

УДК 550.388

## К ВОПРОСУ О РЕАКЦИИ СРЕДНЕШИРОТНОЙ D-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ НА УДАЛЕННЫЕ СИЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

© 2001 г. А. М. Гоков

Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, Харьков (Украина)

Поступила в редакцию 12.04.2000 г.

После доработки 19.06.2000 г.

Экспериментально с помощью метода частичных отражений исследованы изменения плотности электронов  $N$  в  $D$ -области ионосферы после удаленных сильных землетрясений. Обнаружено увеличение  $N$  в течение примерно 10–20 мин через несколько минут после момента землетрясения более, чем на 50–100%. Для объяснения экспериментальных фактов использована гипотеза о высыпании электронов из радиационных поясов, инициируемое МГД-волной, генерируемой при определенных условиях в ионосфере во время землетрясения.

### ВВЕДЕНИЕ

В [1, 2], по измерениям методом частичных отражений (ЧО), исследовано влияние сильных удаленных землетрясений на временные характеристики радишумов на частотах  $f = 2\text{--}4$  МГц, а также рассмотрена реакция  $D$ -области ионосферы средних широт на такие события. Было установлено, что вблизи момента землетрясения (в течение нескольких минут после него) наблюдаются кратковременные (длительностью порядка единиц минут) заметные (в несколько раз) временные вариации амплитуд радишумов  $A_{\text{но}}$ ,  $A_{\text{нх}}$  и амплитуд смеси ЧО сигналов и шумов обыкновенной  $A_o$  и необыкновенной  $A_x$  поляризации. С определенной вероятностью такие события имеют место при землетрясениях с энергией  $E > 10^{12}$  Дж, происходящих как под водой, так и на суше. Эти исследования продолжаются. Банк экспериментальных данных по сравнению с [1, 2] увеличен более чем на 40%. Статистика событий, приведенная в [1], в целом подтверждается. В связи с этим появилась необходимость исследовать возможные изменения плотности электронов во время таких событий. Результаты исследований приведены в настоящей работе.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Измерения амплитуд ЧО сигналов обыкновенной  $A_o$  и необыкновенной  $A_x$  поляризации и шумов  $A_{\text{но}}$ ,  $A_{\text{нх}}$  выполнены с помощью аппаратуры [3] вблизи г. Харькова ( $\varphi = 49.5^\circ\text{N}$ ,  $\lambda = 36.4^\circ\text{E}$ ) в период 1983–1999 гг. во время землетрясений с энергией  $E > 10^{12}$  Дж, произошедших на удаленных  $R_1 = 1\text{--}17$  Мм как на суше, так и под водой. Как и ранее в [1, 2], применялся ретроспективный анализ данных: анализировались высотно-временные вариации амплитуд  $A_{\text{но, нх}}(t)$  и  $A_{o, x}(z, t)$  ( $z$  – высота

над поверхностью Земли,  $t$  – время), полученные на частотах  $f = 2.1\text{--}3.5$  МГц во время сильных удаленных землетрясений. Длительности непрерывных регистраций  $A_{\text{но, нх}}(t)$  и  $A_{o, x}(z, t)$  составляли единицы-десятки часов и охватывали весь высотный диапазон в  $D$ -области ионосферы с дискретностью выборок по высоте 3 км. Анализировались регистрации, полученные в течение десятков минут-часов до и после землетрясения. Сведения о землетрясениях получены в Мировых Центрах Данных (по сети INTERNET).

Для анализа изменений плотности электронов  $N(z, t)$  в  $D$ -области ионосферы вблизи момента землетрясений отбирались регистрации с характерным [1] откликом (и без него) в зависимостях  $A_{\text{но, нх}}(t)$  и  $A_{o, x}(z, t)$ , для которых проведен расчет высотно-временных изменений  $N(z, t)$ . При вычислении профилей  $N(z, t)$  по методике дифференциального поглощения [4] использовалась величина  $R(z) = ((A_x^2) - (A_{\text{нх}}^2)) / ((A_o^2) - (A_{\text{но}}^2))$ . Усреднение амплитуд производилось на интервалах 5 и 10 мин (при меньших интервалах усреднения существенно возрастает погрешность в расчетах  $N(z, t)$ ). Поскольку обратная задача в методе ЧО является некорректной, то применялся алгоритм регуляризации [5], что позволяет уменьшить статистическую погрешность восстановления  $N(z)$  по  $R(z)$  и увеличить диапазон высот, где восстановление возможно. В качестве профиля частоты соударений  $\nu(z)$  использовался модельный профиль [6]. Погрешность расчетов  $N(z, t)$  не превышала 50 и 30% при усреднении на интервале 5 и 10 мин соответственно.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены примеры высотно-временных изменений  $N(z, t)$  (зависимости  $N(z, t)$  по-

лученных на временных интервалах по 5 или 10 мин), а на рис. 2 соответствующие им  $A_x(z, t)$  (усреднение по 1 мин). Сведения о землетрясениях приведены в табл. 1.

Отметим основные особенности в поведении  $N(z, t)$  вблизи момента землетрясения в D-области ионосферы. Из анализа данных (включая не приведенные здесь) обнаружено, что примерно в 25% случаях перед землетрясением (за единицы минут до) и в момент его  $N(z, t)$  уменьшается в течение 5–10 мин более, чем на 50% (см. примеры на рис. 1, данные за 19.02.1997 г. и 24.03.1992 г.). Через 5–10 мин после землетрясения отмечено резкое возрастание  $N(z, t)$  – на ~50–200% по сравнению с невозмущенными значениями в течение примерно 10–20 мин (иногда более). Релаксация  $N(z, t)$  до невозмущенных значений происходит, как правило, в течение 10–15 мин. Такое поведение  $N(z, t)$  экспериментально установлено нами в высотном диапазоне  $z = 78–96$  км (на высотах  $z < 78$  км характерных особенностей в изменениях  $N(z, t)$  не обнаружено). Следует отметить, что подобное описанному выше поведение  $N(z, t)$  установлено нами примерно в 50% случаев; оно наблюдалось как при землетрясениях, происшедших на суше, так и под водой на различной глубине (подробная классификация будет приведена в следующих публикациях). Характерно также то, что отмеченные особенности в поведении  $N(z, t)$  коррелируют с описанными в [1] характерными “всплесками”  $A_{no, \text{ли}}(t)$  и  $A_{o, x}(z, t)$ ; кроме того, они наблюдаются и в отсутствие таких “всплесков”  $A_{no, \text{ли}}(t)$  и  $A_{o, x}(z, t)$  (см. примеры на рис. 1, 2).

Процессы взаимодействия литосферы и ионосферы остаются еще изученными недостаточно, чтобы построить адекватную модель передачи возмущений, вызываемых землетрясениями, в ионосферную плазму. Отмеченные выше особенности в поведении  $N(z, t)$  в D-области ионосферы вблизи момента удаленного мощного землетрясения возможно объяснить на основе механизма о генерации МГД-волн в ионосферной плазме во время землетрясений. Как было отмечено в [1], при определенных условиях в ионосферной плазме возбуждаются МГД-волны, скорость которых равна альвеновской  $V \approx V_A = 100$  км/с [7, 8]. Такие волны могут переносить информацию о возму-

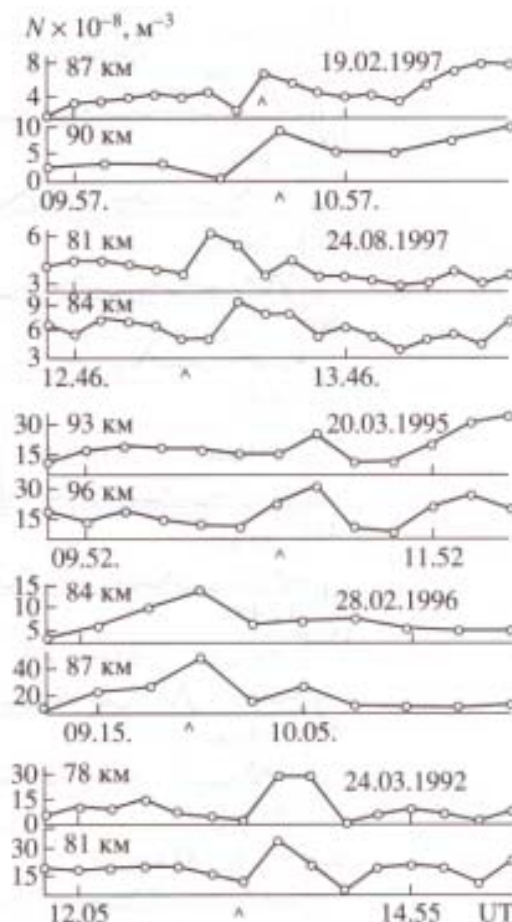


Рис. 1. Примеры высотно-временных зависимостей  $N(z, t)$ , полученных в период сильных удаленных землетрясений (время землетрясений отмечено стрелкой).

щения с минимальными временами запаздывания  $\Delta t \sim 10–100$  с, что регистрировалось [1] в изменениях  $A_{no, \text{ли}}(t)$  и  $A_{o, x}(z, t)$ . В предположении такого механизма передачи возмущения можно объяснить увеличение  $A_{no, \text{ли}}(t)$  и  $A_{o, x}(z, t)$  после землетрясения различными задержками (при одинаковых  $V$ ) при разных удалениях  $R_1$  пункта наблюдений от места землетрясений. МГД-волна в этом случае может быть спусковым фактором, воздействующим на магнитное поле в магнитосфере и вызывающая высыпание высокоэнергичных заряженных частиц (электронов) из ради-

Таблица 1. Сведения о землетрясениях

Дата	Время, UT	Координаты	Магнитуда	Глубина, км
24.03.1992	13.01:49	20.59°N, 146.97°E	5.1	33
20.03.1995	10.48:54	3.37°S, 135.2°E	5.5	33
28.02.1996	09.44:11	1.81°N, 126.06°E	6.4	105
19.02.1997	10.28:57	19.19°N, 64.4°W	5.4	33
24.08.1997	13.15:22	29.99°N, 68.11°E	5.6	33

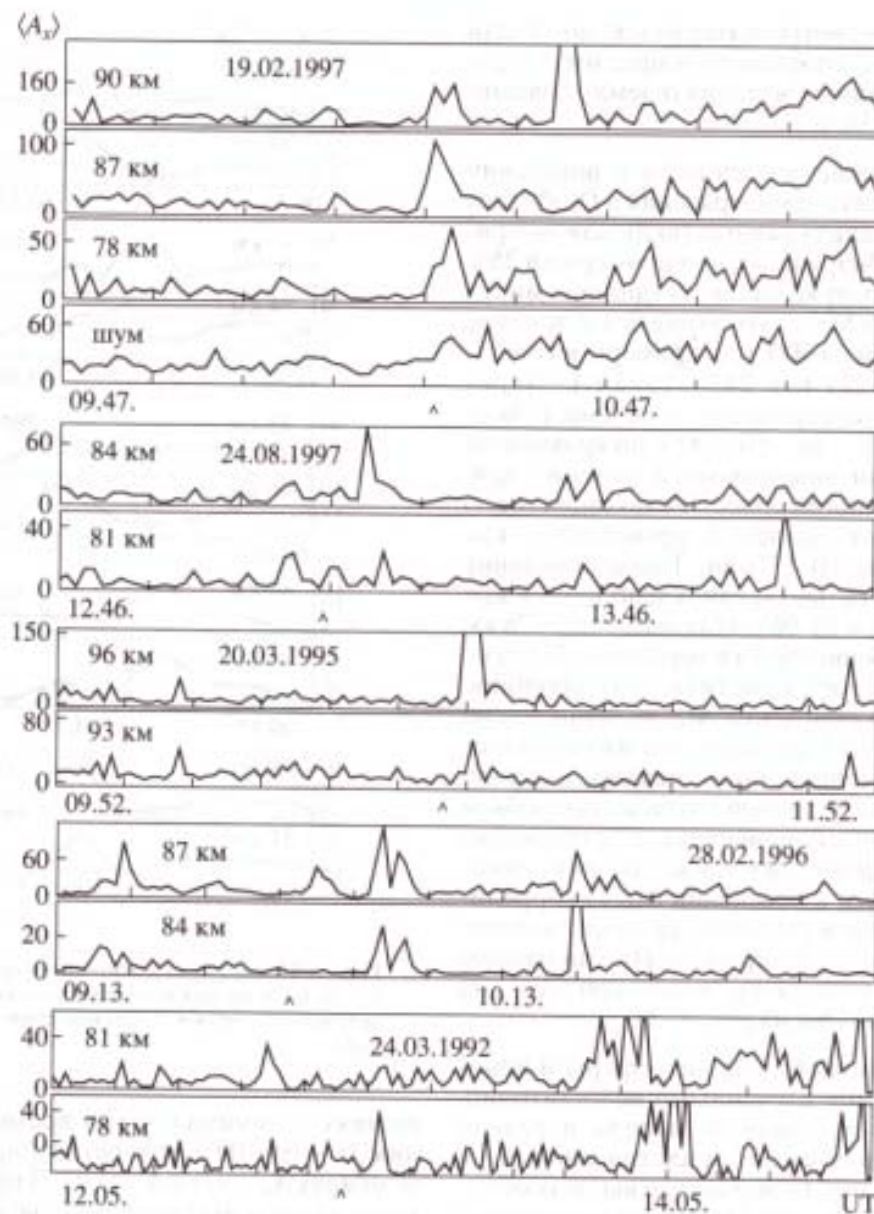


Рис. 2. Примеры зависимостей  $A_{\text{эл}}(t)$  и  $A_z(z, t)$ , полученных во время сильных удаленных землетрясений.

ационного пояса в атмосферу Земли. Эти частицы вызывают увеличение ионизации в нижней ионосфере на временных интервалах  $\sim 1-10$  мин, что приводит к наблюдаемому и описанному выше изменению высотно-временных зависимостей плотности электронов  $N(z, t)$  и ранее в [1] —  $A_{\text{эл}}(t)$  и  $A_z(z, t)$ . Вероятность генерации МГД-волны зависит, прежде всего, от условий в ионосфере, а также от параметров землетрясения (мощности, глубины, места и др.). Кроме того, по-видимому, не всегда МГД-волна может вызвать высыпание электронов (это зависит как от состояния радиационного пояса, так и характеристик самой МГД-волны). Возможны также случаи, когда пункт наблюдений находится вне конуса

высыпаний электронов из радиационного пояса. Поэтому описанные выше особенности в высотно-временных изменениях  $N(z, t)$  регистрируются не во всех экспериментах.

На основе предложенного механизма о высыпании высокоэнергичных электронов из радиационного пояса, оценим параметры потоков подобно тому, как это сделано в [9] для источников возмущений в ионосфере другой природы: старты ракет, магнитная буря, нагрев ионосферы мощным радиоизлучением. По экспериментальным значениям плотности электронов в невозмущенных  $N_0$  и возмущенных  $N$  условиях оценим скорость ионизации  $q_0 = \alpha_0 N_0^2$  и  $q = \alpha N^2$  (индекс

Таблица 2. Оценки параметров потоков электронов

Дата	24.03.1992	20.03.1995	28.02.1996	19.02.1997	24.08.1997
$z$ , км	81	93	84	90	84
$N_0$ , м <sup>-3</sup>	$1.9 \times 10^9$	$1.5 \times 10^9$	$5 \times 10^8$	$3 \times 10^8$	$6 \times 10^8$
$N$ , м <sup>-3</sup>	$3 \times 10^9$	$3.1 \times 10^9$	$1.1 \times 10^9$	$8.7 \times 10^8$	$9 \times 10^8$
$q_0$ , м <sup>-3</sup> с <sup>-1</sup>	$4.0 \times 10^7$	$2.3 \times 10^6$	$1.5 \times 10^6$	$0.3 \times 10^6$	$2.2 \times 10^6$
$q$ , м <sup>-3</sup> с <sup>-1</sup>	$9.9 \times 10^7$	$9.6 \times 10^6$	$7.3 \times 10^6$	$2.3 \times 10^6$	$4.9 \times 10^6$
$P_1$ , Дж м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>	$4.1 \times 10^{-6}$	$5.1 \times 10^{-7}$	$4.1 \times 10^{-7}$	$1.4 \times 10^{-7}$	$1.9 \times 10^{-7}$
$p$ , Дж м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup>	$1.8 \times 10^8$	$3.4 \times 10^8$	$2.8 \times 10^7$	$9.4 \times 10^7$	$1.3 \times 10^7$
$\omega$ , МэВ	0.15	0.01	0.1	0.01	0.1
$S$ , м <sup>2</sup>	$10^{14}$	$10^{14}$	$10^{14}$	$10^{14}$	$10^{14}$
$P$ , Вт	$4.1 \times 10^8$	$5.1 \times 10^7$	$4.1 \times 10^7$	$1.4 \times 10^7$	$1.9 \times 10^7$
$E$ , Дж	$4.9 \times 10^{11}$	$6.1 \times 10^{10}$	$4.9 \times 10^{10}$	$1.7 \times 10^{10}$	$2.3 \times 10^{10}$
$\Delta t$ , с	$1.2 \times 10^3$	$1.2 \times 10^3$	$1.2 \times 10^3$	$1.2 \times 10^3$	$1.2 \times 10^3$

“0” соответствует невозмущенным условиям). На высотах  $z > 75$  км в D-области ионосферы, если рассматривать в качестве основной рекомбинацию электронов с ионами  $NO^+$  и  $O_2^+$  (что вполне оправдано [10]),  $\alpha$  изменяется примерно от  $10^{-11}$  до  $2 \times 10^{-13}$  м<sup>3</sup> с<sup>-1</sup> (далее будем полагать  $\alpha = \alpha_0$ , т.е. пренебрегаем нагревом атмосферы при высыпании электронов). Плотность потока  $P_1$  мощности  $P$  частиц с энергией  $\omega$  определим как (см., например, [11])  $P_1 \equiv 2\omega_1 \Delta z \Delta q = \omega p$ , где  $\Delta q = q - q_0$ ,  $\omega_1 = 35$  эВ [12] – энергия одного акта ионизации,  $\Delta z$  – диапазон высот эффективного поглощения потока  $p$  электронов с данной энергией  $\omega$  (это выражение справедливо, если пренебречь распределением высыпающихся электронов по энергиям). Мощность  $P$  и энергию  $E$  электронов, высыпающихся на площади  $S$  при длительности высыпаний  $\Delta t$  можно оценить из соотношений  $P = P_1 S$ ,  $E = P \Delta t$ . В расчетах, на основе анализа поведения ЧО сигналов и  $N(z, t)$ , полагали  $\Delta t = 1.2 \times 10^3$  с. Результаты расчетов указанных выше величин для обсуждаемых экспериментов приведены в табл. 2 (для удобства расчетов брали  $\Delta z = 10$  км; полагали также, что энергия высыпающихся электронов  $\omega > 40$  кэВ, что, по-видимому, вполне обосновано (см., например, данные для солнечных вспышек и магнитных бурь [10–16])).

Из табл. 2 видно, что параметры потоков высыпающихся электронов имеют достаточно широкий разброс, что обусловлено, по-видимому, различными факторами: например, условиями в ионосфере, состоянием радиационных поясов, мощностью источника (МГД-волны), местоположением пункта наблюдений и т.д. В целом же по абсолютным значениям они не противоречат известным литературным данным о потоках электронов, полученных экспериментально (или оце-

ненных) во время возмущений различной природы, например, во время солнечных вспышек и магнитных бурь [12–16], стартов ракет [9, 17] и др.

Следует отметить, что для землетрясений с энергией  $E < 10^{12}$  Дж, как показал анализ регистраций из банка данных Харьковского Национального Университета, полученных методом ЧО, описываемые выше эффекты не обнаружены (проанализировано более 70 экспериментов для различных условий).

### ВЫВОДЫ

1. По измерениям методом частичных отражений установлено, что во время сильных удаленных землетрясений с энергией  $E > 10^{12}$  Дж в среднеширотной D-области ионосферы на высотах  $z > 78$  км может наблюдаться увеличение  $N$  на 50–200% длительностью  $\Delta t = 10$ –20 мин.

2. Отмеченные вариации  $N(z, t)$  можно объяснить высыпанием потоков высокоэнергичных электронов из радиационного пояса Земли, которое вызывается МГД-волной, генерируемой при определенных условиях в ионосфере и распространяющейся в ионосферной плазме со скоростью  $V = V_A = 100$  км/с.

Автор выражает благодарность К.П. Гармашу за предоставленную программу расчета профилей  $N(z, t)$  с применением метода регуляризации.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гоков А.М., Гритчин А.И. Некоторые особенности поведения радишумов в диапазоне 2–4 МГц во время удаленных сильных землетрясений // Геомагнетизм и аэрономия. 1996. Т. 36. № 1. С. 183.
2. Гоков А.М., Тырнов О.Ф. Исследование реакции нижней ионосферы на удаленные сильные земле-

- трясения методом частичных отражений // Геомагнетизм и аэронаука. 1997. Т. 37. № 4. С. 169.
3. Гритчин А.И., Дорохов В.Л., Концевая Л.Г. и др. Стационарный комплекс аппаратуры для исследования нижней ионосферы методом частичных отражений // Вестник Харьк. ун-та. Радиофизика и электроника. 1988. № 318. С. 21.
  4. Belrose J.S., Burke M.J. Study of the lower ionosphere using partial reflection. 1. Experimental technique and method of analysis // J. Geophys. Res. 1964. V. 69. № 13. P. 2799.
  5. Гармаш К.П., Черногор Л.Ф. Профили электронной концентрации D-области ионосферы в спокойных и возмущенных условиях по данным частичных отражений // Геомагнетизм и аэронаука. 1996. Т. 36. № 2. С. 75.
  6. Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973. 272 с.
  7. Сорокин В.М., Федорович Г.В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. М.: Энергия, 1982. 135 с.
  8. Руденко Г.В. Возбуждение ионосферного МГД-волновода подземными токами в зоне подготовки землетрясений // Геомагнетизм и аэронаука. 1985. Т. 25. № 5. С. 799.
  9. Гармаш К.П., Розуменко В.Т., Черногор Л.Ф. Исследование при помощи частично-отраженных радиосигналов параметров потоков энергичных частиц в среднеширотной нижней ионосфере. XIX Всероссийская конференция "Распространение радиоволн" / Тез. докл. Казань, 22–25 июня 1999. С. 141.
  10. Данилов А.Д. Популярная аэронаука. Л.: Гидрометеониздат, 1989. 230 с.
  11. Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. М.: Наука, 1983. 192 с.
  12. Харгривс Дж.К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. Л.: Гидрометеониздат, 1982. 352 с.
  13. Кнут Р., Вюрцбергер И. Ионосферные возмущения на средних широтах, вызванные частицами высоких энергий // Геомагнетизм и аэронаука. 1976. Т. 16. № 4. С. 666.
  14. Лаитовичка Я., Фёдорова Н.И. Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 3. Необычное среднеширотное ионосферное возмущение корпускулярного происхождения // Геомагнетизм и аэронаука. 1976. Т. 16. № 6. С. 1018.
  15. Кнут Р., Фёдорова Н.И. Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 4. Высыпание энергичных частиц во время бухтообразного возмущения среднеширотной D-области ионосферы // Геомагнетизм и аэронаука. 1977. Т. 17. № 5. С. 856.
  16. Гокос А.М., Гритчин А.И. Характеристики некоторых возмущений в D-области ионосферы во время магнитных бурь и солнечных вспышек // Космич. исслед. 1996. Т. 34. № 6. С. 585.
  17. Гармаш К.П., Костров Л.С., Розуменко В.Т. и др. Глобальные возмущения ионосферы, вызванные стартом ракеты, на фоне магнитной бури // Геомагнетизм и аэронаука. 1999. Т. 39. № 1. С. 72.

#### ПРИНТИ

Исследования выполнены в рамках гранта РФФИ № 01-02-01001. Авторы благодарят В.М. Сорокина за предоставление данных наблюдений с аппаратуры ФИС-М. Авторы благодарят Л.Ф. Черногор за предоставление данных наблюдений с аппаратуры ФИС-М. Авторы благодарят Л.Ф. Черногор за предоставление данных наблюдений с аппаратуры ФИС-М. Авторы благодарят Л.Ф. Черногор за предоставление данных наблюдений с аппаратуры ФИС-М.

Авторы: К.П. Гармаш, В.Т. Розуменко, Л.Ф. Черногор, А.М. Гокос, Л.С. Костров, А.И. Гритчин.

#### REFERENCES

Belrose J.S., Burke M.J. Study of the lower ionosphere using partial reflection. 1. Experimental technique and method of analysis // J. Geophys. Res. 1964. V. 69. № 13. P. 2799.

Гармаш К.П., Черногор Л.Ф. Профили электронной концентрации D-области ионосферы в спокойных и возмущенных условиях по данным частичных отражений // Геомагнетизм и аэронаука. 1996. Т. 36. № 2. С. 75.

Гуревич А.В., Шварцбург А.Б. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1973. 272 с.

Данилов А.Д. Популярная аэронаука. Л.: Гидрометеониздат, 1989. 230 с.

Лаитовичка Я., Фёдорова Н.И. Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 3. Необычное среднеширотное ионосферное возмущение корпускулярного происхождения // Геомагнетизм и аэронаука. 1976. Т. 16. № 6. С. 1018.

Кнут Р., Вюрцбергер И. Ионосферные возмущения на средних широтах, вызванные частицами высоких энергий // Геомагнетизм и аэронаука. 1976. Т. 16. № 4. С. 666.

Кнут Р., Фёдорова Н.И. Международные координированные измерения геофизических эффектов солнечной активности в верхней ионосфере. 4. Высыпание энергичных частиц во время бухтообразного возмущения среднеширотной D-области ионосферы // Геомагнетизм и аэронаука. 1977. Т. 17. № 5. С. 856.

Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. М.: Наука, 1983. 192 с.

Руденко Г.В. Возбуждение ионосферного МГД-волновода подземными токами в зоне подготовки землетрясений // Геомагнетизм и аэронаука. 1985. Т. 25. № 5. С. 799.

Сорокин В.М., Федорович Г.В. Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме. М.: Энергия, 1982. 135 с.

Харгривс Дж.К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи. Л.: Гидрометеониздат, 1982. 352 с.