

УДК 551.510

Н. И. Дзюбенко, В. Н. Ивченко, Л. В. Козак

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Вариации температуры над очагом землетрясения по измерениям спутника UARS

Надійшла до редакції 26.09.01

Проведено пошук можливого відгуку температури верхньої атмосфери на близький землетрус. Проаналізовано температурні профілі, отримані супутником UARS за період з 24 грудня 1991 р. до 12 квітня 1994 р. над осередками землетрусів з магнітудою $M \geq 6$. Кількість таких землетрусів на суші і в шельфовій зоні протягом вказаного проміжку часу склала 215. При обробці використовувався метод накладання епох. Отримано зниження температури над осередками розглянутих землетрусів на висотах 111—270 км. На менших висотах, навпаки, переважає тенденція підвищення температури в періоди високої сейсмічної активності.

ВВЕДЕНИЕ

Известно довольно много наблюдательных фактов, которые прямо или косвенно указывают на литосферно-ионосферные связи, в частности на отклики в ионосфере и верхней атмосфере на близкое землетрясение. Неоднократно наблюдались и анализировались свечение атмосферы [10], возмущение атмосферного электрического потенциала, вариации электронной концентрации в E- и F-слоях ионосферы [6, 7, 9]. С другой стороны, известна реакция ионосферы на действие акусто-гравитационных волн, которые возникают при землетрясениях, извержениях вулканов и мощных взрывах [1]. Со спутников неоднократно регистрировались аномальные низкочастотные излучения в F-слое ионосферы над эпицентрами землетрясений [8], широкомасштабные неоднородности ионосферной плазмы, вариации потоков энергичных частиц, которые высыпаются в ионосферу из радиационных поясов [9].

Механизмы переноса энергии от области землетрясения в верхнюю атмосферу изучены недостаточно. Среди тех, которые рассматривались до сих пор и которые могли бы вызвать вышеупомянутые эффекты, можно выделить два. Во-первых, локальный парниковый эффект, обусловленный увеличением потока ИК-излучения, идущего от Земли [6]. Во-вторых, генерация низкочастотных волн, которые распространяются от очага вверх. Эти меха-

низмы могут приводить к возбуждению турбулентных движений в атмосфере, изменению концентрации ионов и электронов, интенсификации химических процессов. Очевидно, упомянутые явления должны вызвать, кроме описанных ранее процессов, ряд других, которые изучены менее детально. Например, согласно работам [2, 3] турбулентность приводит к переносу тепловой энергии с нижней термосферы в область мезопаузы за счет турбулентной теплопроводности, а также приводит к нагреванию этой области атмосферы за счет вязкой диссипации энергии турбулентных движений. В нижней термосфере Земли турбулентное нагревание и охлаждение в значительной мере компенсируют друг друга [2, 3]. На высотах выше 100—107 км преобладает охлаждение, а ниже — нагревание. Нижняя термосфера довольно устойчива к внешним воздействиям — здесь возможно поглощение заметных потоков энергии (до $2 \cdot 10^{-7}$ Дж·см⁻²·с⁻¹) без заметного повышения температуры, чего нельзя сказать о более высоких слоях атмосферы. Таким образом, изменение коэффициента турбулентного переноса, обусловленное землетрясением, может приводить к деформации высотного температурного профиля.

Ниже на основе спутниковых измерений мы исследуем характер воздействия землетрясений на изменение температуры в верхней атмосфере.

Ход температуры с высотой испытывает существенные пространственно-временные изменения.

Среди факторов, которые влияют на температуру ионосферы, согласно [11], можно выделить:

- спорадические и периодические вариации, связанные с солнечной активностью (11-летний цикл, 27-суточные изменения);
- вариации, которые связаны с геомагнитной активностью;
- сезонно-широтные вариации;
- суточные вариации;
- флюктуации плотности, которые связаны с гравитационными волнами.

Кроме того, локальное изменение температурных профилей может быть вызвано извержениями вулканов, техногенными катастрофами и т. д.

Ниже 100 км в ионосфере изменения температуры, как уже упоминалось, малы. На больших же высотах имеем заметные суточные вариации температурных профилей. Количество факторов, которые влияют на энергетическое состояние атмосферы и формируют температурные профили, очень большое. Это и поглощение УФ-излучения Солнца и энергии частиц, которые выпадают из магнитосферы, химические реакции, джоулево нагревание, диссипация энергии магнитогидродинамических и внутренних гравитационных волн, другие волновые движения, молекулярно-турбулентная теплопроводность, турбулентное нагревание и охлаждение. Очевидно, что среди такого количества формирующих факторов и при таком разбросе значений температуры выделить влияние землетрясения очень сложно. Требования, которые предъявляются к выборке землетрясений и температурных измерений, становятся довольно жесткими. Магнитуда исследуемого землетрясения должна быть достаточно большой. Зона измерения температуры атмосферы должна быть достаточно близкой к эпицентру землетрясения. Измеренный возмущенный профиль должен сравниваться с некоторым фоновым профилем с учетом воздействия других факторов не сейсмического происхождения. Все эти требования, по возможности, учитывались в дальнейшей обработке данных.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Для исследования вариаций температуры в верхней атмосфере мы использовали каталоги землетрясений и спутниковые измерения температуры за 1991-1994 гг. Температурные данные взяты из архива GSFC DAAC (NASA Goddard Space Flight Center Distributed Active Archive Center). Они были получены в рамках проекта UARS (Upper Atmospheric Research Satellite) [14]. Это совместный

проект, спонсируемый Канадским космическим агентством и Французским центром в сотрудничестве с NASA. Спутник UARS был запущен 12 сентября 1991 г.; орбита — почти круговая, средняя высота полета 585 км, наклон 57°. На спутнике измерялись вертикальные профили температуры, перемещение некоторых газов, горизонтальные составляющие скорости ветра, потоки солнечной энергии.

Мы использовали значения температуры, полученные с помощью прибора WINDII (WIND Imaging Interferometer). Он измеряет ветер, температуру и коэффициент эмиссии в диапазоне высот 80 — 300 км. По своему устройству WINDII — это оптический интерферометр Майкельсона с девятью фильтрами для выбора эмиссии. Наблюдения производятся над земным лимбом двумя телескопами, которые расположены под углами 45° и 135° относительно вектора скорости спутника. Поле зрения каждого телескопа охватывает 4° по горизонтали и 6° по вертикали. Некоторый объем атмосферы попадает последовательно в поле зрения обоих телескопов приблизительно через 7 мин. Измеряемые параметры считаются неизменными на протяжении указанного промежутка времени.

Высотный профиль температуры определялся из измерений фотохимического свечения следующих эмиссионных линий [16]:

- в верхней мезосфере — OH;
- в нижней термосфере — O₂, O(¹S);
- в средней термосфере — O(¹S), O(¹D), O(²P).

Параметры указанных линий и полос приведены в таблице.

Для высот ниже 95 км температурные профили определялись также и по измерению релеевского рассеяния [13, 14]. Сначала строился профиль изменения плотности с высотой, а по нему — температурный в предположении, что атмосфера вертикально стратифицирована и находится в гидростатическом равновесии.

Параметры эмиссионных линий, использовавшихся для измерений температуры

Эмиссия	Время жизни, с	λ, нм	h, км	Высота максимальной интенсивности, км
Зеленая линия O(¹ S)	0.8	557.7	< 80—110 > 150—300	97 200
Красная линия O(¹ D)	110	630.0	150—300	250
Полоса OH (8-3)	0.0042	730.0	80—110	87
Полоса O ₂ (0-0)	14	762.0	80—110	94
Линия O ⁺	5	732.0	200—300	150

Данные предоставлены в виде массивов температурных измерений в диапазоне высот 80—300 км с дискретностью 3—5 км по высоте, и 4° по широте.

Каталоги землетрясений взяты из базы данных National Earthquake Information Center World Data Center A for Seismology (United States Geological Survey National Earthquake Information Center) и с Northern California Earthquake Data Center CNSS (Council of the National Seismic System) Global Earthquake Catalog. Были отобраны землетрясения, которые происходили в разных регионах земного шара за период с 24 декабря 1991 г. до 12 апреля 1994 г. Выбирались мощные землетрясения с магнитудой не менее 6.0 баллов (выделение энергии $\lg E(\text{Дж}) \geq 17$).

МЕТОД ОБРАБОТКИ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В список для анализа включены 215 землетрясений. Сюда вошли землетрясения, для которых были одновременные спутниковые измерения температурных профилей в термосфере. Вдобавок эти землетрясения размещены на материке или шельфовой зоне, поскольку, согласно [9], есть основания считать, что воздействие на ионосферу землетрясений, которые происходят на море, менее существенно. При обработке использовался метод наложения эпох. Для этого рассматривались температурные возмущения, которые имели место некоторое время до и после начала каждого выбранного землетрясения. Все ряды сводились к одному временному началу координат — моменту главного удара («накладывались»).

Анализ температурных вариаций производился в пределах эпицентральных расстояний менее 600 км.

Для каждого землетрясения определялись отклонения температуры ΔT от ее фонового значения $T_{\text{ф}}$, которое получалось из тех же измерений для соответствующих высот на временном интервале от -15 до -5 сут относительно начала землетрясения. В нескольких случаях, если после рассматриваемого землетрясения не было мощных толчков, фоновое (среднее) значение определялось в диапазоне от -15 до -5 и от +5 до +10 сут по отношению к землетрясению. Считалось, что на интервале времени больше 5 сут от начала землетрясения воздействие последнего на атмосферу несущественно. Чтобы по возможности исключить суточное изменение температуры (день — ночь), в отдельности находили среднюю фоновую температуру для ночных и дневных измерений. Разделение производилось по зенитному углу Солнца для каждого изме-

рения. Возмущение температуры определялось, таким образом, для каждой высоты во временном интервале ± 5 сут от начала землетрясений. При таком определении температуры в значительной мере исключается влияние таких факторов, как суточные вариации и сезонно-широтные изменения температуры. В статистической процедуре наложения эпох использовались относительные отклонения температуры $\Delta T/T_{\text{ф}}$. Весь диапазон высот был разбит на поддиапазоны: 81—96 км, 99—108 км, 111—150 км та 155—270 км.

На рис. 1, а для рассмотренных интервалов высот представлена среднестатистическая зависимость $\Delta T/T_{\text{ф}}$ для интервала времени ± 5 сут. Результаты представлены в виде гистограмм с интервалом 6 ч. Цифрами указано количество измерений, которые накопились в каждом интервале. Отмечается в целом понижение температуры после землетрясения в диапазоне высот 111—270 км. Также имеет место повышение температуры на высотах 81—96 км, которое начинается за несколько часов до землетрясения и длится после него.

Для большей наглядности на рис. 1, б распределения $\Delta T/T_{\text{ф}}$ получены скользящим усреднением с временным окном 9 ч и шагом 1 ч. Как видно из графиков, понижение температуры на высотах 111—270 км наблюдается после землетрясения и длится более трех суток. Оказалось, что повышение температуры для высот 81—96 км соответствует в основном ночным измерениям (рис. 2).

Детальный анализ показал, что наиболее значительные изменения температуры над очагами землетрясений относятся к эпицентральных расстояниям 250—500 км.

Для того чтобы убедиться, что полученные эффекты вызваны именно землетрясениями, следует учесть другие возможные факторы, вызывающие изменение температуры — влияние солнечной и магнитной активности. Методом наложения эпох построен также ход зависимости чисел Вольфа и 3-ч Kp -индекса относительно начал землетрясений (рис. 3). Никаких существенных особенностей не обнаружено.

ВЫВОДЫ

Итак, можно отметить следующие изменения температуры верхней атмосферы, которые могут быть связаны с землетрясением:

- увеличение температуры атмосферы вблизи мезопаузы 81—96 км после главного толчка;
- общее уменьшение температуры на высотах 111—270 км после начала землетрясения;

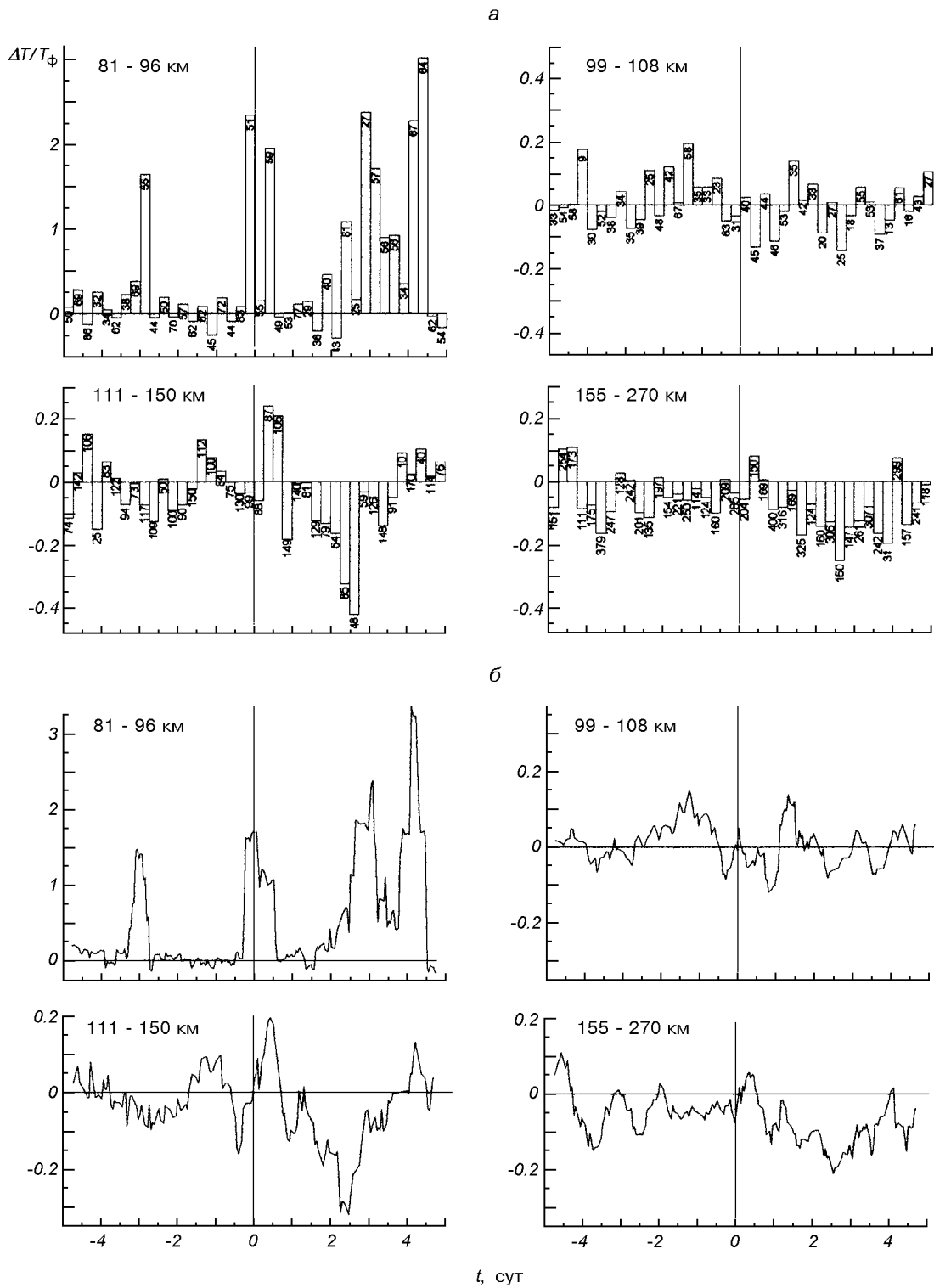


Рис. 1. Средние относительные отклонения температуры $\Delta T/T_\phi$ от фоновых значений на интервале времени ± 5 сут с дискретностью 6 ч (а) и при скользящем усреднении (б), центрированные на момент главного удара землетрясения для четырех высотных интервалов. Цифрами (а) указано количество измерений

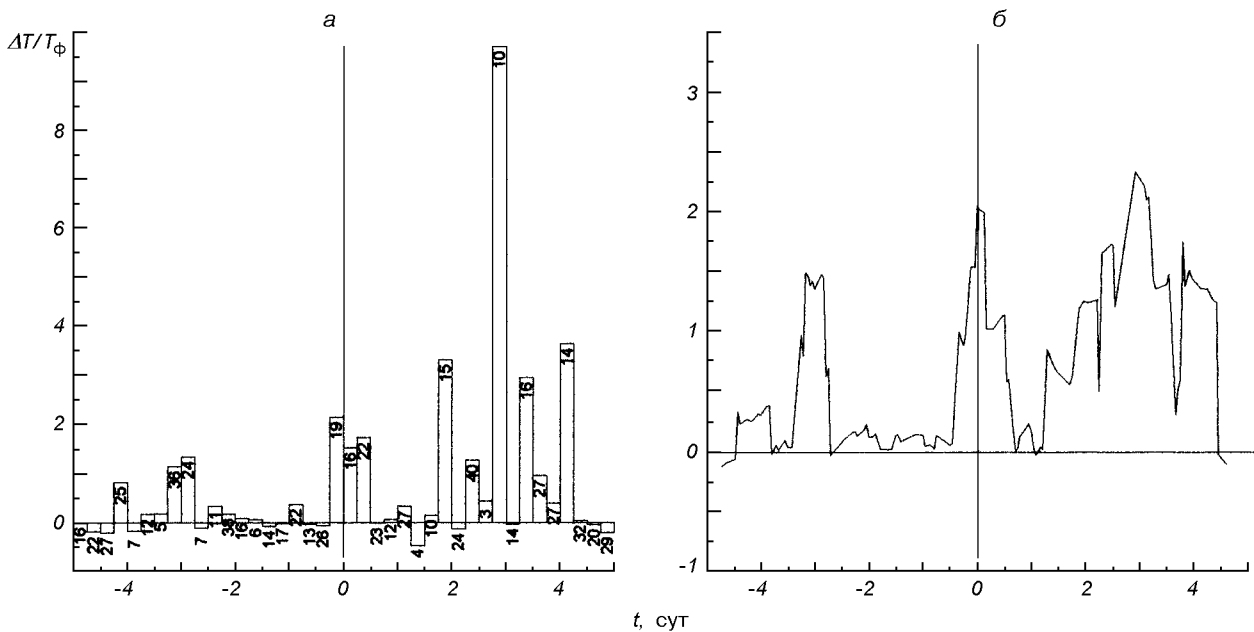


Рис. 2. Отклонение температуры от фоновых значений на интервале времени ± 5 сут от момента главного удара землетрясения для ночных измерений на высотах 81—96 км; *a* — усреднение с дискретностью 6 ч, *b* — скользящее сглаживание (окно 9 ч, шаг 1 ч)

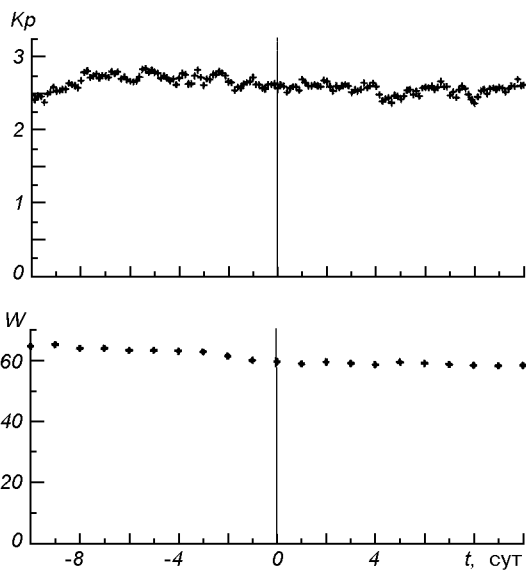


Рис. 3. Среднее изменение чисел Вольфа и 3-часового *Kp*-индекса относительно момента главного удара для всех выбранных землетрясений

— снижение температуры наиболее выражено в пределах кольцевой зоны на эпицентральных расстояниях 250—500 км;

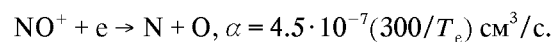
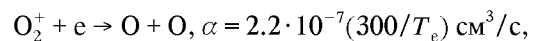
— для интервалов высот 111—150 км имеем понижение температуры перед землетрясением и повышение сразу после него;

— изменение температурных профилей наблюдается, в основном, в течение 4 сут после начала землетрясения.

Для большинства землетрясений все перечисленные температурные эффекты не могут быть объяснены ходом солнечной и геомагнитной активности.

Полученные результаты хорошо согласуются с моделью трансформации температурного профиля нижней термосферы в условиях увеличения коэффициента турбулентной теплопроводности [2].

С другой стороны, уменьшение температуры в слое E авроральной ионосферы над областями землетрясений позволяет объяснить другой сейсмоионосферный эффект — уменьшение яркости дискретных форм полярных сияний [12]. Известно, что основные ионы в E-слое ионосферы суть молекулярные ионы O_2^+ и NO^+ , которые рекомбинируют в процессах диссоциативной рекомбинации:



Кoeffициенты скорости этих реакций α увеличиваются при уменьшении температуры атмосферы ($T_n \sim T_e$), что обуславливает уменьшение электронной концентрации. В результате уменьшается фоновая электропроводность на этих высотах, что приводит к уменьшению яркости дискретных форм полярных сияний.

Феноменологическая модель связи в системе литосфера—ионосфера следующая: во время землетрясения, а в некоторых случаях и на стадии его подготовки в сейсмично активной области генерируются атмосферные внутренние гравитационные волны, которые достигают ионосферных высот и там диссипируют. Значительная часть энергии этих волн идет на интенсификацию турбулентности атмосферы на высотах мезопаузы ($h \approx 80$ км) и нижней термосферы. Увеличение коэффициента турбулентного переноса на этих высотах обуславливает существенную трансформацию высотного температурного профиля [2]: температура атмосферы в мезопаузе увеличивается, а выше уменьшается.

Работа выполнена при частичной поддержке INTAS грант №99-0078 и INTAS-CNES грант № 97-1769.

1. Альперович Л. С., Гохберг М. Б., Сорокин В. М. и др. О генерации геомагнитных вариаций акустическими колебаниями во время землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли.—1979.—№ 3.—С. 58—68.
2. Гордиец Б. Ф., Куликов Ю. Н. О роли турбулентности и инфракрасного излучения в тепловом балансе нижней термосферы // Тр. ФИАН: Инфракрасная спектроскопия космического вещества и свойства среды в космосе. — М.: Наука, 1982.—Т. 130.—С. 29—52.
3. Гордиец Б. Ф., Куликов Ю. Н., Марков М. Н. и др. Численное моделирование нагрева и охлаждения газа в околоземном космическом пространстве // Тр. ФИАН: Инфракрасная спектроскопия космического вещества и свойства среды в космосе. — М.: Наука, 1982.—Т. 130.—С. 3—28.
4. Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Герасимович Э. А. и др. Оперативные электромагнитные предвестники землетрясений. — М.: Наука, 1985.—155 с.
5. Гохберг М. Б., Пилипенко В. А., Похотелов О. А. Наблюдения со спутника электромагнитного излучения над эпицентральной областью готовящегося землетрясения // ДАН СССР.—1982.—268, № 1.—С. 56—58.
6. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Литосферно-ионосферная связь и ее моделирование // Российский журнал наук о Земле.—2000.—2, № 1.
7. Дзубенко М. І., Козак Л. В. Збудження іоносфери під час близького землетрусу // Вісник Київського Університету. Астрономія.—2000.—Вип. 36.—С. 63—65.

8. Ларкина В. И., Наливайко А. В., Гершензон Н. И. и др. Наблюдения на спутнике «Интеркосмос-19» ОНЧ-излучений, связанных с сейсмической активностью // Геомагнетизм и аэрономия.—1983.—23, № 5.—С. 842—846.
9. Липеровский В. А., Похотелов О. А., Шалимов С. Л. Ионосферные предвестники землетрясений — М.: Наука, 1992.—304 с.
10. Фишкова Л. М., Торошелидзе Т. И. Отображение сейсмической активности в вариациях свечения ночного неба // Полярные сияния и свечение ночного неба. — М.: Наука, 1989.—№ 33.—С. 17—23.
11. CIRA 1972 COSPAR International Reference Atmosphere (CIRA). — Berlin: Akademie-Verlag, 1972.
12. Dzubenko M. I., Kozak L. V. A search of correlation between aurora activity and near earthquakes // International Workshop on Seismo Electromagnetics, 2000 of NASDA. — Tokyo: University of Electro-Communications, 2000.—P. 161.
13. Evans W. F. J., Laframboise L. R., Shepherd G. G. Mesospheric temperatures from Rayleigh scattering measurements by the WINDII instrument on UARS // Adv. Space Res.—1994.—14, N 9.—P. 285—288.
14. Reber C. A., Trevathan C. E., McNeal R. J., et al. The Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) Mission // J. Geophys. Res.—1993.—98, N D6.—P. 10643—10647.
15. Sheherd G., Dudhia A., Lopez-Puertas M., et al. Upper mesosphere temperatures in summer: WINDII observations and comparisons // Geophys. Res. Letters.—1997.—24, N 4.—P. 357—360.
16. Shepherd G., Thuillier G., Gault W. A., et al. WINDII — The wind imaging interferometer on the upper atmosphere research satellite // J. Geophys. Res.—1993.—98.—P. 10725—10750.

TEMPERATURE VARIATIONS OVER EARTHQUAKE EPICENTERS FROM OBSERVATIONS OBTAINED BY THE UARS SATELLITE

M. I. Dzubenko, V. M. Ivchenko, L. V. Kozak

The search for a possible response of the upper atmosphere temperature to a nearby earthquake was carried out. The temperature profiles obtained by the UARS satellite from 24 December 1991 till 12 April 1994 over earthquake epicenters with magnitudes not less than 6 ($M \geq 6$) were analyzed. In all, 215 earthquakes were analysed. We used the epoch superposition method for the calculations. Among the results obtained we may note a temperature decrease over earthquake epicenters at altitudes of 111—270 km. At lower altitudes we can see temperature rises at the moments of high seismic activity.