

УДК 621.396.98:629.783

О. Ф. Тырнов, Ю. П. Федоренко, Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Результаты исследования волновых возмущений в околоземной плазме при помощи спутниковых радиомаяков

Надійшла до редакції 05.03.04

Експериментально підтверджено, що поява середньомасштабних рухомих іоносферних збурень (РІЗ) не пов'язана з магнітною збуреністю. Приблизно у 10 % випадків спостерігаються РІЗ із відносними амплітудами більш ніж 0.1. Виявлено широтну залежність просторового періоду РІЗ. Час існування хвильових збурень не перевищує 11—12 год.

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с середины 1960-х годов по настоящее время получен большой объем данных, свидетельствующий о том, что часто горизонтальное распределение электронной концентрации N ионосферы Земли имеет четко выраженную квазипериодическую составляющую. Такие изменения N обычно называются волновыми возмущениями (ВВ). В целом природа механизмов образования ВВ ясна. Они обусловлены сжатием и разряджением ионосферной плазмы в результате распространения в атмосфере внутренней гравитационной волны [2, 5].

В работе применен метод исследования ВВ, основанный на радиопросвечивании ионосферы когерентными сигналами низкоорбитальных навигационных ИСЗ. В экспериментах регистрируется ионосферная составляющая доплеровского смещения частоты, зависящая от времени пролета спутника $\delta f_i(t)$.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Для исследований были отобраны пять циклов измерений $\delta f_i(t)$, проведенных в 1998 и 1999 гг. с использованием российских низкоорбитальных навига-

ционных ИСЗ серии «Цикада» и «Цикада-М». В этих экспериментах ВВ проявляются на регистрациях $\delta f_i(t)$ наиболее сильно — с амплитудами, достигающими 1–2 Гц. Такие амплитуды встречались более чем в 10 % случаев. Упомянутый цикл измерений выполнен при достаточно низкой магнитной активности ($K_p \approx 0...5$). Состояние магнитной возмущенности в течение двух суток до измерений и двух суток после них оставалось таким же низким. Это подтверждает вывод (см., например, [1–3, 5]) о том, что природа среднemasштабных ПИВ скорее всего не связана с геомагнитной возмущенностью.

Возмущенные параметры ионосферы оказывают наиболее сильное влияние на $\delta f_i(t)$ в области пересечения радиолуча со сферической поверхностью радиусом $R_E + z_n$, где R_E — радиус Земли, z_n — высота расположения центра слоя с ВВ. В ходе пролета ИСЗ проекции таких точек на поверхность Земли образуют линии, которые называют трассой z_n . Эти линии позволяют «привязать» обнаруженные ВВ к конкретному региону.

Ниже в качестве примера приведены результаты цикла исследований, выполненного 14.01.99 г. На рис. 1 показаны зависимости $\delta f_i(t)$ и трассы z_n , местоположение измерительного пункта (ИП) отмечено черным кружком, направления движения

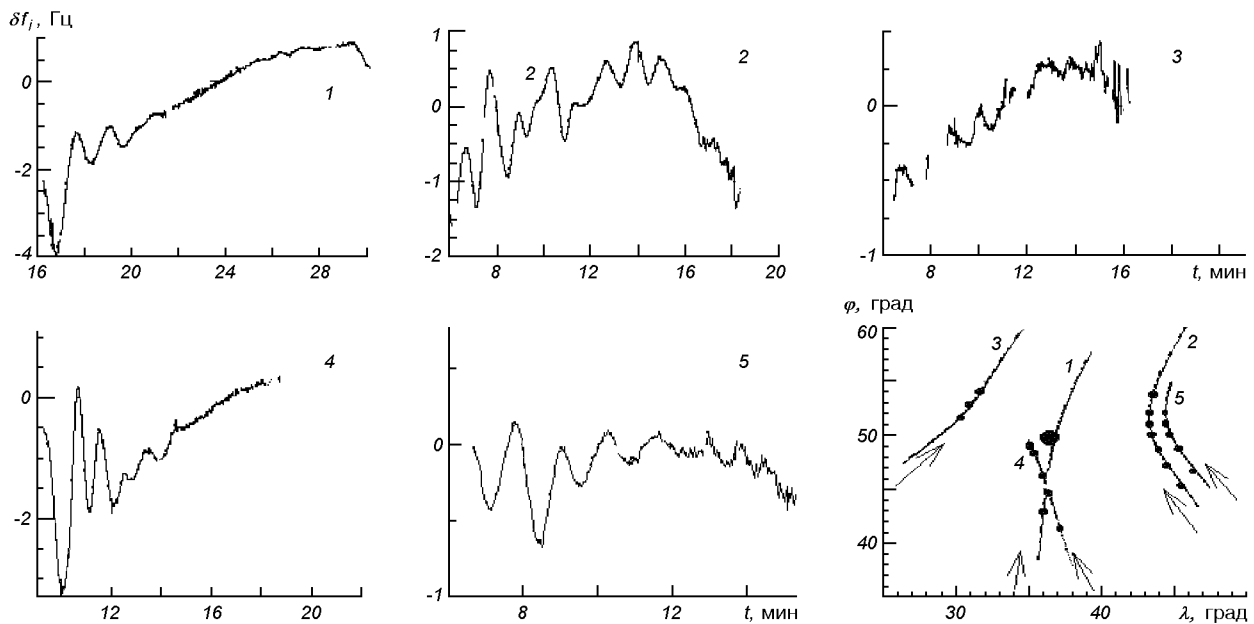


Рис. 1. Регистрации $\delta f_i(t)$ и их трассы z_n в эксперименте 14.01.99 г.: 1 — $t_s = 12:16:14$, $t_0 = 12:23:52$, $\gamma_0 = 11^\circ$; 2 — $t_s = 13:06:11$, $t_0 = 13:11:42$, $\gamma_0 = 72^\circ$; 3 — $t_s = 14:05:29$, $t_0 = 14:09:48$, $\gamma_0 = 69^\circ$; 4 — $t_s = 16:09:18$, $t_0 = 16:14:38$, $\gamma_0 = 45.5^\circ$; 5 — $t_s = 17:06:40$, $t_0 = 17:11:26$, $\gamma_0 = 74.4^\circ$

ИСЗ — стрелками, для момента траверза и его зенитного угла использованы обозначения t_0 и γ_0 , а для начального времени регистрации — t_s . Здесь используется московское декретное время. Точками на трассах z_n отмечены местоположения локальных минимумов (далее — центры ВВ). Кривые 1 и 4 иллюстрируют проявления ВВ с очень большими амплитудами только на южных ветвях трасс z_n . На кривых 2 и 5 ВВ наблюдаются как на северных, так и южных частях графиков $\delta f_i(t)$, т. е. южнее и севернее ИП.

На регистрации 3 ВВ обнаружены только на северной части трассы z_n . На кривых 1 и 4, 2 и 5 фиксируются ВВ при близких значениях зенитного угла ИСЗ γ над совпадающими (в пределах 50—150 км) регионами. Проявления ВВ на кривых 1 и 4, 2 и 5 сходны между собой (все ИСЗ движутся с юга на север), так как, помимо упомянутых совпадений, значения пространственных периодов L (расстояние вдоль меридиана между локальными максимумами электронной концентрации на высоте $z_n = 200$ км) для ближайших ВВ в различных пролетах ИСЗ отличаются не более чем на 20—30 %. Вместе с тем времена пролетов ИСЗ для указанных пар регистраций разнятся примерно на 4 ч. В данном эксперименте время проявления ВВ превышало 5 ч. Тот факт, что на кривых 2 и 5 (см.

трассы z_n) во многих случаях совпадают широты центров ВВ на пространственно близких и похожих по форме трассах z_n , является, видимо, случайным событием: размеры ВВ и местоположение их центров изменяются с течением времени. Наиболее сильно (в 3–4 раза) амплитуда проявлений ВВ варьирует на кривых 1 и 4. Это обусловлено малыми значениями γ_0 (соответственно 11° и 45°). Для других кривых $\gamma_0 \geq 70^\circ$, поэтому амплитуды проявлений ВВ для разных участков регистрации (с разными γ) отличаются не так резко. При этом следует принимать во внимание, что пространственный период ВВ вдоль пролетов 1 и 4 (с юга на север) уменьшался почти в два раза. Без этого факта различие амплитуды проявлений на указанных регистрациях ВВ было бы в два раза больше. Среднее значение L составляло около 160 км.

В выбранных пяти циклах наблюдений обнаружено 120 ВВ, среднее значение L составляло 176 ± 8 км. На рис. 2 (кривая 1) все полученные значения L показаны в виде черных кружков и квадратов в координатах (L, φ) , где φ — широта центра неоднородности. Кружки соответствуют неоднородностям, полученным при $\varphi \leq 49.3^\circ$ N (57 неоднородностей), а квадраты — $\varphi \geq 49.7^\circ$ N (63 неоднородностей). Число обнаруженных ВВ выше и ниже широты ИП приблизительно одинаково.

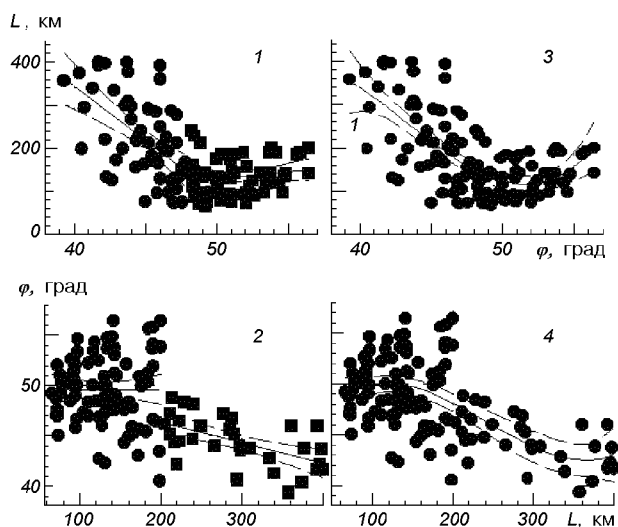


Рис. 2. Зависимости $L(\varphi)$ и $\varphi(L)$, их регрессии и доверительные интервалы: 1, 2 — линейные регрессии, рассчитанные соответственно для 57, 63 и 88, 32 неоднородностей; 3, 4 — регрессии третьего порядка для 120 неоднородностей

Этот результат свидетельствует против утверждения [1, 6], согласно которому основная часть ВВ наблюдается южнее ИП в северном полушарии и севернее ИП — в южном. Во всех циклах измерений замечено увеличение значений L с уменьшением широты наблюдения (рис. 2, зависимость 1). Средние значения L для указанных выше интервалов φ составляют 221 ± 13 км и 130 ± 6 км соответственно. Однако в каждом из этих широтных интервалов прослеживается линейная зависимость L от φ . Для определения зависимостей $L(\varphi)$ представляет интерес получить усредненные значения L для выбранных значений φ в исследуемых диапазонах широт, а затем аппроксимировать их линейными зависимостями, т. е. найти уравнение линейной регрессии. Регрессия восстанавливает зависимость $L(\varphi)$, которая в эксперименте частично разрушается под влиянием совокупности геофизических факторов. Линейные регрессии данных и их 95 % доверительные интервалы также показаны на рис. 2 (зависимость 1). С учетом наблюдаемого разброса данных измерений эти регрессии позволяют лишь говорить об обнаруженных тенденциях в широтном поведении L : в первом широтном интервале значения L линейно уменьшаются, а во втором — несколько увеличиваются.

В интервале широт примерно от 39 до 48 — 50° N наблюдались значения $L \approx 66$..400 км. Вместе с тем в интервале от 48 — 50° до 57° N обнаруживались ВВ с $L \approx 66$..200 км. Для большей наглядно-

сти на рис. 2 (зависимость 2) все полученные значения L показаны в координатах (φ, L) . Здесь кружки соответствуют ВВ с $L \leq 200$ км (88 неоднородностей), а квадраты — с $L > 200$ км (32 неоднородности). Видно, что ВВ с $L \leq 200$ км наблюдались на широтах 40 — 57° N (практически на всех исследуемых широтах), а с $L > 200$ км — только в интервале широт 39 — 48° N. На этом рисунке показаны также линейные регрессии $\varphi(L)$ и их доверительные интервалы для первого и второго интервалов L . Если ранее усреднение при вычислении регрессий выполнялось по L , то в рассматриваемом случае — по φ . Это позволяет выявить различные особенности корреляционного поля широта-размер неоднородности.

На рис. 2 также иллюстрируются регрессии (и их доверительные интервалы) третьего порядка для зависимостей $L(\varphi)$ (зависимость 3) и $\varphi(L)$ (зависимость 4). Эти зависимости получены для всех ВВ. Из первой зависимости можно заключить, что в интервале широт от 50 — 52° до 57° N средний пространственный период неоднородностей увеличивается от 120 до 200 км, а в интервале $\varphi = 38$.. 50° N — уменьшается от 350 до 120 км. Вторая регрессионная зависимость характеризует среднюю широту, на которой наблюдались неоднородности заданного пространственного периода. Так, ВВ с $L < 200$ км фиксировались на средней широте 49° N, а с $L = 300$..400 км — на широте 43° N. Между указанными широтами существовали неоднородности с масштабами $L = 200$..300 км. Оказалось, что регрессии более высоких порядков практически совпадают между собой. Вместе с тем коэффициент корреляции для регрессий третьего порядка выше, чем для регрессий второго порядка. Регрессионные зависимости первого порядка весь объем данных аппроксимируют неудовлетворительно.

Не во всех циклах исследований интервал времени измерения был достаточным для оценки времени существования ВВ над выбранной поверхностью Земли. Как правило, оно более 3—5 ч и, видимо, не превышает 11—12 ч. При этом время наблюдения ВВ над всем регионом, который подвергался радиопросвечиванию сигналами ИСЗ, могло превышать 14 ч. Максимальный широтный и долготный масштабы регионов с ВВ составляли 1 700 км. В наших прежних исследованиях [4] с использованием ИП, разнесенных на 1 390 км, широтный размер составлял всего лишь около 1 000 км, а долготный около 2 000 км. Видимо, без большого пространственного разнесения ИП полученный долготный масштаб ограничивается методическими возможностями и поэтому на самом деле может превышать 1 700 км.

В результате численных экспериментов удалось оценить толщину атмосферного волновода, в котором распространяются наблюдаемые ПИВ. Эти расчеты основывались на всем массиве экспериментальных данных о ПИВ, полученных нами по $\delta f_i(t)$ приблизительно за 10 лет. Оказалось, что эффективная толщина волновода $2H$ составляет около 50—100 км. При повышении толщины волновода, например, в два раза на границах радиовидимости ПИВ практически не проявляются. Это объясняется хорошо известным эффектом. Он заключается в том, что на границах радиовидимости, в случае когда $2H > 100$ км, радиолуч одновременно проходит через разные фазы возмущенности одного или даже нескольких периодов ПИВ. В результате этого локальные влияния различных фаз ПИВ в принятом сигнале взаимно компенсируют друг друга. Для таких волноводов ПИВ может проявляться на регистрациях только в пространственной области, в которой волновой вектор ПИВ приблизительно ортогонален радиолучу. Такая геометрия наблюдается в области траверза, при $\gamma_0 < 30...40^\circ$ амплитуда проявлений становится наиболее заметной. Если толщину волновода уменьшить, например, до $2H \approx 20$ км, то обычно наблюдаемые в эксперименте проявления ВВ соответствовали бы нереальным относительным амплитудам $A_{\Delta N} > 1$.

Во всех регистрациях $\delta f_i(t)$ рассмотренных циклов наблюдений амплитуда проявлений ПИВ не уменьшалась, а наоборот, увеличивалась с удалением от траверза. Это свидетельствует о том, что $2H \leq 50...100$ км. Наличие колебаний $\delta f_i(t)$ одновременно на обеих границах радиовидимости подтверждает волноводный механизм распространения ПИВ.

ОБСУЖДЕНИЕ

Приведенные результаты экспериментальных исследований не претендуют на получение статистически достоверных значений параметров ВВ из-за ограниченности выборки экспериментальных данных. Основным в этих экспериментах была проверка адекватности выбранной модели ВВ, апробация разработанных методик определения параметров изучаемых возмущений и формулировка требований для дальнейших более углубленных исследований.

Экспериментальные зависимости $\delta f_i(t)$, приведенные в работах [1, 5] (они получены в других регионах, но при сходных гелиогеофизических условиях), аналогичны нашим регистрациям $\delta f_i(t)$

как по периодам, так и по амплитудам проявлений на них ВВ. В наших исследованиях установлено, что упомянутые период и амплитуда сложным образом зависят от зенитного угла и поэтому, в отличие от работ [1, 5], мы отказались от расчета и анализа гистограмм этих величин, поскольку они не могут адекватно характеризовать параметры изучаемых ВВ. Кроме того, пространственный период L определялся с учетом пространственной ориентации трассы z_n и направления фронта ВВ. Фактически все полученные ранее данные об экспериментальных значениях L являются искаженными вследствие того, что определялся пространственный период ВВ вдоль трассы z_n в предположении (без достаточных на то оснований), что ориентация этих трасс приблизительно совпадает с меридианом. Мы пришли к выводу о том, что такое приближение в общем случае неверно даже для системы NIMS (ранее эта система называлась TRANSIT), у которой угол наклона плоскости орбиты равен 90° . Наибольшие завышения L можно ожидать для высокоширотных ИП.

Важным подтверждением теории среднemasштабных ПИВ является то обстоятельство, что в экспериментах не было замечено какой-либо связи зарегистрированных ВВ большой амплитуды с геомагнитной возмущенностью. В настоящей работе рассматривались регистрации $\delta f_i(t)$ только с очень большими амплитудами проявлений на них ВВ. Вопрос о погрешности измерений $\delta f_i(t)$ не обсуждался, поскольку эта погрешность в десятки, а иногда и в сотни раз была меньше амплитуд наблюдаемых квазигармонических модуляций, порожденных ВВ. Согласно нашим оценкам для надежного обнаружения ВВ с $A_{\Delta N} = 0.05$ днем ($N_m = 2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$) погрешность частотных измерений должна составлять около 0.04 Гц, а ночью ($N_m = 2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$) — 0.004 Гц. В измерениях $\delta f_i(t)$, помимо проявлений на них ВВ, обнаруживаются еще и флуктуации доплеровской частоты, минимальная средняя квадратичная амплитуда которых обычно составляет около 0.01—0.005 Гц. Поэтому очень часто, особенно ночью, вопрос об обнаружении даже максимальных значений $A_{\Delta N}$ на регистрации $\delta f_i(t)$ определяются не погрешностью измерений (у нас она составляла 0.005 Гц), а амплитудой случайных вариаций $\delta f_i(t)$, которая может превышать проявление ВВ на $\delta f_i(t)$. Как показали наши оценки, в дневное время значения $A_{\Delta N} \geq 0.005$ надежно определяются при $N_m \sim 8 \cdot 10^{11} - 2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, а ночью можно лишь обнаружить ВВ с $A_{\Delta N} \geq 0.02$ при $N_m \geq 2 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$. Аппаратурная погрешность

наших измерениях позволяет надежно регистрировать ПИВ с такими амплитудами.

При повышении амплитуды случайных флуктуаций на всей или части регистрации $\delta f_i(t)$ минимально определяемые значения $A_{\Delta N}$ возрастают. Как уже отмечалось, уровень случайных флуктуаций часто повышается в ночных измерениях $\delta f_i(t)$. Если бы ПИВ порождались равномерно в течение суток с одинаковыми амплитудами, то ночью из-за уменьшения N_m и повышения амплитуды случайных флуктуаций они обнаруживались бы значительно реже, чем днем. Ночью могут быть надежно зарегистрированы, как правило, только ВВ средних и больших амплитуд ($A_{\Delta N} \geq 0.2$).

Согласно теории зарождение ПИВ чаще может происходить в утреннее, а не в дневное время. В ночных же условиях распространение акустико-гравитационных волн до высот F-области существенно упрощается. Поэтому можно предположить, что частота порождений ПИВ ночью должна быть значительно выше. Обнаруживаются же ПИВ днем лишь благодаря их продолжительному времени существования (только зарегистрированные значения составляют около 12 ч), которое позволяет проявиться им в дневной ионосфере.

В ночное время ПИВ действительно обнаруживаются значительно реже, чем в дневное время (следует отметить, что продолжительность ночных наблюдений значительно меньше, чем дневных). Объясняется ли этот экспериментальный результат приведенными выше методическими причинами и большим временем существования ПИВ? Опираясь на наши наблюдения, мы не можем ответить на этот вопрос утвердительно. Экспериментальные данные свидетельствуют, что, по крайней мере, ПИВ средних и больших амплитуд, обнаружение которых всегда надежно, как правило, появляются утром, ближе к полудню, иногда во второй половине дня. При этом фоновые значения электронной концентрации в периоды, когда ПИВ в упомянутых циклах наблюдений не обнаруживаются, практически такие же, как и в период их регистрации. Видимо, имеется почти регулярный механизм порождения ПИВ, который включает в себя явления, происходящие в утренние часы.

Обнаружение проявлений ВВ одновременно на обеих ветвях $\delta f_i(t)$, существование ВВ как южнее, так и севернее ИП, повышение амплитуды проявлений ВВ с увеличением γ и γ_0 , уменьшение различий в проявлениях ВВ (амплитуды и периода) на границах радиовидимости и траверзе при повышении γ_0 достаточно убедительно подтверждают адекватность выбранной модели ВВ и хорошо согласу-

ются с волноводной теорией распространения ПИВ в узком атмосферном волноводе. Полученные оценки максимальных значений продолжительности времени существования ВВ и размеров регионов, над которыми обнаруживаются ВВ, являются достаточно достоверными, и в будущих исследованиях, видимо, существенно не изменятся.

Широтная зависимость пространственного периода ВВ безусловно нуждается в уточнении. В будущем требуется исследовать ее во все сезоны года. Однако наибольшее внимание в дальнейших экспериментах следует уделить определению направления фронта ВВ и возможной зависимости этого направления от сезона года. Из-за большой изменчивости пространственного периода ВВ в наших экспериментах не удалось корректно определить направление волнового фронта исследуемых неоднородностей электронной концентрации. Важным вопросом дальнейших исследований является также определение временного периода ВВ. Мы полагаем, что для этих целей необходимо проводить комплексные исследования с использованием ряда других радиофизических методов, например некогерентного рассеяния и вертикального доплеровского зондирования. Предстоит также выяснить регулярные источники, порождающие среднemasштабные ВВ, в том числе с относительной амплитудой более 0.3. Такие амплитуды наблюдаются не эпизодически, а более чем в 10 % случаев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные среднemasштабные ВВ электронной концентрации получены при незначительной геомагнитной возмущенности, что подтверждает независимость природы образования указанных волновых возмущений от магнитной активности. При задаваемых высотах оси волновода в 200 и 275 км полутолщина атмосферного волновода, в котором распространяются ВВ, соответственно составляют 100 и 50 км.

При высоте центральной оси волновода в 200 км согласно экспериментальным данным пространственный период варьирует от 70 до 400 км. При изменении широты от 38 до 50° N средний пространственный период ВВ понижался от 350 до 120 км, а при дальнейшем увеличении широты до 57° N повышался от 120 до 200 км. В интервале широт от 39 до 50° N наблюдались пространственные периоды ВВ от 70 км до 400 км; в интервале от 50 до 57° N обнаруживались только неоднородности с размерами от 70 до 200 км. Частота наблюдений ВВ в интервале 38...57° N практически

не зависела от широты. Максимальные интервалы времени существования отдельных ВВ приближались к 11—12 ч. Время наблюдения всей структуры ВВ над регионом, который подвергался радиопросвечиванию сигналами ИСЗ, могло превышать 14 ч. Максимальный широтный размер региона с ВВ составлял около 1 700 км, а долготный — около 2 000 км.

Работа выполнена при поддержке НТЦ Украины, проектное соглашение № 1773.

1. Бирюков О. В., Саенко Ю. С., Шагимурагов И. И. Вариации параметров волновых структур в ионосфере по данным комплексного эксперимента за период SUNDIAL сентябрь—октябрь 1989 г. // Геомагнетизм и аэронавигация.—1993.—33, № 1.—С. 37—44.
2. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. — М.: Мир, 1978.—532 с.
3. Денуев В. Х., Сердюк Н. Н., Фаткуллин М. Н. Признаки влияния магнитных возмущений на волнообразные неоднородности электронной концентрации области F по данным доплеровских наблюдений // Геомагнетизм и аэронавигация.—2001.—41, № 2.—С. 204—207.

4. Федоренко В. Н., Федоренко Ю. П., Шагимурагов И. И. Результаты исследования ионосферы, полученные при помощи пространственно разнесенного приема радиосигналов низкоорбитальных навигационных ИСЗ // Геомагнетизм и аэронавигация.—1997.—37, № 3.—С. 121—126.
5. Evans J. V., Holt J. M., Wand R. H. A differential-Doppler study of traveling ionospheric disturbances from Millstone Hill // Radio Sci.—1983.—18, N 3.—P. 435—451.
6. Ogawa T., Igarashi K., Aikyo K., et al. Satellite observation of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Syowa station // Proc. NIPR Symp. Upper Atmos. Phys.—1988.—Vol. 1.—P. 192—198.

BEACON-SATELLITE OBSERVATIONS OF WAVE DISTURBANCES IN THE PLASMA OF NEAR-EARTH SPACE

O. F. Tyrnov, Yu. P. Fedorenko, L. F. Chernogor

Measurements verify that the occurrence of mesoscale travelling ionospheric disturbances (TIDs) is not associated with geomagnetic disturbance. Approximately in 10 % of the cases, the amplitude of TIDs exceeds 0.1 on a relative scale. A latitudinal dependence of the TID wavelength is detected. The lifetimes of wave disturbances do not exceed 11–12 h.