

Эффекты ионосферного F-рассеяния на антарктической станции “Академик Вернадский”

П. В. Силин, А. В. Зализовский, Ю. М. Ямпольский

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: zaliz@rian.ira.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 17 июня 2004 г.

В работе исследованы эффекты ионосферного F-рассеяния на Украинской антарктической станции “Академик Вернадский”. Проведен анализ данных вертикального зондирования ионосферы и мониторинга геомагнитной активности по результатам измерений с 1996 по 2002 гг. Исследована связь образования интенсивных ионосферных неоднородностей, проявляющихся на ионограммах как явление F-рассеяния, с возмущенностью геомагнитного поля Земли. Установлены два механизма образования неоднородностей в ионосфере: один – связанный с распространением внутренних гравитационных волн сквозь ионосферу, второй – с влиянием возмущенности геомагнитного поля.

Введение

Явление F-рассеяния (spread F) известно со времен начала использования техники вертикального зондирования ионосферы для получения основных параметров ионосферных слоев [1]. Этот эффект проявляется в том, что отраженный сигнал теряет свою строго определенную структуру, становится размытым (диффузным), имеет значительно большую продолжительность, чем зондирующий импульс. Связано это с рассеянием зондирующего сигнала на интенсивных естественных ионосферных неоднородностях. Часто F-рассеяние подразделяют на два типа. Первый тип – рассеяние по высоте, при котором низкочастотный отрезок ионограммы имеет диффузный характер, что затрудняет отсчет кажущейся высоты. Второй тип – рассеяние по частоте, при котором в ионограммах появляются диффузные отражения вблизи критических частот (критическая частота дополнительных отражений выше частоты основного следа). Рассеяние по частоте обычно на-

зывают “среднеширотным” типом рассеяния, а по высоте – “экваториальным” [1]. Присутствие F-рассеяния легко определить из стандартных ионограмм вертикального зондирования (рис. 1) или из таблиц часовых значений ионосферных параметров, где наличие рассеянных отражений указывается символами F (рассеяние по частоте) или Q (рассеяние по высоте).

Общеизвестным является факт, что возмущения магнитного поля сильно влияют в основном на параметры верхней ионосферы. За счет эффектов ионного торможения возможны быстрые изменения высоты максимальной концентрации слоев F1 и F2. Так как в верхней ионосфере плазма “вморожена” в магнитное поле, деформация силовых линий приводит к соответствующему дрейфу плазмы, что в свою очередь может вызвать быстрые флуктуации критической частоты ионосферы. При этом, по всей видимости, должна существовать корреляция между интенсивностью естественной турбулентности и возмущенностью магнитного поля.

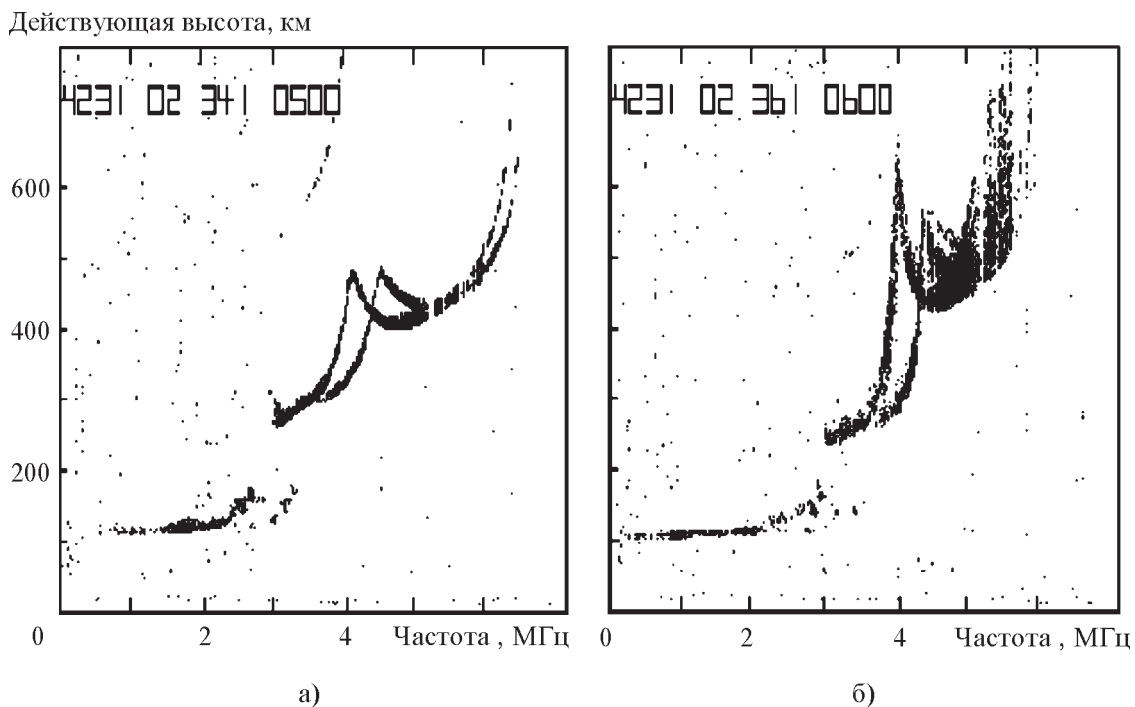


Рис. 1. Пример типичной ионограммы (а) и явления F-рассеяния (б). Ионограммы получены на УАС “Академик Вернадский” в 2002 г.

В настоящей работе проведен анализ возникновения “среднеширотного” F-рассеяния по данным вертикального зондирования ионосферы на антарктической станции “Академик Вернадский”. Исследована зависимость между естественной ионосферной турбулентностью F области, проявляющейся на ионограммах в виде явления F-рассеяния, и возмущенностью геомагнитного поля. Проведен анализ сезонных и суточных вариаций в явлении F-рассеяния. На основании полученных результатов предприняты попытки уточнить причины возникновения турбулентности в верхней ионосфере.

Постановка эксперимента

Украинская антарктическая станция “Академик Вернадский” расположена на архипелаге Аргентинские острова вблизи Антарктического полуострова. Ее отличительной особенностью является высокоширот-

ное географическое положение (65.25° ю. ш., 64.27° з. д.) и среднеширотное магнитное (50.09° ю. ш., 9.32° в. д. в координатах CGM). Исследование параметров ионосферы методом вертикального зондирования на станции проводится с помощью ионозонда IPS-42, работающего в автоматическом режиме и обеспечивающего получение ионограмм каждые 15 минут в стандартном режиме измерений. До 2001 г. ионограммы сохранялись путем фотографирования на киноплёнку с экрана электронно-лучевой трубки. В 2001 г. была произведена модернизация ионозонда, сопряжение его с персональным компьютером, на экран которого выводится графическое изображение ионограмм в реальном времени (рис. 1).

Другим важным направлением исследований на станции “Академик Вернадский” является непрерывный мониторинг геомагнитной активности, проводимый на постоянно действующей обсерватории AIA (“Argentine Islands Archipelago”). Регистра-

ция параметров геомагнитного поля ведется тремя вариометрами. Первый, вариометр Лакура [2], с регистрацией вариаций на фотобумаге. После обработки данные наблюдений с вариометра Лакура представляются в виде месячных таблиц трехчасовых K -индексов возмущенности магнитного поля. Второй, феррозондовый [2] магнитометр E.D.A., с системой регистрации данных "Geologger". И третий, феррозондовый магнитометр LEMI-008, производства Львовского центра института космических исследований НАНУ-НКАУ. В настоящее время LEMI-008 является наиболее современным и чувствительным (чувствительность 0.1 нТл) прибором обсерватории. Темп съема данных – одна секунда. Его данные в формате ИНТЕРМАГНЕТ транслируются через спутник в центр сбора данных в Оттаву (Канада) и доступны в сети Интернет в реальном времени http://www.intermagnet.org/myservlet/imotbl_e.jsp.

Настоящая работа охватывает семилетний период измерений с 1996 по 2002 гг. и посвящена поиску корреляции между K -индексами магнитной активности и наблюдением явления F-рассеяния на ионограммах вертикального зондирования. В качестве исходных ионосферных данных рассматривались все полученные часовые ионограммы, на которых наблюдались отражения от F-области ионосферы.

Результаты измерений и интерпретация

Проведенный на антарктической станции предварительный анализ данных показал, что как геомагнитная активность, так и ионосферная турбулентность имеют сезонную зависимость.

Повышение геомагнитной активности наблюдается вблизи равноденствий. Это связывают с максимумом южно-направленной компоненты B_z межпланетного магнитного поля (ММП), который приходится на эти периоды [3]. Компонента B_z направлена противоположно магнитным силовым линиям Земли, ослабляет действие

геомагнитного поля и приводит к проникновению солнечного ветра глубже в магнитосферу. В периоды максимума южно-направленной компоненты отмечается возрастание геомагнитных возмущений.

В поведении ионосферной турбулентности, проявляющейся на ионограммах как явление F-рассеяния, также наблюдается сезонная зависимость. Один из регистрируемых на антарктической станции максимумов этого явления приходится на зимний период и имеет заметный суточный ход: ночью вероятность появления F-рассеяния выше, чем днем. Этот эффект проявляется в годы пониженной гелиоактивности. На рис. 2 показана сезонная зависимость частоты наблюдения F-рассеяния на ионограммах в процентах $P_S = (n_S/n) \cdot 100$ (где n_S – количество ионограмм, на которых присутствует явление F-рассеяния; n – общее количество ионограмм за этот период, на которых зарегистрированы отражения от F-области ионосферы).

Частота появления F-рассеяния, %

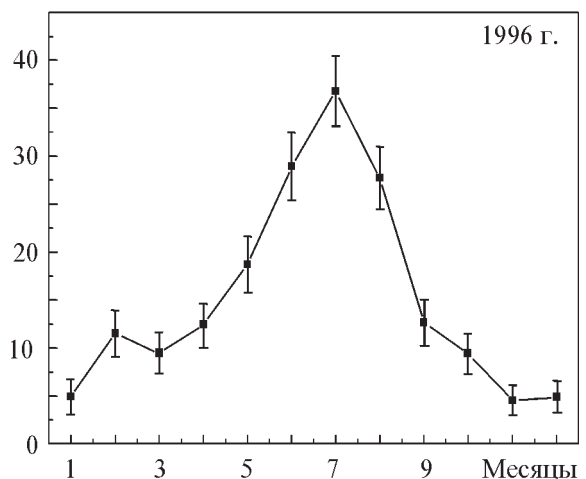


Рис. 2. Сезонная зависимость частоты появления F-рассеяния на ионограммах в течение 1996 г.

Для оценки частоты наблюдения P_S рассчитывался доверительный интервал по уровню 0.95 [4]. Поскольку во всех случаях

количество рассматриваемых событий было велико (100 и более), полагалось, что частота распределена по нормальному закону. Границы P_1 , P_2 доверительного интервала рассчитывались следующим образом:

$$P_1, P_2 = \frac{P_S + \varepsilon_\alpha^2/2n}{1 + \varepsilon_\alpha^2/2n} \pm \frac{\varepsilon_\alpha}{1 + \varepsilon_\alpha^2/2n} \sqrt{\frac{P_S(1-P_S)}{n} + \frac{\varepsilon_\alpha}{4n^2}},$$

где $\varepsilon_\alpha = 1.96$ – параметр функции Лапласа Φ , соответствующий доверительному интервалу $\alpha = 0.95$ ($2\Phi(\varepsilon_\alpha) = \alpha$). В этой формуле минус относится к нижней границе интервала P_1 , плюс – к верхней P_2 .

Причину появления среднеширотного ночного F-рассеяния связывают с неоднородностями, развивающимися вследствие распространения внутренних гравитационных волн тропосферной природы [1, 5]. Вызванные ими возмущения электронной плотности на высотах F-области проявляются в виде пространственных волн с длинами $25 \div 350$ км и периодами $5 \div 60$ мин.

Когда внутренние гравитационные волны распространяются в область F снизу, их амплитуда растет с ростом высоты. Если этот эффект сильнее, чем затухание за счет вязкости среды, то амплитуда квазисинусоидальных колебаний изоэлектронных поверхностей тоже будет возрастать с высотой [1]. В случае, если амплитуда волны превышает уровень нелинейного ограничения (относительные изменения плотности достигают 30 % от фонового значения), волна должна разрушаться, приводя к развитию турбулентности разных масштабов и к эффекту F-рассеяния.

Другой вид сезонной зависимости в поведении явления F-рассеяния наблюдается в годы высокой активности Солнца (последний максимум в 11-летнем солнечном цикле приходится на 2001 г.). Частота появления F-рассеяния на ионограммах в эти годы максимальна вблизи весеннего и осеннего равноденствий (в апреле и в октябре), что совпадает с поведением сезонной зависимости геомагнитной активности (рис. 3).

Доверительные интервалы по средним значениям K -индексов возмущенности магнитного поля по уровню 0.95 определялись в предположении об их нормальном распределении аналогично оценкам доверительных интервалов частоты наблюдения.

Таким образом, проанализированные данные свидетельствуют о двух видах сезонной зависимости в поведении явления F-рассеяния. Это может означать, что существуют различия в природе возникновения F-рассеяния в разные годы и сезоны. С целью более подробного изучения этого вопроса было проведено несколько видов обработки данных за весь семилетний период наблюдений.

На первом этапе обработки была вычислена условная вероятность наблюдения явления F-рассеяния на ионограммах в зависимости от возмущенности геомагнитного поля для каждого из семи лет наблюдений (рис. 4). Рассматривались все часовые ионограммы, на которых зарегистрированы отражения от области F ионосферы. Не рассматривались ионограммы в периоды сильных магнитных возмущений, поскольку в этом случае поглощение в D-области ионосферы сильно увеличивается и следы отражений на ионограммах не наблюдаются. Кроме того, не рассматривались ионограммы, на которых спорадический слой E_s полностью экранировал область F ионосферы.

Оценка условной вероятности появления F-рассеяния рассчитывалась как отношение количества зарегистрированных случаев F-рассеяния к общему количеству случаев регистрации области F на ионограммах при условии, что трехчасовой K -индекс геомагнитной активности был выше определенного порогового значения. Для оценки вероятности рассчитывался доверительный интервал по уровню 0.95 таким же образом, как и для частоты наблюдения F-рассеяния.

Из рис. 4, на котором приведены данные за все семь лет, видно, что вероятность наблюдения явления F-рассеяния увеличивается с ростом возмущенности магнитного поля. Это справедливо для всех лет наблю-

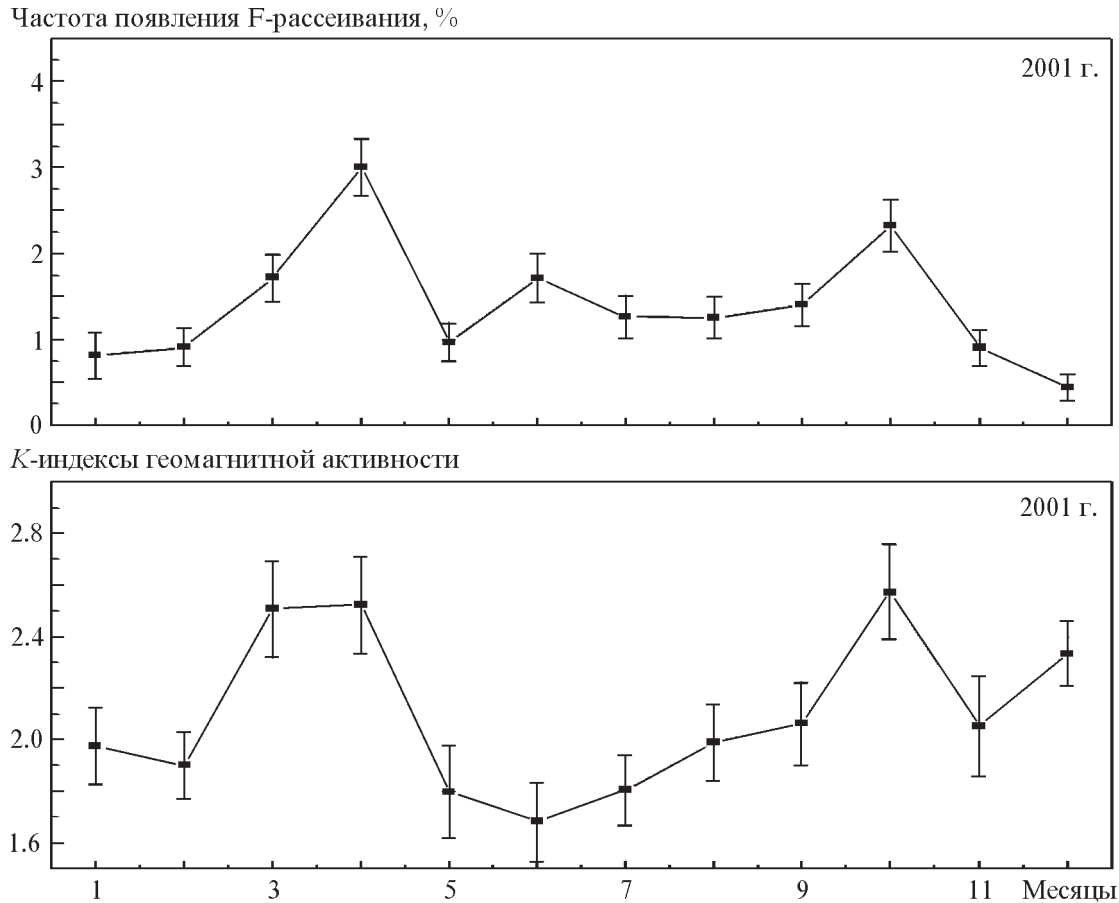


Рис. 3. Сезонные зависимости частоты появления F-рассеивания (а) и К-индекса геомагнитной активности (б) в 2001 г.

дений, за исключением 1996 и 1997 гг. Очевидно, в эти годы преобладал механизм образования “среднеширотного” ночного F-рассеивания (рис. 2).

Оценка вероятности за весь семилетний интервал наблюдений показывает, что возмущенность геомагнитного поля оказывает преобладающее влияние на образование ионосферных неоднородностей на протяжении всех семи лет измерений (рис. 5). Уже при незначительном увеличении вариаций магнитного поля (начиная с $K = 1 \div 2$) вероятность образования интенсивных ионосферных неоднородностей, проявляющихся на ионограммах как явление F-рассеивания, растет. По-видимому, происходит преобразование энергии геомагнитных ва-

риаций в ионосферную турбулентность. При этом наблюдается пороговое значение К-индекса геомагнитной активности ($K = 5$) (рис. 4, 6), выше которого происходит “насыщение”, и увеличение возмущенности магнитного поля уже не приводит к большей турбулизации ионосферы.

На следующем этапе было проведено исследование сезонных зависимостей в поведении F-рассеивания, поскольку, как уже упоминалось выше, геомагнитная активность наибольшая вблизи весеннего и осеннего равноденствий, а вероятность наблюдения ночного среднеширотного F-рассеивания растет вблизи зимнего солнцестояния. Рассчитывалась вероятность появления F-рассеивания в различные сезоны года в течение 7 лет (рис. 6).



Рис. 4. Зависимости вероятности появления F-рассеяния на ионограммах от возмущенности геомагнитного поля

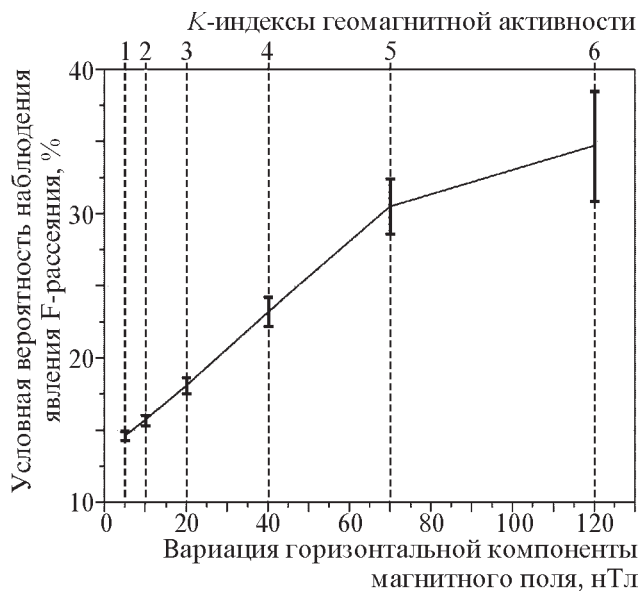


Рис. 5. Зависимость вероятности появления F-рассеяния от возмущенности геомагнитного поля в 1996-2002 гг.

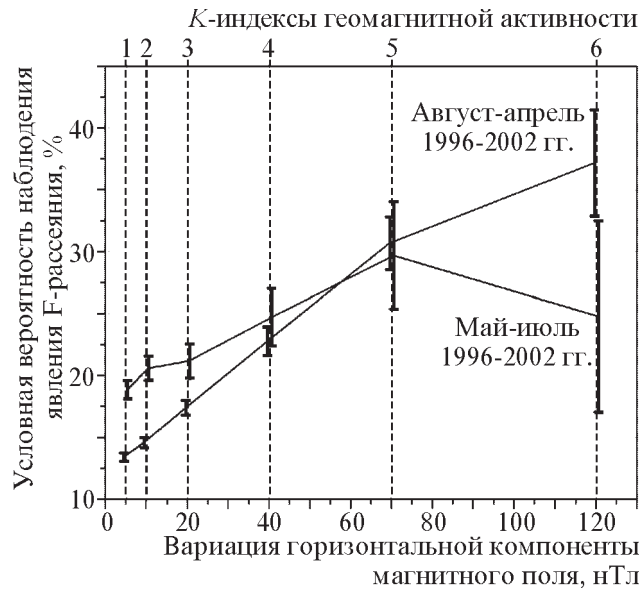


Рис. 6. Зависимости вероятности появления F-рассеяния в различные сезоны года

Полученные зависимости показывают, что влияние геомагнитных возмущений на образование ионосферных неоднородностей меньше вблизи зимнего солнцестояния (с мая по июль месяц). В эти месяцы преобладающим является механизм, связанный, по-видимому, с распространением внутренних гравитационных волн сквозь ионосферу. На протяжении остального периода наблюдений основной вклад в образование ионосферной турбулентности вносят возмущения геомагнитного поля Земли.

Заключение

Проведена обработка данных ионосферного зондирования и мониторинга геомагнитной активности, полученных на Украинской антарктической станции «Академик Вернадский» в течение 1996-2002 гг. Рассмотрены сезонные особенности в поведении геомагнитной активности и наблюдении явления F-рассеяния на ионограммах вертикального зондирования. Исследована связь образования интенсивных ионосферных неоднородностей, проявляющихся на ионограммах как явление F-рассеяния, с возмущенностью геомагнитного поля Земли.

Установлены два механизма образования неоднородностей в ионосфере: один – связанный с распространением внутренних гравитационных волн сквозь ионосферу, второй – с влиянием возмущенности геомагнитного поля. Первый механизм преобладает в зимние месяцы, второй – вблизи равноденствий. Высказано предположение о преобразовании энергии геомагнитных вариаций в ионосферную турбулентность.

Авторы благодарят Украинский антарктический центр за предоставленный архив ионосферных и магнитных данных. Мы также признательны сотрудникам Радиоастрономического института НАН Украины В. Г. Синицыну, Н. Н. Герасимовой и Г. В. Литвиненко за полезные замечания и обсуждения.

Работа выполнена при частичной поддержке партнерского проекта УНТЦ Р-072 и в рамках Договора 2М/118 МОН Украины.

Литература

1. Гершман Б. Н., Казимировский Э. С., Кокоуров В. Д., Чернобровкина Н. А. Явление F-рассеяния в ионосфере. – М.: Наука, 1984. – 143 с.

2. Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. / Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 528 с.
3. Russel C. T. and R. L. McPherron. Semiannual variation of geomagnetic activity // J. Geophys. Res. – 1973. – Vol. 78. – P. 92-108.
4. Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Наука, 1979. – 496 с.
5. Bowman G. G. Movements of ionospheric irregularities and gravity waves // J. Atmos. Terr. Phys. – 1968. – Vol. 30. – P. 721-734.

Ефекти іоносферного F-розсіювання на антарктичній станції “Академік Вернадський”

**П. В. Сілін, А. В. Залізовський,
Ю. М. Ямпольський**

У роботі досліджені ефекти іоносферного F-розсіювання на Українській антарктичній станції “Академік Вернадський”. Проаналізовано дані вертикального зондування іоносфери і моніторингу геомагнітної активності за результатами вимірювань з 1996 до 2002 рр. Досліджено зв'язок між утворенням інтенсивних іоносферних неоднорідностей, що проявляються на іонограмах як явище F-розсіювання, та збуреннями геомагнітного поля Землі. Встановлено два механізми утворення неоднорідностей в іоносфері: один – пов'язаний з поширенням внутрішніх гравітаційних хвиль через іоносферу, другий – із впливом збурень геомагнітного поля.

Ionospheric Spread-F Effects as Observed at the Antarctic Base “Akademik Vernadsky”

**P. V. Silin, A. V. Zalizovski,
and Y. M. Yampolski**

Ionospheric spread-F effects as observed at the Antarctic base “Akademik Vernadsky” are studied. The 1996-2002 data of vertical ionospheric sounding and of geomagnetic activity monitoring are analyzed. The correlation between the formation of strong ionospheric inhomogeneities, manifesting themselves on ionograms as spread-F, and disturbances in the geomagnetic field is investigated. Two formation mechanisms of the ionospheric inhomogeneities have been revealed, one connected with the propagation of internal gravity waves through the ionosphere and the other with the effect of geomagnetic field perturbations.