

УДК 551.510.535

РОЛЬ КОСМИЧЕСКОЙ И ТРОПОСФЕРНОЙ ПОГОДНЫХ СИСТЕМ В ТУРБУЛИЗАЦИИ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ

А.В. Зализовский, Ю.М. Ямпольский

UPPER ATMOSPHERE TURBULIZATION: THE ROLE OF THE TROPOSPHERIC AND SPACE WEATHER SYSTEMS

A.V. Zalizovsky, Yu.M. Yampolsky

Введение

При рассмотрении процессов в геокосмосе основное внимание, как правило, уделяется потоку энергии, приходящему непосредственно от Солнца [1, 2]. При этом вкладом энергии, приходящей от поверхности Земли, часто пренебрегают, считая его несущественно малым. Настоящая работа посвящена определению роли погоды у поверхности Земли в формировании ионосферной турбулентности.

Ранее авторами было описано влияние атмосферных гравитационных волн тропосферного происхождения на флуктуации магнитного поля Земли [3]. В качестве эффекта, характеризующего состояние верхней ионосферы, в данном случае выбрана турбулентность F-области, вызывающая рассеяние зондирующего сигнала на интенсивных плазменных неоднородностях (F-рассеяние, spread F). Степень турбулизации ионосферы Земли является важным признаком возмущенности космической погоды. Неоднородности ионосферной плазмы оказывают существенное влияние на распространение радиоволн и функционирование спутниковых систем.

Цель лекции состоит в оценке вклада приходящей снизу энергии тропосферных возмущений в состоянии околоземного космического пространства, а также в интерпретации особенностей тропосферно-ионосферного взаимодействия на примере возникновения F-рассеяния.

Положенные в основу доклада данные измерений были получены в Антарктике на Украинской антарктической станции «Академик Вернадский» (географические координаты: 65.25° S, 64.27° W, геомагнитные: 50.1° S, 9.3° W в координатах CGM, до 1996 г. «Фарадей», Великобритания), расположенной вблизи Антарктического полуострова. Этот регион имеет ряд преимуществ для решения поставленной задачи. Первое преимущество состоит в том, что полуостров расположен в высоких географических и средних геомагнитных широтах. Средние геомагнитные широты обеспечивают спокойный фон вариаций геомагнитного поля и параметров верхней ионосферы, на котором должно быть проще, чем в других регионах, выделять события, связанные с проникновением воздействия снизу.

Второе преимущество связано с повышенной циклонической активностью в регионе, которая должна генерировать атмосферные гравитационные волны (АГВ). Воздействие АГВ можно зарегистрировать на ионосферной высоте. Иными сло-

вами, для поиска отклика геокосмоса на события в тропосфере регион Антарктического полуострова является удачным местом.

В лекции используются метеорологические, геомагнитные данные и данные вертикального зондирования ионосферы: F-рассеяние характеризуется вероятностью его появления на ионограммах в течение различных интервалов времени; состояние космической погоды представлено *K*-индексами магнитной активности, рассчитанными по данным обсерватории AIA; параметры приземной погоды получены с помощью автоматической метеостанции. В лекции анализируются экспериментальные данные, полученные в 1993–2003 гг.

Статистика F-рассеяния. Воздействие космических факторов на F-рассеяние

Вероятность наблюдения F-рассеяния демонстрирует существенный как суточный, так и сезонный ход. Главная особенность суточной вариации во все сезоны года состоит в возрастании вероятности наблюдения F-рассеяния в ночные часы.

Сезонные вариации вероятности наблюдения эффекта в годы с высокой и низкой солнечной активностью приведены на верхних панелях рис. 1, *a* и 1, *б*. Характер зависимостей разный. Так в 2001 г. (высокая активность) максимумы отмечались в апреле и октябре. В то же время в 1996 г. (низкая активность) максимум вероятности наблюдения приходится на зимние месяцы. На нижних панелях рис. 1, *a* и 1, *б* приведены изменения среднемесячных *K*-индексов геомагнитной активности в 2001 и 1996 годах. Как видно, в год с высокой солнечной активностью максимумы двух зависимостей совпадают и приходятся на апрель и октябрь (рис. 1, *a*). Корреляция между ними очевидна. В год с низкой солнечной активностью характер сезонной вариации *K*-индексов остался таким же, максимумы приходятся на весну и осень. В то же время корреляция *K*-индексов с вероятностью наблюдения F-рассеяния исчезает (рис. 1, *б*). Максимум вероятности F-рассеяния приходится на южную зиму, когда в *K*-индексах наблюдается явный минимум.

Рассмотрим условные вероятности наблюдения F-рассеяния при разных значениях локальных *K*-индексов. На рис. 2, *a* представлена статистика за семь лет наблюдений. Очевидным представляется рост вероятности наблюдения F-рассеяния с ростом *K*-индекса. По верхней горизонтальной оси отложены *K*-индексы, по нижней

горизонтальной оси – соответствующая K -индексу вариация горизонтальной компоненты магнитного поля. Вплоть до $K = 5$ рост практически линейный, далее наступает «насыщение». На рис. 2, б приведены те же зависимости, но уже отдельно для трех месяцев вблизи зимнего солнцестояния (май–август) и остальных девяти месяцев года. Очевидно, что в зимние месяцы зависимость F-рассеяния от возмущенности геомагнитного поля существенно ослабевает. Проведенная обработка данных позволяет сделать следующие основные выводы:

- F-рассеяние в целом зависит от возмущенности магнитного поля и с ростом K -индексов магнитной активности вероятность наблюдения F-рассеяния возрастает.
- зависимость вероятности F-рассеяния от космических факторов растет в годы максимума солнечной активности.
- в сезонном ходе минимум влияния возмущенности магнитного поля на возбуждение плазменной турбулентности приходится на зимние месяцы, для которых следует искать иную причину возбуждения F-рассеяния.

Причина такого поведения, по-видимому, состоит в проникновении энергии тропосферных возмущений в ионосферу благодаря возбуждению атмосферных гравитационных волн и их распространению на высоты верхней ионосферы.

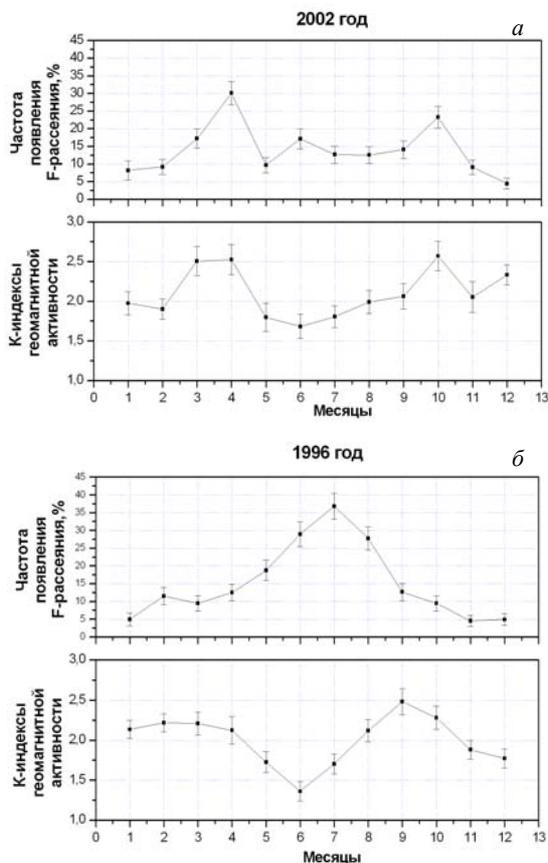


Рис. 1. Сезонные вариации вероятности наблюдения F-рассеяния (верхние панели) и среднемесячных значений локальных K -индексов (нижние панели) в год с высокой солнечной активностью (а) и в год с низкой солнечной активностью (б).

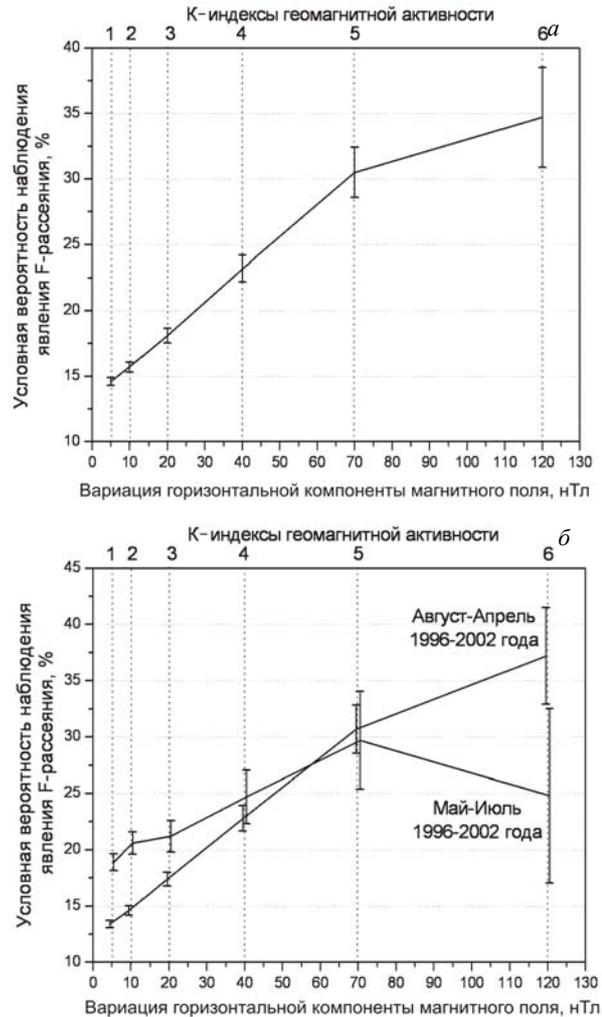


Рис. 2. Условные вероятности наблюдения F-рассеяния: а – полная статистика, б – отдельно для мая-июля и остальной части года.

Воздействие тропосферных возмущений на F-рассеяние

Поиск экспериментальных свидетельств влияния приземной погоды на F-рассеяние велся аналогично поиску связи с возмущенностью геомагнитного поля, т.е. оценивались условные вероятности наблюдения эффекта в тех или иных погодных условиях. В качестве погодных параметров рассматривались приземное давление и его производная, температура, сила и направление ветра, проекции ветра на различные направления. Был найден параметр, для которого связь с F-рассеянием оказалась наиболее существенной. Этим параметром оказалась проекция ветра на северо-восточное направление (откуда дует ветер), являющееся наиболее вероятным в местной розе ветров. На рис. 3 изображены условные вероятности наблюдения F-рассеяния при разных значениях проекции ветра на северо-восточное направление. На рис. 3, а это показано для зимних месяцев за 11 лет наблюдений. Условная вероятность F-рассеяния при северо-восточном ветре в 4 раза превышает вероятность наблюдения эффекта при юго-западном ветре. В тоже время, в другие сезоны года эта связь исчезает, о чем свидетельствует зависимость для ноября-февраля (рис. 3, б).

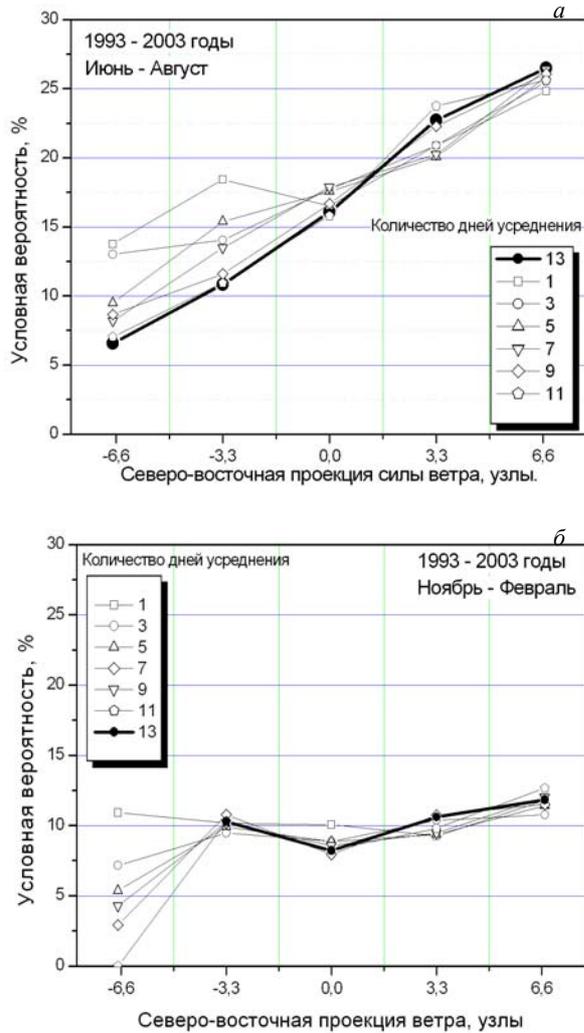


Рис. 3. Условные вероятности наблюдения F-рассеяния при разных значениях северо-восточной проекции ветра в июне–августе (а), в ноябре–феврале (б).

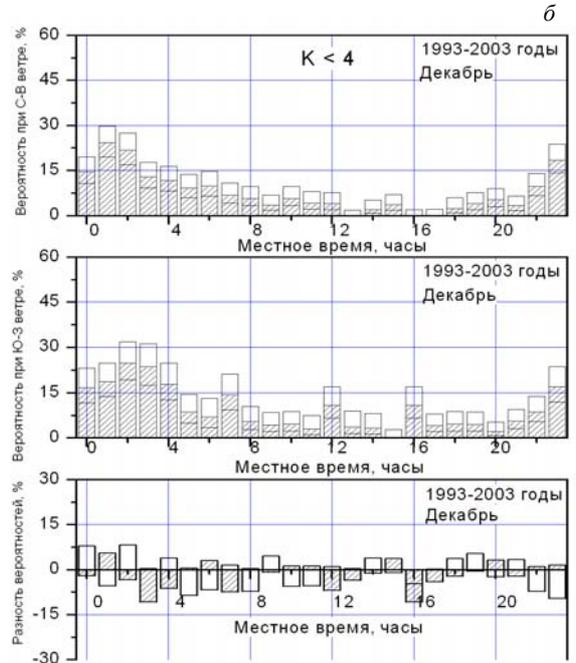
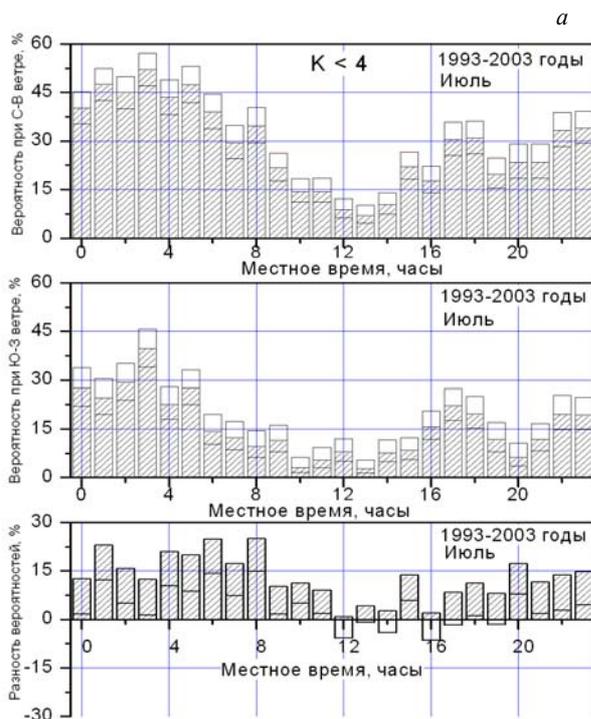


Рис. 4. Суточные вариации вероятности наблюдения F-рассеяния при северо-восточном ветре (верхние панели), юго-западном ветре (средние панели) и разности вероятностей при северо-восточном и юго-западном ветре (нижние панели) в июле (а) и в декабре (б).

На рис. 4 изображены суточные вариации вероятности наблюдения эффекта при северо-восточном и юго-западном ветрах для июля (рис. 4, а) и декабря (рис. 4, б). На верхних панелях изображены вероятности наблюдения эффекта при северо-восточном ветре, на средних – при юго-западном. На нижних панелях приведены разности вероятностей наблюдения F-рассеяния при северо-восточном и юго-западном ветрах. Очевидно, что в июле при северо-восточном переносе вероятность появления F-рассеяния выше в течение практически всего времени, причем в ночные часы это превышение существенно и достоверно (рис. 4, а). В то же время в декабре с точностью до среднеквадратических отклонений F-рассеяние не реагирует на ветер у поверхности Земли (рис. 4, б).

На рис. 5 приведена разность вероятностей регистрации F-рассеяния при северо-восточном и юго-западном ветрах для мая–июня. Обращает на себя внимание тот факт, что максимальные значения «чувствительности» ионосферы к приземной погоде отмечается утром и вечером. Вертикальными линиями на рисунке выделены времена расположения солнечного терминатора между поверхностью Земли и ионосферой.

Обобщая экспериментальные факты, можно отметить, что вероятность наблюдения F-рассеяния зависит от метеоусловий преимущественно в зимнее время. Для региона Антарктического полуострова наиболее сильно влияющим на F-рассеяние параметром погоды оказалась проекция ветра на северо-восточное направление. В зимние месяцы при положительной северо-восточной проекции ветра вероятность наблюдения F-рассеяния возрастает. Влияние тропосферы на F-рассеяние проявляется ночью и максимально в сумеречное время.

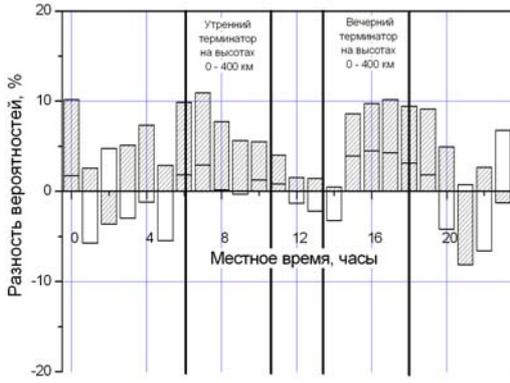


Рис. 5. Суточный ход разности вероятностей регистрации F-рассеяния при северо-восточном и юго-западном ветре в мае-июне.

Обсуждение и интерпретация

Детали механизма, поясняющего влияние солнечных факторов на ионосферную турбулентность, достаточно хорошо разработаны в литературе. Воздействию со стороны тропосферы до сих пор уделялось значительно меньше внимания. Более подробно рассмотрим возможный механизм такого влияния и попытаемся дать качественное объяснение наблюдаемым в эксперименте фактам.

В тропосфере происходит генерация АГВ. Причем по всей вероятности возбуждается широкий пространственно-временной спектр, который фильтруется по мере распространения волн в атмосфере [4]. При распространении вверх амплитуда АГВ растет. В случае, если этот процесс сильнее, чем затухание за счет вязкости среды, амплитуда колебаний ионосферных поверхностей также будет расти с высотой, что приведет к F-рассеянию.

В том, что наиболее информационным метеорологическим параметром оказалась северо-восточная проекция ветра, наверняка есть подсказка относительно тропосферного источника АГВ. Сезонные и суточные изменения чувствительности ионосферы к ситуации в тропосфере связаны, скорее всего, с вариациями условий распространения АГВ из тропосферы на высоты F-области ионосферы.

Остановимся на генерации АГВ. Северо-восточный ветер в окрестности Антарктического полуострова сопутствует передним частям циклонов и благодаря направляющему воздействию горной системы дует в довольно узком секторе углов. В переднюю часть циклонов вынесены атмосферные фронты. Атмосферный фронт – это поверхность раздела теплой и холодной воздушных масс, наклоненная очень полого к горизонту (так, у типичного теплового фронта на 8 км высоты приходится порядка 800 км длины). Выше границы раздела атмосфера конвективно неустойчива практически до тропопаузы. В нашем случае при северо-восточном ветре атмосферный фронт находится над станцией и генерирует атмосферные гравитационные волны, т.е. северо-восточная проекция ветра на станции является удачным индикатором атмосферных фронтов. Генерация АГВ, скорее всего, происходит на высотах тропопаузы, выше которой температурная инверсия ограничивает область конвективной неустойчивости атмосферного фронта.

Остановимся на условиях распространения АГВ. Запишем уравнение для АГВ [5]:

$$\frac{\rho'}{\rho_0} R = \frac{p'}{p_0} P = \frac{u}{X} = \frac{w}{Z} = A \exp\left(\frac{z}{2H}\right), \quad (1)$$

$$\exp(i(\omega t - k_x x - k_z z))$$

где R, P, X, Z, A – комплексные для относительных возмущений плотности и давления ($\frac{\rho'}{\rho_0}$ и $\frac{p'}{p_0}$) и возмущений горизонтальной и вертикальной компонент вектора скорости (u и w).

Дисперсионное соотношение для АГВ описывается следующим выражением [5]:

$$k_z^2 = \left(\frac{\omega_g^2}{\omega^2} - 1\right) k_x^2 - \frac{1}{4H^2} + \frac{\omega^2}{u_s^2}, \quad (2)$$

где ω_g – частота Брандта-Вайсяля, ω – частота АГВ, H – высота однородной атмосферы, u_s – скорость звука в среде. Основным параметром среды, влияющим на распространение АГВ, является частота Бранта-Вайсяля. В случае, если $\omega_g < \omega$, k_z переходит в мнимую область, что физически означает невозможность распространения АГВ в такой среде. Рассмотрим выражение, связывающее частоту Брандта-Вайсяля с параметрами среды [6].

$$\omega_g^2 = g\alpha \frac{dT}{dz} + C_p^{-1} g^2 \alpha^2 T - g\beta \frac{ds}{dz}. \quad (3)$$

Здесь C_p – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, β – соленость (в случае океана), s – энтропия. Для идеальной атмосферы $\alpha = T^{-1}$. Для сухой идеальной атмосферы (3) можно упростить до следующего вида:

$$\omega_g^2 = \frac{g}{T} \left(\frac{dT}{dz} + \frac{g}{C_p} \right). \quad (4)$$

Второе слагаемое в скобках (4) $\frac{g}{C_p}$ – это адиабатический вертикальный градиент температуры. Если реальный градиент $\frac{dT}{dz}$ на какой-то высоте будет, во-первых, отрицательным, и, во-вторых, превысит по модулю адиабатический вертикальный градиент, это будет означать невозможность распространения АГВ всех масштабов в слое и соответственно полное экранирование АГВ, распространяющихся вверх от поверхности Земли. Очевидно, что, если в какой-то области атмосферы температура с высотой растет, частота Бранта-Вайсяля всегда вещественна и достаточно велика, атмосфера устойчива и АГВ в такой среде будут успешно распространяться. Затруднения в распространении АГВ могут возникать в слоях с отрицательным температурным градиентом. По пути из тропосферы вверх такой слой один – это мезосфера. Чем быстрее температура падает с высотой, тем все более ограничивается пространственно-

временной спектр волн, способных распространиться сквозь мезосферу, а в случае, если реальный градиент превысит вертикальный адиабатический, распространение АГВ станет невозможным и среда перейдет в конвективно-неустойчивое состояние.

Вертикальный градиент температуры в мезосфере связан, в первую очередь, с прогревом стратосферы, который вызван поглощением ультрафиолета в озоносфере. Поскольку прогрев озоносферы связан с зенитным углом Солнца, в летний день он максимален, поэтому наблюдается минимальная устойчивость мезосферы и худшие условия распространения АГВ. Зимой условия распространения лучше, чем летом, в силу уменьшения среднего прогрева озоносферы. Ночью условия распространения АГВ улучшаются, в сумеречное время наблюдаются максимальная устойчивость и лучшие условия распространения волн.

Выводы

- Летом и во время равноденствий определяющую роль в развитии ионосферной турбулентности играют солнечно-земные связи.
- В зимние месяцы возрастает влияние процессов в тропосфере на ионосферную турбулентность.
- Переносчиком энергии из тропосферы в ионосферу выступают внутренние атмосферные гравитационные волны, которые генерируются атмосферными фронтами.

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить организаторов Школы за предоставленную возможность опубликовать лекцию, Украинский антарктический центр – за содействие в проведении измерений в Антарктике, зимовщиков станции «Академик Вернадский», благодаря которым был собран экспериментальный материал, и сотрудников отдела Радиофизики геокосмоса радиоастрономического института НАН Украины – за обсуждение результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гершман Б.Н., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д., Чернобровкина Н.А. Явление F-рассеяния в ионосфере. М.: Наука, 1984. 143 с.
2. Силян П.В., Зализовский А.В., Ямпольский Ю.М. Эффекты ионосферного F-рассеяния на антарктической станции «Академик Вернадский» // Радиофизика и радиоастрономия. 2004. Т. 10, № 1. С. 30–37.
3. Ямпольский Ю.М., Зализовский А.В., Литвиненко и др. Вариации магнитного поля в Антарктике и сопряженном регионе (Новая Англия), стимулированные циклонической активностью // Радиофизика и радиоастрономия. 2004. Т. 9, № 2. С. 130–151.
4. Booker H.G. The role of acoustic gravity waves in the generation of spread-F echoes and ionospheric scintillation // J. Atmos. and Terr. Phys. 1979. V. 41, N 5. P. 501–515.
5. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
6. Гиль А. Динамика атмосферы и океана. В 2-х т. М.: Мир, 1986. Т. 1. 397 с.

Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, Харьков