

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ГЕОМАГНЕТИЗМ
И
АЭРОНОМИЯ

1997 №4

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

МОСКВА

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ НА УДАЛЕННЫЕ СИЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ МЕТОДОМ ЧАСТИЧНЫХ ОТРАЖЕНИЙ

Экспериментально методом частичных отражений изучены и уточнены характеристики волновых возмущений (тип, периоды, длительности, скорости распространения), генерируемых или усиливаемых в среднеширотной нижней ионосфере после удаленных сильных землетрясений. Проведена систематизация в зависимости от мощности, удаленности от пункта наблюдения, места (на суше, под водой) и глубины землетрясения; рассмотрена схема передачи возмущений от литосферы в ионосферу и дана классификация возможных типов волн, переносящих их на глобальные расстояния.

Введение

Землетрясения достаточной интенсивности могут быть фиксированными в пространстве и времени источником волновых возмущений в ионосфере и связанных с ними вариаций геомагнитного поля. Это относится как к стадии подготовки землетрясения [1], так и к моменту сейсмического толчка [2], поскольку сейсмический очаг является источником, с одной стороны, интенсивных крупномасштабных электрических полей и радиоизлучения (на стадии подготовки землетрясения), с другой стороны – мощного акустического импульса (в момент сейсмического толчка). Существуют два направления исследований: изучение краткосрочных (десятки секунд – десятки минут) и долгосрочных (часы – сутки) предвестников землетрясений и изучение влияния самого землетрясения на параметры ионосферы, что важно для целей радиосвязи, радионавигации и т.д. В обоих направлениях в последние два десятилетия ведутся интенсивные теоретические и экспериментальные исследования. В [3–5] нами по измерениям методом частичных отражений (ЧО) исследовано влияние сильных удаленных землетрясений на временные характеристики радишумов на частотах $f = 2-4$ МГц, а также рассмотрена реакция D -области ионосферы средних широт на такие события.

В настоящей работе на основе данных, полученных в Харьковском госуниверситете методом ЧО во время более 180 землетрясений разной интенсивности, изучены характеристики возмущений (тип, периоды, длительности, кажущиеся скорости распространения), генерируемых или усиливаемых в нижней ионосфере в эти периоды.

Экспериментальная техника и методика исследований

Исследования выполнены на основе ретроспективного анализа банка данных, полученных методом ЧО в период 1983–1994 гг. Измерения частично отраженных сигналов и радишумов проведены на аппаратуре [6] на средней широте вблизи г. Харькова. Основные параметры комплекса: рабочие частоты $f = 2-4$ МГц, длительность зондирующих импульсов $\tau_n = 25$ мкс с частотой повторения $F = 1-5$ Гц. Амплитуды $A_{o,n}^{III}$ радишумов (2–6 выборок, которые получены в интервале между излучением зондирующих импульсов) и смеси радишумов и ЧО сигналов $A_{o,n}$ обыкновенной ("о") и необыкновенной ("н") магнитоионных компонент регистрировались с 15 высотных уровней (начиная с 45 или 60 км) через 3 км. Длительности регистраций $A_{o,n}(z, t)$ и $A_{o,n}^{III}(t)$ (здесь t – время, z – высота над поверхностью Земли), проведенных в различные времена года и суток, составляли от 20 мин до суток и более (непрерывные измерения). Для последующего анализа на ЭВМ проведена частичная статистическая обработка высотно-временных массивов $A_{o,n}(z, t)$ и $A_{o,n}^{III}(t)$:

путем усреднения $A_{o,n}(z, t)$ и $A_{o,n}^m(t)$ за 30 или 60 с получены массивы $\bar{A}_{o,n}^m(t)$ и $\bar{A}_{o,n}(z, t)$ (черта сверху означает усреднение); амплитуды ЧО сигналов определялись вычитанием $\bar{A}_{o,n}^c = \bar{A}_{o,n} - \bar{A}_{o,n}^m$. Для более чем 80% экспериментальных данных проведена спектральная обработка массивов $A_{o,n}(z, t)$, $A_{o,n}^m(t)$ с целью уточнения параметров возмущений. Для каждой регистрации вычислены временные зависимости $a_{o,n}(t) = \frac{(\bar{A}_{o,n}^c)^2}{\langle (\bar{A}_{o,n}^m)^2 \rangle}$ на интервале времени в 20 мин (± 10 мин относительно момента землетрясения; здесь $\langle (\bar{A}_{o,n}^m)^2 \rangle$ – среднее значение $(\bar{A}_{o,n}^m)^2(t)$ на этом промежутке времени), которые использованы при анализе данных с помощью метода наложения эпох.

Общее число землетрясений, происшедших на суше и под водой с энергией $E > 10^{11}$ Дж, на удалениях $R \approx (1-15) \cdot 10^3$ км и глубине $h \sim 1-100$ км, составило более 180. Из них с $E > 10^{12}$ Дж (магнитуда по шкале Рихтера $M > 5$) зарегистрировано 115 событий. Сведения о землетрясениях взяты из [7]. Влияние других источников возмущений естественного и искусственного характера исключалось селекцией регистраций $A_{o,n}^m(t)$ и $A_{o,n}(z, t)$.

Возмущения в нижней ионосфере

Ранее [3] установлено, что методом ЧО возможна регистрация квазипериодических возмущений в ионосферной плазме после землетрясений – на высотно-временных зависимостях $A_{o,n}(z, t)$ и $A_{o,n}^m(t)$ с разной временной задержкой наблюдаются квазигармонические изменения. В отсутствие других источников возмущений такие возмущения $A_{o,n}(z, t)$ и $A_{o,n}^m(t)$, вероятно, вызываются землетрясениями. На основании анализа банка данных об $A_{o,n}(z, t)$ и $A_{o,n}^m(t)$, полученных во время землетрясений и в контрольные дни (когда сильные землетрясения отсутствовали), установлено, что при землетрясениях с энергией $E < 10^{12}$ Дж указанный эффект отсутствует при любых R и

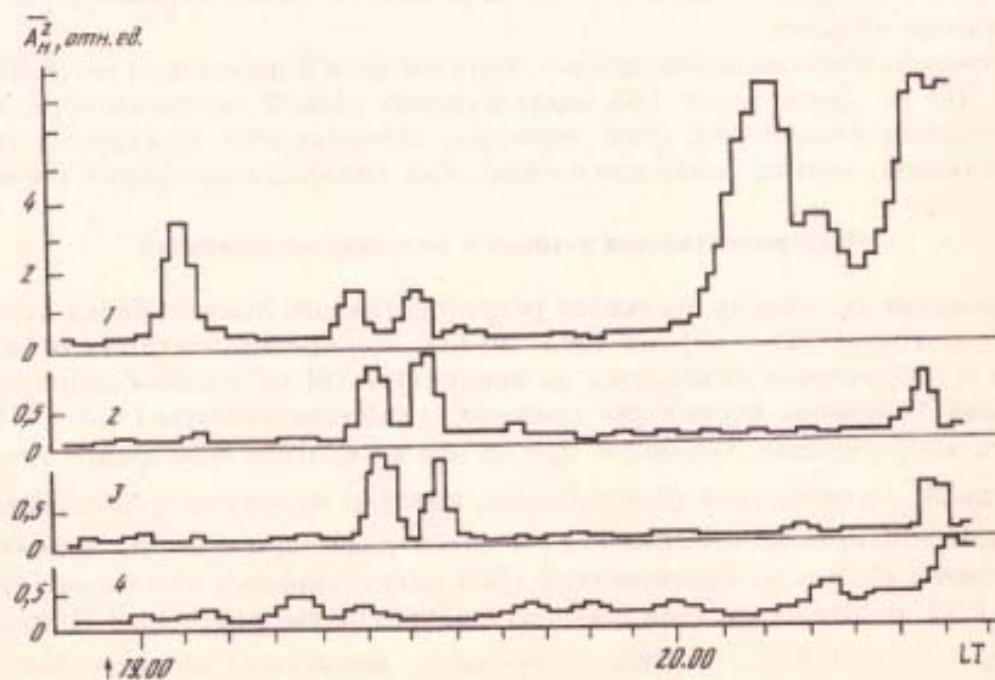


Рис. 1. Высотно-временные зависимости средних интенсивностей частично отраженных сигналов с высот 105, 81 и 57 км (кривые 1-3) и ионосферного шума (кривая 4), полученные во время землетрясения 13 августа 1987 г. ($R \approx 10\ 000$ км)

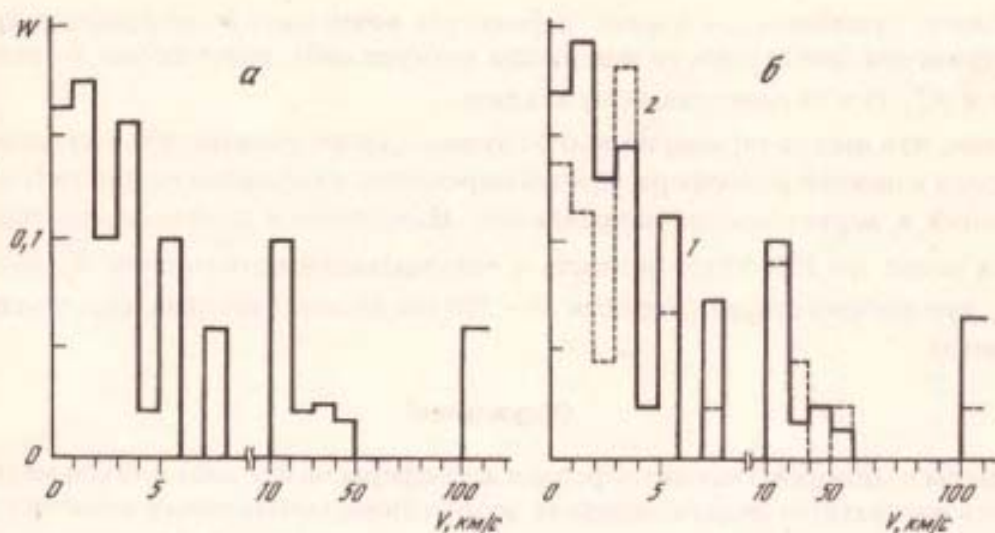


Рис. 2. Гистограммы распределения скоростей возмущений, зарегистрированных методом частичных отражений после землетрясений с $E > 10^{12}$ Дж: а – для всех землетрясений; б – для землетрясений на суше (1) и под водой (2)

h. С вероятностью $W \sim 65-70\%$ квазигармонические изменения $A_{o,n}(z, t)$ и $A_{o,n}^{III}(t)$ наблюдались при землетрясениях с $E > 10^{12}$ Дж на суше, при землетрясениях под водой – с $W \approx 40\%$.

На рис. 1 приведен пример возмущений $\overline{A_n^2}(z, t)$ при землетрясении с $E \approx 10^{14}$ Дж и $R \sim 10^4$ км. Эксперимент проведен в послеполуденное время, примерно за 3 ч до захода Солнца. По времени задержки момента "всплеска" – возрастания $A_{o,n}(z, t)$ относительно землетрясения вычисленные кажущиеся скорости передачи возмущений составили $U \approx 50; 7-8$ и 2 км/с. На основании анализа банка высотно-временных зависимостей $A_{o,n}(z, t)$ и $A_{o,n}^{III}(t)$ зафиксирован ряд возмущений в нижней ионосфере с $U \sim 0,5-10$ км/с. На рис. 2а приведена гистограмма $W(U)$ распределения кажущихся скоростей передачи возмущений, полученная по этим данным. На рис. 2б даны гистограммы $W(U)$ для землетрясений на суше (кривая 1) и под водой (кривая 2). Анализ приведенных зависимостей показывает, что наиболее часто регистрировались возмущения с кажущимися скоростями $U \approx 0,5-4, \approx 10-20$ и $\approx 10^2$ км/с как при землетрясениях на суше, так и под водой. Есть, однако, отличия в распределениях $W(U)$: например, при землетрясениях под водой наиболее часто регистрировались возмущения с $U \approx 3-4$ км/с и заметно реже с $U \approx 10^2$ км/с; при землетрясениях на суше чаще регистрировались возмущения с $U \approx 1-4$ км/с. Классификация возможных типов возмущений, имеющих такие скорости и несущих информацию о землетрясении, рассмотрена в следующем разделе.

Основные параметры возмущений в нижней ионосфере, вызываемых землетрясениями

Длительность процесса, мин	Величина квазипериода, мин	Кажущаяся скорость, км/с	Возможный тип волн
~ 1	–	100	МГД
~ 1	–	10–50	гиротропные, ионно-акустические
~ 10	2–3	6–8	электромагнитные
~ 10	~ 3	5–6	объемные
10–15	~ 3	3–4	поверхностные Релея
10–20	3–8	1,2–3	плазмо-акустические (магнито-звуковые, медленные МГД)
15–35	3–10	0,4–1	акустико-гравитационные

В таблице приведены основные параметры возмущений (кажущиеся скорости распространения, длительности и периоды возмущений), полученные по данным об $A_{o,n}(z,t)$ и $A_{o,n}^m(t)$ и их спектральному анализу.

Заметим, что иногда (примерно в 10% случаев), кроме горизонтальных скоростей U возмущений в нижней ионосфере, удается определить кажущиеся скорости U передачи возмущений в вертикальном направлении. Например, в приведенном выше примере для высот $z = 105-57$ км разность в запаздывании возмущений $\overline{A_n^2}$ составляет ~ 3 мин, что соответствует скорости $U \sim 300$ м/с (здесь передача возмущений шла сверху вниз).

Обсуждение

Процессы взаимодействия литосферы и ионосферы не изучены в такой мере, чтобы построить адекватную модель передачи возмущений, вызываемых землетрясениями, в ионосферную плазму. Экспериментальное исследование отклика ионосферы на удаленные землетрясения позволяет, в частности, уточнить возможные механизмы и типы волн, переносящие возмущения от землетрясений. Рассмотрим некоторые из них.

Землетрясение генерирует мощный акустический импульс, распространяющийся до высоты ≈ 10 км в виде ударной волны, которая затем трансформируется в звуковую и инфразвуковую волны. Часть энергии последней переносится вверх (до высоты $z = 90$ км время распространения составляет ~ 5 мин), захватывается в волновод, образованный регулярной высотной анизотропией проводимости ионосферы на $z = 80-120$ км [8]. В нем волна с малым поглощением распространяется на расстояния до $R = 10\,000$ км. Скорость распространения таких инфразвуковых (акустико-гравитационных) волн составляет $U = 0,4-1$ км/с, период $T = 3-6$ мин, продолжительность процесса по нашим экспериментальным данным соответствует нескольким периодам. При землетрясении генерируются также сейсмические волны [9] со скоростью распространения $U \approx 3-8$ км/с. Скоростям $U \approx 3-4$ км/с соответствуют поверхностные волны Релея, $U \approx 5-6$ км/с – объемные волны и $U = 6-8$ км/с – электромагнитные. Сейсмические волны могут распространяться в глобальных масштабах вследствие слабого их затухания. По мере их распространения вдоль поверхности Земли происходит трансформация этих волн в длиннопериодные акустические, а также преломление в ионосферу [9, 10]. Акустические волны в ионосфере могут трансформироваться в плазмо-акустические волны с горизонтальной скоростью распространения $U = 1,3-2,2$ км/с [11]. Примером плазмо-акустических волн могут быть магнитозвуковые [12] и медленные магнитогидродинамические (МГД) волны [8, 12]. Ионно-звуковые волны, скорости распространения которых вдоль поверхности Земли составляют $U = 20-40$ км/с, также могут инициироваться в ионосферной плазме акустическими волнами [13].

Для объяснения результатов экспериментов может привлекаться также гипотеза об участии гиротропных волн [8] как разновидности медленных МГД-волн. Скорости их распространения составляют $U \approx 10-50$ км/с.

Известно также, что при определенных условиях в плазме возбуждаются МГД-волны, скорость которых равна альвеновской $U = U_A = 10$ км/с [8, 14]. Такие волны могут переносить информацию о возмущениях с минимальными временами запаздывания $\Delta t \approx 10-10^2$ с, что регистрировалось нами в изменениях $A_{o,n}^m(t)$. В предположении такого механизма передачи возмущения можно объяснить увеличение $a_{o,n}(t)$ в течение 3-4 мин после землетрясения (которое обнаружено нами и отмечалось ранее в [3-5]) различными задержками (при одинаковых U) при разных удалениях R пункта наблюдений от места землетрясений. Заметим, что МГД-волна в этом случае является спусковым фактором, воздействующим на магнитное поле в магнитосфере и

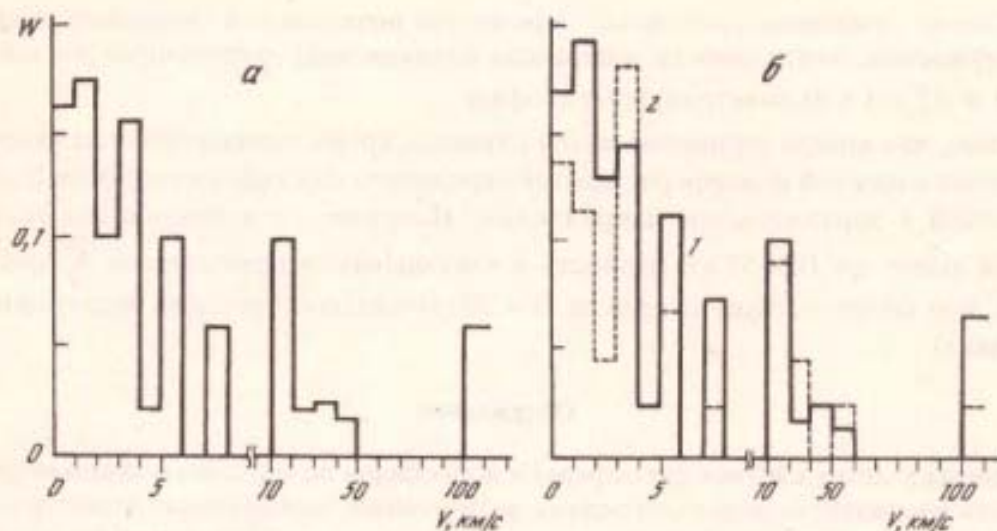


Рис. 2. Гистограммы распределения скоростей возмущений, зарегистрированных методом частичных отражений после землетрясений с $E > 10^{12}$ Дж: а – для всех землетрясений; б – для землетрясений на суше (1) и под водой (2)

h. С вероятностью $W \sim 65\text{--}70\%$ квазигармонические изменения $A_{\alpha,n}(z, t)$ и $A_{\alpha,n}^m(t)$ наблюдались при землетрясениях с $E > 10^{12}$ Дж на суше, при землетрясениях под водой – с $W = 40\%$.

На рис. 1 приведен пример возмущений $\overline{A_n^2}(z, t)$ при землетрясении с $E \geq 10^{14}$ Дж и $R \sim 10^4$ км. Эксперимент проведен в послеполуденное время, примерно за 3 ч до захода Солнца. По времени задержки момента "всплеска" – возрастания $A_{\alpha,n}(z, t)$ относительно землетрясения вычисленные кажущиеся скорости передачи возмущений составили $U \approx 50$; 7–8 и 2 км/с. На основании анализа банка высотно-временных зависимостей $A_{\alpha,n}(z, t)$ и $A_{\alpha,n}^m(t)$ зафиксирован ряд возмущений в нижней ионосфере с $U \sim 0,5\text{--}10$ км/с. На рис. 2а приведена гистограмма $W(U)$ распределения кажущихся скоростей передачи возмущений, полученная по этим данным. На рис. 2б даны гистограммы $W(U)$ для землетрясений на суше (кривая 1) и под водой (кривая 2). Анализ приведенных зависимостей показывает, что наиболее часто регистрировались возмущения с кажущимися скоростями $U \approx 0,5\text{--}4$, $\approx 10\text{--}20$ и $\approx 10^2$ км/с как при землетрясениях на суше, так и под водой. Есть, однако, отличия в распределениях $W(U)$: например, при землетрясениях под водой наиболее часто регистрировались возмущения с $U \approx 3\text{--}4$ км/с и заметно реже с $U \geq 10^2$ км/с; при землетрясениях на суше чаще регистрировались возмущения с $U \approx 1\text{--}4$ км/с. Классификация возможных типов возмущений, имеющих такие скорости и несущих информацию о землетрясении, рассмотрена в следующем разделе.

Основные параметры возмущений в нижней ионосфере, вызываемых землетрясениями

Длительность процесса, мин	Величина квазипериода, мин	Кажущаяся скорость, км/с	Возможный тип волн
~ 1	–	100	МГД
~ 1	–	10–50	гиротропные, ионно-акустические
~ 10	2–3	6–8	электромагнитные
~ 10	~ 3	5–6	объемные
10–15	~ 3	3–4	поверхностные Релея
10–20	3–8	1,2–3	плазмо-акустические (магнито-звуковые, медленные МГД)
15–35	3–10	0,4–1	акустико-гравитационные

Заключение

Представленный анализ экспериментальных данных, полученных методом ЧО, свидетельствует о том, что землетрясения с энергией $E \geq 10^{12}$ Дж вызывают в нижней ионосфере несколько типов возмущений, которые проявляются на расстояниях до ~ 10 Мм от эпицентра. Показано, что горизонтальные скорости передачи этих возмущений изменяются в широких пределах: $U = 0,5-10^2$ км/с. Приведена возможная классификация возмущений, соответствующая современным представлениям о литосферно-ионосферном взаимодействии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электромагнитные предвестники землетрясений / Под ред. Садовского М.А.. М.: Наука, 1982. 88 с.
2. Павлов В.А. Воздействие землетрясений и извержений вулканов на ионосферную плазму // Изв. вузов. Радиофизика. 1979. Т. 22. № 1. С. 11.
3. Гармаш К.П., Гокон А.М., Гритчин А.И. и др. Исследование реакции нижней ионосферы на удаленные мощные землетрясения // Радиотехника. Харьков. 1990. Вып. 95. С. 52.
4. Gokov A.M., Gritchyn A.I., Misyura U.A., Somov U.G. Experimental investigations of natural disturbances in the middlelatitudinal ionospheric D-region // Proc. Intern. Conf. Physics in Ukraine (Bogolubov Institute for Theoretical Physics, Kiev, 1993), p. 111.
5. Гокон А.М., Гритчин А.И. Возмущения в нижней ионосфере, обусловленные сильными удаленными землетрясениями // Тез. докл. международного симпозиума "Спутниковые исследования ионосферных и магнитосферных процессов". М.: ИЗМИРАН. 11-13. 12.95. С. 40.
6. Tyrnov O.F., Garmash K.P., Gokov A.M. et al. The radiophysical observatory for remote sounding of the ionosphere // Turkish J. of Physics. 1994. V. 18. N 11. P. 1260.
7. Каталоги сильных землетрясений. М.: МЦД РАН. 1983-1994.
8. Сорокин В.М., Федорович Г.В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. М.: Энергия, 1982. 135 с.
9. Yuen P.C., Weaver P.F., Suzuki R.K., Furumoto A.S. Continuous traveling coupling between seismic waves and ionosphere evident in May 1968 Japan earthquake data // J. Geophys. Res. 1969. V. 74. N 9. P. 2256.
10. Егоров Е.А., Елизарьев Ю.Н., Новиков В.М. и др. Эффекты сильных землетрясений в ионосфере Земли // Геомагнетизм и аэрномия. 1990. Т. 30. № 4. С. 680.
11. Wickersham A.F. Identification of acoustic-wave modes from ionospheric range-time Observation // J. Geophys. Res. 1966. V. 70. N 11. P. 4551.
12. Павлов В.А. Волновые процессы в ионосфере. Алма-Ата: Наука. 1987. С. 3.
13. Пономарев Е.А., Ерущенков А.И. Инфразвуковые волны в атмосфере Земли (обзор) // Изв. вузов. Радиофизика. 1977. Т. 20. № 12. С. 1773.
14. Руденко Г.В. Возбуждение ионосферного МГД-волновода подземными токами в зоне подготовки землетрясений // Геомагнетизм и аэрномия. 1985. Т. 25. № 5. С. 799.

Харьковский госуниверситет

Поступила в редакцию
08.08.96