

Предвосходные вариации ПЭС зимней ионосферы над Москвой

Ружин Ю.Я.¹, Смирнов В.М.², Важеркин В.А.¹, Панченко В.А.¹

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г.Троицк, E-mail: ruzhin@izmiran.ru

²Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, г. Фрязино

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 предвосходный период. Показано, что это может быть связано 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. 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.

Analysis of the results of the continuous electromagnetic transmission probing of ionosphere by the satellite signals of the GPS network showed 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. As a result of the plasma drift in crossed $E \times B$ fields in the presence of gradients of plasma density in the area the morning terminator over Moscow develops a gradient – drift instability and the corresponding wave activity. Considering the relationship of TEC with the maximum plasma density in the F2 layer - this also leads to modulation of the critical frequency and the corresponding consequences for the radiowave propagation in this area.

Введение

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 [1,2]. Исследование неоднородной структуры ионосферы имеет большое фундаментальное и прикладное значение. В работах [3, 4] было установлено, что на средних широтах неоднородность ионосферы проявляется особым образом в переходное время суток (область солнечного терминатора) и выражается в увеличении интенсивности образования спорадических неоднородностей в E-области и волновой активности в слое F2.

С появлением навигационных спутников появилась возможность непрерывного контроля ионосферных условий с помощью полного электронного содержания ТЕС. Новые возможности в изучении пространственно-временных характеристик ионосферы предоставляет использование глобальной навигационной системы GPS (Global Positioning System). GPS техника осуществляет измерения групповых и фазовых задержек радиосигналов $L1=1575$ МГц и $L2=1228$ МГц с 30-секундным интервалом одновременно для всех спутников, находящихся в зоне радиовидимости для данной GPS станции.

Анализ GPS наблюдений показал, что вариации ПЭС очень чувствительны к изменению электронной концентрации области F2 и могут эффективно использоваться для обнаружения волновых возмущений [5,6]. Коэффициент корреляции между ПЭС и f_0F_2 достигает величины 0,9. А поскольку электронная концентрация в максимуме слоя F2 является одним из наиболее чувствительных к волновой активности параметров ионосферы, мы можем использовать ПЭС данные для оценки пространственных масштабов и временной динамики ионосферных возмущений практически в любом регионе мира.

В нашей работе приведены обнаруженные в период зимнего солнцестояния квазипериодические регулярные вариации ПЭС большой амплитуды, которые свидетельствуют о генерации аномальных волновых возмущений (плазменных неоднородностей) в зоне солнечного утреннего терминатора. Обсуждается возможный механизм и последовательность процессов в магнитно – сопряженных областях ионосфер обоих полушарий способствующих появлению таких неоднородностей над Москвой.

Экспериментальные условия и результаты

По данным радиопросвечивания ионосферы в декабре 2013 сигналами спутников навигационной сети GPS над Москвой обнаружены предвосходные квазипериодические вариации ПЭС ионосферы с амплитудой достигающей 100%. Наблюдения проводились с 13 по 27 декабря и обнаруженный эффект проявлялся регулярно. На Рис.1 приведены примеры регистрируемых ПЭС для двух спутников, которые наблюдались в предвосходный период одновременно почти три часа. Видны устойчивые квазисинусоидальные вариации ПЭС периодами 10-15 мин для спутника GPS21.

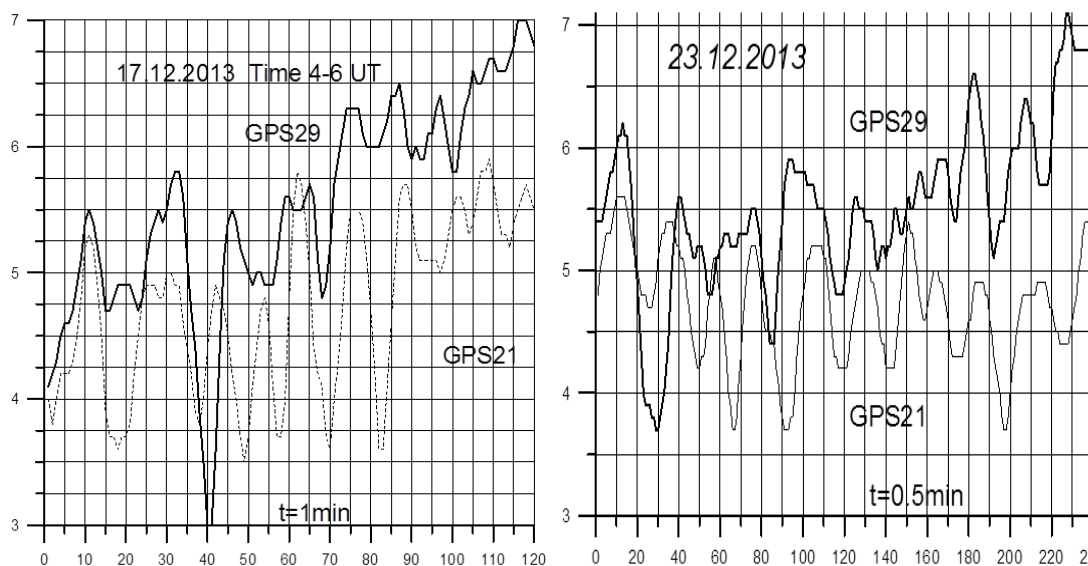


Рис.1. Представлена динамика ПЭС (TECU) для 17 и 23 декабря для предвосходного периода 4-6 UT. Видны квазипериодические вариации ПЭС для спутника GPS21.

На Рис.2 представлена геометрия расположения подионосферных точек для каждого спутника и пункта наблюдения (крестик) – ИЗМИРАН. Пространственное положение траекторий и различие в поведении ПЭС дает нам возможность установить причину такого явления, которое является аномальным, судя по амплитуде возмущения и устойчивости проявления. Для этого остановимся на некоторых особенностях зондирования.

Проекция ионосферной точки (условное пересечение луча зондирования с ионосферой) на поверхность Земли известна как подионосферная точка [6]. Примем, что ионосферная точка находилась на высоте ≈ 350 км. Тогда скорость ее движения изменяется в пределах 60—500 м/с. Меньшее значение скорости отнесено к моменту прохождения спутника вблизи зенита для каждого приемника. Максимальная скорость достигается при восходе и заходе спутника. Добавим, что из-за относительно малой скорости сканирования (~ 100 м/с) возмущенной области ионосферы диагностика среды носит пространственно-временной характер. Поэтому характер наблюдаемых вариаций ПЭС, вообще говоря, может быть обусловлен как пространственными особенностями возмущенной области, так и временными изменениями ПЭС.

Учитывая, что результаты получены в области утреннего терминатора, в таблице для трех моментов времени для подионосферных точек обоих спутников приведены значения зенитных углов Солнца (Z_0) и высота тени.

Таблица

	4:00 UT		4:30 UT		5:00 UT	
	Z_0	h, km	Z_0	h, km	Z_0	h, km
GPS 21	-15.9°	254	-11.5°	131	-7.5°	54
GPS 29	-14.8°	217	-10.9°	117	-7.2°	51

В течении 15 - 23 декабря эти параметры практически не менялись. Из Рис. 2 видно, что точки траектории для спутника GPS 29 все отмеченное время находятся восточнее на 200-250 км и поэтому высота тени там ниже. Оценки показывают, что для процессов ионизации все высоты в таблице нужно скорректировать на толщину озонового слоя, то есть добавить 25-30км.

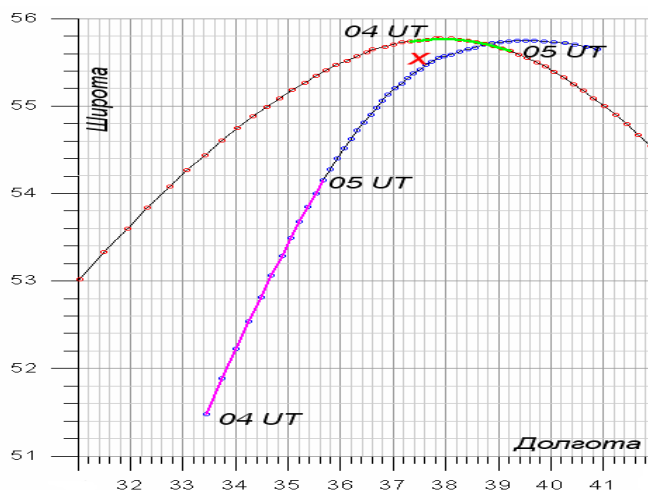


Рис.2. Траектории подионосферных точек (географ. координаты) для двух спутников. Закрашены участки соответствующие промежутку времени 4-5 UT (фиолетовый - GPS21, зеленый - GPS29). Перемещение точек происходит слева направо для обоих спутников. X – положение ИЗМИРАН.

Для выяснения природы обнаруженных возмущений проведен анализ высоты и скорости перемещения терминатора с учетом высоты экранирующего слоя озона как экрана для ионизирующего УФ излучения. Учтено, что на высоте мезопаузы скорость перемещения тени может превышать скорость звука и это могло быть причиной волновых возмущений в области ионосферы, но возможное воздействие – ожидается больше чем на час позже. Далее, судя по геомагнитным данным (индексы Dst, Kp, Ae) в

это время (3h-6h UT) не было заметной авроральной активности с 15-го по 25 декабря, что исключает появление волновых возмущений со стороны полярной зоны.

Обсуждение

Исследование возникновения и эволюции неоднородностей электронной концентрации является одним из основных вопросов физики ионосферы. Общепринятыми основными механизмами их образования в настоящее время считаются плазменные неустойчивости [7,8], что и предопределяет их интенсивное изучение во всем мире. Наиболее важными из них являются градиентно-дрейфовая, Рэлея-Тейлора и конвергентная неустойчивости, которые именуются неустойчивостями градиентно-дрейфового (ГД) типа. Градиентно-дрейфовая неустойчивость обычно привлекается для объяснения F2 рассеяния на субавроральной и авроральных широтах, где наблюдаются резкие горизонтальные градиенты концентрации плазмы и сильные электрические поля и токи [7,8]. Однако в вечерней и утренней ионосфере средних и низких широт также может иметь место достаточно сильные электрические поля [9]. В связи с этим естественно обратить внимание на градиентно-дрейфовую неустойчивость ионосферной плазмы [8].

Для развития градиентно-дрейфовой неустойчивости необходимо наличие неоднородности концентрации заряженных частиц ионосферной плазмы с достаточно большим горизонтальным градиентом. Отметим, что наблюдаемые в нашем случае квазипериодические вариации ПЭС происходят в зоне утреннего терминатора, которому присущи как вертикальные так горизонтальные градиенты концентрации ионосферной плазмы. Так хорошо известно, какое существенное влияние на распространение радиоволн оказывает неоднородность ионосферы в горизонтальном направлении [10]. Градиенты критических частот максимальны в утренние часы, когда величина их достигает 0.4 МГц на 100 км, и возрастают с увеличением солнечной активности. В горизонтально неоднородной ионосфере нарушается симметрия траектории КВ радиоволн, изменяется время их группового запаздывания, расстояние скачка, величины МПЧ [11].

Кроме градиентов концентрации плазмы, для реализации градиентно - дрейфовой неустойчивости необходимы и электрические поля. В южном полушарии в декабре развивается летняя токовая система Sq-вариации геомагнитного поля более интенсивная, чем в это время суток на севере. При этом, предвосходящему периоду на севере соответствует практически предполуденная ситуация в магнитно-сопряженной области ионосферы южного полушария, когда электрическое динамо - поле максимально.

Ионосферные процессы в магнитосопряженных областях исследуются давно. Однако подобные исследования не касались волновых процессов, исключая работу [12], в которой было установлено, что вероятность появления спорадического слоя Es ночью над Москвой повышается при прохождении терминатора в магнитно-сопряженной области. Авторы объясняют это явление распространением на север вдоль магнитной силовой линии Альфеновских волн, генерируемых сверхзвуковым перемещением терминатора в южном полушарии.

Магнитно - сопряженная Москве область ионосферы находится в Индийском океане, где на островах расположены три магнитные обсерватории Франции (Крозе, Амстердам и Кергелен) международной сети INTERMAGNET (см. Рис.3). Они образуют треугольник, где вблизи одной их вершин (обс. Крозе) и находится область ионосферы соответствующая Москве.

Рассмотрим оценку электрического динамо-поля, ответственного за спокойно - суточную вариацию геомагнитного поля (Sq) на обс. Крозе и, учитывая

эквипотенциальность магнитных силовых линий, возможность переноса его в северное полушарие.

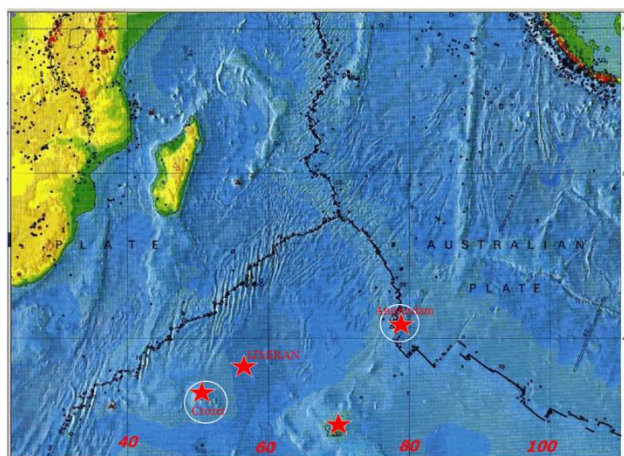


Рис. 3. Расположение обсерваторий INTERMAGNET и магнитносопряженной точки ионосферы ИЗМИРАН

На Рис.4а представлены горизонтальные компоненты магнитного поля спокойной солнечно-суточной вариации геомагнитного поля на ближней обс. Кроме, где хорошо видно, что времени 3-6 UT соответствуют максимальные отклонения, как в меридиональной, так и зональной компонентах. Представим динамику вектора магнитной вариации для этого периода времени на Рис.4б. Получаем, что вектор составляет угол α с направлением на запад в пределах $\alpha=20^\circ-25^\circ$. Направление тока и соответственно электрического поля в ионосфере, обеспечивающего эту вариацию, будет иметь перпендикулярное направление (правило правой руки), то есть на север и, при этом, азимут равен этому углу.

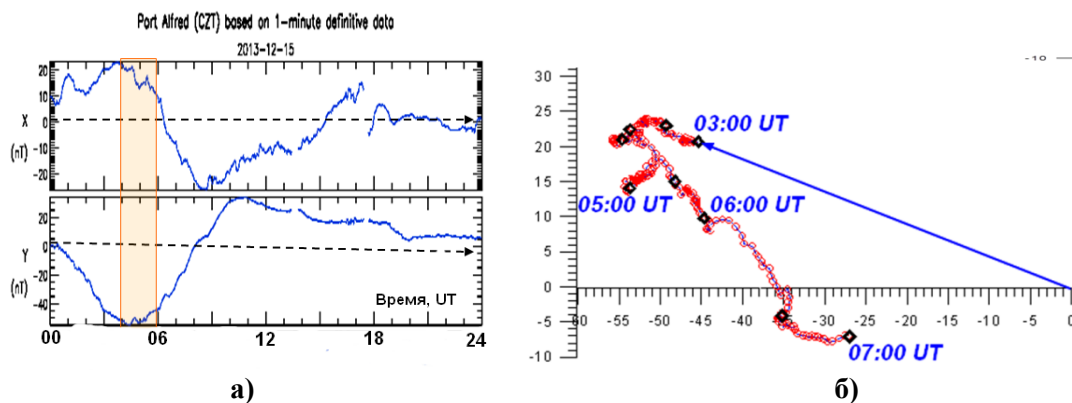


Рис.4. Слева – компоненты вектора горизонтальной вариации геомагнитного поля (X – меридиональная компонента, направлена на север, Y – зональная компонента). Справа – динамика вектора вариации с 03 UT до 07 UT (X – вертикальная ось, Y – горизонтальная ось). Все величины компонент указаны в нТл.

Разность потенциалов участка (условно - АВ) за счет высокой проводимости плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля (практически от высот 100км в ионосфере) будет перенесена в северное полушарие (участок A^*B^*). При этом меридиональная компонента электрического поля меняет свое направление на обратное, а зональная сохраняет направление. В итоге мы получаем электрическое поле на севере с азимутом $155^\circ-160^\circ$, соответственно. При этом величина этого поля

несколько увеличивается за счет сгущения силовых линий геомагнитного поля по сравнению с южным полушарием. Оценочная величина поля составляет 1-2 мВ/м.

Таким образом, в декабре, когда над Москвой в ионосфере в предвосходный период появляется электрическое поле, плазма испытывает дрейф в скрещенных электрическом и магнитном полях $E \times B$. Считаем магнитное поле B вертикальным и тогда азимут направления дрейфа составит 65° - 70° , соответственно. Скорость дрейфа находится в пределах 20-40 м/с.

Возвращаясь к Рис.2, где представлены проекции траекторий подионосферных точек для спутников GPS21 и GPS29 видим, что скорость дрейфа близка по направлению к траектории точек спутника GPS21. Учитывая, что на участке соответствующем 4-6 UT, горизонтальная скорость перемещения подионосферной точки составляет 68-300 м/с, то это способствует пространственному сканированию состояния ионосферы в этом направлении. Для спутника GPS29 скорость сканирования минимальная (66 м/с) и направлена почти в ортогональном направлении.

Положение волнового вектора дрейфовой волны зависит как от неоднородности градиента плотности или электрического поля, так и от их взаимного положения [8]. При больших электрических полях, когда разность скоростей электронного ионного дрейфа превышает звуковую скорость развивается неустойчивость Фарли-Бунемана и называется двухпотоковой. Неустойчивость при малых скоростях развивается при наличии градиента фоновой концентрации. Инкремент градиентно-дрейфовой (ГД) неустойчивости максимален при параллельной ориентации векторов электрического поля и градиента фоновой концентрации [13]. С увеличением угла между этими векторами инкремент уменьшается и становится равным нулю, когда вектора антипараллельны.

В нашем случае, азимут направления на Солнце или направления горизонтального градиента ионосферной плазмы в области терминатора находится в пределах 105° - 125° , что достаточно для развития неустойчивости при азимуте электрического поля 155° - 160°

Судя по Рис.2, где направление сканирования ионосферы спутником близко к направлению перпендикулярному электрическому полю, или направлению скорости дрейфа (азимут 65° - 70°), то регулярные вариации ПЭС высвечивают регулярную структуру неоднородностей ионосферной плазмы, вызванной градиентно - дрейфовой неустойчивостью. Принимая скорость пространственного сканирования 100 м/с для спутника GPS21 и, вычитая возможную скорость дрейфа в скрещенных полях 20-40 м/с получим для периодов 10-15 мин оценку размера поперечника неоднородностей в пределах 36-72 км. Этот масштаб соответствует классу среднемасштабных [6,7] перемещающихся ионосферных неоднородностей (ПИВ). Продольный же размер неоднородностей, по-видимому, зависит как от структуры градиента концентрации плазмы в терминаторной области ионосферы над Москвой, так от геометрии электрического динамо-поля в магнитно – сопряженной области ионосферы и может достигать сотней километров.

В пределах полученных оценок, траектория спутника GPS29 может совпадать с направлением длины неоднородностей, что не выявляет периодичности, или даже проявляет возможность высвечивать интерференционную картину неустойчивостей высшего порядка. Так в работе [13] показано, что нарастающие ГД-волны меняют среду, повышая величину градиента: на фронтах первичных волн начинают генерироваться вторичные ГД-волны с меньшей длиной волн, затем третичные и т.д. В результате этого каскадного процесса вся ионосфера оказывается заполненной мелкомасштабными неоднородностями.

Заключение

По данным радиопросвечивания ионосферы сигналами спутников навигационной сети GPS обнаружены в декабре над Москвой предвосходящие квазипериодические вариации ПЭС ионосферы с амплитудой достигающей 100%. Принимая к сведению, что коэффициент корреляции между ПЭС и f_0F_2 достигает величины 0.9, то эти результаты свидетельствуют о значительных вариациях критических частот слоя F2 в этот период. Наличие результатов одновременной регистрации ПЭС на пространственно разнесенных траекториях ионосферных точек трансionoсферного зондирования позволило определить направление среднemasштабных ПИВ и их характерный размер.

Для выяснения природы обнаруженных возмущений проведен анализ высоты и скорости перемещения терминатора с учетом высоты экранирующего слоя озона как экрана для ионизирующего УФ излучения. Учтено, что на высоте мезопаузы скорость перемещения тени могла превышать скорость звука и это могло быть причиной волновых возмущений в ионосфере, но возможное воздействие – ожидается больше чем на час позже. Далее, судя по геомагнитным данным (индексы Dst, Kp, Ae) в это время суток (3-6UT) не было заметной авроральной активности с 15-го по 25 декабря, что исключает появление ПИВ со стороны полярной зоны.

По данным трех станций INTERMAGNET в Индийском океане, образующих почти равнобедренный треугольник (вблизи которого находится область ионосферы магнитно – сопряженная Москве), рассмотрена ситуация в магнитно – сопряженной области южного полушария, где в это время развивалась система токов спокойной солнечно – суточной вариации магнитного поля и определены величина и направление электрического динамо поля в окрестности магнитно - сопряженной точки.

Учитывая высокую проводимость плазмы вдоль геомагнитных силовых линий это поле проникает в ионосферу над Москвой и способствует появлению $E \times B$ горизонтальных дрейфов и перераспределению неустойчивой ионосферной плазмы в предвосходящий период. Сопоставление направления ожидаемых дрейфов с экспериментальным направлением регистрируемых среднemasштабных волновых ПИВ показало удовлетворительное согласие.

Литература

1. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. М.: Мир, 532 с. 1975.
2. Bowman, G.G., The nature of ionospheric spread-F irregularities in midlatitude regions // Journal Atmospheric and Terrestrial Physics, 1981, V. 43, n.1, p. 65-79.
3. Сомсиков, В.М., Солнечный терминатор и динамика атмосферы, Алма-Ата, Наука, 1983, 192 стр.
4. Сомсиков В. М. Волны в атмосфере, обусловленные солнечным терминатором. (Обзор) / Геомагнетизм и аэрономия. – 1991. –Т. 31, № 1. – Р. 1–12.
5. Afraimovich E. L. First GPS-TEC evidence of wave structure excited by solar terminator moving // Earth, Planets and Space. – 2008. – Vol. 60. – Р. 895–900.
6. Афраимович Э. Л., Н. П. Перевалова. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Иркутск : Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. – 480 с.
7. Гершман Б.Н., Механизмы возникновения ионосферных неоднородностей в области F. Ионосферные исследования. 1980. н 30. стр 17-26
8. Гершман Б.Н., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д., Чернобровкина Н.А. Явление F2 рассеяния в ионосфере. М.: Наука. 141 с. 1984.
9. Takeda M., Yamada Y. Simulation of ionospheric electric fields and geomagnetic field variation by the ionospheric dynamo for different solar activity // Ann. Geophysicae. V. 5. № 6. P. 429–433. 1987.

10. Kolomiitsev O.P., Ruzhin Yu.Ya., Egorov I.B., Razinkov O.G., Cherkashin Yu. The ionospheric holes – modeling and diagnostics // *Phys.Chem.Earth (C)*. V. 24. № 4. P. 393–399. 1999.
11. Колومیицев О.П., Ружин Ю.Я., Егоров И.Б., Разинков О.Г., Черкашин Ю.Н. Модельные исследования влияния ионосферных дыр на условия распространения декаметровых радиоволн // *ДАН СССР*. Т. 369. № 4. С. 220–224. 1999.
12. Abramchuk V.P., Oraevsky V.N., Ruzhin Yu.Ya., Sporadic E layer in the twilight period during winter and its relations to sunrise in the conjugate area // *Acta Geod., Geoph. Mont. Hung.*, 1987, V. 2, N. 1-2, p.199 - 209.
13. Мальцев Ю.П. Лекции по магнитосферно-ионосферной физике. Апатиты, 125 с.