

УДК 551.509

Г. В. Лизунов, Т. В. Скороход

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

ПЛАНЕТАРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕМАСШТАБНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Подано результати обробки мас-спектрометричних вимірювань концентрацій нейтральних атмосферних газів на супутнику «Dynamics Explorer 2». Досліджено глобальний розподіл хвильової активності верхньої термосфери, залежність характеристик хвильових збурень від геомагнітної активності, фоновий рівень атмосферних гравітаційних хвиль на іоносферних висотах.

ВВЕДЕНИЕ

Атмосферные гравитационные волны (АГВ) играют значительную роль в динамике верхней атмосферы Земли. Эти волны регистрируются главным образом методами дистанционного зондирования ионосферы в виде периодических вариаций плазменных параметров. В таких измерениях нет прямой информации о процессах в нейтральном газе, что затрудняет количественный анализ АГВ. В полярной ионосфере, где даже в магнитоспокойные периоды плазма сильно «зашумлена», само выделение эффектов АГВ на фоне ионосферных неоднородностей является проблематичным.

В данной работе проанализированы прямые измерения нейтральных компонентов верхней атмосферы на спутнике «Dynamics Explorer 2» (DE 2). Работа продолжает цикл исследований [1–3], ведущихся в Институте космических исследований НАН и НКА Украины.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Контактные измерения параметров нейтральной атмосферы на ионосферных высотах немногочисленны. Основной объём результатов получен на серии спутников «Atmosphere Explorer» и «Dynamics Explorer» в 1970-х и начале 1980-х гг. Данные этих проектов представлены на веб-ресурсе НАСА

«National Space Science Data Center» (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/atmoweb>) в открытом доступе.

Для настоящего исследования были выбраны измерения концентраций нейтральных газов на DE 2 (эксперимент NACS) [4]. Этот спутник был запущен в 1981 г. на солнечно-синхронную орбиту с перигеем 309 км, апогеем 1012 км и наклоном 90° . Диагностика нейтральной атмосферы осуществлялась ниже 500 км. Орбитальное движение DE 2 происходило практически вдоль меридиана при значениях местного времени $LT = 2$ ч на ночном и 14 ч на дневном отрезках витка. С течением времени орбита DE 2 снижалась, орбитальное время LT изменялось. Последний месяц (февраль 1983 г.) измерения велись на почти циркулярной орбите с высотой 240–340 км.

В данной работе анализ измерений проводился по методике [2]. Процедура обработки данных иллюстрирует рис. 1. На рис. 1, а представлен ход концентраций $[x]$ нейтральных газов $[O]$ и $[N_2]$ вдоль одного из орбитальных витков. В таком виде данные измерений размещены в базе данных НАСА. Крупномасштабное изменение кривых на рис. 1, а отражает изменение высоты спутника; в данном случае перигей приходится на район географического экватора. После спектральной фильтрации данных, включающей исключение низкочастотного тренда и высокочастотных шумов, были выделены волновые формы колебаний относительной плотности га-

зов $\delta[N_2]/[N_2]$ и $\delta[O]/[O]$, представленные на рис. 1, б. Фильтрация производилась в области среднemasштабных длин волн (от 10 км до приблизительно 800 км). Таким образом, возможные крупномасштабные АГВ (с горизонтальными длинами волн более 1000 км) отсеивались.

Тестом, удостоверяющим, что выделенные колебания атмосферных газов есть АГВ, служит соответствие измеренных характеристик колебаний соотношениям теории АГВ. Мы основывались на приближённой формуле, устанавливающей связь амплитуд вариаций плотностей различных газовых компонентов в АГВ [5]:

$$\frac{\delta\rho_\alpha}{\rho_\alpha} = \frac{\gamma H / H_\alpha - 1}{\gamma - 1} \frac{\delta\rho}{\rho}, \quad (1)$$

где $\delta\rho_\alpha / \rho_\alpha$ — относительное возмущение плотности газа сорта « α », $\delta\rho / \rho$ — возмущение суммарной плотности атмосферы, $H_\alpha = k_B T / m_\alpha g$ — индивидуальная высота однородной атмосферы для газа « α », $H = \rho / (\partial\rho / \partial z)$ — высота многокомпонентной однородной атмосферы, γ — показатель адиабаты. Обратим внимание, что хотя отдельные газы движутся в АГВ совместно и испытывают одинаковые вариации температуры δT и потоковой скорости δV , относительные возмущения плотности изменяются по-разному [1, 5].

На высотах 240...500 км, где производились измерения, атомарный кислород является основной составляющей. Этот газ определяет высоту многокомпонентной однородной атмосферы $H \approx H_O \approx 40$ км и значение показателя адиабаты $\gamma = 5/3$. Следующей составляющей является молекулярный азот, содержание которого $[O]:[N_2] \sim 10:1$, отношение индивидуальных высот однородных атмосфер $H_{N_2}:H_O = 4:1$. Согласно (1)

$$\frac{\delta[N_2]}{[N_2]} = 3 \frac{\delta[O]}{[O]}. \quad (2)$$

На рис. 1, в показан увеличенный фрагмент волновой формы из рис. 1, б. Измеренное отношение амплитуд колебаний составило

$$\frac{\delta[N_2]}{[N_2]} = 2.9 \frac{\delta[O]}{[O]}, \quad (3)$$

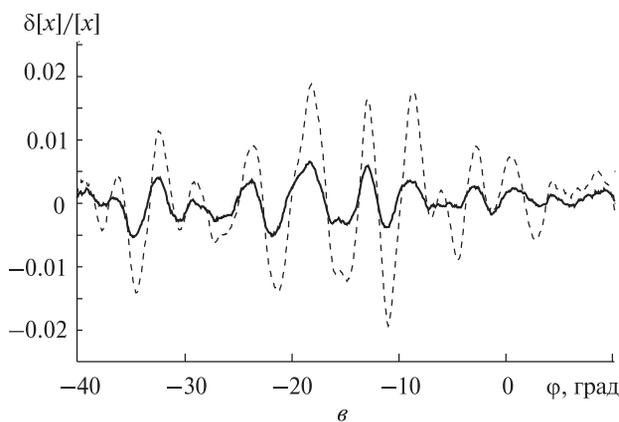
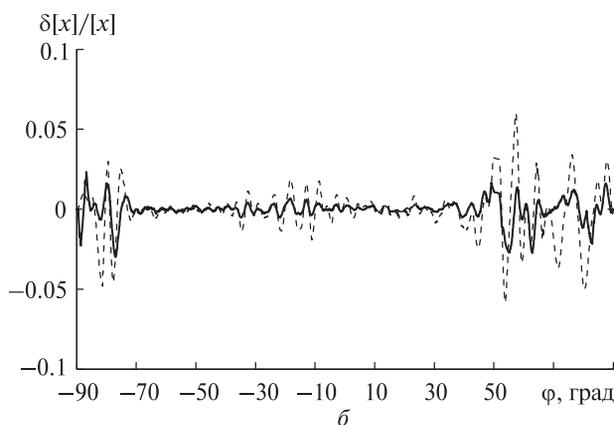
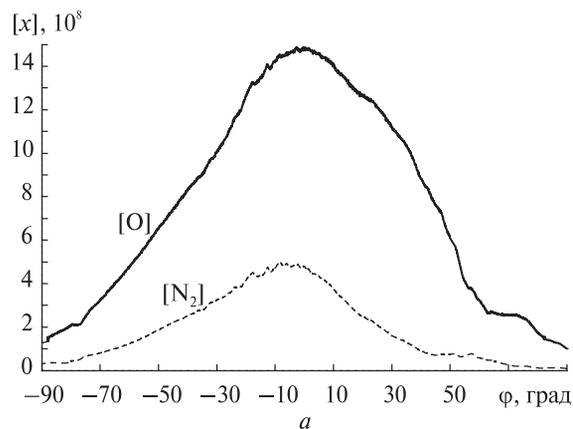


Рис. 1. а — ход концентрации $[x]$ атомарного кислорода (сплошная кривая) и молекулярного азота (пунктир) вдоль орбиты DE 2, б — относительные вариации $\delta[O]/[O]$ (сплошная кривая) и $\delta[N_2]/[N_2]$ (пунктир), в — увеличенный фрагмент волновой формы АГВ

что очень хорошо согласуется с предшествующей теоретической оценкой. Таким образом: 1) вариации различных и независимо измеренных газовых компонентов ведут себя согласованно,

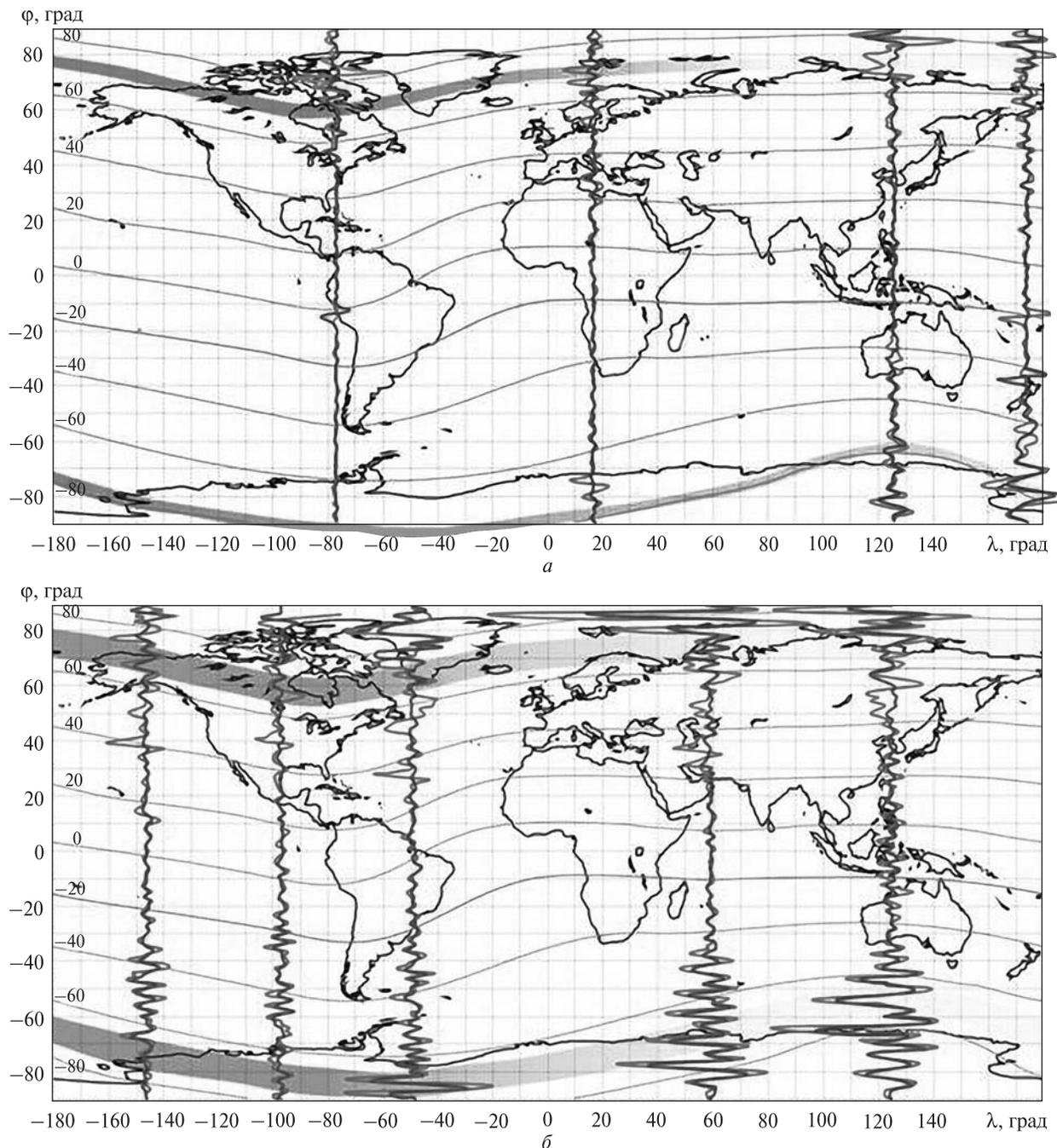


Рис. 2. Планетарное распределение атмосферных гравитационных волн: *а* — в дневной полусфере, *б* — в ночной полусфере (λ , φ — географические координаты, ψ — геомагнитная широта). Представлены волновые формы относительных возмущений $\delta[O]/[O]$ (меньшей амплитуды) и $\delta[N_2]/[N_2]$ (большей амплитуды)

что косвенно свидетельствует о правильности выделения волновых форм АГВ; 2) измеренные амплитуды вариаций удовлетворяют теории АГВ.

Данный проверочный тест применялся ко всем измерениям. Если соотношения амплитуд и фаз колебаний атмосферных газов сильно расходились с теорией (скажем, вариации $[O]$ и $[N_2]$

происходили в противофазе), полученный сигнал трактовался как помеха (не АГВ) и исключался из рассмотрения.

ГЛОБАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Всего было обработано более 100 орбитальных витков измерений на DE 2. На рис. 2 представлено полученное планетарное распределение волновой активности атмосферы. Условно показаны области авроральных овалов, положение которых зависит от конкретного уровня магнитной активности. Поскольку орбита DE 2 привязана к солнечному времени, распределение АГВ на рисунках скорее характеризует не долготную, а широтную зависимость. Характерная горизонтальная длина волны АГВ — около 550 км.

Анализируя рис. 2, отметим, что генерация АГВ происходит в полярных областях (где амплитуда АГВ максимальна), вероятно, внутри авроральных овалов, откуда АГВ, постепенно затухая, распространяются к низким широтам. Днём амплитуда АГВ меньше, чем ночью, в низких широтах — гораздо меньше, чем в полярных шапках, волновой фон детектируется в ионосфере везде.

Эти результаты являются характерными. Как показано далее, с изменением магнитной активности изменяются и интенсивность АГВ в полярных шапках, и положение среднеширотной границы, до которой спускаются АГВ, но общая структура планетарного распределения АГВ не изменяется.

ЗАВИСИМОСТЬ ОТ МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

Рис. 3, 4 показывают зависимость АГВ от магнитной активности. С увеличением K_p -индекса амплитуда АГВ в полярных шапках растёт: от нескольких процентов величины возмущения плотности при спокойных магнитных условиях до более десяти процентов при высокой магнитной активности. Амплитуда волнового фона в низких широтах составляет около 0.5 % (несмотря на малую величину, это надёжная оценка, лежащая в пределах динамического диапазона измерительных приборов), и с увеличением магнитной активности незначительно увеличивается.

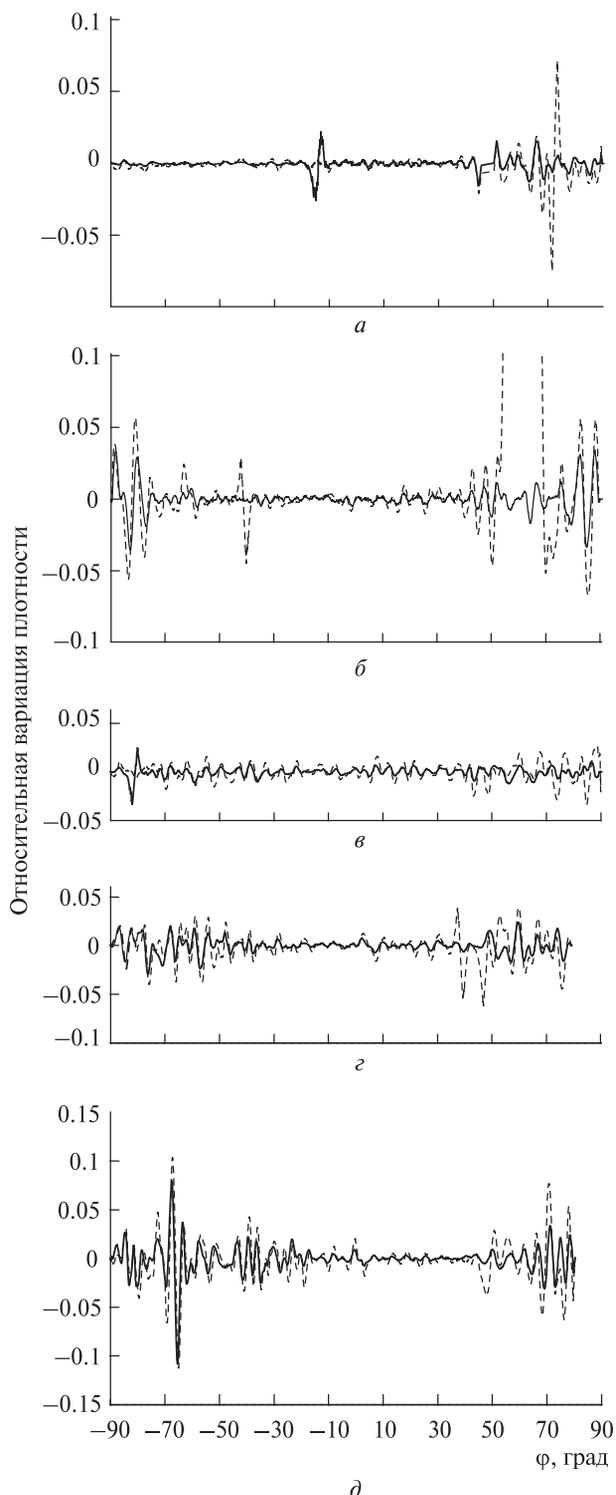


Рис. 3. Дневные (а, б) и ночные (в—д) широтные распределения АГВ в зависимости от K_p -индекса: а, в — $K_p = 1$, б, г — $K_p = 3$, д — $K_p = 5$

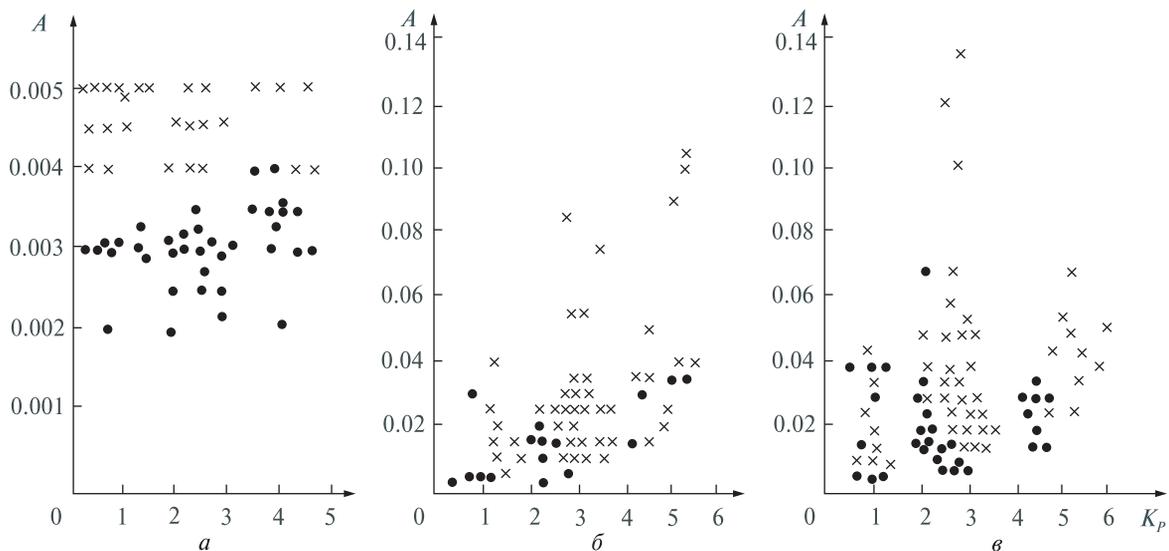


Рис. 4. Амплитуда атмосферных гравитационных волн $A = \delta[O]/[O]$ в зависимости от геомагнитной активности: а — в низких широтах, б — в южной полярной шапке, в — в северной полярной шапке. Кружки — дневные измерения, крестики — ночные

ВЫВОДЫ

В данной работе по данным прямых спутниковых измерений исследовано глобальное распределение волновой активности верхней атмосферы. Подвергнуты анализу масс-спектрометрические измерения концентраций нейтральных газов на спутнике DE 2.

Один из основных выводов данной работы состоит в том, что детектируемый фон АГВ всегда есть на ионосферных высотах. Наблюдаемое глобальное распределение АГВ характеризуется морфологической структурой, включающей: 1) области полярных шапок, где происходит непрерывная генерация АГВ и где амплитуды АГВ максимальны, 2) средних широт, где происходит постепенное убывание амплитуды АГВ, 3) низких широт, где фон АГВ сравнительно мал.

Некоторые характеристики АГВ стабильны и повторяются от события к событию:

- горизонтальная длина волны составляет около 550 км;
- в полярных шапках минимальная амплитуда АГВ составляет несколько процентов относительной величины в условиях низкой магнитной активности. При высокой активности амплитуда АГВ увеличивается до 10 % и более;

- широтная граница, до которой АГВ спускаются из полярных шапок в условиях низкой магнитной активности, составляет днём приблизительно 60° географической широты и 50° ночью. В условиях высокой магнитной активности граница опускается до 55° северной широты и 50° южной широты днём, 50° северной и 35° южной широты ночью;

- фоновая амплитуда АГВ в низких широтах составляет 0.5 % и очень слабо зависит от магнитной активности.

Авторы благодарны А. К. Федоренко за тесное сотрудничество.

1. Лизунов Г. В., Федоренко А. К. Генерация атмосферных гравитационных волн солнечным терминатором по данным измерений на спутнике «Atmosphere Explorer-E» // Радиофизика и радиоастрономия. — 2006. — **11**, № 1. — С. 49—62.
2. Федоренко А. К. Відтворення характеристик атмосферних гравітаційних хвиль в полярних регіонах на основі мас-спектрометричних супутникових вимірювань // Радиофизика и радиоастрономия. — 2009. — **14**, № 3.
3. Федоренко А. К., Лизунов Г. В., Роткель Х. Спутниковые наблюдения квазиволновых возмущений атмосферы на высотах области F, вызванных мощными землетря-

- сениями // Геомагнетизм и аэрономия. — 2005. — **45**, № 3. — С. 403—410.
4. *Kramer H. J.* Observation of the Earth and its environment. Survey of missions and sensors. — Springer, 2002.
5. *Makhlouf U. E., Dewan J. R., Isler T. F. Tuan.* On the importance of the purely gravitationally induced density, pressure and temperature variations in gravity waves: Their application to airglow observations // J. Geophys. Res. — 1990. — **95**. — P. 4103—4111.

Надійшла до редакції 01.10.09

G. V. Lizunov, T. V. Skorokhod

PLANETARY DISTRIBUTION OF MIDDLE-SCALE
ATMOSPHERE GRAVITY WAVES ACCORDING TO
SATELLITE MEASUREMENTS

We present our results for reducing of mass-spectrometric measurements of concentrations of neutral atmosphere gases onboard the Dynamics Explorer 2 satellite. We investigated the global distribution of upper thermosphere wave activity, the dependence of wave parameters on geomagnetic activity, and the background level of atmosphere gravity waves at ionospheric heights.