

УДК 550.388, 551.520.32

**А. К. Федоренко**

Інститут космічних досліджень НАНУ та НКАУ, Київ

## Спутниковые наблюдения среднемасштабных акустико-гравитационных волн над полярными шапками

*Надійшла до редакції 20.12.07*

---

Досліджено властивості хвильових збурень над полярними шапками за даними вимірювань на супутнику «Dynamics Explorer 2». При перетині полярних шапок на висотах 250—450 км систематично реєструвалися періодичні варіації нейтральних параметрів атмосфери з горизонтальними масштабами в кілька сотень кілометрів. На основі аналізу амплітудних і фазових співвідношень коливань концентрацій різних атмосферних газів показано, що ці варіації викликані поширенням акустико-гравітаційних хвиль (АГХ). Запропоновано методику виділення варіацій АГХ на фоні трендів на основі кроскореляційного аналізу синхронних рядів вимірювань концентрацій O і N<sub>2</sub>. Відносні амплітуди АГХ над полярними шапками складають 3—10 %; переважні горизонтальні довжини хвиль 500—600 км; періоди — десятки хвилин. В денному секторі область підвищеної хвильової активності в основному обмежується високими широтами, а в нічному, як правило, простягається від полярних областей аж до середніх і низьких широт.

---

### ВВЕДЕНИЕ

Акустико-гравитационные волны (АГВ) играют важную роль в энергетике верхней атмосферы и перераспределении энергии атмосферных возмущений в планетарном масштабе. С поверхности Земли АГВ уже около 60 лет наблюдаются в виде перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Основная экспериментальная информация о волновых процессах в нейтральной атмосфере была получена именно в наземных наблюдениях их ионосферного отклика, в то время как прямые спутниковые измерения параметров этих волн в вариациях нейтральной температуры и плотности значительно более редки. По данным наземных наблюдений было установлено, что в ионосфере практически всегда существует некоторый «фоновый» уровень волновой активности, который, вероятно, представляет собой интегральный эффект от суперпозиции волн от разных источников сравнитель-

но небольшой мощности [1, 4]. На этом фоне иногда возникают ограниченной протяженности всплески волновой активности с амплитудой в несколько раз, или даже на порядок большей. Эти события могут быть вызваны отдельными сравнительно мощными источниками природного или техногенного характера: высыпаниями частиц, авроральными электроструями, солнечным терминатором, землетрясениями, ураганами, циклонами, ядерными взрывами, стартами ракет и др. Из-за ограниченного количества экспериментальных данных планетарное распределение АГВ в вариациях параметров нейтральной атмосферы остается малоизученным.

Целью работы является изучение АГВ над полярными шапками по данным измерений нейтральных параметров атмосферы на спутнике «Dynamics Explorer 2» (DE2). Интерес к области высоких широт связан с тем, что вблизи полярных шапок и авроральных овалов сосредоточены наиболее мощные источники возмущений верх-

ней атмосферы и, как следствие, наблюдаются наиболее интенсивные АГВ [5, 6].

Спутник DE2 летал в начале 1980-х годов, и с тех пор не было запущено ни одного низкоорбитального аппарата с подходящим комплексом научной аппаратуры для прямых измерений параметров АГВ. Поэтому базы данных старых проектов, таких как «Dynamics Explorer», «Atmosphere Explorer» с прямыми измерениями атмосферных и ионосферных параметров на высотах 250—500 км являются уникальными для изучения АГВ, и к ним целесообразно обращаться для решения вновь возникающих научных задач.

Высота орбиты DE2 составляла примерно 250—1010 км, наклонение  $89.9^\circ$ , период обращения около 98 мин. Благодаря такой конфигурации спутник на каждом витке пролетал вблизи географических полюсов и пересекал полярные шапки. В данной работе АГВ исследовались по измерениям концентраций атомарного кислорода O, молекулярного азота  $N_2$ , аргона Ar и гелия He. Данные взяты из базы ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/spacecraft\_data, где усредненные за 1 с результаты измерений представлены за период с 15 августа 1981 по 16 февраля 1983 года.

#### ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Концентрации нейтральных компонентов измерялись с помощью бортового масс-спектрометра на низких участках витков (примерно ниже 500 км). Частота волны, измеряемая со спутника  $\omega' = \omega - k_x V_s$ , где  $\omega$  — частота в неподвижной системе отсчета,  $k_x$  — составная волнового вектора вдоль траектории,  $V_s$  — скорость спутника. Фазовая горизонтальная скорость АГВ составляет сотни метров в секунду, что мало по сравнению со скоростью движения спутника (около 8 км/с), поэтому  $\omega' \approx -k_x V_s$  и фактически на спутнике измеряется спектр волновых чисел.

Обнаружение АГВ в концентрациях нейтральных частиц затруднено из-за наличия значительных перепадов плотности атмосферы вдоль орбиты спутника (например, тренды температуры и вертикальной скорости газа не столь значительны). Поэтому важным элементом обработки данных являлось отделение вариаций концентраций, вызванных АГВ от крупномасштаб-

ных изменений, связанных с суточным и географическим ходом параметров, изменением высоты орбиты. Для этого производилось сглаживание исходного ряда данных  $x_i$  по методу скользящего среднего:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=-n}^n x_{i+j},$$

где  $N = 2n + 1$  — количество точек усреднения. Затем из исходных данных вычитался сглаженный ряд, и анализировалась разность  $\delta x_i = x_i - \bar{x}_i$ . Если увеличивать  $N$ , в ряде  $\delta x_i$  появляются составляющие все более крупных масштабов. Для отделения вариаций АГВ от низкочастотных трендов,  $N$  надо выбирать таким, чтобы ряд разностей  $\delta x_i$  вместе с высокочастотной составляющей содержал и вариации с масштабами АГВ. Для извлечения этих волновых вариаций исследовались одновременно два ряда синхронных измерений концентраций преобладающих газов O и  $N_2$ . Крупномасштабные тренды концентраций всех атмосферных газов, хоть и связаны между собой (например, уменьшаются с высотой и возрастают в дневных условиях), но в целом коррелируют слабо, в то время как вариации АГВ должны показывать высокую корреляцию в разных сортах атмосферных газов, так как отражают одну и ту же волну. Вычислялась кросс-корреляция между рядами разностей  $\delta x_i(N_2)$  и  $\delta x_i(O)$  при разных значениях  $N$ , и определялось значение, соответствующее максимальной корреляции. Зависимость коэффициента корреляции  $\delta x_i(N_2)$  и  $\delta x_i(O)$  от  $N$  на участке витка 8296 показана на рис. 1 (1). В этом примере максимальная корреляция достигается при  $N = 67$  точек (рис. 1 (2)), что соответствует преобладающему горизонтальному масштабу колебаний  $\lambda_x \approx 67 \cdot 1 \text{ с} \cdot 8 \text{ км/с} \approx 540 \text{ км}$ . Исходные ряды концентраций O и  $N_2$ , а также соответствующие сглаженные по 67 точкам данные показаны на рис. 1 (3, 4), относительные вариации концентраций представлены на рис. 1 (5). Затем из относительных вариаций исключалась высокочастотная составляющая, включающая шумы и предположительно не связанная с АГВ. Для данного ряда это производилось сглаживанием по  $N = 18$  точкам из условия, что коэффициент корреляции  $\delta x_i(N_2)$  и  $\delta x_i(O)$  не превышает 0.4 (нижний уровень корреляции крупномасштабных трендов) (рис. 1 (1)). Отфильтрован-

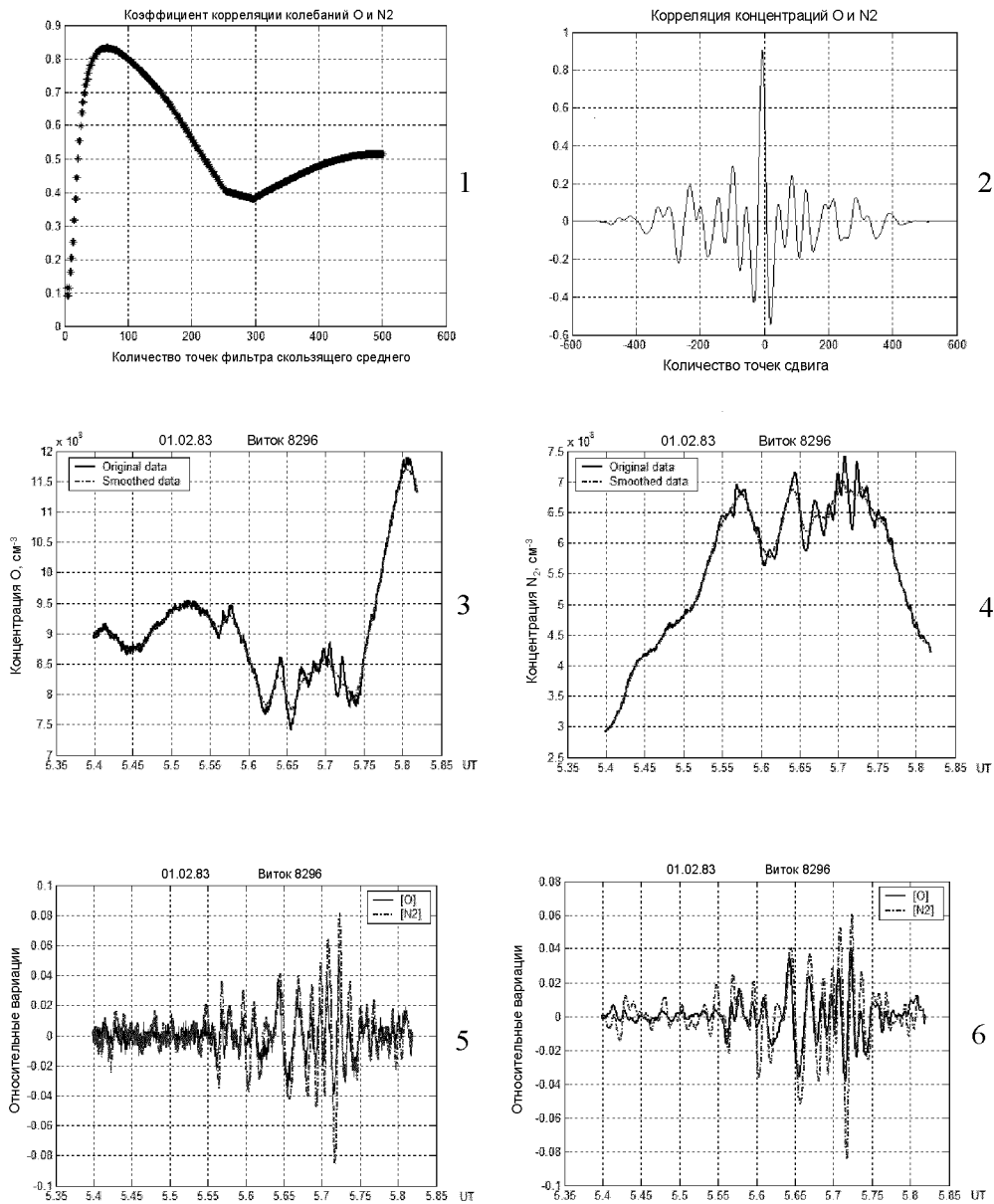


Рис. 1. Регистрация АГВ в спутниковых измерениях нейтральных концентраций: 1 — определение оптимального количества точек сглаживания; 2 — кросс-корреляция между колебаниями концентраций O и N<sub>2</sub> при оптимальном N; 3, 4 — исходные и сглаженные ряды концентраций N<sub>2</sub>, O; 5, 6 — относительные вариации АГВ в концентрациях O и N<sub>2</sub> до и после исключения высокочастотной составляющей

ные таким образом вариации АГВ показаны на рис. 1 (6).

Подобный анализ проводился для всех анализируемых рядов данных. В каждом случае из условия максимальной корреляции  $\delta x_i(N_2)$  и

$\delta x_i(O)$  выбиралось оптимальное значение N для сглаживания. В целом для разных рядов величина N изменялась примерно в интервале 51—81 в зависимости от масштаба АГВ. В каждом конкретном случае корректность снятия низкочас-

точного тренда должна подтверждаться согласованным характером колебаний отдельных компонентов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Были проанализированы вариации концентраций разных сортов атмосферных газов над полярными шапками для 45 витков. Данные наблюдений обобщены в таблице. В колонках таблицы показаны: 1 — дата, 2 — порядковый номер события, 3 — номер витка, 4 — интервал UT, соответствующий области повышенной интенсивности АГВ, 5 — изменение высоты  $h$  орбиты на этом интервале, 6 — преобладающий масштаб колебаний  $\lambda_x$ , 7 — относительная амплитуда АГВ, 8 — сдвиг фаз между колебаниями концентраций O и N<sub>2</sub>, 9 — средняя высота однородной атмосферы в пределах волнового

цуга, 10 — период АГВ, 11 — момент перехода день — ночь (д-н) или ночь — день (н-д) в UT, 12 — локализация волнового цуга по географической широте.

Характерное изменение концентраций O и N<sub>2</sub> при пролете над полярной шапкой показано на рис. 2. Даже на фоне низкочастотных суточных и высотных трендов отчетливо видны более высокочастотные колебания непосредственно над шапкой (рис. 2 (1, 2)). В рассматриваемом примере спутник пересекает терминатор в момент  $UT = 17.73^h$  вблизи южного полюса, влетая из дневного сектора (местное время  $LT \approx 13.6^h$ ) в ночной ( $LT \approx 1.6^h$ ). Видно, что волновой цуг преимущественно расположен в ночном секторе и простирается вплоть до низких широт. После исключения низкочастотного тренда и высокочастотной составляющей выделяются периодические вариации с относительной амплитудой около 5 %.

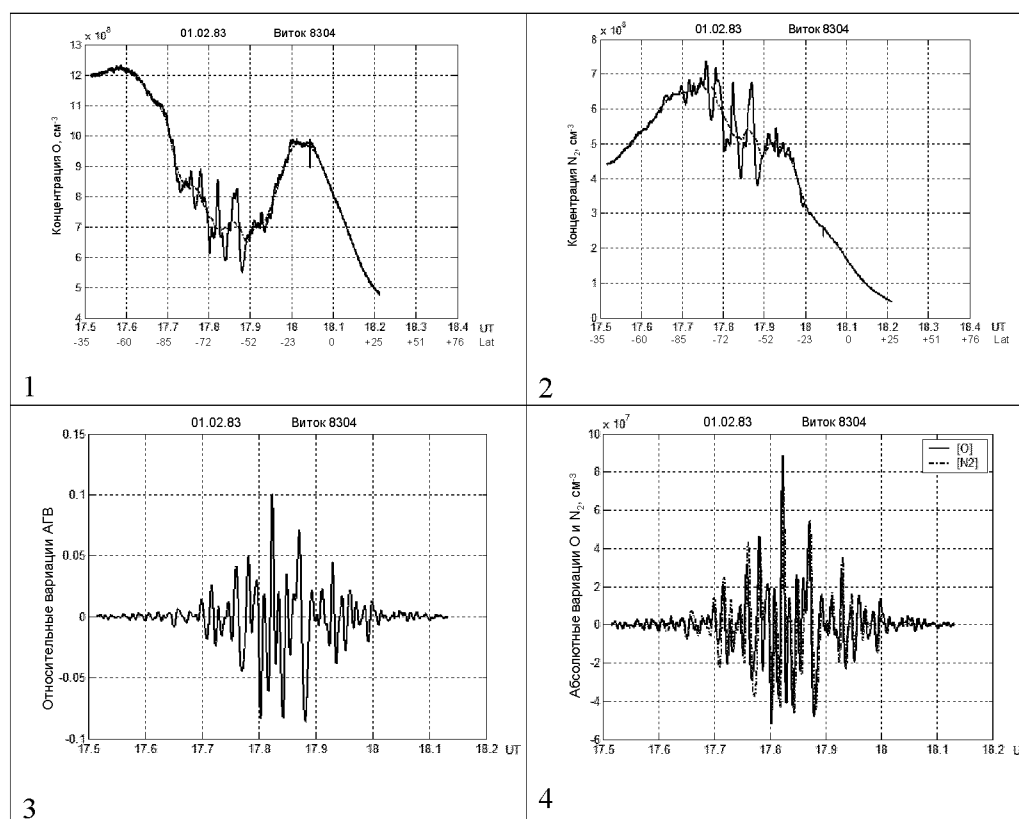


Рис. 2. АГВ над полярными шапками в концентрациях нейтральных компонент: 1, 2 — исходные и сглаженные ряды концентраций O, N<sub>2</sub>; 3 — относительные вариации АГВ; 4 — сравнение абсолютных вариаций O и N<sub>2</sub>

Характеристики АГВ над полярными шапками

Дата	№	Виток	UT, ч	h, км	$\lambda_x$ , км	$\Delta n/n$ , %	$\Delta \varphi_{O-N_2}$	H, км	Период, мин	Смена дня и ночи, UT (ч)	Локализация дуга АГВ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
81.08.25	1	320	3.47—3.75	440—320	650	6...9	-34	57.4	20	д—н, 3.53 <sup>1</sup>	+75...N...+40 <sup>2</sup>
	2	321	5.14—5.33	400—310	550	7...9	-35	62.5	20	д—н, 5.17	+85...N...+50
	3	327	14.90—15.14	450—310	500, 750	4...7	-33, -22	59.6	25 45	д—н, 14.94	+70...N...+40
	4	329	18.11—18.31	480—320	500	10...19	-44	58.9	15	д—н, 18.19	+60...N...+60
	5	331	21.44—21.67	385—315	550	7...15	-32	53.5	30	д—н, 21.46	+85...N...+40
81.08.26	6	337	7.14—7.42	460—320	430, 650	6...8	-32 -21	61.2	25 45	д—н, 7.22	+65...N...+50
	7	342	15.28—15.50	450—310	650	3...6	-30	59.6	30	д—н, 15.36	+65...N...+50
83.01.20	8	346	21.86—22.00	400—310	770	6...9	-25	58.6	40	д—н, 21.89	+80...N...+70
	9	8104	2.97—3.17	310—370	500	5...9	+28	61.3	30	н—д, 3.11	+55...N...+75
	10	8105	4.44—4.64	300—360	600	7...12	+18	54.2	60	н—д, 4.61	+50...N...+85
	11	8106	6.03—6.19	310—370	500	7...12	+28	65.6	30	н—д, 6.14	+65...N...+70
	12	8108	9.00—9.19	305—370	500, 650	5	+28 +21	55.5	30 50	н—д, 9.17	+55...N...+85
83.01.21	13	8110	12.03—12.19	300—360	600	5...6	+14	56.5	80	н—д, 12.17	+60...N...+80
	14	8110	12.92—13.14	310—255	550, 700	3...5	-35 -28	53.4	25 35	д—н, 12.94	-85...S...-40
	15	8113	17.47—17.78	310—245	650	6...8	-26	50.9	40	д—н, 17.47	-85...S...-20
	16	8115	19.64—19.86	320—380	600	6...9	+18	56.5	60	н—д, 19.75	+60...N...+60
	17	8121	5.42—5.78	350—250	600	5...8	-32	55.7	30	д—н, 5.58	-50...S...-45
	18	8122	6.94—7.25	335—255	700	8...12	-24	60.3	40	д—н, 7.08	-55...S...-55
	19	8123	8.61—8.81	300—250	500	3...6	-28	47.3	40	д—н, 8.61	-90...S...-55
	20	8128	15.19—15.42	300—365	500	3...5	+17	52.0	70	н—д, 15.42	+55...N...+85
	21	8129	16.75—16.94	310—365	400, 550	7...10	+14 +10	52.0	85 115	н—д, 16.89	+50...N...+80
	22	8129	17.69—17.92	290—250	400, 550	7...12	-41 -30	50.4	20 35	д—н, 17.69	-90...S...-35
83.01.22	23	8132	22.22—22.50	290—245	550	5...10	-40	50.9	20	д—н, 22.22	-90...S...-20
	24	8133	22.89—23.03	330—375	600	8...20	+28	60.9	35	н—д, 22.97	+70...N...+70
	25	8137	5.64—6.06	320—245	500, 650	5...12	-22 -19	47.8	50 65	д—н, 5.75	-80...S...-20
	26	8138	6.33—6.44	285—340	600	5...7	+23	45.7	50	н—д, 6.53	+50...+80, N
	27	8140	10.42—10.53	270—250	500	3...8	-22	45.7	55	н	S, -70...-45
	28	8141	11.83—12.11	290—245	650	3...6	-18	50.0	65	д—н, 11.83	-90... S ...-20
	29	8142	12.33—12.56	280—350	600	3...6	+18	51.4	60	н—д, 12.58	+40...N...+80
83.01.23	30	8144	16.36—16.61	290—245	500	5...9	-28	45.9	40	д—н, 16.36	-90...S...-30
	31	8152	4.39—4.58	300—260	600	6...9	-32	48.7	30	д—н, 4.44	-80...S...-60
	32	8159	15.00—15.25	290—250	700	3...5	-20	48.7	55	д—н, 15.03	-85...S...-40
83.01.24	33	8168	4.47—4.81	305—250	650	5...7	-38	53.8	20	д—н, 4.64	-55...S...-50
	34	8169	6.28—6.39	255—245	450	8	-25	66.9	35	н	S, -60...-30
	35	8173	12.31—12.47	255—250	650	3	-17	41.4	70	н	S, -60...-20
	36	8177	18.14—18.56	290—250	500	5...8	-39	60.6	20	д—н, 18.22	-85...S...-10
83.01.25	37	8181	0.32—0.53	277—248	500, 800	3...5	-39 -24	63.6	20 40	д—н, 0.33	S, -90...-35
	38	8182	1.86—2.03	265—250	750	5...10	-26	38.2	45	н	S, -60...-30
	39	8183	2.42—2.50	330—360	400	5...10	+28	58.8	35	н—д, 2.53	+60...+85, N
	40	8185	6.37—6.50	265—250	500	3...4	-22	59.4	45	н	S, -70...-40
	41	8191	15.42—15.60	265—250	450	4...6	-25	41.4	50	н	S, -75...-35
	42	8196	22.05—22.27	340—375	450	5...8	+25	60.6	40	н—д, 22.15	+65...N...+65
	43	8296	5.55—5.74	260—255	550, 800	4...5	-30, -21	52.0	30 50	д—н, 5.68	-80... S...-70
	44	8303	16.20—16.42	256—252	500	6...8	-44	50.8	20	д—н, 16.22	-85... S...-45
	45	8304	17.70—18.00	255—260	600	5...8	-41	52.5	20	д—н, 17.73	-80... S...-20

1, 2 — спутник переходит из дневного сектора в ночной в момент UT = 3.53 ч, с дневной стороны волновой дуга ограничена широтой +75°, с ночной простирается до +40°

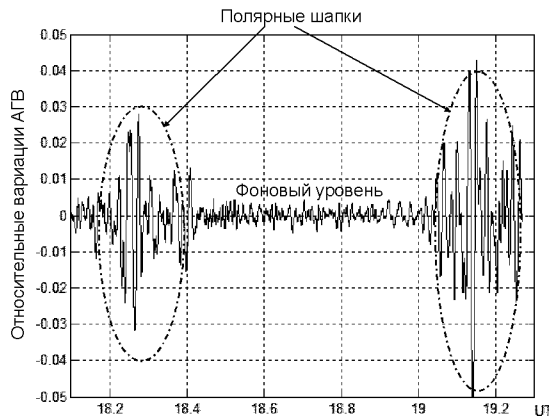


Рис. 3. Распределение волновой активности вдоль витка 8273. Высота спутника изменялась примерно от 340 до 250 км, географическая широта от  $+70^\circ$  N до  $-50^\circ$  S

Колебания концентраций O и  $N_2$  отличаются по амплитуде и сдвинуты по фазе (рис. 2 (4)).

Благодаря подходящей орбитальной конфигурации DE2 пересекал все географические широты, что позволяет судить о планетарном распределении волновой активности. В глобальном масштабе наблюдается следующая картина. В средних и низких широтах постоянно существует некоторый «фоновый» уровень среднемасштабных колебаний с относительной амплитудой не более 0.5 % в нейтральной концентрации. Этот уровень систематически повышается над полярными шапками до 3—10 %, иногда до 20 % (рис. 3, таблица). В дневном секторе область повышенной волновой активности почти всегда ограничивается высокими широтами, а с ночной стороны овала примерно в половине рассмотренных случаев эта область простиралась вплоть до средних и низких широт. Только в трех случаях наблюдалось распространение волн до средних широт в дневном секторе (таблица): № 17 ( $-50^\circ \dots S \dots -45^\circ$ ), № 18 ( $-55^\circ \dots S \dots -55^\circ$ ) и № 33 ( $-55^\circ \dots S \dots -50^\circ$ ). При этом, похоже, случаи № 17 (виток 8121) и № 18 (8122) — это два последовательных пролета над одной и той же структурой. Сравнить волновую активность над северной и южной шапкой, а также в отдельные дни сложно, так как изменение высоты орбиты искажает истинное соотношение амплитуд.

По спектральному составу как в дневном, так и в ночном секторах заметно преобладание го-

ризонтальных масштабов АГВ около 500—600 км, что хорошо согласуется с данными работы [6], хотя иногда наблюдается суперпозиция колебаний нескольких масштабов. Примерно такие же длины волн преобладают и в спектре «фоновых» колебаний. Наличие в спектре атмосферных колебаний выделенных горизонтальных длин волн является очень интересным результатом, не получившим пока что теоретического объяснения.

Рассмотренная картина глобального поведения АГВ является достаточно типичной (таблица).

#### ОБСУЖДЕНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для интерпретации волновых возмущений над полярными шапками были проанализированы амплитудные и фазовые отличия в колебаниях разных сортов атмосферных газов. Рассматривались вариации преобладающих на высотах спутника DE2 нейтральных компонентов: O (концентрация  $10^8 \dots 10^9 \text{ см}^{-3}$ ) и  $N_2$  ( $\sim 10^8 \text{ см}^{-3}$ ), а также малые добавки He ( $\sim 10^7 \text{ см}^{-3}$ ) и Ar ( $10^5 \dots 10^6 \text{ см}^{-3}$ ).

Согласно теории распространения АГВ в многокомпонентной газовой среде относительная амплитуда концентрации газа сорта «j» связана с относительной амплитудой волны соотношением [2]:

$$\frac{\delta n_j}{n_j} = \left\{ 1 - \frac{i(H - H_j)}{H_j} \cdot \frac{1 - \frac{\gamma^2 k_x^2 H^2 \omega_B^2}{(\gamma - 1)\omega^2}}{k_z H + i \left( \frac{\gamma \omega_B^2 H^2 k_x^2}{\omega^2} - \frac{1}{2} \right)} \right\} \frac{\delta n}{n}, \quad (1)$$

где  $H = RT/(Mg)$  — высота однородной атмосферы,  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $T$  — температура нейтрального компонента,  $M$  — средний молекулярный вес,  $g$  — ускорение свободного падения,  $H_j = RT/(M_j g)$  — высота однородной атмосферы для газа сорта «j»,  $\gamma$  — показатель адиабаты,  $k_x$ ,  $k_z$  — горизонтальная и вертикальная составные волнового вектора,  $\omega$ ,  $\omega_B$  — частота волны и частота Брента — Вайселя соответственно. Параметры  $\omega$ ,  $k_x$  и  $k_z$  удов-

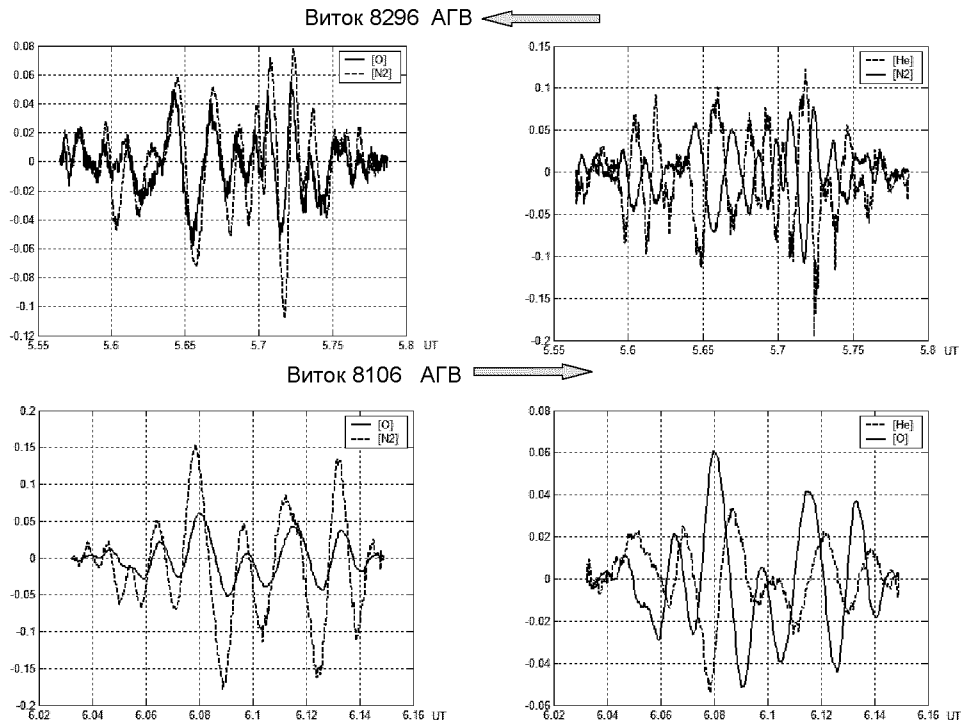


Рис. 4. Относительные вариации АГВ в разных атмосферных газах: на витке 8296 спутник движется навстречу волне (верхние графики), на витке 8106—догоняет АГВ (нижние графики)

летворяют дисперсионному соотношению АГВ [2]:

$$\left(\frac{\gamma - 1}{\gamma^2} \cdot \frac{\omega^2}{\omega_B^2} - \frac{1}{4}\right) \cdot \frac{\omega^2}{\omega_B^2} + k_x^2 H^2 - (k_x^2 + k_z^2) \cdot H^2 \frac{\omega^2}{\omega_z^2} = 0. \quad (2)$$

Амплитуда колебаний вертикальной скорости связана с колебаниями плотности соотношением

$$V_z = \frac{\omega H \left(1 - \frac{\gamma^2 H^2 k_x^2 \omega_B^2}{(\gamma - 1)\omega^2}\right)}{k_z H + i \left(\frac{\gamma \omega_B^2 H^2 k_x^2}{\omega^2} - \frac{1}{2}\right)} \frac{\delta n}{n}. \quad (3)$$

В теории АГВ часто используется приближение

$$\omega^2 \ll \omega_B^2, \quad k_z H \gg 1, \quad (4)$$

в котором выражение (1) существенно упрощается:

$$\frac{\delta n_j}{n_j} = \frac{\gamma H - H_j}{(\gamma - 1) H_j} \frac{\delta n}{n}, \quad (5)$$

а колебания вертикальной скорости оказываются сдвинуты относительно колебаний плотности на угол  $\pi/2$ :

$$V_z = \frac{i\gamma\omega H}{(\gamma - 1)} \frac{\delta n}{n}. \quad (6)$$

В соответствии с (5) колебания разных атмосферных компонентов должны происходить в фазе или в противофазе в зависимости от знака  $H - H_j$ . В частности, колебания легкого He (4 а. е. м.) противофазны колебаниям тяжелых компонентов. Относительная амплитуда вариаций более тяжелых газов N<sub>2</sub> (28 а. е. м.), Ar (40 а. е. м.) в несколько раз превышает вариации концентрации O (16 а. е. м.).

Характерные наблюдаемые над полярными шапками относительные вариации O, N<sub>2</sub> и He показаны на рис. 4 (на витке 8296 над южной полярной шапкой, на витке 8106 над северной

шапкой). Видно, что характер наблюдаемых колебаний в отдельных газах в целом согласуется с теорией АГВ.

Особый интерес представляют небольшие фазовые сдвиги между колебаниями O и N<sub>2</sub> (на витке 8296 колебания O отстают от N<sub>2</sub>, на 8106 — опережают) и отклонение от противофазы колебаний He, что указывает на ограниченность приближения (4). На витке 8296 для преобладающего масштаба  $\lambda_x = 550$  км сдвиги фаз составляют  $\Delta\varphi_{O-N_2} = -30^\circ$ ,  $\Delta\varphi_{He-N_2} = 195^\circ$ ; на витке 8106 для  $\lambda_x = 500$  км  $\Delta\varphi_{O-N_2} = +33^\circ$ ,  $\Delta\varphi_{He-O} = 145^\circ$ . Проанализируем, какие свойства волны можно определить из этих фазовых сдвигов.

В колонке 8 таблицы приведены значения сдвигов фаз между колебаниями O и N<sub>2</sub> для всех проанализированных полярных шапок. Все волновые цуги делятся на две группы: колебания O либо отстают (знак «минус»), либо опережают колебания N<sub>2</sub> (знак «плюс») в среднем от 15 до 40°. Знак сдвига фаз O — N<sub>2</sub> зависит от того, движется спутник в том же направлении, что и волна, либо ей навстречу. Кроме того, из формулы (1) видно, что знак сдвига фаз O — N<sub>2</sub> зависит от знака  $k_z$ , т. е. от того, распространяется волна вверх или вниз. Согласно современным представлениям АГВ в полярных областях генерируются на высотах E-области ионосферы под действием вариаций аврорального электродржета или высыпаний заряженных частиц [5]. Если предположить, что все наблюдаемые АГВ распространяются на высоты спутника снизу (для гравитационной ветви АГВ это означает, что  $k_z < 0$  [3]), тогда положительные и отрицательные сдвиги фаз должны быть обусловлены только направлением движения спутника. Для компонентов O и N<sub>2</sub> из (1) и (3) следует

$$\frac{\delta n(O)}{n(O)} = \frac{\delta n(N_2)}{n(N_2)} + i \left( \frac{1}{H(N_2)} - \frac{1}{H(O)} \right) \frac{V_z}{\omega}. \quad (7)$$

Поскольку  $H(N_2) < H(O)$ , для АГВ с  $k_z < 0$  опережение колебаний O (положительный сдвиг фаз) указывает на то, что спутник догоняет волну, а отставание O относительно N<sub>2</sub> (отрицательный сдвиг фаз) наблюдается, если спутник движется навстречу волне.

Рассчитанная по формулам (1) и (2) зависимость сдвигов фаз от периода АГВ для пар He —

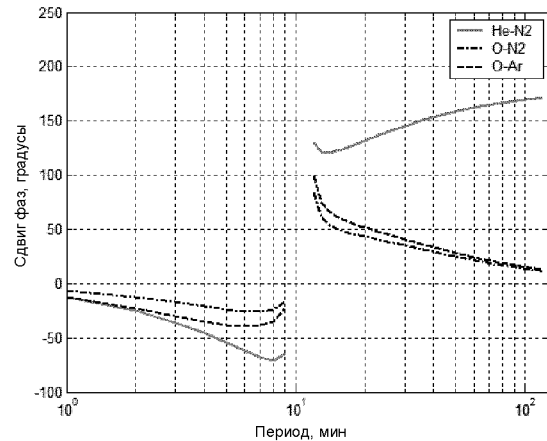


Рис. 5. Зависимость от периода АГВ сдвигов фаз в колебаниях разных компонентов при  $k_z < 0$

N<sub>2</sub>, O — N<sub>2</sub>, O — Ar при  $k_z < 0$  показана на рис. 5. Для расчетов взяты измеренная горизонтальная длина волны  $\lambda_x = 500$  км, температура нейтральной атмосферы  $T = 1000$  К, средний молекулярный вес  $M = 20$  (соответствует относительному содержанию N<sub>2</sub> около 30%). Для таких условий период Брента — Вайсяля составляет  $T_B = 10.9$  мин. Эту зависимость можно использовать для определения периода волны. Поскольку с борта спутника регистрируется не истинная горизонтальная длина волны, а только ее составляющая вдоль орбиты, можно говорить лишь о приближенной оценке периода. Значения периодов наблюдавшихся АГВ приведены в колонке 10 таблицы. При оценке периода учитывалась также поправка на изменение величины  $H$  для разных участков витков, которая изменялась в интервале примерно 40—60 км.

Следует заметить, что интенсивные АГВ от полярных шапок могут создавать значительные трудности для наблюдения воздействий на ионосферу снизу, в частности, от тропосферных источников, которые регистрируются в виде всплесков АГВ примерно тех же пространственных масштабов, но меньших амплитуд. Если днем эффекты воздействий снизу можно наблюдать почти вплоть до высоких широт, то ночью доступными для поиска таких эффектов остаются практически лишь околоэкваториальные широты.



## ВЫВОДЫ

При пересечении спутником полярных шапок на высотах 250—400 км систематически регистрировалось усиление активности среднemasштабных АГВ до 3—10 % по сравнению с «фоновым» уровнем около 0.5 %.

АГВ над полярными шапками имеют преимущественные горизонтальные длины волн около 500—600 км. Поскольку со спутника регистрируется не истинная горизонтальная длина волны, а ее проекция на направление движения спутника, выделенные масштабы АГВ могут также свидетельствовать о преобладающем направлении их распространения.

На основе сдвигов фаз между колебаниями различных компонентов оценены периоды АГВ (таблица) и установлено направление движения волн относительно спутника.

В дневном секторе область повышенной волновой активности в основном ограничена высокими широтами, а в ночном секторе часто простирается вплоть до средних и даже низких широт.

1. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния // Успехи современной радиоэлектроники.—2005.—№ 3.—С. 4—35.
2. Dudis J. J., Reber C. A. Composition effects in thermospheric gravity waves // Geophys. Res. Lett.—1976.—3, № 12.—P. 727—730.

3. Francis S. H. Global propagation of atmospheric gravity waves: A review // J. Atmos. and Terr. Phys.—1975.—37.—P. 1011—1054.
4. Hocke K, Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982—1995 // Ann. Geophysicae.—1996.—14.—P. 917—940.
5. Hunsucker R. D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: a review // Rev. Geophys. Space Res.—1982.—20, N 2.—P. 293—315.
6. Johnson F. S., Hanson W. B., Hodges R. R., et al. Gravity waves near 300 km over the polar caps // J. Geophys. Res.—1995.—100.—P. 23993—24002.

---

**SATELLITE OBSERVATIONS OF MIDDLESCALE ACOUSTIC GRAVITY WAVES ABOVE THE POLAR CAPS**

*A. K. Fedorenko*

Wavelike disturbances over the polar caps are analysed using the Dynamic Explorer 2 satellite data. Some variations of neutral atmosphere parameters with horizontal scale lengths of about several hundred kilometers were systematically detected at altitudes from 250 to 450 km in the polar cap regions. Our analysis of amplitude and phase correlation between different atmosphere gases variations shows that these variations are generated by the propagation of acoustic gravity waves (AGW). We propose a procedure for the separation of AGW perturbations from low-frequency trends of atmosphere parameters on the basis of the cross-correlations analysis of N<sub>2</sub> and O variations. The relative AGW amplitudes in the polar regions are equal to 3—10 %, horizontal wavelengths are 500—600 km, periods are equal to tens of minutes. In the daytime region the area of high-wave activity is restricted by high latitudes but in the nighttime sector AGW usually propagate from the polar regions to mid and low latitudes.