

# Исследование временных вариаций ионосферных параметров в регионе Сибири и Дальнего Востока

М.А. Черниговская<sup>1</sup>, Е.А. Шарков<sup>2</sup>, В.И. Куркин<sup>1</sup>, И.И. Орлов<sup>1</sup>, И.В. Покровская<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Институт солнечно-земной физики СО РАН  
664033, г. Иркутск, а/я 291  
E-mail: [cher@iszf.irk.ru](mailto:cher@iszf.irk.ru)*

<sup>2</sup> *Институт космических исследований РАН  
117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32  
E-mail: [easharkov@iki.rssi.ru](mailto:easharkov@iki.rssi.ru)*

Проведено исследование короткопериодных временных вариаций максимальных наблюдаемых частот односкачковых сигналов наклонного зондирования, вызванных изменениями параметров верхней ионосферы вдоль трассы Магадан-Иркутск в ноябре 2005 г. Анализ выполнялся с помощью разработанных в ИСЗФ СО РАН методики и алгоритма поиска периодичностей для временных рядов. Использовался скользящий режим обработки для поиска периодичностей в определенном диапазоне периодов (порядка десятков минут, часов). Обнаружено усиление мощности спектров МНЧ для периодов 1 и 2 часа в отдельные дни рассматриваемого временного интервала, что можно интерпретировать как проявление перемещающихся ионосферных возмущений, связанных с распространением в ионосфере внутренних волн. Обсуждаются возможные причины выявленных изменений ионосферных параметров, в том числе метеорологического происхождения.

## Введение

Термосфера и ионосфера Земли являются наиболее изменчивой частью земной атмосферы. Доминирующими факторами в термодинамическом режиме ионосферы являются гелио- и геомагнитная активность (электромагнитное излучение Солнца, корпускулярные потоки частиц, магнитные поля). В настоящее время окончательно утвердилась точка зрения, что атмосфера Земли является единой динамической системой, и вариации ионосферных параметров не могут быть поняты, если считать ионосферу изолированной от нижележащих слоев атмосферы. На параметры термосферы и ионосферы оказывают большое влияние различные геофизические факторы (метеорологические, сейсмические события и др.). Изменения атмосферных характеристик в нижней и средней атмосфере могут приводить к вариациям параметров на ионосферных высотах. В обзорных работах [1-3] показана важность исследований влияния различного рода волновых движений, возникающих в стратосфере и тропосфере, на распределение параметров ионосферы на высотах 200–400 км, приведены корреляционные характеристики воздействия внутренних гравитационных, приливных и планетарных волн на изменения критических частот в F-области. На средних широтах в спокойных геомагнитных условиях, когда воздействие магнитосферных эффектов на характеристики ионосферы минимальны, фоновые параметры нейтральной атмосферы и ионосферы могут меняться ото дня ко дню в значительных пределах (до 15-20% и более), вызывая вариации характеристик ионосферного радиоканала. Поэтому при построении моделей атмосферы и ионосферы возникают различного рода неопределенности – с какими процессами можно связать такие вариации, каковы их количественные характеристики, которые можно было бы учесть при построении моделей. Решение этих вопросов является очень важной геофизической задачей.

В данной работе проведено исследование короткопериодных временных вариаций максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) односкачковых сигналов наклонного зондирования (НЗ), вызванные изменениями параметров верхней ионосферы вдоль трассы Магадан-Иркутск в ноябре 2005 г.

## Данные наблюдений

В период с 9 по 19 ноября 2005 г. проводились исследования распространения радиоволн на трассе наклонного зондирования ионосферы Магадан–Иркутск, проходящей в регионах Восточной Сибири и Дальнего Востока. Измерения максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) проводились с пятиминутным интервалом. Протяженность среднеширотной трассы Магадан–Иркутск составляет около 3000 км. Геометрия трассы такова, что точка излучения Магадан и средняя точка трассы (область ионосферы, от которой происходит отражение радиосигналов) – район Якутска имеют приблизительно одинаковую геомагнитную широту  $\sim 51^\circ$  с.ш., поэтому условия прохождения радиоволн на этой трассе в значительной мере определяются состоянием субавроральной ионосферы и динамикой границ ее крупномасштабных структур с изменением уровня магнитной возмущенности.

Геомагнитная обстановка в период наблюдения в целом была спокойной, за исключением 13 и 19 ноября, когда индекс  $K_p$  достигал 4. Поток радиоизлучения Солнца на длине 10,7 см  $F_{10.7}$ , характеризующий ионизирующую способность Солнца, изменялся от 99 до 76 (в ед.  $10^{-22}$  Вт/(Гц·м<sup>2</sup>)).

## Результаты анализа данных

Анализ выполнялся с помощью разработанных в ИСЗФ СО РАН методики и алгоритма поиска периодичностей для временных рядов [4]. Использовался скользящий режим обработки для поиска периодичностей в определенном диапазоне периодов (порядка десятков минут, часов). По всему массиву исходных данных МНЧ рассчитывалась "энергия"  $E_i$  на частоте  $\omega_i$  (рис. 1). Расчеты  $E_i$  проводились на сетке периодов с шагом, равным 0.5 часа. Минимальный период равен 30 ми-

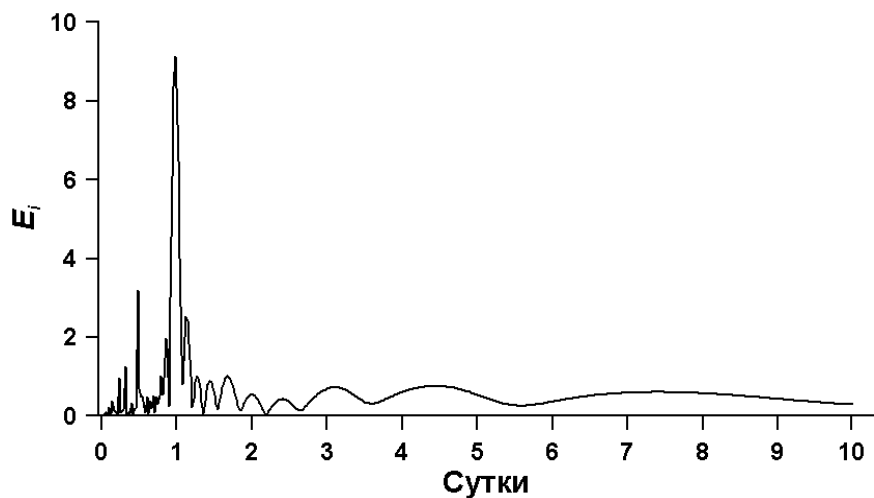


Рис. 1. "Энергия"  $E_i$  на частоте  $\omega_i$  временного ряда данных МНЧ сигналов НЗ вдоль трассы Магадан–Иркутск в ноябре 2005 г.

нутам, а максимальный – 10 суткам. После удаления из исходного ряда данных МНЧ приливных гармоник (с периодами 8 и 6 часов), был рассчитан спектр мощности  $Q_i$  гармоник короткопериодных вариаций. Из графика спектра мощности (рис. 2) видно, что в рассматриваемый период происходило усиление спектральной мощности сигнала на частотах 1 и 2 часа. Эти периодичности были проанализированы более подробно.

На рис. 3 представлены результаты расчета энергетике МНЧ для периодов 1 час –  $U_{1,0}$  (рис. 3а) и 2 часа  $U_{2,0}$  (рис. 3б) со скользящим окном 7 часов. Временной сдвиг скользящего окна равен 1 часу. Здесь же приведены вариации геомагнитных параметров. Из сопоставления графиков для энергетике МНЧ и индексов геомагнитной активности видно, что не во всех случаях усиление мощности энергетике МНЧ связано с усилением геомагнитной возмущенности.

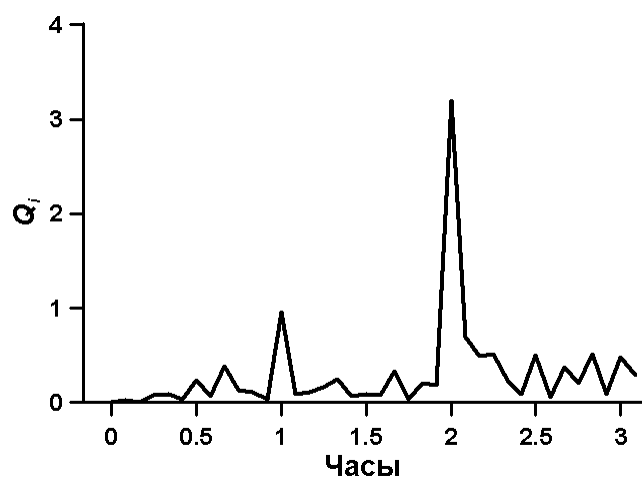


Рис. 2. Спектр мощности  $Q_i$  гармоник короткопериодных вариаций временного ряда данных МНЧ сигналов НЗ

Усиление энергетики спектра сигнала на определенных частотах  $\omega$  можно интерпретировать как проявление перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), связанных с распространением внутренних волн (ВВ).

Источниками ВВ могут быть:

- возмущения гелио- и геомагнитной обстановки (внешний фактор);
- атмосферные процессы (внутренний фактор) – тропосферные циклоны, фронтальные системы, струйные течения, полярная и экваториальная токовые системы, связанные с магнитными бурями, солнечный терминатор, ураганы, грозы, ядерные испытания, землетрясения, извержения вулканов, сверхзвуковой полет ракет и т.д. Эти источники в основном двух типов: природные и искусственные.

Детали механизма влияния солнечных и геомагнитных факторов на процессы в атмосфере и ионосфере (воздействие "сверху") интенсивно исследовались в течении длительного периода. Воздействию же со стороны нижних слоев атмосферы (воздействие "снизу") до сих пор уделялось значительно меньше внимания.

Одним из эффективных механизмов взаимодействия между слоями атмосферы и воздействия со стороны нижних слоев атмосферы является волновой механизм [5].

Локальные импульсные возмущения в нижней атмосфере возбуждают широкий пространственно-временной спектр внутренних волн (ВВ), который фильтруется по мере распространения волн в атмосфере. Распространяясь вверх по наклонным траекториям, ВВ переносят энергию из тропосферы в среднюю атмосферу и ионосферу на многие сотни и даже тысячи километров. При этом амплитуда ВВ растет. Достигая мезосферы волны могут разрушаться, и это приводит к локальному нагреванию и движениям атмосферного газа. Однако при определенных условиях ВВ могут достигать высот максимума ионосферы (~300-350 км). Теоретические расчеты и экспериментальные данные показывают, что ВВ обнаруживаются на горизонтальных расстояниях до нескольких тысяч километров от источника возбуждения. Они могут захватываться в волноводный канал, где способны распространяться с незначительным затуханием. Волновод образуется благодаря минимуму температуры в области мезопаузы. ВВ распространяются с различными скоростями в горизонтальных направлениях, в результате чего формируются движущиеся пакеты волн [6, 7].

Одним из мощнейших потенциальных источников воздействия "снизу" могут быть тропические циклоны (ТЦ). Гигантские атмосферные вихри, зарождающиеся в экваториальных широтах и получающие свое развитие в тропических зонах, представляют собой эффективный механизм сброса избыточной энергии атмосферы в условиях, когда действие обычных механизмов (конвективный перенос и глобальная циркуляция) становится недостаточным. Прохождение мощного циклонического фронта может сопровождаться возбуждением широкого спектра ВВ.

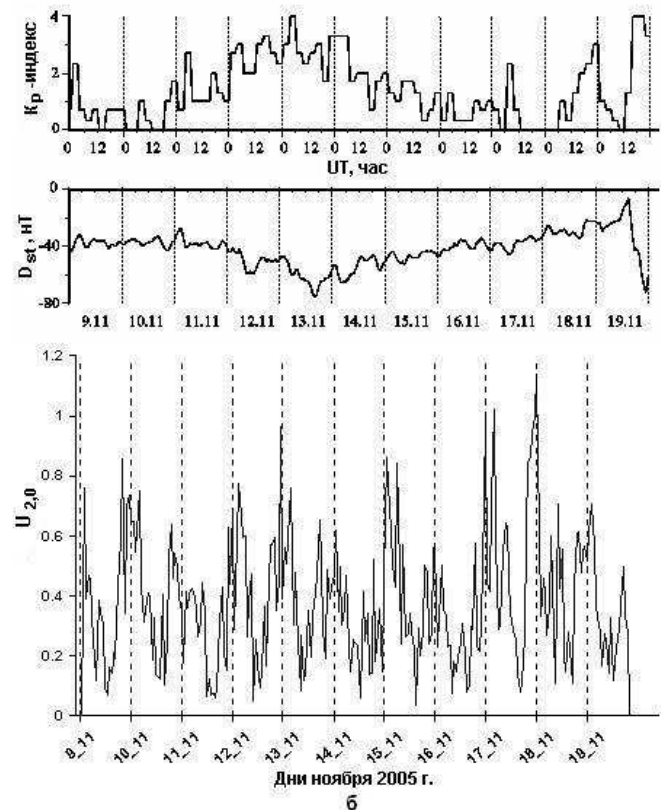
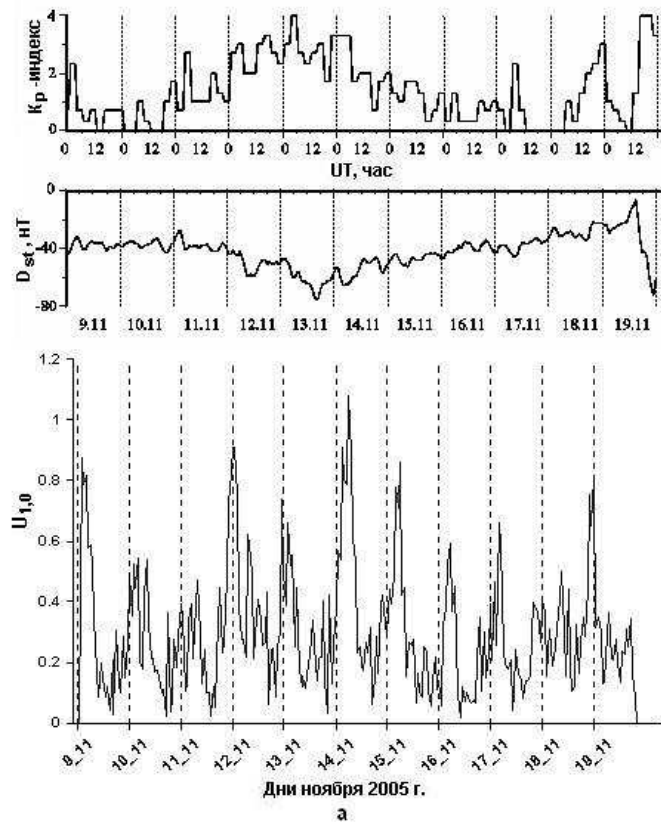


Рис. 3. Энергетика МНЧ сигналов НЗ для периодов 1 час (а) и 2 часа (б)

В период проведения радиофизических измерений на трассе наклонного зондирования Магадан-Иркутск 9-19 ноября 2005 г. в акватории северо-запада Тихого океана действовали 2 тропических циклона:

- NWP 0522 (имя ТЦ по международному перечню – TEMBIN), который 11 ноября 2005 г., уже пройдя основные стадии развития возмущения, перешел в стадию тропической депрессии;
- NWP 0523 (имя ТЦ по международному перечню – BOLAVEN), который проходил весь цикл развития возмущения в период с 12 по 21 ноября 2005 г.

Траектории движения этих ТЦ представлены на рис. 4. Возможное влияние на атмосферу и ионосферу в рассматриваемый временной интервал мог оказать только тропический циклон NWP 0523. Его характеристики по геоинформационной системе глобального тропического циклогенеза "Геоинформ-ТЦ" приведены табл. 1.

Таблица 1. Характеристика тропического циклона № NWP 0523\*, действующего в период радиофизических измерений

№	Стадия развития возмущения**	Дата, ММ_ДД	Время, УТ	Широта, °	Долгота, °	Давление, мбар	Скорость ветра в центре возмущения, м/с	Направление смещения возмущения, румбы	Скорость смещения, узлы***
1	TL	11_12	1	5.2	133.8	1008	5	W	10
2	TL	11_12	14	6.1	132.5	1006	8	WNW	8
3	TL	11_13	0	6.7	131.0	1003	11	WNW	10
4	TD	11_13	12	7.5	129.8	1003	13	WNW	11
5	TD	11_13	18	7.3	129.5	1004	13	SW	7
6	TD	11_14	0	8.2	128.9	1004	15	NW	10
7	TS	11_14	6	9.6	128.6	1002	18	NNW	11
8	TS	11_14	12	10.2	128.4	1004	18	NNW	9
9	TS	11_14	18	10.6	128.9	1000	21	NE	7
10	TS	11_15	0	10.5	130.0	1000	21	N	5
11	TS	11_15	6	11.2	130.0	998	21	N	5
12	TS	11_15	12	12.3	130.5	998	21	NNE	9
13	TS	11_15	18	13.6	131.0	996	23	NNE	10
14	STS	11_16	0	14.1	130.7	996	26	NW	6
15	STS	11_16	6	14.4	130.2	994	31	NW	5
16	STS	11_16	12	14.0	129.1	992	31	NW	4
17	STS	11_16	18	13.9	129.8	990	28	W	5
18	T	11_17	0	13.6	129.1	985	33	WSW	6
19	T	11_17	6	13.0	129.1	980	33	S	4
20	T	11_17	12	13.2	128.3	975	38	WNW	7
21	T	11_17	18	13.6	129.5	975	36	WNW	8
22	T	11_18	0	13.8	128.0	975	33	WNW	4
23	T	11_18	6	14.1	128.5	975	33	WNW	5
24	T	11_18	12	14.9	127.3	975	33	WNW	10
25	STS	11_18	18	15.2	126.4	975	31	WNW	9
26	STS	11_19	0	15.4	125.1	980	31	WNW	11
27	STS	11_19	6	15.9	124.3	980	28	WNW	9
28	TS	11_19	12	16.5	123.6	990	23	NW	9
29	TS	11_19	18	16.6	123.4	992	23	NW	6
30	TS	11_20	0	16.9	122.9	996	21	NW	6
31	TD	11_20	6	17.7	122.7	1002	13	NNW	5
32	TL	11_20	12	18.2	122.6	1006	11	WNW	8
33	TL	11_21	0	19.0	121.0	1010	5	NW	5

\* ТЦ разрушился над территорией Филиппин.

\*\* Стадии развития возмущения: TL – первичное тропическое возмущение (замкнутая область низкого приземного давления тропической зоны); TD – тропическая депрессия; TS – тропический шторм; STS – сильный тропический шторм; T – тайфун (ураган).

\*\*\* 1 узел = 0,51 м/с = 1,85 км/ч

На рис. 4 представлены расстояния от начальной ( $D_1 \approx 6100$  км) и конечной ( $D_2 \approx 4600$  км) точек движения ТЦ до Якутска ( $62^\circ$  с.ш.,  $129^\circ$  в.д.), координаты которого дают географическое положение средней точки рассматриваемой трассы наклонного зондирования. В характеристиках принимаемых в Иркутске радиосигналов проявляются особенности, вызванные изменениями параметров верхней ионосферы вдоль трассы НЗ, особенно в области средней точки трассы, где происходит отражение радиоволн на различных частотах (6-30 МГц). Если принять во внимание данные экспериментальных измерений скоростей перемещения ПИВ и теоретические оценки скоростей распространения ВВ в атмосфере, которые в зависимости от высоты распространения могут изменяться от 300 до 600 м/с, можно оценить время распространения ВВ, возможно генерированных мощным тропическим циклоном, до средней точки трассы НЗ. Приняв среднее значение скорости  $\sim 450$  м/с, получаем время прохождения волновым возмущением расстояния  $D_1$  примерно 3.4 часа, а расстояния  $D_2$  – примерно 2.5 часа.

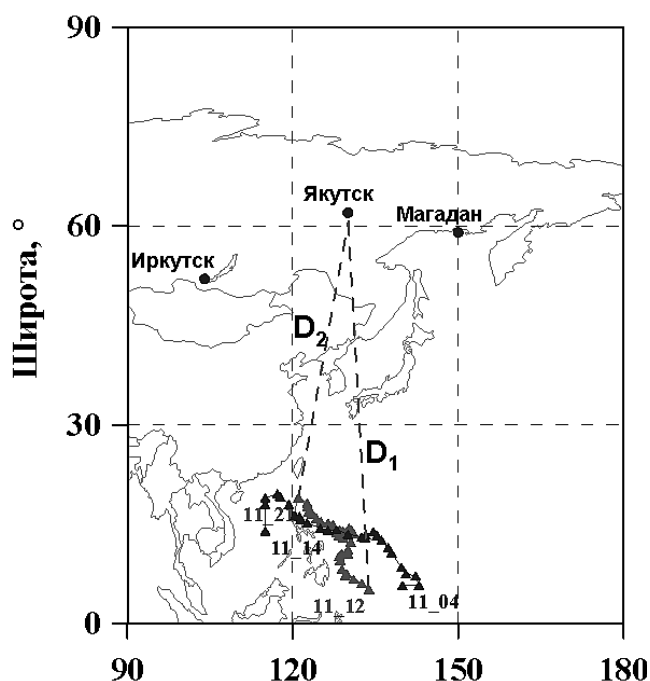


Рис. 4. Траектории движения тропических циклонов, действовавших в период 9-19 ноября 2005 г.

### Выводы

Усиление энергетики МНЧ для периода 2 часа (рис. 3б) 17-18 ноября 2005 г. происходило в спокойных гелио- и геомагнитных и условиях. Можно предположить, что наблюдавшееся ПИВ было генерировано неким метеорологическим источником. Влияние на атмосферу и ионосферу в этот время мог оказать тропический циклон NWP 0523 (см. табл. 1), который развивался в северо-западной акватории Тихого океана в период с 12 по 21 ноября 2005 г., перемещался в основном в северо-западном направлении, приближаясь к региону средней точки трассы НЗ (рис. 4).

На рис. 5 сопоставлены графики энергетики МНЧ для периода 2 час (рис. 5а) и изменения давления в центре ТЦ (рис. 5б). Из данных табл. 1 и рис. 5б видно, что 17 ноября ТЦ достиг наивысшей стадии развития возмущения – "Т" (тайфун, ураган): в центре циклона произошло резкое падение давления на 15 мбар до минимального значения; скорость ветра в центре возмущения достигла 38 м/с. Именно в этот период ТЦ мог оказать мощное импульсное воздействие на атмосферу, став источником генерации внутренних волн. При благоприятных условиях это волновое возмущение в виде волнового пакета

та разных частот могло по наклонным траекториям распространиться от места генерации на значительные горизонтальные расстояния (время распространения ПИВ до средней точки трассы оценено выше). В это же время 17 ноября отмечено ПИВ с периодом 2 часа в принимаемых сигналах наклонного зондирования, вызванное изменениями параметров верхней ионосферы вдоль исследуемой трассы Магадан-Иркутск. Это волновое возмущение наблюдалось в течение всех суток вплоть до 18 ноября 2005 г.

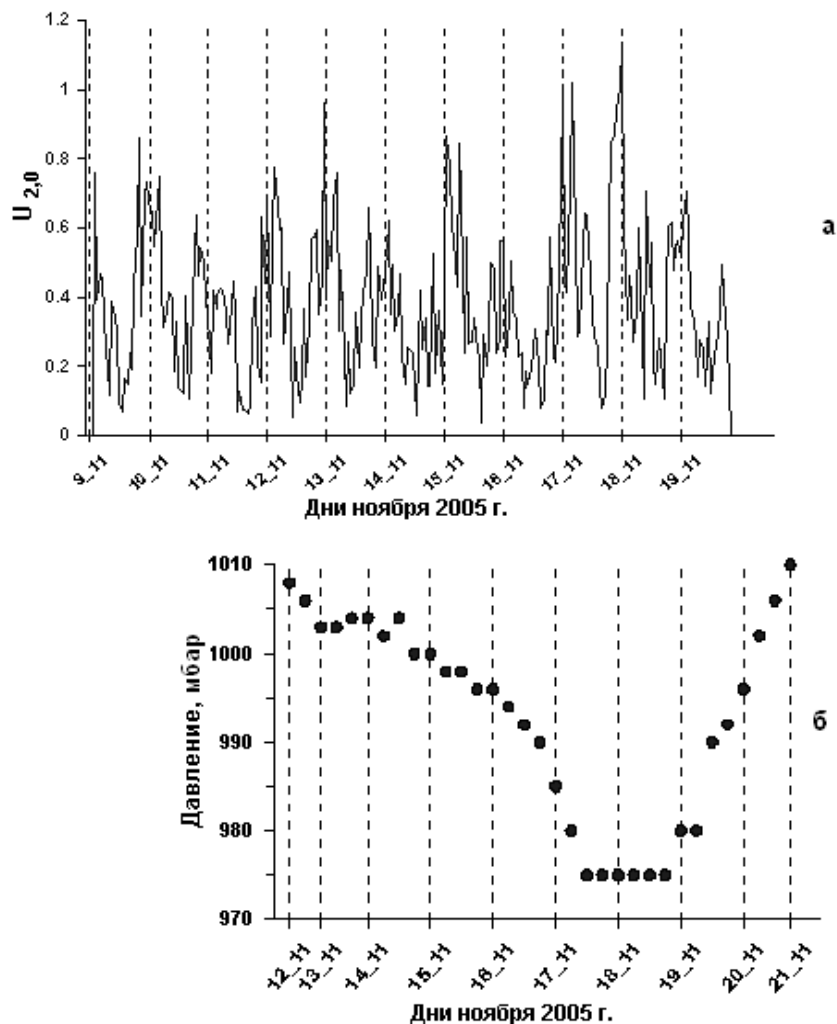


Рис. 5. Энергетика МНЧ сигналов НЗ для периода 2 час (а) и изменения давления в центре ТЦ (б)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Анализ короткопериодных временных вариаций максимальных наблюдаемых частот сигналов наклонного зондирования вдоль среднеширотной трассы Магадан-Иркутск в период с 9 по 19 ноября 2005 г. выявил наличие перемещающихся ионосферных возмущений, источниками которых являются ВВ с периодами 1 и 2 часа.

2. Усиление энергетика МНЧ для периода 1 час вероятно связано с ростом геомагнитной возмущенности 12-14 ноября 2005 г.

3. Усиление энергетика МНЧ для периода 2 часа в спокойных гелио-геомагнитных условиях 17-18 ноября 2005 г. может быть связано с развитием во время анализируемого временного интервала тропического циклона.

Сделанное предположение подтверждается выводами теоретических исследований [6, 7] о том, что над местом локального возмущения атмосферы наблюдаются акустико-гравитационные волны (АГВ) с периодами ~минут, а на больших горизонтальных расстояниях, в основном, внут-

ренные гравитационные волны (ВГВ) с периодами ~десятков минут–3 часа, поскольку мелкомасштабные АГВ по мере распространения на большие расстояния быстро затухают из-за вязкости и теплопроводности атмосферы.

Настоящая работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №16.

### Литература

1. *Kazimirovsky E.S., M.Herraiz, B.A. De la Morena* Effects on the ionosphere due to phenomena occurring below it // *Survey in Geophysics*, 2003. Vol. 24. №1. P.139-184.
2. *Lastovicka J.* Forcing of the ionosphere by waves from below // *J. Atmos. and Solar-Terr. Phys.*, 2006. V. 68. P.479-497.
3. *Rishbeth H.* F-region links with the low atmosphere? // *J. Atmos. and Sola-Terr. Phys.*, 2006. Vol. 68. P.469-478.
4. *Куклин Г.В., Орлов И.И., Бернгардт О.И.* О методике определения периодичностей на примере анализа чисел Вольфа // Сб. "Исследования по геомагнетизму, аэронамии и физике Солнца", Изд-во СО РАН. 2000. Вып. 110. С.7-12.
5. *Волны и излучение верхней атмосферы* // Алма-Ата: "Наука", 1981. 168 с.
6. *Ахмедов Р.Р., Куницын В.Е.* Моделирование ионосферных возмущений, вызванных землетрясениями и взрывами // *Геомагнетизм и аэронамия*, 2004. Т. 44. №1. С.105-112.
7. *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.