперимента 2007г. Исследованы когерентные импульсные последовательности двух зондирующих частот 1,70 и 2,16 МГц отраженные от выбранного диапазона высоты слоя E_s . Построены динамические спектры в районе основной частоты зондирования. Доплеровские сдвиги частоты сигналов были основой для оценок амплитудного поведения. Для полупрозрачных слоев E_s такая амплитуда сигналов может служить фоном для оценки порядка прозрачности или плотности этих слоев.

Более интересным является случай 19 января 2007. Минимальная амплитуда E_s -сигналов четко наблюдается для обеих частот и сопровождается хорошо выраженным пиком (Рис.4) в течение примерно 1,5 часа в районе 5-7 часов LT. Необходимо отметить, что повышение амплитуды E_s - сигналов сопровождается модификацией их спектров (Рис.5). Во время нарастания интенсивности возвращающихся сигналов появляются отдельные треки (вырезка из спектра на Рис.5). Такое поведение доплеровских динамических спектров легко объяснить с помощью модели движения плазменных ионизированных облаков над объектом наблюдения.

Частотные треки имеют почти постоянный наклон. Это говорит о преобладании горизонтальной компоненты скорости движения неоднородностей. Считаем высоту слоя E_s равной $Z = 105$ км. Теперь оценка скорости изменения частоты $df/dt = \text{const}$ вместе с шириной спектра Δf_{dopl} позволяет определить скорость,

$V_{hor} = 88 \text{ m/s}$, и размер проплывающих «облаков ионизации» $D_{hor} = 9 - 16 \text{ km}$.

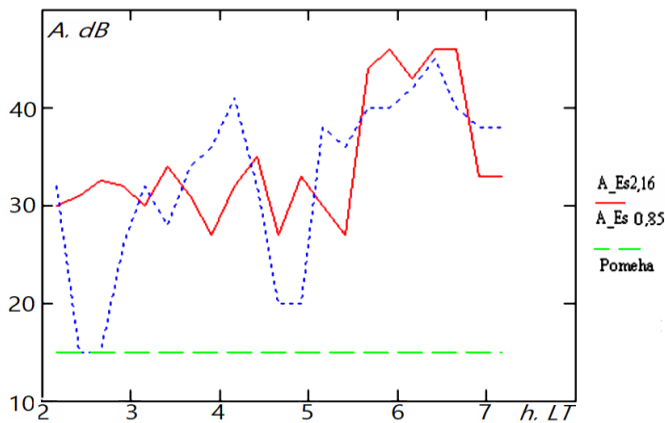


Рис. 4. Амплитуды сигналов Es на частотах 0.85 МГц и 2.14 МГц 19 января 2007г.

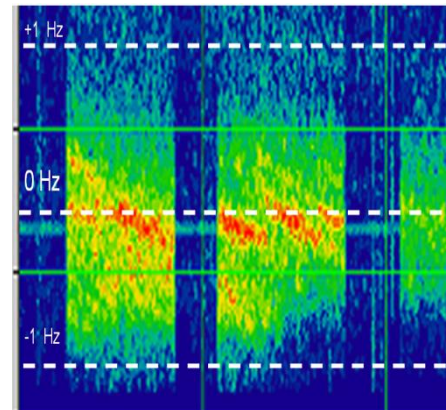


Рис. 5. Шкала по вертикали -1 /+1 Гц (сдвиг Доплера). Частота зондирования 2.16 МГц. Представлен период 05-07 LT (московское время, UT+3).

Таким образом, отчетливо видно, что восход Солнца в магнитно-сопряженной области ионосферы приводит к активации специфической структуры облаков полупрозрачного слоя Es. 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 [14-15] Афраймовича и его коллег. Представленные здесь результаты являются существенным дополнением работы [16] о сезонных особенностях среднеширотного спорадического E-слоя ионосферы.

Еще одним проявлением активного взаимодействием магнитосопряженных областей ионосферы является предвосходящая активация волновых явлений в ПЭС (ПЭС - полное электронное содержание) ночной ионосферы. С появлением навигационных спутников появилась возможность непрерывного контроля ионосферных условий с помощью полного электронного содержания ПЭС. Новые возможности в изучении пространственно-временных характеристик ионосферы предоставляет использование глобальной навигационной системы GPS (GlobalPositioningSystem). По данным радиопросвечивания ионосферы в декабре 2013 сигналами спутников навигационной сети GPS над Москвой обнаружены [4-5] предвосходящие квазипериодические вариации ПЭС ионосферы с амплитудой достигающей десятки процентов. Наблюдения проводились с 13 по 27 декабря и обнаруженный эффект проявлялся регулярно.

На Рис.6 приведены примеры регистрируемых ПЭС для двух спутников, которые наблюдались в предвосходящий период одновременно почти три часа. Видны устойчивые квазисинусоидальные вариации ПЭС периодами 10-15 мин для спутника GPS21.

Наличие результатов одновременной регистрации ПЭС на пространственно разнесенных траекториях ионосферных точек трансionoсферного зондирования (Рис.7) позволило определить направление среднемасштабных ПИВ и их характерный

размер. В работах [4-5] показано, что обнаруженный эффект может быть связан с развитием магнитно-сопряженной токовой системы в динамо области южного полушария. В результате дрейфа плазмы в скрещенных $E \times B$ полях при наличии градиентов плотности плазмы в зоне утреннего терминатора над Москвой развивается градиентно – дрейфовая неустойчивость и соответствующая волновая активность.

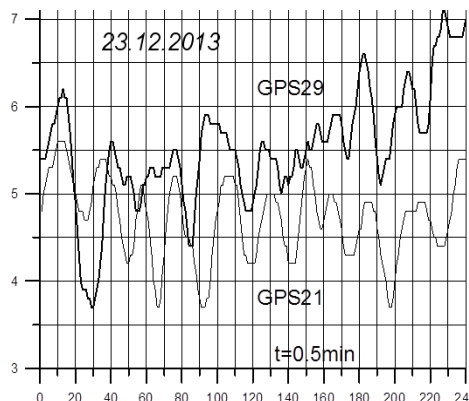


Рис.6. Представлена динамика ПЭС (TECU) 23 декабря для предвосходного периода 4-6 UT. Видны квазипериодические вариации ПЭС для спутника GPS21.

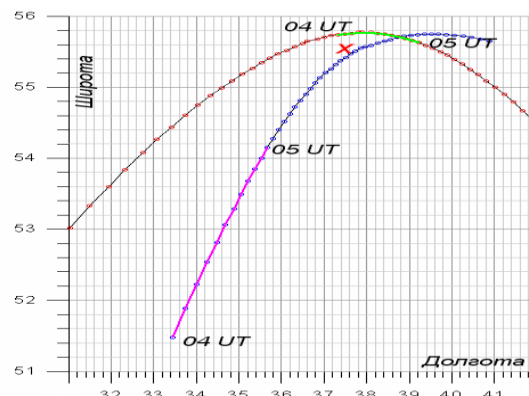


Рис.7. Траектории подионосферных точек (географ. координаты) для двух спутников. Закрашены участки соответствующие промежутку времени 4-5 UT (зеленый - GPS29, фиолетовый - GPS21). Перемещение точек происходит слева направо для обоих спутников. X – положение ИЗМИРАН.

Таким образом, 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. Учитывая связь ПЭС с плотностью плазмы максимума слоя F2 - это приводит также к модуляции критической частоты и соответствующим последствиям в распространении радиоволн в этой зоне.

В итоге, описанные в работе, ночные и предвосходные аномалии в ионосфере над Москвой в период зимнего солнцестояния, обеспечены тремя различными процессами в магнитосопряженной атмосфере (ионосфере) – фотоионизацией (рождением фотоэлектронов), электрическим динамо-полем и турбулентностью, вызванной сверхзвуковым перемещением терминатора в атмосфере (озоносфере).

В нашей работе мы представили примеры как статистически значимые, так и конкретные проявления магнитосопряженной связи процессов в соответствующих областях ионосферы обоих полушарий. Естественно, что приведенные результаты сопровождаются спокойной гелио-геофизической обстановкой и, вполне понятно, что наблюдаемые явления зависят как от сезона (период солнцестояний) и времени суток, так и от географического положения пары сопряженных областей.

Литература

1. Shepherd, G. G., J. F. Pieau, T. Ogawa, T. Tohmatsu, K. Oyama, and Y. Watanabe Direct measurement of conjugate photoelectrons and predawn 630 nm airglow, Planet. Space Sci., 1978, 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.*, 1987, Vol. 22 (1-2), pp. 199-209
8. Гершман Б.Н., Игнатьев 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](#)
13. Ружин Ю.Я., Ким В.Ю., Панченко В.А., Полиматиди В.П. Ночные спорадические слои во время восхода Солнца в магнитосопреженной ионосфере. Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. (CD-ROM), 2019, г. Муром, Стр.81-85
14. 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.
15. Afraimovich, E.L., I.K. Edemskiy, A.S. Leonovich, L.A. Leonovich, S.V. Voeykov, and Yu.V. Yasukevich, The MHD nature of night-time MSTIDs excited by the solar terminator, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L15106, 2009
16. 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>.