

УДК 551.510

Л. В. Козак, В. Н. Ивченко

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Изменения ветра в верхней атмосфере над землетрясениями по спутниковым измерениям

Надійшла до редакції 27.06.02

Проведено пошук можливої зміни горизонтальної складової швидкості вітру в діапазоні висот 80—300 км над осередками землетрусів. Використані дані вимірювань з 24 грудня 1991 р. до 12 квітня 1994 р. за допомогою приладу WINDII, встановленого на супутнику UARS. Аналізувались 234 землетруси з магнітудою понад 6 балів. Проводився пошук загальних тенденцій для всіх землетрусів методом накладання епох, а також вивчались зміни вітру над кожним конкретним землетрусом, для чого будувалися карти вітрів на висоті 90 км. Відмічено підсилення вітру на висотах 81—102 км, 135—250 км і збурення радіальної складової швидкості вітру відносно епіцентра землетрусу на висотах 125—260 км, яке має максимум за добу до землетрусу. Можливим механізмом передачі збурення від землетрусу у верхню атмосферу є генерація і розповсюдження внутрішніх гравітаційних хвиль.

ВВЕДЕНИЕ

Многие наблюдения указывают на литосферно-ионосферные связи. В верхней атмосфере над очагами землетрясений наблюдались вариации электронной концентрации в E- и F-слоях [9, 10], свечения [14], изменения яркости дискретных форм полярных сияний [15], аномальные низкочастотные излучения в F-слое ионосферы [9], а также широкомасштабные неоднородности ионосферной плазмы и вариации потоков энергичных частиц, которые выпадают в ионосферу из радиационных поясов [5]. Особенности изменения скорости ветра над областью землетрясения рассмотрены в работе [14], где приведено значение скорости ветра на высоте 300 км. Значение ветра определялось из наблюдений эмиссии 630 нм с помощью трехазимутального электрофотометра на Абастуманской обсерватории.

До сегодняшнего дня не существует общепринятой точки зрения, позволяющей интерпретировать наблюдения ионосферных аномалий над сейсмиче-

ски активными регионами. Среди возможных механизмов передачи возмущения от очага землетрясения в ионосферу обсуждаются: УНЧ-волны (0.3—3 кГц) [8], инфразвуковые колебания, аномалии в постоянном и низкочастотном электрических полях, высокочастотное электромагнитное излучение, внутренние гравитационные волны. Так, трансформацией УНЧ-волн, генерируемых в процессах смещения и разрушения пород вдоль активных разломов перед землетрясением, в ОНЧ-колебания (3—30 кГц) объясняют вариации свечения верхней атмосферы [16]. Те же вариации свечения связаны с диссипацией инфразвука, предположительно излучаемого из эпицентра землетрясения непосредственно перед событием [13].

В определенной мере каждый из этих подходов заслуживает внимания, тем не менее в последнее время специалисты все больше склоняются к тому, что именно внутренние гравитационные волны (ВГВ) могут обеспечить основной канал передачи энергии от областей сейсмической активности к ионосферным высотам [6, 11]. Источником ВГВ в

эпицентральной области могут быть долгопериодические колебания земной коры, нестационарные газовыделения, локальный парниковый эффект.

Ниже мы исследуем возможное воздействие землетрясения на термосферную циркуляцию (область выше 80 км). Будут рассмотрены крупномасштабные движения нейтрального газа, медленно изменяющиеся во времени (горизонтальные ветры).

Изменение термосферной циркуляции определяется процессом поглощения солнечного УФ-излучения [12], диссипацией волн, распространяющихся из плотной нижней атмосферы, а также динамическими процессами, в результате которых происходит перераспределение тепла от неоднородно распределенных источников. Это далеко не полный перечень факторов, которые определяют динамику верхней атмосферы.

Очевидно, что выявление эффектов, связанных с сейсмической активностью, достаточно сложная задача. Необходимо, чтобы землетрясение было мощным, а измерения составляющих скорости ветра в области данного землетрясения охватывали длительный период времени. Кроме того, особенности, вызванные землетрясением, могут маскироваться возмущениями другого происхождения, в частности солнечной и геомагнитной активностью, сезонно-широтными вариациями, суточными изменениями.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Для поиска изменений термосферной циркуляции над землетрясениями использованы каталоги землетрясений и спутниковые измерения горизонтальных составляющих скорости ветра за период с декабря 1991 по апрель 1994 гг. Использовались предоставленные нам измерения скорости ветра, полученные с помощью прибора WINDII (Wind Imaging Interferometer), который был установлен на спутнике UARS [(Upper Atmospheric Research Satellite) [17]. Данный прибор проводил измерения горизонтальных составляющих скорости ветра (раздельно приведены зональная и меридиональная составляющие) в диапазоне высот 80—300 км. Измерения представлены с дискретностью 4° по широте и 3—5 км по высоте.

WINDII — оптический интерферометр Майкельсона с девятью фильтрами, которые обеспечивают наблюдения в отдельных эмиссиях [14]. Наблюдения производились 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. Каждый из телескопов мог измерять

ветер в диапазоне высот от 80 до 300 км. При движении спутника по орбите некоторый объем атмосферы попадает последовательно в поле зрения обоих телескопов приблизительно через семь минут. Измеряемые параметры предполагались неизменными в течение указанного промежутка времени. Погрешность высотной привязки составляет ± 1 км.

В основе метода определения ветра верхней атмосферы лежат интерферометрические наблюдения доплеровского смещения следующих эмиссионных линий [18]: в верхней мезосфере — λ 730 нм (OH); в нижней термосфере — λ 762 нм (O₂), λ 557.7 нм (O(¹S)); в средней термосфере — λ 630 нм (O(¹D)), λ 732 нм (O(²P));

Каталоги землетрясений взяты из базы данных National Earthquake Information Center World Data (US Geological Survey National Earthquake Information Center) [<http://neic.usgs.gov>]. Для анализа были отобраны мощные землетрясения с магнитудой более шести баллов, которые происходили в разных местах земного шара за период с 24 декабря 1991 г. до 12 апреля 1994 г. Всего рассмотрено 234 землетрясения, из них 73.5 % поверхностные (глубина очагов 0—70 км), 24 % промежуточные (70—300 км) и 2.5 % глубокие (в соответствии с [1]). Основными областями локализации землетрясений являются Тихоокеанский пояс островных дуг и горных хребтов и Альпийско-Гималайский пояс. Около 70 % рассмотренных землетрясений расположены в северном полушарии.

МЕТОД ОБРАБОТКИ ДАННЫХ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Использовались два подхода. В первом случае рассматривались усредненные по всем землетрясениям изменения горизонтальной составляющей ветра, во втором — изучались изменения ветра для конкретных землетрясений и определенного диапазона высот.

В первом случае рассмотрены 234 землетрясения, для которых имелись спутниковые наблюдения ветра. При обработке использовался метод наложения эпох. Для анализа рассматривались изменения скорости ветра в интервале времени ± 5 сут для каждого выбранного землетрясения. При этом все ряды данных сводились к одному временному началу координат — моменту главного удара землетрясения (нуль-пункт). Рассмотрение особенностей изменения меридиональной и зональной составляющих скорости ветра проводилось в эпицентральной зоне с радиусом 600 км. Анализировались отклонения составляющих скорости ветра ΔV от их фоно-

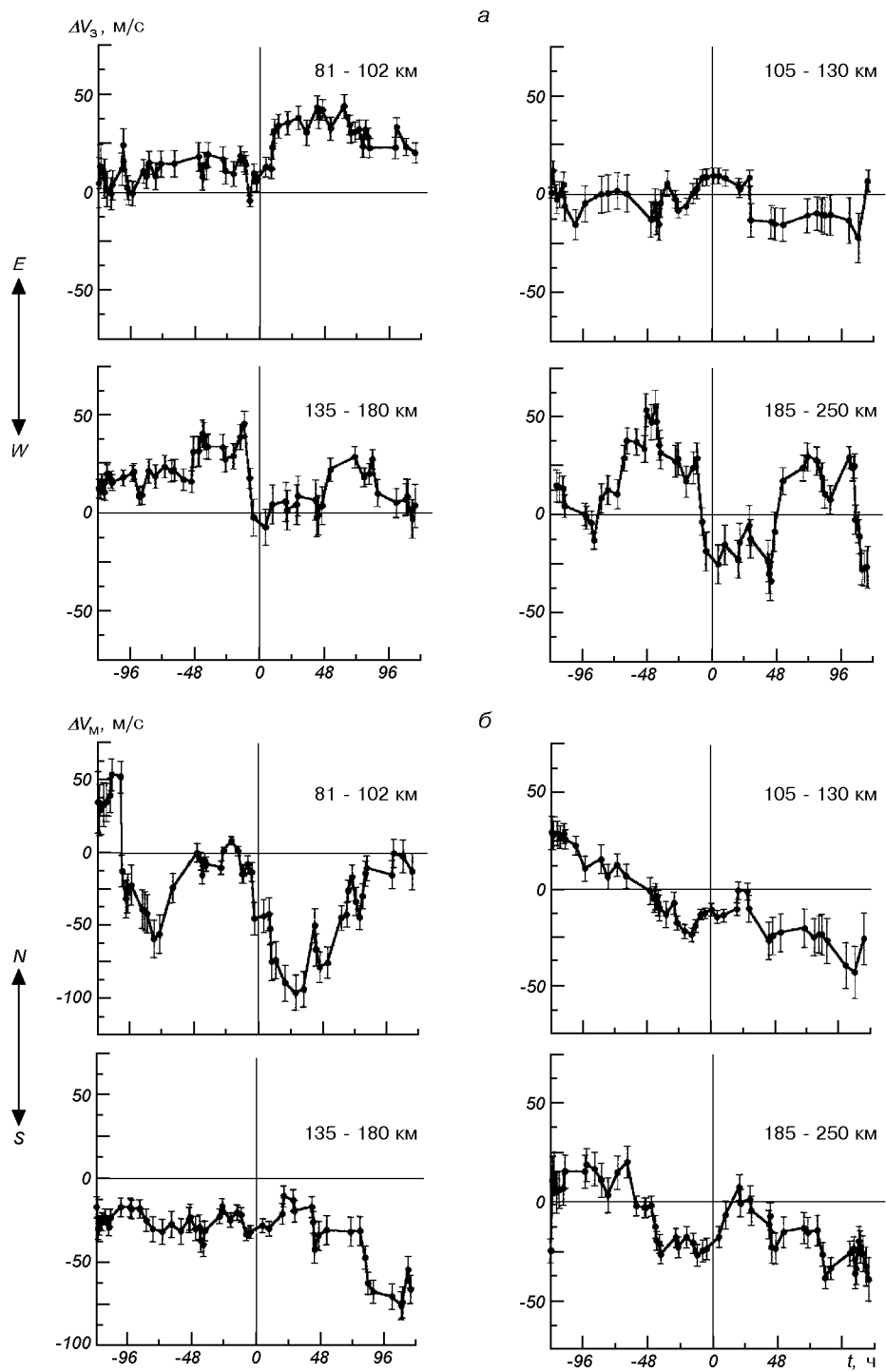


Рис. 1. Относительные отклонения зональной (а) и меридиональной (б) составляющих скорости ветра ΔV_z и ΔV_m от фонового значения (скользящее усреднение по 9-часовым интервалам) и их средние квадратичные погрешности на интервале времени ± 5 сут, центрированные на моменты главных ударов землетрясений для разных диапазонов высот

вого значения, которое определялось для соответствующих высот на временном интервале от -10 до -5 сут относительно начала землетрясения и при близких зенитных углах Солнца (допускались отклонения $\Delta z \leq 5^\circ$). При таком рассмотрении в значительной степени исключаются суточные и сезонно-широтные вариации. Для изучения вертикальной структуры отклика весь диапазон высот был разбит на поддиапазоны: 84—102, 105—130, 135—180, 185—210, 215—270 км. В каждом из поддиапазонов отклонения скорости сохраняют качественное подобие.

На рис. 1 представлены отклонения скорости ветра отдельно для зональной и меридиональной составляющих в пределах выделенных диапазонов высот. Кривая получена скользящим усреднением в 9-часовом временном окне.

Среди полученных результатов можно отметить: усиление зональной составляющей скорости ветра в направлении на восток на высотах 81—102 км после землетрясения, и, за несколько часов перед землетрясением, — на высотах 135—250 км. Для высот 105—130 км наблюдается небольшое усиление меридиональной составляющей на юг на фоне мало изменяющейся зональной составляющей. На высотах 135—180 км можно отметить усиление меридиональной составляющей скорости ветра на юг после землетрясения, а для диапазона высот 185—250 км еще и за сутки до землетрясения. На высотах 81—102 км имеет место сложная зависимость ΔV с преобладающим усилением на юг.

Для подтверждения того, что изменения зональной и меридиональной составляющих ветра являются следствием землетрясения, были учтены другие возможные факторы: солнечная и геомагнитная активность. На рис. 2 построен средний ход чисел Вольфа и трехчасового Кр-индекса относительно начала всех рассмотренных землетрясений (методом наложения эпох). Видно, что данные факторы не могут обусловить полученные изменения термосферной циркуляции.

Также были построены контрольные графики для зональной и меридиональной составляющих скорости ветра в отсутствии землетрясений. Произвольные точки выбирались в районах земного шара, где землетрясения происходят очень редко. Усреднение картины ветров выполнялось для тех моментов времени, когда происходили исследуемые нами землетрясения. Графики по 120 контрольным точкам (1992—1993 гг.) полученные для указанных выше диапазонов высот, представлены на рис. 3.

При рассмотрении изменений ветра для конкретных землетрясений были построены карты скорости ветра на высоте 90 км в пределах эпицентральных

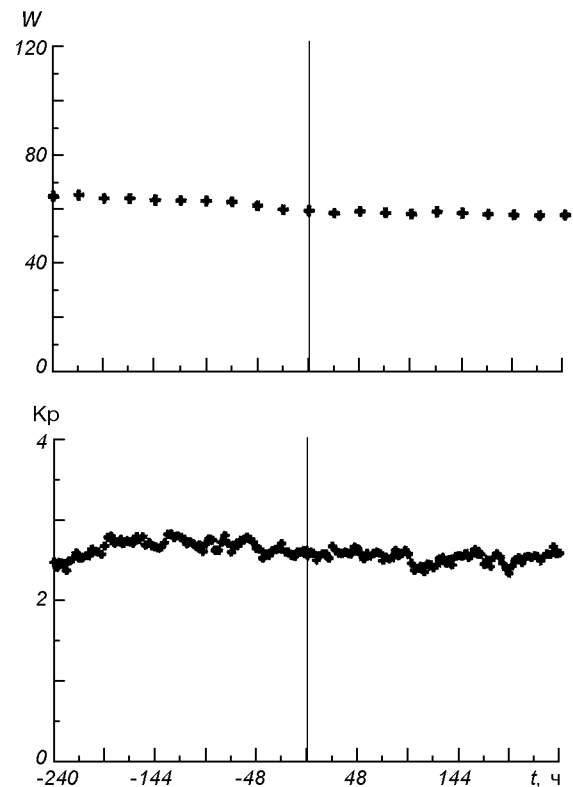


Рис. 2. Средние значения чисел Вольфа W и 3-часового Кр-индекса относительно моментов главных ударов для всех отобранных землетрясений

расстояний до 1000 км (рис. 4). Характеристики землетрясений (время, местоположение и глубина залегания очага) указаны внизу карт. Приведены карты для нескольких типичных землетрясений.

На рис. 4 представлена скорость горизонтального ветра для измерений, выполненных во временном интервале ± 10 сут относительно главного сейсмического удара. Длина стрелки соответствует модулю скорости ветра, ее масштаб согласован с масштабом карты (например, длина стрелки 100 км в масштабе карты соответствует скорости ветра 100 м/с). Цифрами возле стрелок указано время относительно момента землетрясения. Как видно из рис. 4, после землетрясения наблюдалось увеличение скорости ветра. Так, для землетрясения на островах Симба (*a*) наблюдалось значительное увеличение скорости ветра в моменты +17, +41 ч по сравнению со скоростями ветра за -124 , -78 ч до землетрясения. Особенностью карт *a* и *г* есть то, что ветры дуют вдоль берега. На карте *б* усиление ветра зафиксировано в моменты +10, +34 ч. Кроме того, в некоторых случаях, когда было достаточно

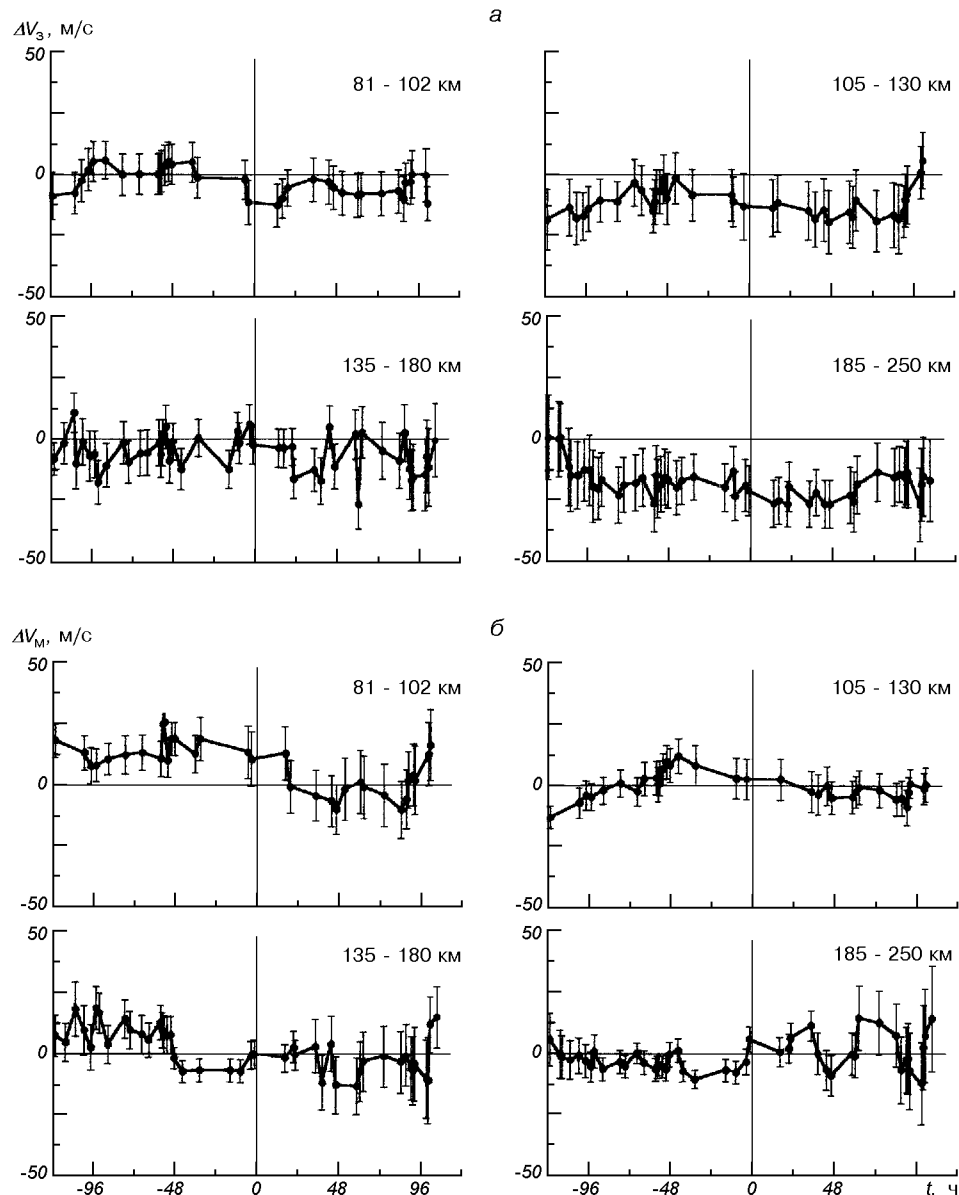


Рис. 3. То же, что на рис. 1, для контрольных точек (произвольные точки в местах, где землетрясения происходят очень редко)

измерений в пространственно близкой области для интервалов времени, включающих землетрясение, наблюдается изменение направления вектора скорости ветра — пары векторов $(-86, +9 \text{ ч})$, $(-87, -7 \text{ ч})$, $(-87, +7 \text{ ч})$ на рис. 4, г.

Чтобы детальнее изучить природу воздействия землетрясения на динамику верхней атмосферы, было рассмотрено изменение радиальной и тангенциальной составляющих скорости ветра относительно эпицентра. Методом наложения эпох по-

строены отклонения этих составляющих скорости ветра во временном интервале ± 5 сут для каждого землетрясения. Среднее значение, как и при рассмотрении зонального и меридионального ветра, определялось для соответствующих высот на временном интервале от -10 до -5 сут относительно начала землетрясения и при близких зенитных углах Солнца ($\Delta z \leq 5^\circ$), в радиальной зоне 600 км. Весь диапазон высот был разбит на поддиапазоны: 81—90 км, 93—99 км, 102—120 км и 125—260 км.

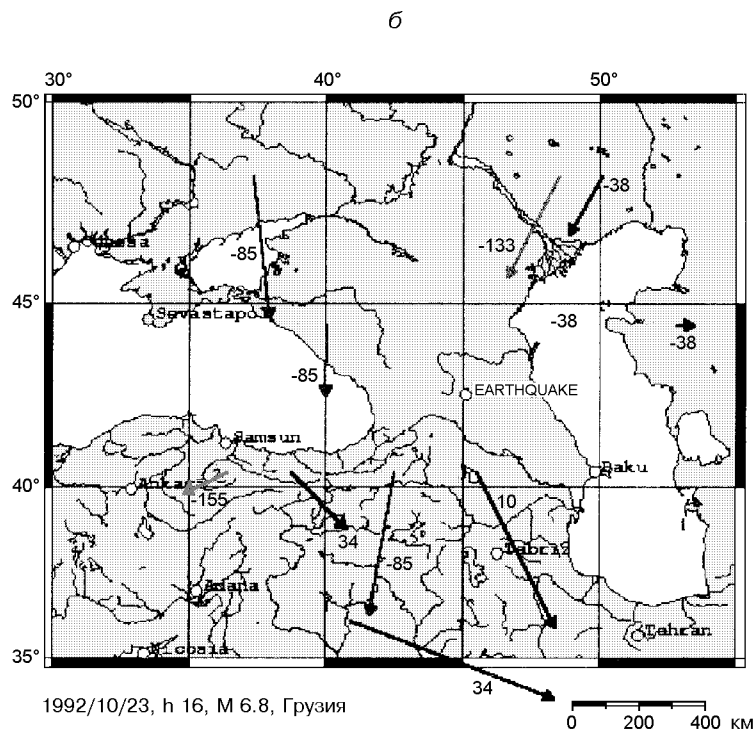
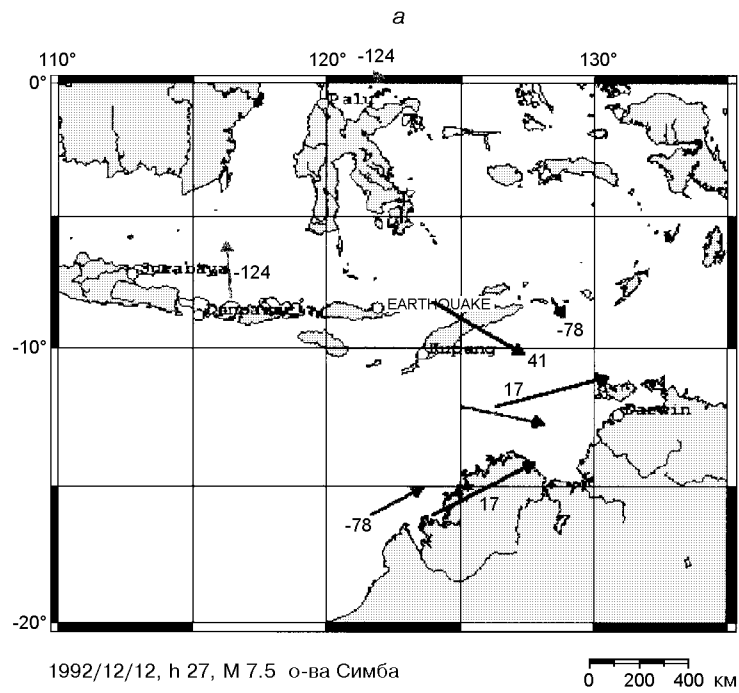


Рис. 4. Карты ветров для отдельных землетрясений на высоте 90 км. Эпицентры землетрясений указаны на картах (о Earthquake)

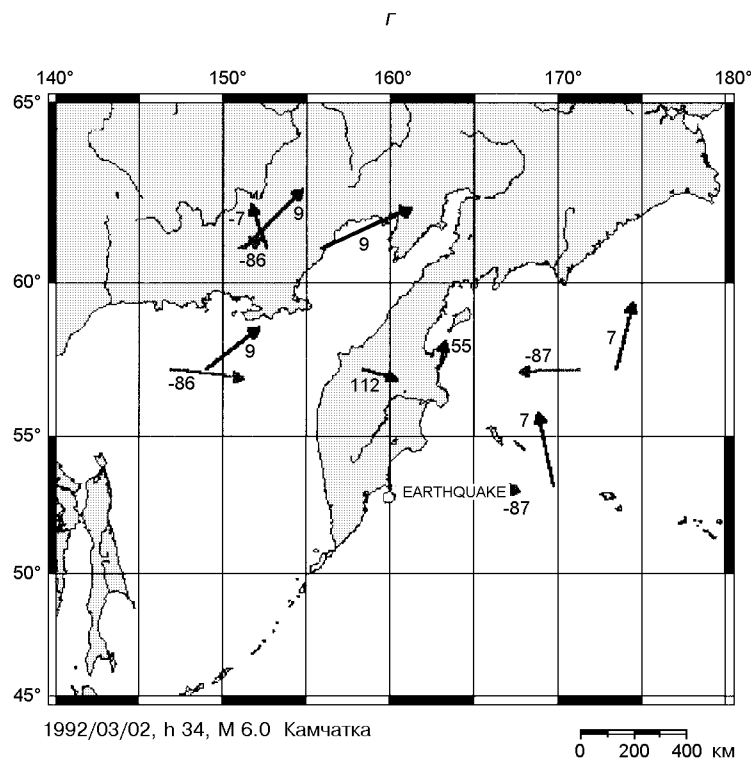
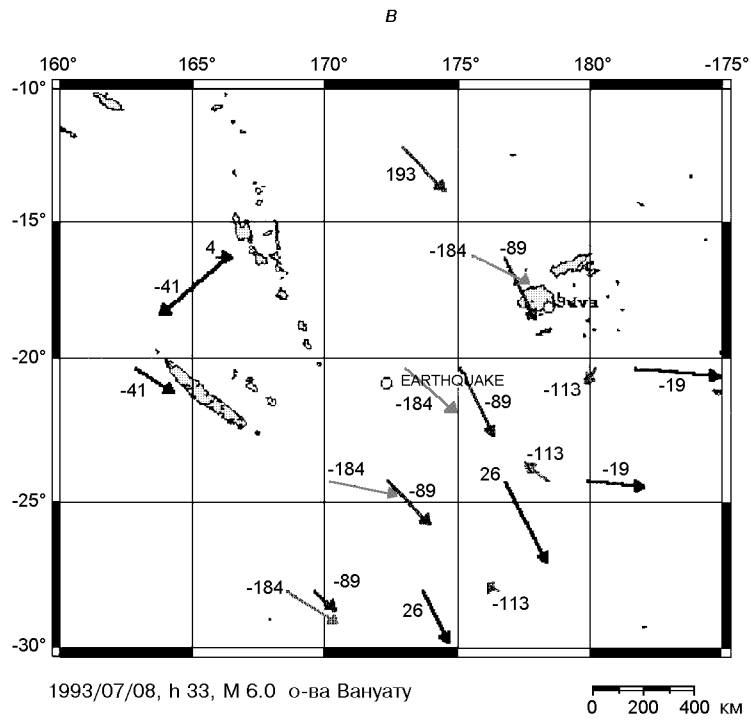


Рис. 4 (окончание)

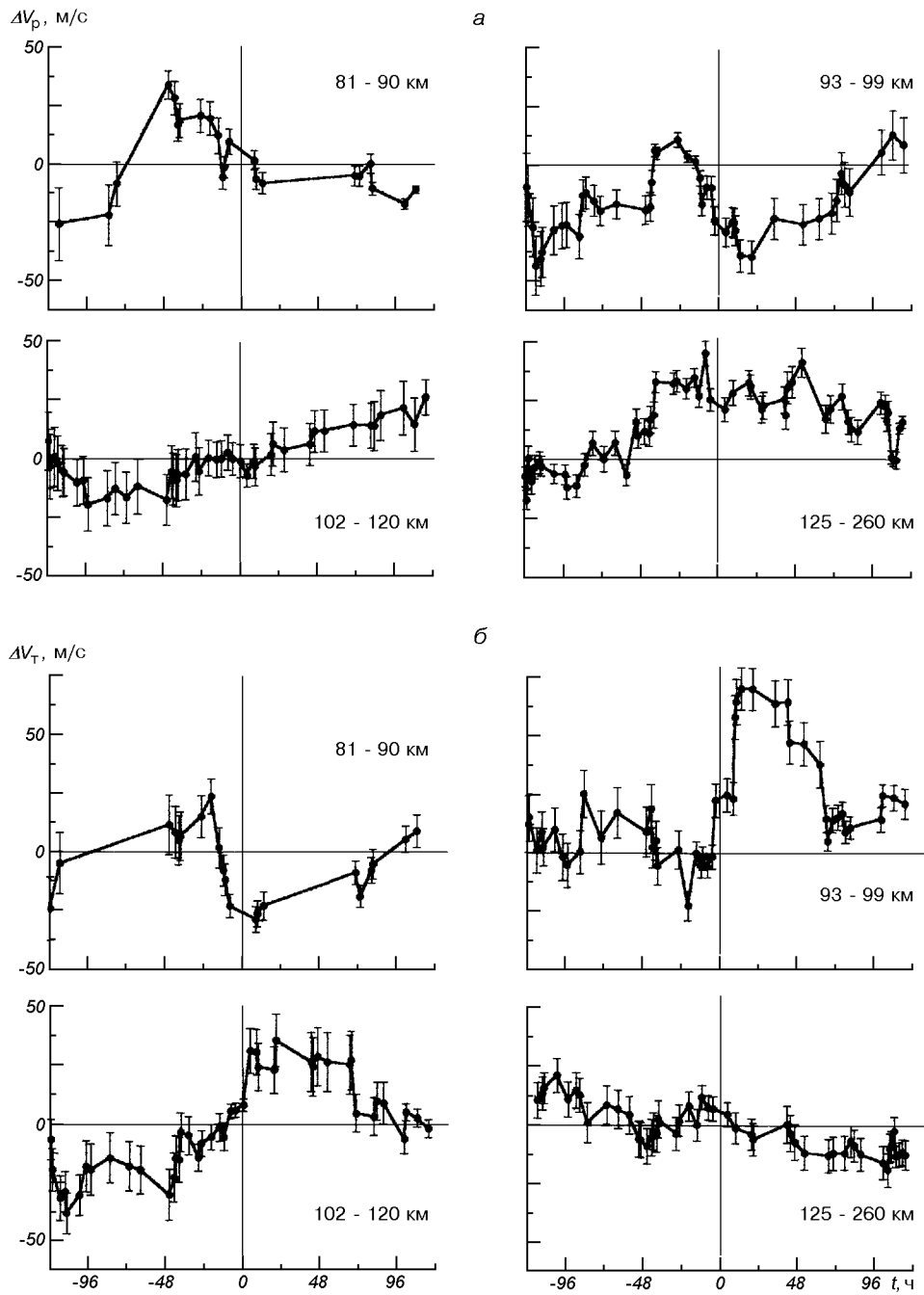


Рис. 5. Относительные отклонения радиальной (а) и тангенциальной (б) составляющих скорости ветра ΔV_p и ΔV_t от фонового значения (скользящее усреднение по 11-часовым интервалам) и их средние квадратичные погрешности на интервале времени ± 5 сут, центрированные на моменты главных ударов землетрясений для разных диапазонов высот

На рис. 5 для рассмотренных интервалов высот представлено отклонение ΔV для интервала времени ± 5 сут. Кривая получена скользящим усреднением по 11 часам.

На высотах 125—260 км наблюдается возмущение радиальной составляющей скорости $\Delta V_{\text{рад}}$, которое выражается в усилении ветра, если он направлен от землетрясения, и в уменьшении, если ветер был направлен к землетрясению. Продолжительность возмущения составляет около 4 сут с максимумом за сутки до землетрясения. Можно констатировать, что на квазистационарную систему ветров накладывается ветер в радиальном направлении от землетрясения.

Для тангенциальной составляющей на высотах 125—260 км подобных изменений не обнаружено.

На высотах 102—120 км радиальная составляющая скорости ветра не демонстрирует каких-либо особенностей, а тангенциальная показывает некоторое усиление после землетрясения.

На высотах 93—99 км радиальная и тангенциальная составляющие изменяются сложным образом: при усилении ветра от землетрясения (радиальная составляющая увеличивается) тангенциальная составляющая уменьшается, а при распространении ветра к землетрясению — увеличивается. Возможно это свидетельствует о вращении вектора скорости горизонтального ветра по часовой стрелке относительно эпицентра.

ВЫВОДЫ

Подводя итоги, можно отметить, что имеет место изменение горизонтальных составляющих скорости ветра над областями сильных землетрясений. В вариациях термосферной циркуляции выявлены следующие тенденции:

— на высотах 125—260 км в направлении от землетрясения наблюдается возмущение радиальной составляющей скорости ветра, которое имеет максимум за сутки до землетрясения.

— усиление зональной составляющей скорости ветра в направлении на восток на высотах 81—102 км после землетрясения, а на высотах 135—250 км — усиление еще за несколько часов до землетрясения;

— для меридиональной составляющей скорости ветра усиление на юг на высотах 135—250 км после землетрясения;

— усиление и изменение направления горизонтальной скорости ветра на высоте 90 км на эпицентральных расстояниях до 600 км в течение 3 сут после главного удара;

Механизмом переноса энергии от области землетрясения в верхнюю атмосферу могут быть ВГВ. Так, согласно работам Н. М. Гаврилова [2], ВГВ могут создавать динамическое воздействие на средний поток (ветер). В случае распространения волн в направлении среднего ветра они способны ускорять средний поток, а при распространении навстречу среднему ветру — тормозить.

Характерной особенностью ВГВ есть то, что при адиабатическом распространении вверх амплитуда их увеличивается, так как плотность среды с высотой уменьшается. Поэтому и выявить эти волны легче на больших высотах. Из-за того что атмосфера неизотермическая, то на высотах мезопаузы (90 км, наибольший градиент температуры) будет происходить частичная диссипация ВГВ (мелкомасштабная составляющая ВГВ затухает). Диссипируя, ВГВ усиливают атмосферную турбулентность, а это, в свою очередь, приводит к трансформации вертикального профиля температуры верхней атмосферы за счет интенсификации процессов турбулентного переноса и турбулентного нагревания [3, 4]. Увеличением турбулентности объясняют полочные изменения температуры в области землетрясения [7].

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

1. Ботт М. Внутреннее строение Земли. — М.: Мир, 1974.
2. Гаврилов Н. М., Юдин В. А. Численное моделирование распространения ВГВ от нестационарных тропосферных источников // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.—1987.—23, № 3.—С. 241—254.
3. Гордиец Б. Ф., Куликов Ю. Н. О роли турбулентности и инфракрасного излучения в тепловом балансе нижней термосферы // Инфракрасная спектроскопия космического вещества и свойства среды в космосе / Под ред. Н. Г. Басова. — М.: Наука, 1982.—С. 29—47.—(Тр. ФИАН, Т. 130).
4. Гордиец Б. Ф., Куликов Ю. Н., Марков М. Н., Маров М. Я. Численное моделирование нагрева и охлаждения газа в околоземном космическом пространстве // Инфракрасная спектроскопия космического вещества и свойства среды в космосе / Под ред. Н. Г. Басова. — М.: Наука, 1982.—С. 3—28.—(Тр. ФИАН, Т. 130).
5. Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Похотелов О. А. Сейсмоэлектроманнитные явления. — М.: Наука, 1988.—174 с.
6. Гохберг М. Б., Шалимов С. Л. Литосферно-ионосферная связь и ее моделирование // Российский журн. наук о Земле.—2000.—2, № 1.
7. Дзюбенко Н. И., Ивченко В. Н., Козак Л. В. Вариации температуры над очагами землетрясений по измерениям спутника UARS // Космічна наука і технологія.—2001.—7, № 5/6.—С. 94—99.
8. Колоколов Л. Е., Липеровская Е. В., Липеровский В. А. и др. Резкие расплывания спорадических слоев E среднеширотной ионосферы в периоды подготовки землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли.—1992.—7.—С. 101—109.

9. Ларкина В. И., Наливайко А. В., Гершензон Н. И. и др. Наблюдения на спутнике «Интеркосмос-19» ОНЧ-излучений, связанных с сейсмической активностью // Геомагнетизм и аэронавигация.—1983.—23, № 5.—С. 842—846.
10. Липеровский В. А., Похотелов О. А., Шалимов С. Л. Ионосферные предвестники землетрясений. — М.: Наука, 1992.—340 с.
11. Перцев Н. Н., Шалимов С. Л. Генерация атмосферных гравитационных волн в сейсмически активном регионе и их влияние на ионосферу // Геомагнетизм и аэронавигация.—1996.—36, № 2.—С. 111—118.
12. Термосферная циркуляция // Под ред. У. Уэбба. — М.: Мир, 1975.—350 с.
13. Торшелидзе Т. И., Фишкова Л. М. Анализ колебаний ночного излучения средней и верхней атмосферы, предшествующих землетрясениям // Докл. АН СССР.—1988.—302, № 2.—С. 313—316.
14. Фишкова Л. М. Торшелидзе Т. И. Отображение сейсмической активности в вариациях свечения ночного неба // Полярные сияния и свечение ночного неба.—1989.—№ 33.—С. 17—23.
15. Dzubenko M. I., Kozak L. V. A search of correlation between aurora activity and near earthquakes // Seismo electromagnetics lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling / Eds M. Hayakawa, O. A. Molchanov. — Tokyo: TERAPUB, 2002.—P. 333—335.
16. Molchanov O. A., Hayakawa M. Generation of ULF seismogenic electromagnetic emission: a natural consequence of microfracturing process // Electromagnetic phenomena related to earthquake prediction / Eds M. Hayakawa, Y. Fujinawa. — Tokyo: Terra Publ. Sci. Co., 1994.—P. 537—563.
17. Reber C. A., Trevathan C. E., McNeal R. J., Luther M. R. The Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) mission // J. Geophys. Res.—1993.—D98, N 6.—P. 10643—10647.
18. Shepherd G., Thuillier G., Gault W. A., et al. WINDII — The Wind Imaging Interferometer on the Upper Atmosphere Research Satellite // J. Geophys. Res.—1993.—D98.—P. 10725—10750.

WIND CHANGES IN UPPER ATMOSPHERE OVER EARTHQUAKES FROM SATELLITE MEASUREMENTS

L. V. Kozak, V. M. Ivchenko

We performed a search for a possible change of the horizontal component of the wind velocity at altitudes of 80—300 km over earthquake epicenters. We used the measurement data derived by the WINDII device set on the board of the UARS satellite from 24 December 1991 till 12 April 1994. We analysed 234 earthquakes with the magnitude more than 6. We tried to detect common tendencies for all earthquakes using the method of epoch superposition. In addition, we analysed a wind change over each earthquake by plotting wind maps for an altitude of 90 km. We noted wind growing at altitudes 81—102 km and 135—250 km together with disturbance of the wind radial component relatively an earthquake epicenter at altitudes of 125—260 km which has a maximum one day before the earthquake. The generation and propagation of inner gravity waves can be considered as a possible mechanism of energy transfer from an earthquake into upper atmosphere.