

6. Cheremisin A., Granitskii L., Myasnikov V., Vetchinkin N. Improved aerosol scattering in the upper atmosphere according to data of ultraviolet observations from space, with instrumental smoothing taken into account // Proc. SPIE. 2000. V. 4341. P. 383–389.
7. Микуров А.Е., Смеркалов В.А. Исследование рассеянного излучения верхней атмосферы Земли. Л.: Гидрометеониздат, 1981.
8. Бутков В.В., Логинов С.В. Результаты восстановления распределений озона и некоторых характеристик аэрозоля в стратосфере методом зондирования сумеречного ореола Земли из космоса // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. № 8. С. 697–703.
9. Cheremisin A.A., Vassilyev. Y.V. Numerical calculation gravito-photophoretic movement for aerosol aggregates // A. Deepak Publishing. 2006. V.148. pp.131–135.
10. Бычков В.В., Маричев В.Н., Пережогин А.С., Шевцов Б.М., Шумейко А.В. Динамика лидарных отражений в мезосфере Камчатки в период зимнего аномального поглощения радиоволн в ионосфере // Оптика атмосферы и океана. № 12. С. 1083–1087. 2008.
11. Dobber M.R., Dirksen R.J., Levelt P.F. et. al. Ozone Monitoring Instrument calibration // IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens. 2006. V. 44. No. 5. P. 1209–1238. (<http://avdc.gsfc.nasa.gov/index.php?site=2045907950>).
12. Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRL-MSISE-00 Empirical Model of the Atmosphere: Statistical Comparisons and Scientific Issues // J. Geophys. Res. 2003, 107, 1468. (www.nrl.navy.mil/content.php?P=03REVIEW105).

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОЩНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ В
НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ НА ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ В
АЗИАТСКОМ РЕГИОНЕ РОССИИ**
**RESEARCHING THE INFLUENCE OF STRONG METEOROLOGICAL DISTURBANCES IN
THE EARTH'S LOWER ATMOSPHERE ON VARIATIONS OF IONOSPHERIC
PARAMETERS IN THE ASIAN REGION OF RUSSIA**

**Черниговская М.А.¹, Куркин В.И.¹, Орлов И.И.¹, Поддельский И.Н.², Поддельский А.И.²,
Шарков Е.А.²**

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

²Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

³Институт космических исследований РАН, Москва

This work relies on the analysis of short-period temporal variations of ionospheric parameters to investigate a possibility that strong meteorological disturbances in the Earth's lower atmosphere are reflected in the ionospheric parameter variations in a zone far removed from the source of the disturbance. Tropical cyclones (TC) may be a most powerful potential source of impact from below. The analysis involves data on maximum observed frequencies (MOF) of oblique sounding (OS) signals along the Norilsk–Irkutsk, Magadan–Irkutsk, and Khabarovsk–Irkutsk paths in East Siberia and the Far East obtained at equinoxes (March, September) in 2005–2009 and in November 2005.

A frequency analysis has revealed time intervals with enhanced intensity of short-period oscillations which may be interpreted as manifestations of large-scale traveling ionospheric disturbances (TIDs) whose sources were internal gravity waves (IGWs) with periods of 1–5 hours. Based on a complex analysis of helio-geomagnetic, ionospheric, and meteorological data in the regions under study as well as of data on tropical cyclones, we have made an attempt at finding a link between a number of detected TIDs and the ionospheric responses to tropical cyclones which were in their active phase in the north-west Pacific during the periods in question. A considerable increase in the energy of short-period wave disturbances was observed along the Khabarovsk–Irkutsk, Magadan–Irkutsk, and Norilsk–Irkutsk paths during active tropical cyclogenesis in September 2005–2009 and in November 2005. The intensity of the observed TIDs decreased as the midpoints of the OS paths moved westward away from the potential IGW sources. Ionospheric responses to wave disturbance propagation from the same IGW sources differ in the OS paths under analysis. The wave disturbance propagation velocities were estimated from the delay in TID passage in the regions of the midpoints of the spaced-apart OS paths. Short-period TIDs can also be observed at the spring equinox in March 2005–2009 under quiet helio-geomagnetic conditions and in the absence of active tropical cyclones in the north-west Pacific, but their energy is much lower than during the autumns of various years.

Возмущения верхней атмосферы и ионосферы Земли, обусловленные воздействиями снизу (в том числе, метеорологического характера), активно изучаются в течение многих лет. Источниками таких возмущений могут быть атмосферные гравитационные волны, распространяющиеся из нижележащих слоев атмосферы и переносящие с собой момент количества движения и энергию. Различные источники, действующие в нижней и средней

атмосфере (сейсмические события, метеорологические фронты и струйные течения, прохождение солнечного терминатора, стратосферные потепления, антропогенные воздействия и т.п.), возбуждают широкий пространственно-временной спектр внутренних гравитационных волн (ВГВ) [1]. При определенных условиях ВГВ достигают высот максимума ионосферы (~300-350 км). Проникая на высоты ионосферы, ВГВ проявляют свои свойства в виде перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Теоретические расчеты и экспериментальные данные показывают, что ВГВ распространяются в горизонтальных направлениях с различными скоростями, в результате чего формируются движущиеся пакеты волн, которые могут обнаруживаться на расстояниях до нескольких тысяч километров от источника возбуждения [2, 3].

В работе исследуется волновой механизм воздействия со стороны нижних слоев атмосферы на ионосферу Земли. В качестве мощнейшего источника воздействия снизу рассматриваются гигантские по своей энергетике метеорологические возмущения в тропосфере – тропические циклоны (ТЦ). Прохождение фронта ТЦ может сопровождаться возбуждением ВГВ различных временных масштабов [4-6]. В данной работе приводятся результаты исследования короткопериодных (порядка десятков минут, часов) временных вариаций ионосферных параметров, полученных на сети ионозодов наклонного зондирования (НЗ), вызванных изменениями параметров верхней атмосферы и ионосферы в регионах проведения радиофизических измерений [7-9]. Для анализа использовались данные наблюдений временных вариаций максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) сигналов НЗ на трассах Норильск-Иркутск, Магадан-Иркутск, Хабаровск-Иркутск. Измерения проводились со скважностью ~5 мин в равноденственные периоды (март, сентябрь) 2005-2009 гг. и в ноябре 2005 г. Характеристики ТЦ, действовавших в периоды радиофизических измерений, брались из электронной базы спутниковых данных глобального тропического циклогенеза "Глобал-ТЦ". Трассы наклонного зондирования проходят в регионах Восточной Сибири и Дальнего Востока азиатской части России, их геометрия различна. Трасса НЗ Хабаровск-Иркутск была задействована только в 2009 г., ее средняя точка (область ионосферы, в окрестности которых происходит отражение радиосигналов) наиболее близка к региону активной деятельности тропических циклонов в акватории северо-запада Тихого океана.

Частотный анализ выполнялся с помощью разработанных в ИСЗФ СО РАН методики поиска периодичностей для временных рядов [10]. Рассчитывались матрицы значений величин R_i , характеризующих "энергетику" колебаний с периодами T_i . Расчеты мощностей текущих спектров R_i проводились в скользящем режиме обработки для периодов $0.5 \div 5$ часов с шагом 0.5 часа. Усиление мощности спектра на определенных периодах T_i интерпретировалось как проявление ПИВ, связанных с распространением ВГВ.

Решая задачу о возможности регистрации проявлений деятельности мощных ТЦ в вариациях ионосферных параметров в зоне, удаленной от региона деятельности ТЦ, существенным является вопрос о выявлении других возможных источников волновых возмущений. Доминирующим фактором в термодинамическом режиме ионосферы является гелио-геомагнитная активность. Поэтому при анализе учитывалась сопутствующая гелио-геомагнитная возмущенность (поток солнечного радиоизлучения $F_{10.7}$ на длине 10,7 см и геомагнитный индекс K_p). Особый интерес представлял временной период 2008-09 гг., который характеризовался минимумом солнечной активности с низкой интенсивностью активных событий на Солнце и сопутствующих им геомагнитных возмущений. Это чрезвычайно благоприятствовало эффективности исследования ионосферных возмущений, связанных с влиянием внутренних атмосферных процессов, в том числе метеорологических эффектов. Поток радиоизлучения Солнца $F_{10.7}$ в этот период не превышал 70, в ед. 10^{-22} Вт/(Гц·м²). Кроме гелио-геомагнитной возмущенности учитывалась метеорологическая обстановка в исследуемых регионах, поскольку атмосферные фронты также могут быть источниками ВГВ. По композитам облачного покрова по данным спутника NOAA определялось время прохождения атмосферных фронтов через регионы средних точек трасс НЗ. Вариации параметров ионосферы в этой области существенным образом проявляются в характеристиках принимаемых в Иркутске радиосигналов.

В качестве примера приведем данные анализа за 2009 г. На рис. 1 представлены матрицы текущих спектров МНЧ для периодов 1-5 час на широтной трассе Хабаровск-Иркутск и меридиональной трассе Норильск-Иркутск в сентябре 2009 г. На верхней панели рисунка дан график изменения индекса геомагнитной активности K_p , на временной оси которого указаны с помощью горизонтальных полос периоды действия наиболее мощных ТЦ в северо-западной акватории Тихого океана (супер-тайфун Choi Wan категории 5 в соответствии со шкалой

Саффира-Симпсона, 12-20/09/2009; супер-тайфун категории 4 Parma, 27/09-14/10/2009 и супер-тайфун категории 5 MELOR, 29/09-08/10/2009). Вертикальными стрелками на картах мощности спектра вариаций МНЧ указаны моменты прохождения местных метеорологических атмосферных фронтов в регионах подионосферных средних точек трасс НЗ. Из рис. 1 видно, что проявление ПИВ не всегда связано с усилениями гелио-геомагнитной возмущенности или прохождением в регионах средних точек трасс местных метеорологических фронтов. Не связаны эти ПИВ и с прохождением солнечного терминатора, так их длительность – порядка суток и более. Если источниками наблюдаемых ПИВ являются ТЦ, действующие в северо-западной акватории Тихого океана, то для анализируемых трасс НЗ отклик ионосферы на прохождение волновых возмущений от одних источников ВГВ различен. Прежде всего, это, очевидно, связано с различной удаленностью средних точек трасс НЗ от потенциальных источников ВГВ. Существует, по-видимому, связь и с геометрией трасс, а также с тем, что сам источник ВГВ в процессе развития ТЦ, изменяется по интенсивности и меняет свои координаты (стадии развития и траектории движения ТЦ). Поэтому существует зависимость от угла между направлением распространения волнового возмущения и линией, соединяющей средние точки трасс НЗ.

Из предположения о том, что источником наблюдаемых ПИВ по данным МНЧ сигналов наклонного зондирования на рассматриваемых трассах служат волновые пакеты, генерируемые прохождением фронта мощного ТЦ в акватории северо-запада Тихого океана, была предпринята попытка оценить скорость распространения ПИВ. На рис. 2,б приведены временные зависимости мощностей текущих спектров R_i для периода $T_i = 5$ час для трасс Хабаровск-Иркутск и Норильск-Иркутск для 12-20 сентября 2009 г. в период действия супер-тайфуна 5 (наивысшей) категории Choi Wan (рис. 2,а). Расстояние между средними точками трасс Хабаровск-Иркутск и Норильск-Иркутск (пунктирная линия на карте рис. 5,а) составляет ~1800 км. Задержка между последовательными прохождениями ПИВ региона средней точки трассы Хабаровск-Иркутск, а затем региона средней точки трассы Норильск-Иркутск составляет $\Delta t \approx 3 \div 6$ час. Соответственно, скорость распространения ПИВ может составлять величину от 170 до 90 м/с. Полученные оценочные значения согласуются с результатами экспериментальных и теоретических оценок скоростей распространения ВГВ. По теоретическим оценкам [3] скорость ВГВ от импульсного источника может составлять величину до 200-300 м/с. По экспериментальным оценкам [1] скорость ВГВ может составлять ~нескольких десятков до сотни м/с.

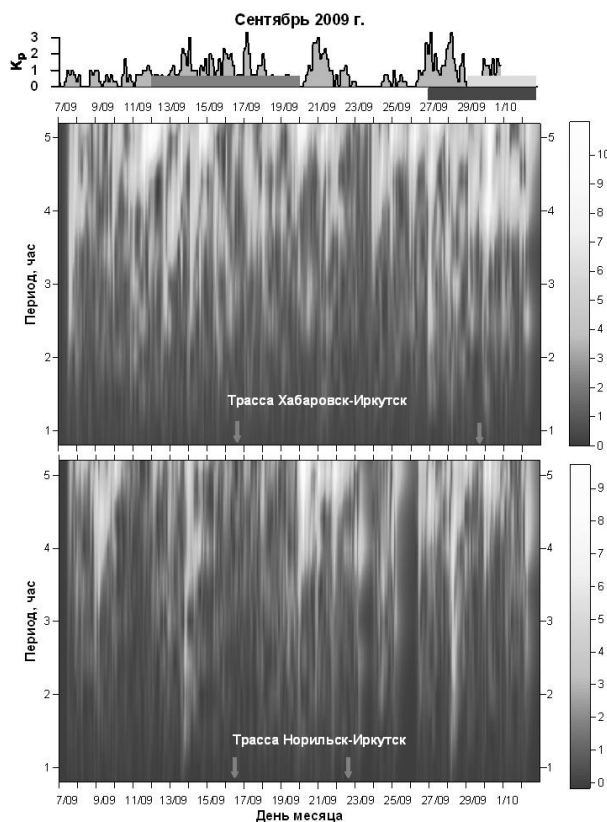


Рис. 1. Матрицы текущих спектров МНЧ для периодов 1-5 час на трассах Хабаровск-Иркутск и Норильск-Иркутск и индекс геомагнитной активности K_p в сентябре 2009 г.

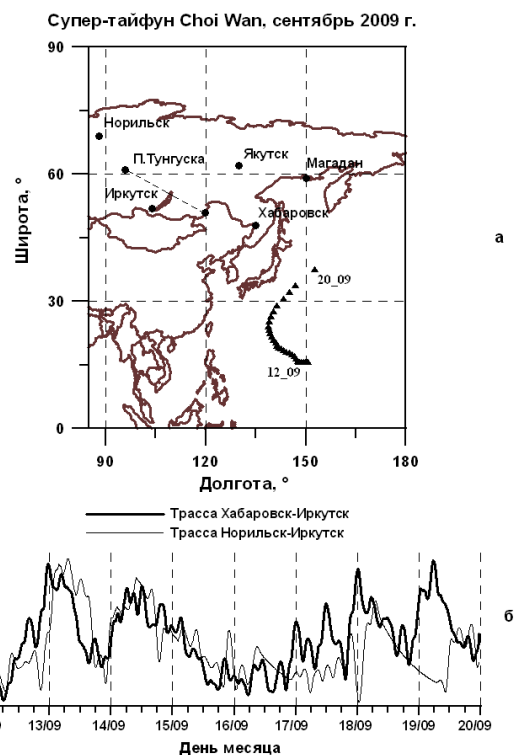


Рис. 2. Траектория движения ТЦ Choi Wan (а) и временные зависимости мощностей текущих спектров R_i для периода $T_i = 5$ час на трассах Хабаровск-Иркутск и Норильск-Иркутск (б) в период 12-20 сентября 2009 г.

Аналогичный частотный анализ данных МНЧ сигналов НЗ для рассматриваемых трасс был выполнен для периодов весеннего равноденствия (март 2005-09 гг.). Полученные спектры мощности вариаций МНЧ для весны, когда циклоническая активность в северо-западной акватории Тихого океана отсутствовала, в спокойных гелио-геомагнитных условиях (2008-09 гг.) можно рассматривать как фоновые. Проведено сравнение фоновых спектров со спектрами амплитуд возмущений, полученными в периоды активной деятельности тропического циклогенеза в сентябре. В весенние месяцы, в отсутствие действующих тропических циклонов в акватории северо-запада Тихого океана, также отмечались ПИВ с периодами 1-5 час, но их энергетика была значительно слабее (в полтора-два раза) по сравнению с энергетикой ПИВ в осенние периоды. Этот факт дает основание отметить, что при прочих аналогичных условиях наличие мощных действующих тропических циклонов (даже в достаточно удаленной зоне), может рассматриваться как потенциальный источник короткопериодных волновых возмущений ионосферных параметров.

В результате проведенного исследования можно сформулировать следующие результаты:

1. Проведенный частотный анализ выявил временные интервалы с повышенной энергетикой короткопериодных колебаний данных МНЧ сигналов НЗ на трассах Магадан-Иркутск, Норильск-Иркутск и Хабаровск-Иркутск для равноденственных периодов 2005-09 гг. и ноября 2005 г., которые можно интерпретировать как проявление ПИВ, источниками которых являются ВГВ с периодами 1-5 часов.

2. Анализируя потенциальные источники короткопериодных волновых возмущений, установлено, что обнаруженные ПИВ не всегда связаны с проявлениями гелио-геомагнитной возмущенности (к примеру, 2008-09 гг. характеризуются минимумом солнечной активности и спокойной геомагнитной обстановкой). Не всегда выявленные ПИВ совпадают по времени с прохождением в регионах подионосферных средних точек трасс НЗ местных метеорологических фронтов, а также не связаны с прохождением солнечного терминатора.

3. В периоды активной деятельности ТЦ (сентябрь 2005-09 гг., ноябрь 2005 г.) в акватории северо-запада Тихого океана отмечено значительное усиление энергетики короткопериодных волновых возмущений на трассах НЗ. Интенсивность наблюдаемых ПИВ уменьшается по мере удаления средних точек трасс к западу от региона активного тропического циклогенеза.

4. Для анализируемых трасс НЗ отмечается различный отклик ионосферы на прохождение волновых возмущений от одних источников ВГВ. По-видимому, это связано с различной геометрией трасс НЗ, а также с тем, что сам рассматриваемый источник ВГВ в процессе развития ТЦ изменяется по интенсивности и меняет свои координаты.

5. По времени задержки прохождения ПИВ регионов средних точек разнесенных по пространству трасс НЗ оценена скорость распространения волновых возмущений, составляющая величину ~90-170 м/с.

Выявленные различия энергетики короткопериодных колебаний для разных сезонов и лет могут быть, на наш взгляд, связаны с возможными различиями в условиях распространения волновых возмущений в атмосфере, а также с особенностями формирования, развития, перемещения конкретных ТЦ в рассматриваемые периоды времени и, как следствие этих особенностей, различными эффектами воздействия ТЦ на вышележащую атмосферу.

В рамках настоящей работы для некоторых ПИВ не удалось идентифицировать потенциальные источники ВГВ. Возможно, эти ПИВ связаны с откликами ионосферы на сезонные перестройки динамического режима верхней атмосферы в рассматриваемые равноденственные периоды. Таким образом, необходимы дальнейшие систематические исследования в этой актуальной области исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 09-05-00760_а.

Литература

1. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982-1995 // *Ann. Geophys.*, 1996. Vol. 14. P. 917-940.
2. Ахмедов Р.Р., Куницын В.Е. Моделирование ионосферных возмущений, вызванных землетрясениями и взрывами // *Геомагнетизм и аэрономия*, 2004. Т. 44. № 1. С. 105-112.
3. Куницын В.Е., Сураев С.Н., Ахмедов Р.Р. Моделирование распространения акустико-гравитационных волн в атмосфере для различных поверхностных источников // *Вестник Моск. ун-та. Серия 3. Физика. Астрономия*, 2007. № 2. С. 59-63.
4. Bishop R.L., Aponte N. et al. Arecibo observations of ionospheric perturbations associated with the passage of Tropical Storm Odette // *J. Geophys. Res.*, 2006. Vol. 111. No. A11. P. A11320. doi:10.1029/2006JA011668.

5. Zuo Xiao, Sai-guan Xiao, Yong-qiang Hao, Dong-he Zhang Morphological features of ionospheric response to typhoon // J. Geophys. Res., 2008. Vol. 112. No. A4. A04304.
6. Perevalova N.P., Polekh N.M. An investigation of the upper atmosphere response to cyclones using ionosonde data in Eastern Siberia and the Far East // Proc. of SPIE, 2008. V. 7296. P. 72960J1-72960J11. doi: 10.1117/12.823814.
7. Черниговская М.А., Шарков Е.А., Куркин В.И., Орлов И.И., Покровская И.В. Исследование временных вариаций ионосферных параметров в регионе Сибири и Дальнего Востока // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. – М.: ООО "Азбука-2000", 2008. Вып. 5. Т. I. С. 567-574.
8. Черниговская М.А., Шарков Е.А. и др. Короткопериодные временные вариации ионосферных параметров в регионе Сибири и Дальнего Востока // Исследование Земли из космоса, 2008. № 6. С. 17-24.
9. Черниговская М.А., Куркин В.И., Орлов И.И., Шарков Е.А., Покровская И.В. Совместный анализ короткопериодных временных вариаций ионосферных параметров в регионе Сибири и Дальнего Востока и процессов тропического циклогенеза // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. – М.: ООО "Азбука", 2009. Вып. 6. Т. II. С. 324-332.
10. Орлов И.И., Ильин Н.В. О текущих спектрах сигналов // Радиолокация. Навигация. Связь / Под ред. Борисова В.И. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2000. Т.1. С. 361-365.

ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВЕРХНЕЙ И СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК СИБИРСКОГО РЕГИОНА LONG -TIME VARIATIONS OF MIDDLE AND UPPER ATMOSPHERE PARAMETERS ON THE BASE OF EAST-SIBERIAN GEOPHYSICAL OBSERVATORIES DATA.

Шпынев Б.Г.¹, Ойнац А.В.¹, Медведева И.В.¹, Черниговская М.А.¹, Белинская А.Ю.²

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия;

²Алтае-Саянский филиал Геофизической службы СО РАН

Long period variations of upper atmosphere parameters were investigated for the matter of their connection with tidal processes. Data of ground based optical instruments, data of the MLS device onboard AURA satellite, Incoherent Scatter data on electron density, temperature and ion composition, as well as GPS total electron content and ionosound data were used for the analysis. It was found that the most pronounced long time variations appeared due to changing of relative phase of solar thermal and lunar gravitational tides. It was founded that the main variations of upper atmosphere parameters are caused by wave-like processes of tidal origin. Global planetary waves are modulated by solar-lunar tides which work as trigger mechanism for generation of new circulation cells. This is a periodical process and it has a maximum in the mesosphere. The disturbing moved up into ionosphere and down into stratosphere, where it can be registered by radio and optic methods. Experimental data showed the most pronounced variations, which are harmonics of tidal waves .

В настоящем исследовании рассматриваются вариации параметров верхней атмосферы Земли, которые имеют характерный период единицы и десятки дней. Основное внимание было уделено влиянию на долговременную динамику верхней атмосферы приливных процессов, которые оказывают регулярное и детерминированное воздействие на атмосферный газ. Возмущения верхней атмосферы и ионосферы Земли, как правило, обусловлены воздействиями снизу, и они активно изучаются в течение многих лет. Источниками таких возмущений могут быть атмосферные гравитационные волны, распространяющиеся из нижележащих слоев атмосферы и переносящие с собой момент количества движения и энергию. Различные источники, действующие в нижней и средней атмосфере (сейсмические события, метеорологические фронты и струйные течения, прохождение солнечного терминатора, стратосферные потепления, антропогенные воздействия и т.п.), возбуждают широкий пространственно-временной спектр внутренних гравитационных волн (ВГВ) [1]. При определенных условиях ВГВ достигают высот максимума ионосферы (~300-350 км), и на высотах ионосферы, проявляют свои свойства в виде перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Эти возмущения могут быть обнаружены радиофизическими и оптическими методами при активном или пассивном исследовании верхней атмосферы.