

УДК 551.510

**Т. В. Скороход**

Інститут космічних досліджень Національної академії наук України  
та Державного космічного агентства України, Київ

## МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ВОЗМОЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ИОНОСФЕРЕ

---

*За даними вимірювань на супутнику «Dynamics Explorer 2» досліджувались акустико-гравітаційні хвилі (АГХ) в термосфері. Показано, що планетарне поле АГХ містить регулярну і спорадичну складові. Складено каталог хвильових форм АГХ та досліджено можливі приземні джерела генерації цих хвиль: тропічні циклони, запуски ракет і землетруси. За результатами статистичного аналізу зв'язку з тропічними циклонами і запусками ракет не виявлено, зв'язок із землетрусами — ймовірний.*

---

### ВВЕДЕНИЕ

Акустико-гравитационные волны (далее АГВ) на ионосферных высотах — один из типов колебаний верхней нейтральной атмосферы с периодами от десяти до нескольких десятков минут, горизонтальными длинами волн от сотен до более полутора тысяч километров. Выявление и количественный анализ АГВ является сложной задачей [2, 5, 6].

Одна из причин современного интереса к АГВ связана с предполагаемой ролью этих волн в формировании потоков энергии, воздействующих на ионосферу снизу. Согласно многочисленным данным в состоянии ионосферы локально отображаются явления, происходящие в нижней атмосфере и на поверхности Земли: ураганы, цунами, землетрясения, вероятно процессы подготовки землетрясений, старты ракет, ядерные и химические взрывы, другие природные и антропогенные явления, связанные с мощными возмущениями нижней атмосферы. Но только в немногих наблюдениях указанные источники ионосферных вариаций были отождествлены или априори известны (как при регистрации отклика ионосферы на ядерные взрывы), в боль-

шинстве же случаев связь космических и приземных процессов только декларировалась.

Цель работы состоит в систематическом изучении волнового поля АГВ в ионосфере и на этой основе выявлении связи наблюдаемых возмущений с воздействиями снизу.

### МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Был проведен анализ измерений на спутнике «Dynamics Explorer 2» (DE2) — последнем низкоорбитальном аппарате, предназначенном для прямой регистрации параметров термосферы Земли. Обработывались данные последних четырех месяцев активного функционирования спутника (по 15 февраля 1983 г.), данные брались из сайта <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/atmoweb>.

Математическая обработка по методике [3] состояла в полосовой фильтрации данных в диапазоне длин волн среднemasштабных возмущений. На рис. 1 представлен пример зарегистрированного на спутнике распределения концентраций основных атмосферных газов [O] и [N<sub>2</sub>] (движение DE2 происходило практически вдоль меридиана, поэтому ход измеряемых параметров всюду подан как функция географической широты спутника). На этом же рисунке представлены относительные колебания плотности  $\delta[N_2]/[N_2]$  и  $\delta[O]/[O]$ .

### СТРУКТУРА ПЛАНЕТАРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

В результате анализа более чем 400 витков измерений за период 1 ноября 1982 г. — 15 февраля 1983 г. был составлен каталог АГВ. Рис. 1 демонстрирует типичную запись хода волнового возмущения вдоль одного из орбитальных витков. В планетарном распределении АГВ выделяются: 1) область относительно спокойной атмосферы — область средних и низких широт, 2) сильно возмущенная область полярных шапок [1]. На данном фоне спорадически наблюдаются изолированные волновые всплески — локализованные волновые пакеты (ЛВП), которые различаются по широтному расположению (вблизи или вдали от авроральных овалов) и по форме огибающей: острова (одинарные и двойные) и полуострова (рис. 2).

Всего за рассматриваемый период удалось выделить 53 ЛВП (табл. 1). На рис. 3 области наблюдения ЛВП вдоль орбиты спутника представлены на фоне географической карты. Отметим случайный характер возникновения ЛВП во времени и по координате.

### ВОЗМОЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ ВОЗМУЩЕНИЙ

**Тропические циклоны.** Рассмотрим корреляцию ЛВП с тропическими циклонами (ТЦ), достигшими фазы урагана (тайфуна, циклона), т. е. со скоростью ветра более 120 км/ч. Связь АГВ с ТЦ ранее

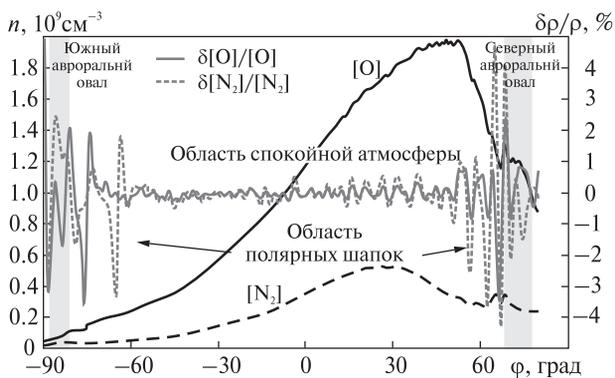


Рис. 1. Орбитальный ход концентрации атомарного кислорода (сплошная жирная кривая), молекулярного азота (пунктир) на витке 7468 и отфильтрованные в диапазоне горизонтальных длин волн  $\lambda = 400...700$  км их вариации  $\delta[O]/[O]$  (сплошная серая кривая) и  $\delta[N_2]/[N_2]$  (серая пунктирная линия)

исследовалась в работах [4, 7] и др. На рис. 4 изображены следы прохождения четырех мощных ТЦ в период с 1 ноября 1982 г. до 15 февраля 1983 г. (табл. 2, данные из <http://weather.unisys.com/hurricane>).

Каждый из указанных ТЦ был изучен отдельно. На карту наносились сами циклоны и все ЛВП, которые были обнаружены не позднее чем через сутки после ослабления ураганной фазы ТЦ. На примере тайфуна № 27, след которого представлен на рис. 5, видно, что ЛВП не связаны с ним даже визуально. За время жизни тайфуна

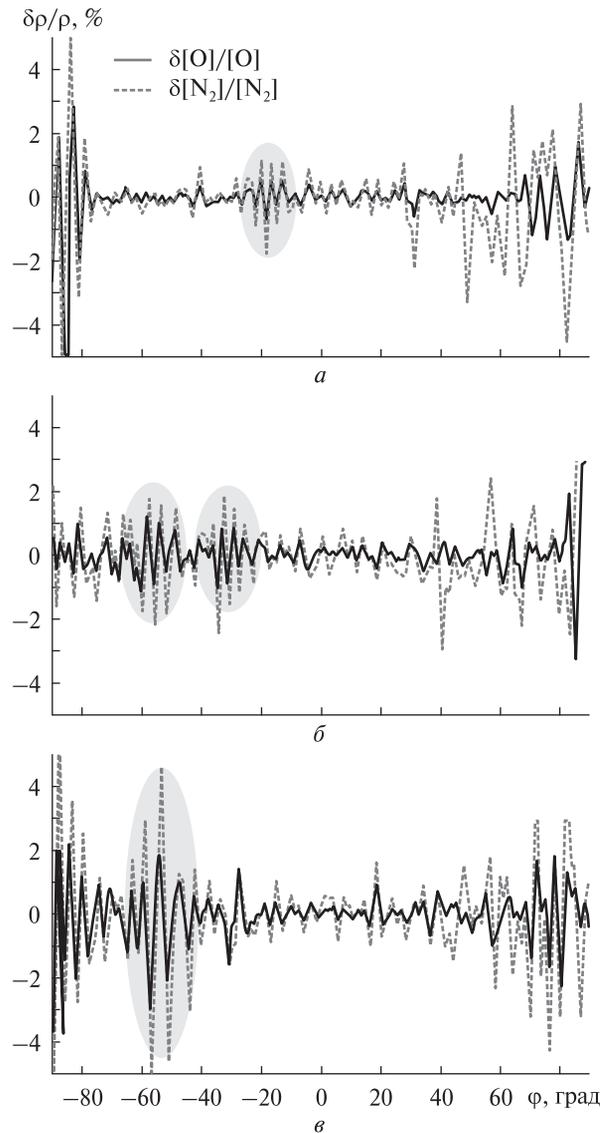


Рис. 2. Типы локализованных волновых пакетов: а — остров, б — двойной остров, в — полуостров

Таблица 1. Каталог наблюдений локализованных волновых пакетов акустико-гравитационных волн

Номер ЛВП	Дата	УТ, ч	Местоположение ЛВП	Номер витка спутника	$A_{\max}/A_{\text{фон}}$
1	15 ноября 1982 г.	23.11	68°W, 20°—56°S	7082	7
2	17 ноября 1982 г.	01.73	105°W, 31°—47°S	7099	5
3	18 ноября 1982 г.	22.51	59°W, 15°—27°S	7128	3
4	22 ноября 1982 г.	09.53	128°E, 40°—60°S	7182	2
5	23 ноября 1982 г.	16.69	24°E, 3°N—42°S	7202	5
6	25 ноября 1982 г.	14.65	52°E, 0°—23°S	7232	5
7	26 ноября 1982 г.	12.23	86°E, 6°N—4°S	7246	3
8	26 ноября 1982 г.	23.02	77°W, 25°N—30°S	7253	3
9	28 ноября 1982 г.	04.38	158°W, 5°—15°S	7272	2
10	28 ноября 1982 г.	16.59	17°E, 10°—27°S	7280	3
11	29 ноября 1982 г.	15.72	29°E, 2°—14°S	7295	2
12	29 ноября 1982 г.	21.88	64°W, 10°—35°S	7299	5
13	30 ноября 1982 г.	05.60	180°E, 20°N—4°S	7304	5
14	30 ноября 1982 г.	22.71	75°W, 10°—37°S	7315	5
15	1 декабря 1982 г.	01.60	121°W, 26°N—25°S	7317	5
16	2 декабря 1982 г.	14.83	44°E, 4°—20°N	7341	3
17	2 декабря 1982 г.	14.83	44°E, 18°—23°S	7341	3
18	4 декабря 1982 г.	05.00	176°W, 0°—15°S	7366	2
19	6 декабря 1982 г.	03.13	146°W, 20°—40°N	7396	4
20	10 декабря 1982 г.	16.19	13°E, 39°—48°N	7467	5
21	11 декабря 1982 г.	10.61	95°E, 30°—45°N	7479	3
22	12 декабря 1982 г.	09.64	108°E, 0°—34°N	7494	4
23	12 декабря 1982 г.	12.73	62°E, 40°—60°N	7496	4
24	12 декабря 1982 г.	18.93	30°W, 40°—50°N	7500	3
25	2 января 1983 г.	20.22	110°E, 18°—26°N	7830	2
26	5 января 1983 г.	14.88	175°W, 30°—35°S	7874	3
27	5 января 1983 г.	14.88	175°W, 7°—16°N	7874	5
28	6 января 1983 г.	13.65	157°W, 22°—32°S	7889	2
29	6 января 1983 г.	13.65	157°W, 40°—50°N	7889	2
30	9 января 1983 г.	08.6	84°W, 15°—20°N	7933	5
31	12 января 1983 г.	20.31	100°E, 40°—30°S	7988	3
32	13 января 1983 г.	06.91	61°W, 48°—40°S	7995	6
33	13 января 1983 г.	13.55	17°E, 30°—40°N	8000	5
34	14 января 1983 г.	19.29	112°E, 5°—24°N	8019	5
35	21 января 1983 г.	08.61	97°W, 35°—27°S	8123	3
36	22 января 1983 г.	05.78	50°W, 37°—25°S	8137	5
37	22 января 1983 г.	05.78	50°W, 2°—12°N	8137	5
38	24 января 1983 г.	12.31	153°W, 27°—33°N	8173	2
39	24 января 1983 г.	06.22	62°W, 50°—35°S	8169	5
40	25 января 1983 г.	01.87	2°E, 65°—35°S	8182	11
41	25 января 1983 г.	09.59	112°W, 25°—15°S	8187	3
42	27 января 1983 г.	15.82	150°E, 52°—32°S	8223	10
43	27 января 1983 г.	05.10	45°W, 47°—43°S	8216	4
44	28 января 1983 г.	05.36	53°W, 55°—45°S	8232	2
45	29 января 1983 г.	08.45	99°W, 52°—32°S	8250	6
46	31 января 1983 г.	08.71	105°W, 32°—25°S	8282	5
47	1 февраля 1983 г.	05.69	64°W, 50°—35°S	8296	2
48	1 февраля 1983 г.	17.73	114°E, 45°—35°S	8304	9
49	4 февраля 1983 г.	01.51	25°W, 32°—27°S	8341	5
50	7 февраля 1983 г.	11.92	158°W, 45°—35°S	8396	4
51	7 февраля 1983 г.	05.92	73°W, 50°—35°S	8392	5
52	13 февраля 1983 г.	01.77	166°E, 10°—30°N	8486	2
53	15 февраля 1983 г.	09.47	150°W, 43°—27°S	8523	5

Примечание. В последней колонке указано превышение амплитуды волнового пакета над фоновым уровнем АГВ

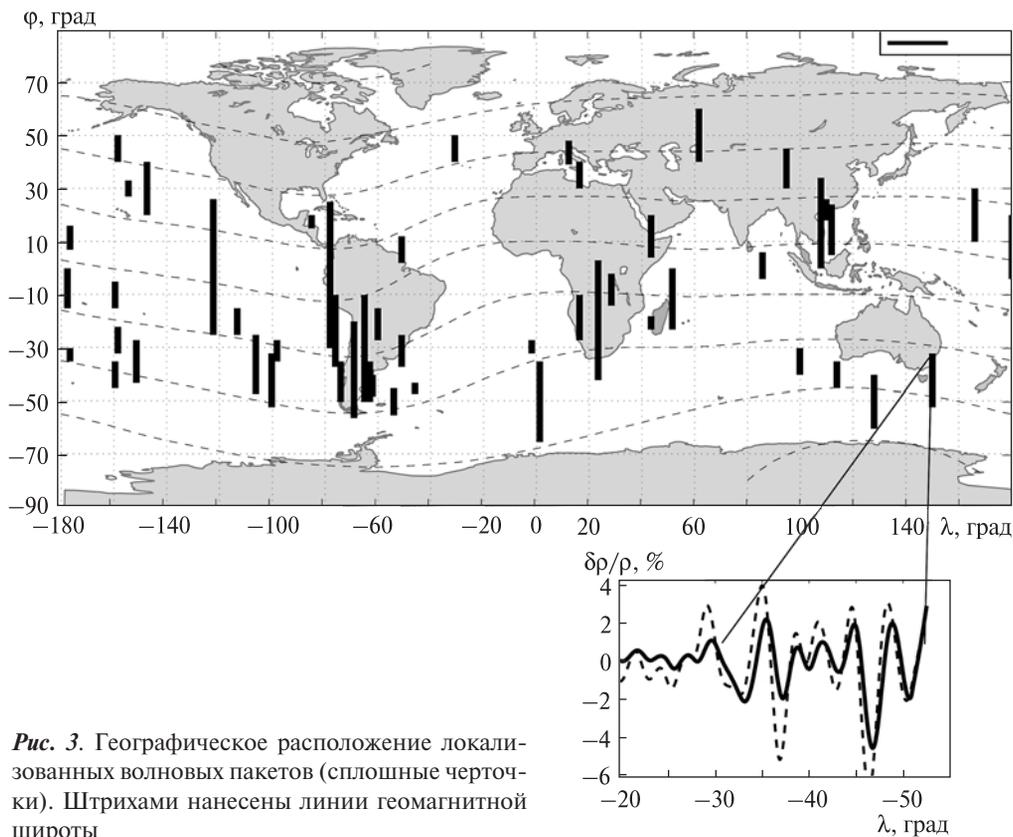


Рис. 3. Географическое расположение локализованных волновых пакетов (сплошные черточки). Штрихами нанесены линии геомагнитной широты

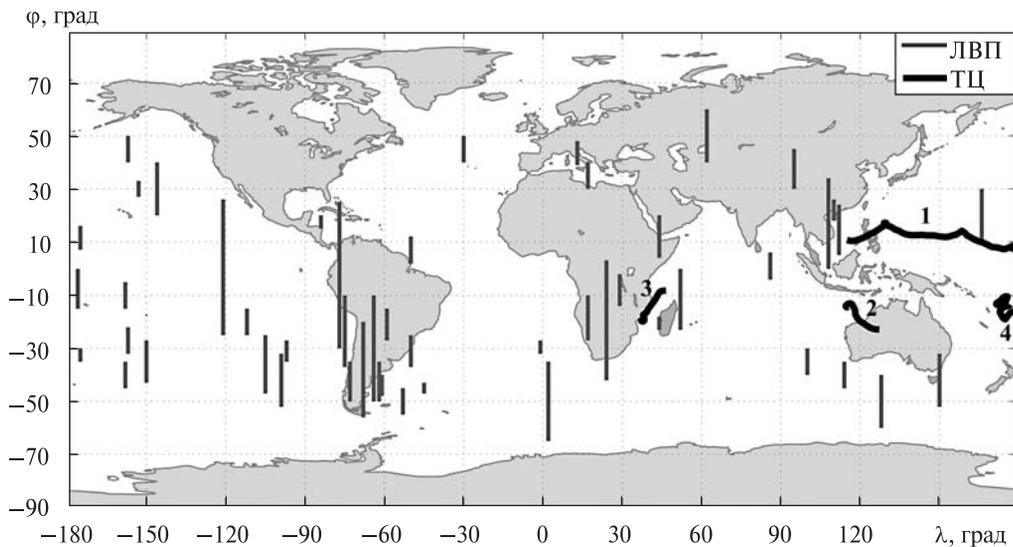


Рис. 4. Траектории прохождения тропических циклонов на фоне планетарного распределения локализованных волновых пакетов: 1 — тайфун № 27 (21 ноября — 9 декабря 1982 г.), 2 — циклон № 7 (4—10 января 1983 г.), 3 — циклон № 8 (10—16 января 1983 г.), 4 — циклон № 10 (18—30 января 1983 г.)

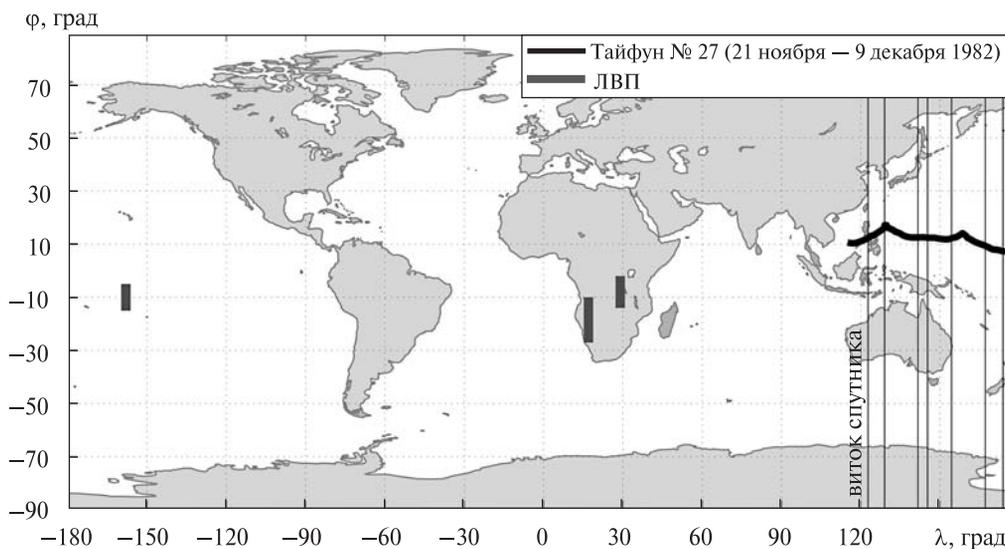


Рис. 5. След тайфуна третьей категории и наблюдаемые в эти дни ЛВП

спутник покрыл почти всю поверхность Земли с интервалом в 3–5°, орбитальные витки над тайфуном показаны на рис. 5. Так же обстоит дело и с остальными ТЦ. Таким образом, связь ТЦ и ЛВП в данных наблюдениях не подтверждается.

**Запуски ракет.** Для изучения связи ЛВП с запусками ракет на карту были вынесены местоположения всех космодромов (рис. 6, а) и конкретно проанализированы запуски с трёх их них — космодромов Плесецк, Байконур и Капустин Яр (всего 21 запуск). Как видно из рис. 6, б, в этом случае связь отсутствует.

**Землетрясения.** Эпицентры землетрясений, происшедших в исследуемый период, указаны на рис. 7 (данные взяты из [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/epic\\_global.php](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/epic/epic_global.php)). Основное число ЛВП расположено относительно близко к местам формирования мощных землетрясений.

Для дальнейшего анализа множество землетрясений, могущих служить источниками ЛВП, ограничим следующими критериями. Будем рассматривать только землетрясения с магнитудой  $M > 5.0$ , глубиной гипоцентра  $D < 100$  км, удаленные менее чем на 4500 км от ЛВП и происшедшие в пределах  $\pm 24$  ч от момента регистрации ЛВП.

На рис. 8 представлена причинно-следственная диаграмма, на которой методом наложения эпох все отобранные землетрясения помещены в начало отсчёта, а ЛВП показаны по отношению к ним в системе координат «время — расстояние». В области отрицательных времён ЛВП являются предвестниками землетрясений, в области положительных времён — откликами. Показан сверхзвуковой конус, внутри которого связь событий физически невозможна. На рис. 8 выделилась группа волновых пакетов, которые можно связать с возможными предвестниками землетрясений (в интервале времен — 8... – 4 ч), в осталь-

Таблица 2. Тропические циклоны, которые достигли ураганной силы в период с 1 ноября 1982 г. до 15 февраля 1983 г.

Тропический циклон	Местоположение тропических циклонов	Время жизни как урагана	Максимальная скорость ветра, км/ч	Категория
Тайфун № 27	8°–13°N, 168°–158°E	26–29 ноября 1982 г.	185	3
Циклон № 7	17°–21°S, 118°–121°E	8–9 января 1983 г.	148	1
Циклон № 8	15°–16°S, 41°–40°E	12 января 1983 г.	120	1
Циклон № 10	15°–18°S, 174°–173°E	25–26 января 1983 г.	148	1

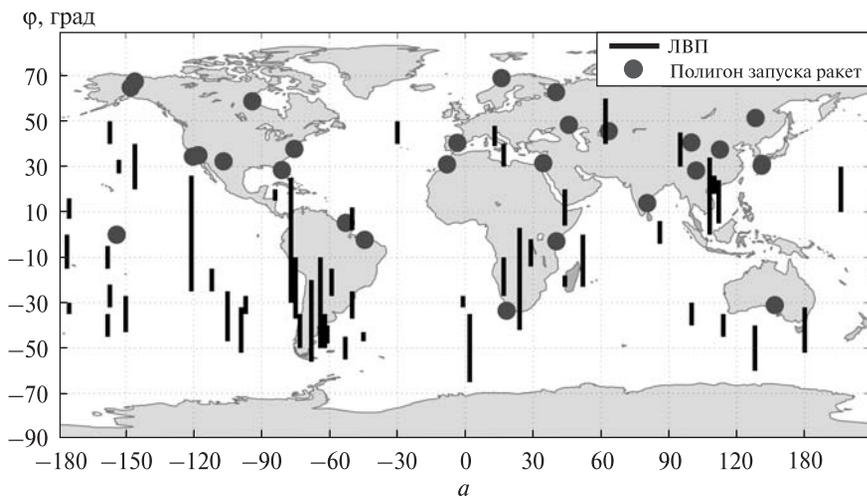


Рис. 6: а — местоположение космодромов всего мира и локализованных волновых пакетов, б — только космодромы СССР и локализованных волновых пакетов, обнаруженные на протяжении 24 ч от моментов конкретных запусков

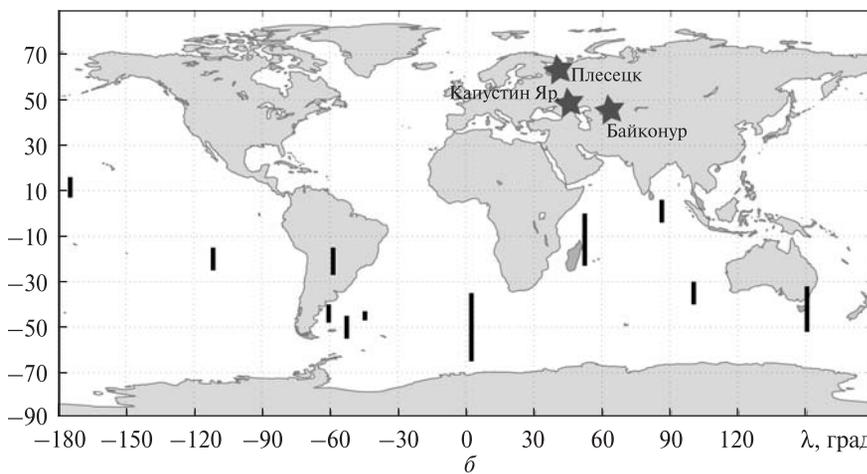
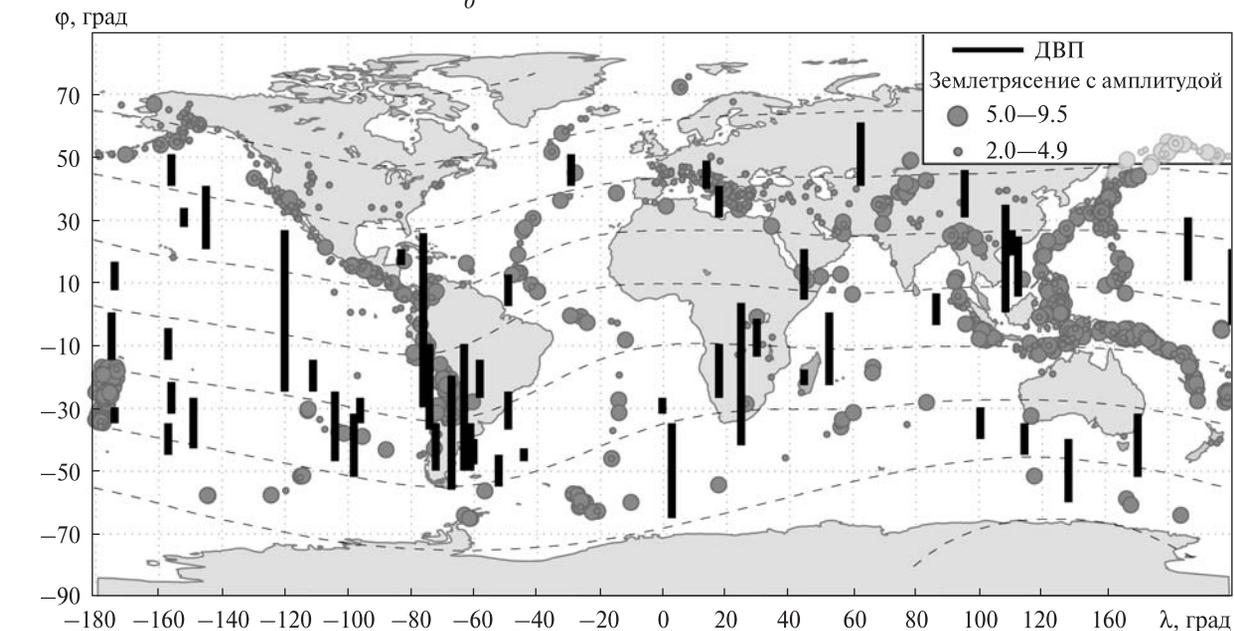


Рис. 7. Локализованные волновые пакеты на фоне землетрясений



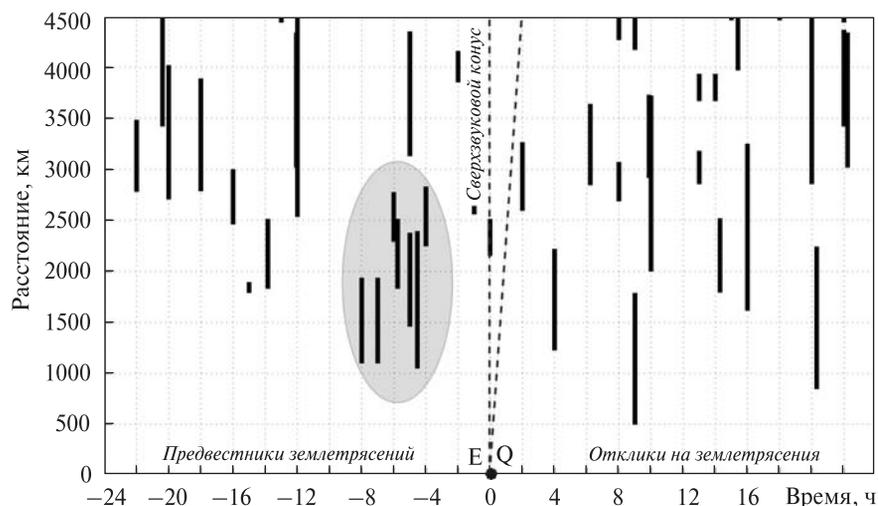


Рис. 8. Диаграмма причинно-следственных связей между землетрясениями (помещены в начало координат) и локализованными волновыми пакетами АГВ

ном же в расположении ЛВП трудно обозначить конкретную закономерность.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выделение и каталогизация волновых форм АГВ по данным прямых спутниковых измерений позволили проанализировать связь ионосферных АГВ с конкретными геофизическими факторами. На фоне устойчивого планетарного распределения АГВ, генерируемого авроральной активностью, периодически выделяются всплески интенсивности АГВ — локализованные волновые пакеты. Связь последних с тропическими циклонами и запусками ракет не нашла статистического подтверждения. Определённая связь с землетрясениями, вероятно, имеет место, но данный вопрос требует изучения на большей статистической базе.

Представленные результаты показывают, что связь ионосферных неоднородностей с воздействиями снизу не является ни прозрачной, ни однозначно установленной.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю Г. В. Лизунову за помощь и поддержку.

1. Лизунов Г. В., Скороход Т. В. Планетарное распределение среднемасштабных атмосферных гравитационных волн по данным спутниковых измерений // Космічна наука та технологія. — 2010. — **16**, № 1. — С. 40—45.
2. Фаткуллин М. Н., Заруцкая Е. В., Фаткуллина В. А. Глобальные пространственные характеристики среднемасштабных волнообразных неоднородностей на высотах области F ионосферы при различных уровнях

геомагнитной активности. — М.: ИЗМИРАН, 1990. — (Препринт № 41 (926)).

3. Федоренко А. К. Спутниковые наблюдения среднемасштабных акустико-гравитационных волн над полярными шапками // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 5. — С. 65—73.
4. Черногор Л. Ф. Тропический циклон как элемент системы Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера // Космічна наука та технологія. — 2006. — **12**, № 2/3. — С. 16—36.
5. Francis S. H. Global propagation of atmospheric gravity waves: a review // J. Atmos. and Terr. Phys. — 1975. — **37**. — P. 1011—1054.
6. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982—1995 // Ann. geophys. — 1996. — **14**. — P. 917—940.
7. Saul P., Boska J. Tropospheric events and possible related gravity wave activity effect on the ionosphere // J. Atmos. and Solar-Terr. Phys. — 2001. — N 63. — P. 945—950.

Надійшла до редакції 17.12.10

T. V. Skorokhod

#### MORPHOLOGIC STRUCTURE AND POSSIBLE SOURCES OF THE AGW GENERATION IN IONOSPHERE

Acoustic-gravity waves (AGW) in the thermosphere are investigated on the basis of observation data from the Dynamics Explorer 2 satellite. It is shown that the planetary AGW distribution consists of regular and sporadic components. A catalogue of AGW waveforms is compiled. Possible surface sources of the AGW generation, namely, tropical cyclones, rocket launchings and earthquakes are investigated. Our statistical analysis reveals no correlation between the AGW generation and tropical cyclones as well as rocket launchings, but it shows some possible relation between the AGW generation and earthquakes.