

УДК 551.510

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕМАСШТАБНЫХ АГВ В ПОЛЯРНЫХ РЕГИОНАХ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© 2011 г. А. К. Федоренко, Е. И. Крючков

Институт космических исследований НАНУ-НКАУ, Киев, Украина

e-mail: aurora28@i.ua

Поступила в редакцию 11.01.2010 г.

После доработки 03.06.2010 г.

Исследованы особенности распределения среднemasштабных акустико-гравитационных волн (АГВ) в полярных областях по данным измерений на спутнике Dynamics Explorer 2. Над полярными регионами обоих полушарий на высотах 250–400 км систематически регистрировались волновые вариации параметров нейтральной атмосферы. Эти вариации идентифицированы как АГВ с горизонтальными длинами волн 500–650 км. Относительные амплитуды полярных АГВ в нейтральной концентрации достигают 10%. Волновые цуги простираются над полярными шапками на тысячи километров и демонстрируют отчетливую пространственную связь с авроральным овалом. Установлено систематическое направление распространения АГВ из ночного сектора овала в дневной, где волновая активность резко ограничивается. Высказано предположение, что это ограничение обусловлено динамическим взаимодействием между АГВ и зональным ветром в дневном секторе аврорального овала.

1. ВВЕДЕНИЕ

Волновая активность в параметрах нейтральной верхней атмосферы изучена недостаточно как из-за специфики наземной диагностики, так и по причине ограниченного количества прямых спутниковых измерений. Большинство наземных методов позволяют исследовать только ионизированную составляющую верхней атмосферы – ионосферу, на основе чего затем восстанавливаются свойства нейтральной среды. Особенно труднодоступными для наземных наблюдений являются полярные регионы, в первую очередь из-за высокой степени возмущенности ионосферной плазмы, которая контролируется скорее влиянием полей и высыпаний частиц, чем динамикой нейтральной атмосферы. В то же время именно в этих областях происходит наиболее интенсивный энерго- и массообмен между различными высотными звеньями геокосмоса и, соответственно, амплитуды возмущений верхней атмосферы являются максимальными. Только контактные спутниковые измерения позволяют в полной мере воссоздать картину волновой активности нейтральной атмосферы на ионосферных высотах. Для исследования АГВ в высокоширотных областях необходим низкоорбитальный полярный спутник. Этим условиям удовлетворяет ИСЗ Dynamics Explorer 2 (DE2) с высотой орбиты 250–1000 км и наклоном 89.9°. Комплекс научной аппаратуры DE2 включал датчики параметров нейтральной и плазменной компонент атмосферы [Caignan et al., 1981, Spencer et al., 1981]. Наличие синхронных измерений разных па-

раметров позволяет восстанавливать свойства АГВ, недоступные в однократных спутниковых измерениях, такие как временной период, горизонтальная фазовая скорость и направление распространения [Федоренко, 2009].

Целью работы является изучение распределения полярных среднemasштабных АГВ на основе спутниковых данных. В первом разделе проанализированы особенности регистрации и идентификации волновых возмущений в контактных спутниковых измерениях. Во втором и третьем разделах приведены результаты наблюдений планетарного распределения и установлены преобладающие направления распространения этих волн. В четвертом – представлены экспериментальные свидетельства взаимодействия АГВ с зональным ветровым потоком, возникающим в дневном секторе аврорального овала.

2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВАРИАЦИЙ

Исследование волновых процессов в прямых спутниковых измерениях связано с рядом ограничений. Характерные фазовые горизонтальные скорости АГВ (сотни м/с) значительно меньше, чем скорость низкоорбитального спутника (около 8 км/с), поэтому в контактных измерениях эти волны регистрируются в виде пространственных периодических вариаций концентрации, температуры, давления, скорости и других параметров. На масштабах длины волны АГВ (сотни км) изменением высоты орбиты спутника можно пренебречь и считать, что

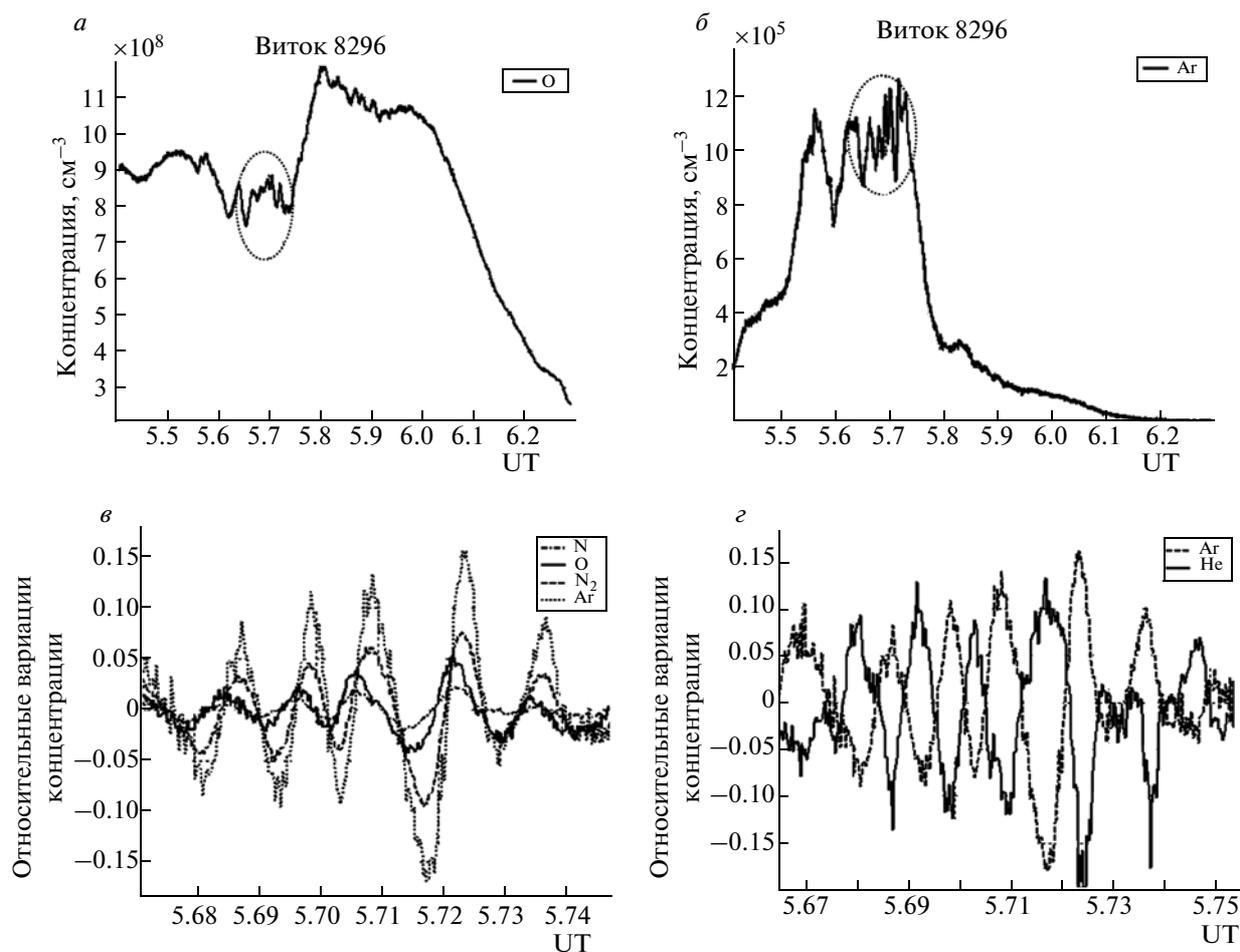


Рис. 1. Концентрации атмосферных газов на витке 8296 спутника DE2: *a*, *б* — абсолютные концентрации O и Ar, *в*, *г* — относительные вариации в разных газах.

измеряется горизонтальная компонента длины волны вдоль витка. Важным элементом обработки данных является выделение волн на фоне крупномасштабных изменений параметров другой природы, так называемый тренд. Анализируя периодические вариации необходимо, во-первых, установить, имеют ли они физическое происхождение, а не связаны с особенностями измерений, спецификой обработки данных, вращением спутника и др. Физическая волновая форма должна наблюдаться одновременно в различных атмосферных параметрах, например, в концентрациях разных сортов газов, а еще надежнее — в параметрах, измеряемых независимыми датчиками.

Основные структурные параметры нейтральной атмосферы измерялись на спутнике DE2 в двух экспериментах. Концентрации нейтральных компонент: атомарного кислорода (O), молекулярного азота (N_2), атомарного азота (N), аргона (Ar) и гелия (He) измерялись с помощью бортового масс-спектрометра в эксперименте NACS (Neutral Atmosphere

Composition Spectrometer) [Carignan et al., 1981], температура нейтральных частиц и скорость — в эксперименте WATS [Spencer et al., 1981]. На рис. 1 показано изменение концентрации двух газов — преобладающего на высотах спутника O ($\sim 10^9 \text{ см}^{-3}$) и малой составляющей Ar ($\sim 10^6 \text{ см}^{-3}$) (рис. 1*a*, *б*) по измерениям масс-спектрометра вдоль витка 8296. Над полярной областью регистрируются отчетливые волновые вариации, которые накладываются на крупномасштабный ход параметров, связанный с изменением высоты орбиты, крупномасштабной динамикой, суточным ходом и др. Абсолютные значения концентраций представленных газов отличаются на три порядка, и в каждом из них наблюдается различный крупномасштабный ход параметров. Поэтому для сравнения АГВ в разных газах необходимо рассматривать относительные вариации концентраций $\delta n_i/n_i$, нормированные на невозмущенное усредненное значение. Методика отделения волновых вариаций нейтральной концентрации от трендов описана в работе [Федоренко,

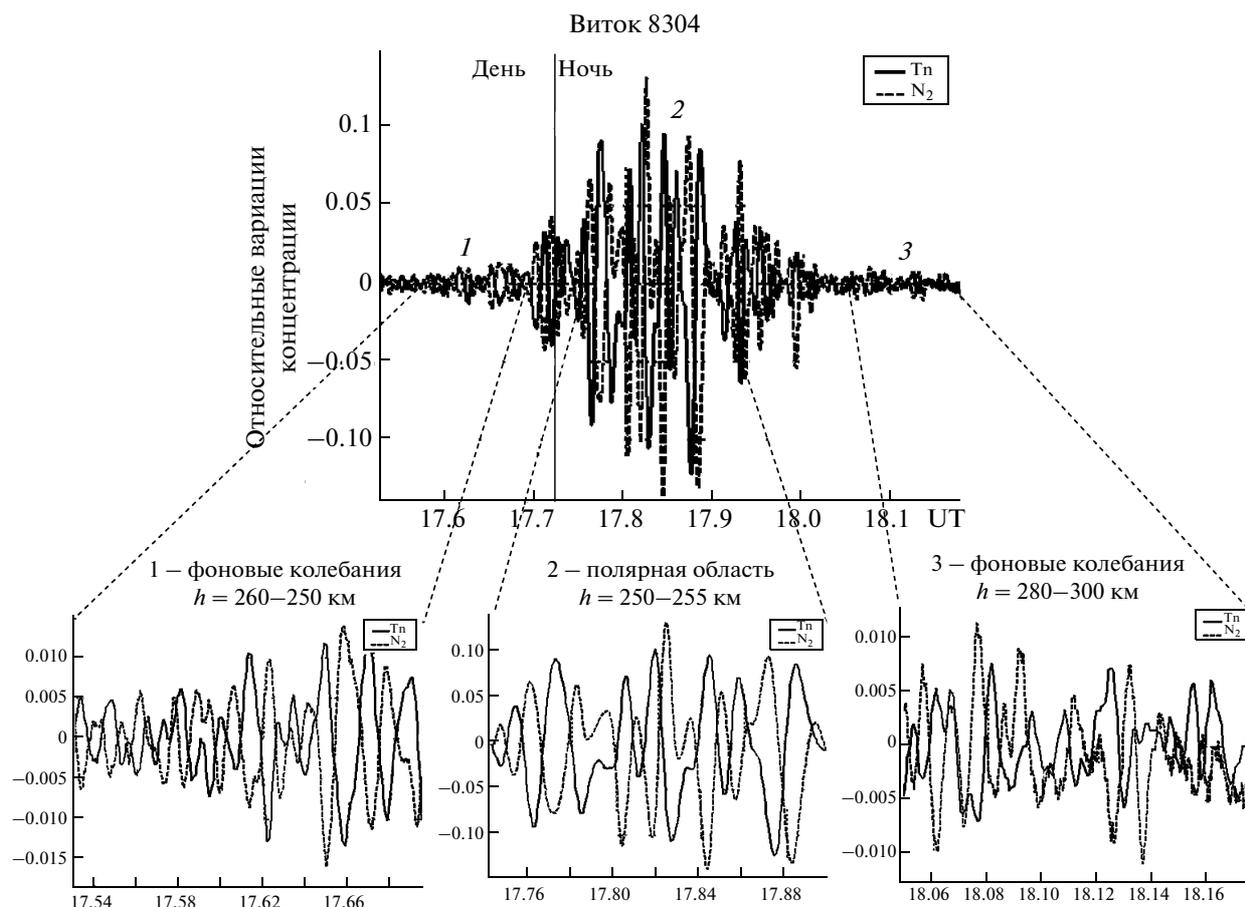


Рис. 2. Относительные вариации концентрации N_2 и температуры на витке 8304: 1 – средние широты, 2 – полярная область, 3 – низкие широты.

2009]. В основу этой методики положен стандартный метод скользящего среднего, при этом размеры окна выбирались из условия максимальной кросс-корреляции колебаний в разных сортах газов. Синхронные относительные вариации концентраций в отдельных газах в полярной области показаны более крупным планом на рис. 1в, г. Наблюдаются амплитудные и фазовые отличия между пространственными профилями колебаний компонент. Однако совпадение масштабов колебаний, соотношения амплитуд отдельных пиков, указывают на то, что в разных газах мы видим одну и ту же волну. Согласованный характер вариаций не только подтверждает их физическую природу, но также и адекватность процедуры отделения волн от крупномасштабных изменений. Сравнение экспериментальных зависимостей с теоретическими поляризационными соотношениями дает возможность идентифицировать эти волновые формы как АГВ и определять их основные спектральные свойства. Преобладание относительной амплитуды колебаний в тяжелых газах,

опережение или отставание профиля концентраций O и N относительно N_2 и Ar (рис. 1в), почти противофазность колебаний He относительно тяжелых газов (рис. 1г), – все это признаки, присущие АГВ [Dudis and Reber, 1976; Федоренко, 2009]. Различие между профилями колебаний в газах обусловлено отличием их высотных распределений концентраций выше турбопаузы. При смещении элементарного объема на некоторую высоту (для АГВ в верхней атмосфере обычно от сотен метров до нескольких километров) изменение фоновой концентрации и, как следствие, относительная амплитуда тяжелых газов N_2 (28 а.е.м.) и Ar (40 а.е.м.) будет больше, чем для O (16 а.е.м.) и N (14 а.е.м.) [Dudis and Reber, 1976].

Характерное распределение относительных вариаций концентрации и температуры, измеренных разными датчиками, вдоль витка спутника DE2 показано на рис. 2. Концентрация N_2 и температура нейтральных частиц показаны на трех разных участках витка 8304 в южном полушарии: 1 – в средних

широтах, день; 2 — над полярной областью, ночь; 3 — в низких широтах, ночь. Вариации температуры и концентрации относительно невозмущенных значений связаны в АГВ соотношением [Dudis and Reber, 1976]

$$\frac{\delta T_n}{T_n} = \left(\frac{P}{R} - 1 \right) \frac{\delta n}{n}, \quad (1)$$

где P и R — поляризационные факторы, которые зависят от спектральных свойств АГВ и характеристик среды. В зависимости от типа АГВ сдвиг фаз между колебаниями концентрации и температуры может составлять 120–180°. Характер связи колебаний температуры и концентрации на витке 8304 согласуется с выражением (1). Кроме полярной области с относительной амплитудой АГВ до 10%, внимание привлекают фоновые колебания в области 1 с амплитудой не более 1%, которые также демонстрируют признаки АГВ. В области 3 (высоты 280–300 км) характер связи между температурой и концентрацией более хаотичный. Это может быть следствием недостаточной точности измерений или указывать на то, что таких высот АГВ с малыми амплитудами не достигают. Вопрос о том, до каких высот могут распространяться АГВ в термосфере, требует отдельного исследования.

3. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯРНЫХ АГВ

Для исследования полярных АГВ проанализированы данные измерений за весь период функционирования спутника DE2 с сентября 1981 г. по февраль 1983 г. Орбита спутника была солнечно-синхронная, но поскольку она медленно прецессировала, наблюдениями охвачены практически все часовые пояса. Систематичность изучения глобального распределения волновой активности усложнялась изменением высоты орбиты, из-за чего в разные периоды условия для наблюдений южной и северной полярных областей были неравноценными. В отдельные месяцы спутник поднимался слишком высоко, или минимум высоты орбиты приходился на низкие широты. Наиболее благоприятные условия для наблюдения полярных АГВ сложились в конце миссии DE2 в январе-феврале 1983 г., когда спутник опустился настолько низко, что можно было исследовать волновую активность над обеими шапками на одном и том же витке. Всего отобрано и проанализировано около 280-ти витков, на которых спутник пролетал ниже 350-ти км над полярными шапками.

Особенности распределения АГВ для южного (слева) и северного (справа) полушарий представлены на рис. 3. В координатах инвариантная широта и магнитное местное время показаны примерные границы, когда интенсивность полярных АГВ сравнивается с фоновым уровнем. Под границами понимаются начало и конец области повышенной волновой

активности. В целом эти границы полярных АГВ демонстрируют выраженное пространственное совпадение с авроральным овалом (рис. 3). Понятно, что речь идет о некоторой конфигурации овала, усредненной за разные периоды геомагнитной активности. В отличие от крупномасштабных АГВ, частота появления которых коррелирует с геомагнитной активностью [Hunsucker, 1982; Hocke and Schlegel, 1996], рассматриваемые волны наблюдаются систематически при разных уровнях активности.

Полярные АГВ фактически заполняют весь авроральный овал изнутри, и почти не наблюдаются с его внешней стороны. Исключение составляют южное полушарие в январе-феврале и северное полушарие в июле-сентябре, когда в ночном секторе границы полярной волновой активности простираются далеко за пределы овала, иногда до 20° геомагнитной широты, образуя своеобразные "хвосты" (рис. 3*в, е*). В другие времена года полярные АГВ, как правило, ограничиваются геомагнитными широтами 55–70° ночью и 65–80° днем. Отметим, что точки плотнее ложатся на график в часовых интервалах, где больше данных измерений. В частности, пробелы в данных за январь-февраль 1983 г. в часовых поясах 5–10^h и 20–24^h связаны с тем, что спутник просто в эти пояса не попадал. Интересно отметить, что ночной "хвост" в северном полушарии смещен ближе к утренним часам, чем в южном полушарии (рис. 3*в, е*). Эти ночные "хвосты" в распределении полярных АГВ, имеют амплитуды в несколько раз меньшие, чем волны в пределах овала, т. е. основная волновая активность сосредоточена именно внутри овала. В дневном секторе АГВ ограничиваются, как правило, резко, часто на фоне увеличения амплитуды и никогда не достигают средних и низких геомагнитных широт.

4. НАПРАВЛЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН

Положение границ полярных АГВ дает пространственное представление о связи этих волн с авроральным овалом. Для получения более полной картины глобального распределения необходимо определить направления их распространения. Рассмотрим, как можно определить направление АГВ на основе спутниковых измерений разных атмосферных параметров.

Для распространяющейся в пространстве волны между колебаниями вертикального смещения и вертикальной скорости должен наблюдаться сдвиг фаз $\pi/2$ [Johnson et al., 1995]. Для определения направления движения полярных АГВ используем измерения скорости в эксперименте WATS и концентраций в эксперименте NACS. Вертикальное смещение элементарного объема h при распространении АГВ можно вычислить на основе измерений кон-

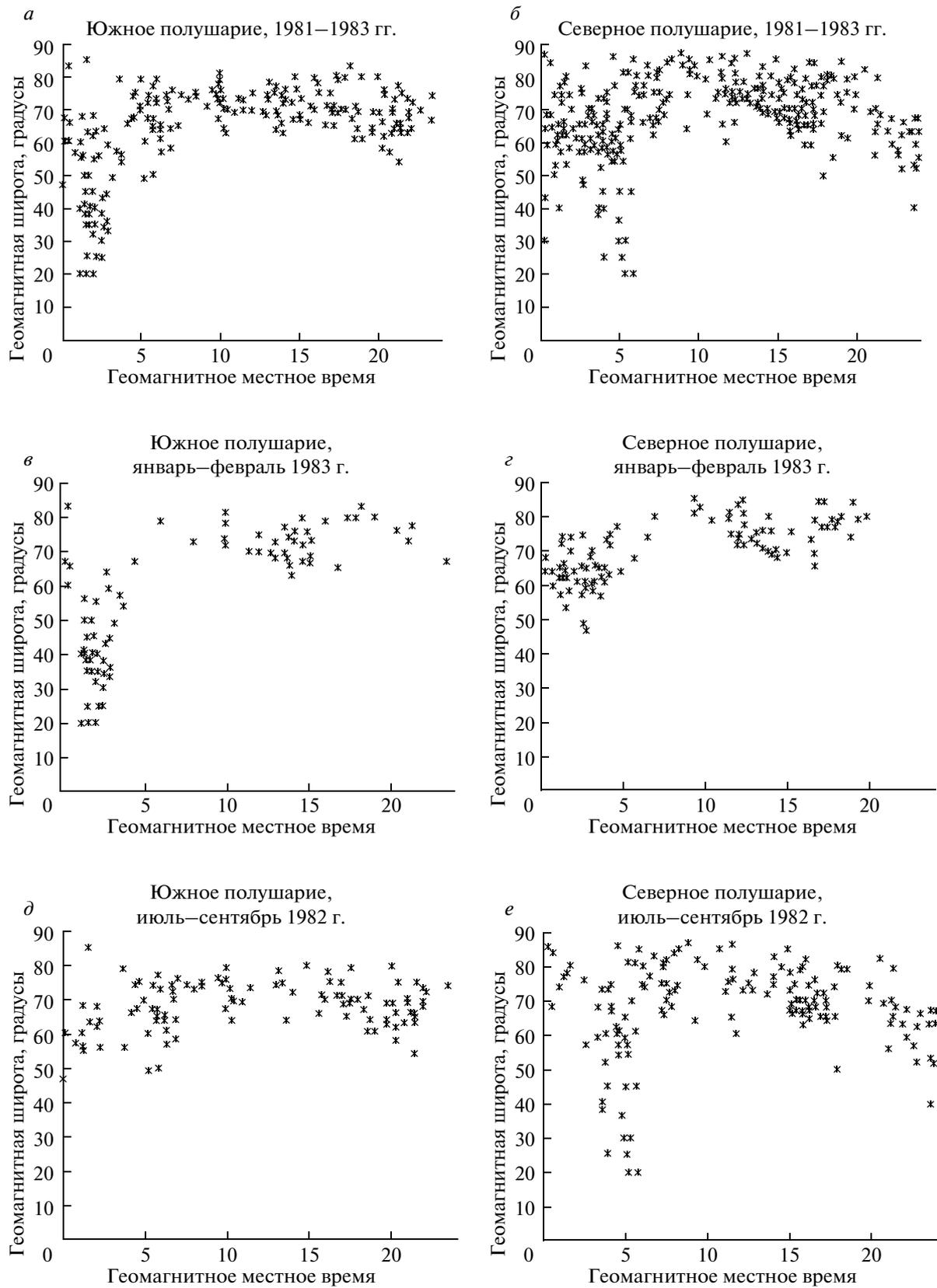


Рис. 3. Границы полярных среднemasштабных АГВ: *а, б* – интегральная картина за весь период наблюдений; *в, г* – январь–февраль; *д, е* – июль–сентябрь.

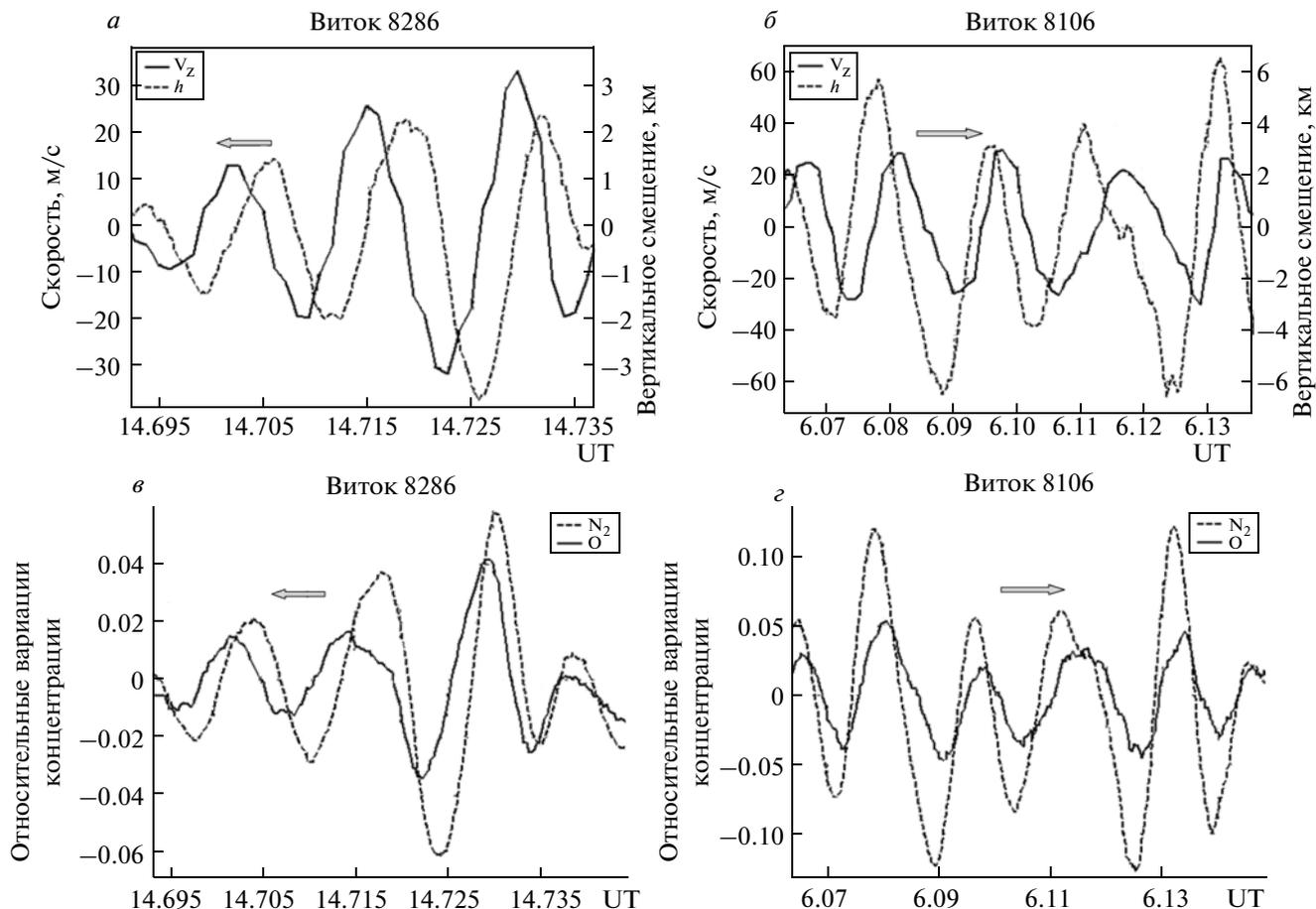


Рис. 4. Определение направления движения АГВ относительно спутника: а, б – вариации вертикальной скорости и смещения; в, г – относительные вариации концентраций O и N_2 .

центраций и температуры по формуле [Федоренко, 2010]

$$h = \left(\frac{H(O)H(N_2)}{H(O) - H(N_2)} \right) \left(\frac{\delta n(N_2)}{n(N_2)} - \frac{\delta n(O)}{n(O)} \right) = \frac{kT_n}{g} \frac{1}{m(N_2) - m(O)} \left[\frac{\delta n(N_2)}{n(N_2)} - \frac{\delta n(O)}{n(O)} \right], \quad (2)$$

где $n(O)$ и $n(N_2)$ – концентрации газов, $\delta n(N_2)$, $\delta n(O)$ – волновые отклонения от средних значений,

$H(O) = \frac{kT_n}{m(O)g}$, $H(N_2) = \frac{kT_n}{m(N_2)g}$ – высоты однородных атмосфер газов, k – постоянная Больцмана, T_n – температура нейтральной компоненты, $m(O)$ и $m(N_2)$ – массы молекул, g – ускорение силы тяжести. Поскольку $T_n = T_{n0} + \delta T_n$, для вычисления вертикального смещения можно использовать приближенную формулу:

$$h \approx \frac{kT_{n0}}{g} \frac{1}{m(N_2) - m(O)} \left[\frac{\delta n(N_2)}{n(N_2)} - \frac{\delta n(O)}{n(O)} \right], \quad (3)$$

и при отсутствии измерений температуры взять, например, модельное значение T_{n0} .

Синхронные профили колебаний вертикальной скорости по измерениям WATS и рассчитанного по формуле (3) вертикального смещения показаны на рис. 4 сверху. На витке 8286 АГВ движется навстречу спутнику, на витке 8106 – спутник и волна движутся в одном направлении (рис. 4а, б).

Существует возможность определять направление АГВ только по измерениям концентраций, не вычисляя h и без измерений вертикальной скорости [Федоренко, 2009]. В основе этого метода лежит представление о вариациях концентрации любого газа как суперпозиции акустической (вследствие градиента давления) и гравитационной (из-за вертикальных смещений) составляющих. Акустическая компонента примерно одинакова для всех сортов

Характеристики полярных АГВ

Виток	$\frac{\delta n}{n_0}, \%$	Высота	UT	LAT	SLT	LMT	Полушарие	Направление
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Июль–август, 1982 г.								
4983	2	300–400	7.60–7.80	67–68	15.9–3.9	15.4–4.1	N	←
4984	3	300–430	9.19–9.43	70–59	15.9–3.9	16.0–3.3	N	←
4986	4	310–430	12.35–12.56	74–57	15.9–3.9	17.7–2.6	N	←
4991	3	290–370	20.15–20.35	70–67	15.9–3.9	16.5–4.1	N	←
5053	5	300–400	21.80–22.04	67–62	15.6–3.6	15.0–4.5	N	←
5424	4–5	370–300	6.04–6.25	63–72	2.0–14.0	1.6–14.1	S	→
5454	5	370–300	5.10–5.30	56–80	1.8–13.8	1.3–14.8	S	→
5462	3–5	420–320	17.57–17.75	63–74	1.8–13.8	2.2–13.0	S	→
5487	3–4	350–310	8.89–9.05	56–76	1.7–13.7	2.3–9.5	S	→
5500	5	340–310	5.30–5.53	55–72	1.6–13.6	1.3–14.0	S	→
5600	3–5	320–310	18.14–18.34	68–64	1.2–13.2	1.3–13.6	S	→
5614	2–4	315–310	16.10–16.26	68–73	1.2–13.2	2.0–11.4	S	→
2. Ноябрь, 1982 г.								
6852	2	340–290	4.00–4.20	64–65	20.2–8.2	21.5–6.9	S	→←
6901	2	340–300	7.84–7.98	69–70	20.0–8.0	22.0–5.0	S	не выражено
6903	5	350–315	10.90–11.00	70–85	20.0–8.0	21.0–1.6	S	→
6922	2	310–290	16.39–16.50	71–70	19.9–7.9	16.8–10.5	S	←
6925	2	305–295	21.08–21.20	71–76	19.9–7.9	17.1–9.5	S	←
6930	2	315–295	7.75–4.95	63–64	19.9–7.9	21.5–6.2	S	→←
6940	2	300	20.28–20.40	69–76	19.8–7.8	17.1–10.0	S	←
6972	2–3	295–310	21.80–21.95	70–74	19.7–7.7	18.0–8.5	S	не выражено
6991	2	295–315	3.20–3.34	73–65	19.6–7.6	22.1–6.2	S	→←
6992	2	290–305	4.68–4.85	65–67	19.6–7.6	21.5–5.5	S	→←
6994	2	300–305	7.72–7.91	65–65	19.6–7.6	21.2–5.8	S	→←
7004	3–4	295–325	23.26–23.45	61–74	19.5–7.5	19.0–7.6	S	←
7005	3	300–320	0.84–1.00	69–70	19.5–7.5	20.1–6.8	S	не выражено
7022	2–3	295–335	3.08–3.30	63–61	19.5–7.5	20.8–6.3	S	→←
7048	2–3	295–320	19.31–19.42	70–75	19.3–7.3	16.0–9.7	S	←
7054	2	300–335	4.53–4.72	65–64	19.3–7.3	21.2–5.7	S	→←
7076	2	290–315	14.50–14.62	70–73	19.2–7.2	17.6–10.2	S	←
3. Январь, 1983 г.								
8192	10–15	340–370	16.02–16.18	62–78	2.0–14.0	1.1–18.0	N	→
8196	5–10	340–375	22.04–22.26	59–72	2.0–14.0	2.7–11.9	N	→
8201	3–5	340–370	5.61–5.71	75–81	2.0–14.0	4.2–12.3	N	→
8205	4–6	340–370	11.64–11.78	68–77	2.0–14.0	0.3–17.4	N	→
8206	5–7	340–375	13.13–13.30	59–77	2.0–14.0	0.8–17.9	N	→
8208	6–10	350–375	16.19–16.33	65–79	2.0–14.0	1.1–17.7	N	→
8215	3–4	270–250	3.58–3.78	77–40	14.0–2.0	21.3–1.4	S	←
8216	5–6	280–250	4.95–5.30	67–35	13.9–1.9	14.7–1.8	S	←
8257	5	265–250	18.90–19.17	66–45	13.8–1.8	13.9–1.5	S	←
8273	3–5	260–250	19.04–19.27	73–50	13.7–1.7	14.2–1.4	S	←
8286	2–3	260–250	14.60–14.90	70–32	13.6–1.6	11.4–2.0	S	←
8303	4–6	250–255	16.20–16.42	70–55	13.6–1.6	12.0–2.0	S	←
8304	6–8	250–260	17.70–18.00	68–35	13.6–1.6	13.0–1.6	S	←

Примечание: 1 – номер витка; 2 – относительные вариации концентрации; 3 – высота орбиты в пределах волнового цуга; 4 – интервал UT, который соответствует волновой области; 5 – инвариантная широта; 6 – солнечное местное время; 7 – магнитное местное время; 8 – южное (S) или северное (N) полушария; 9 – направление АГВ (“←” – волна распространяется навстречу спутнику, “→” – в одном со спутником направлении).

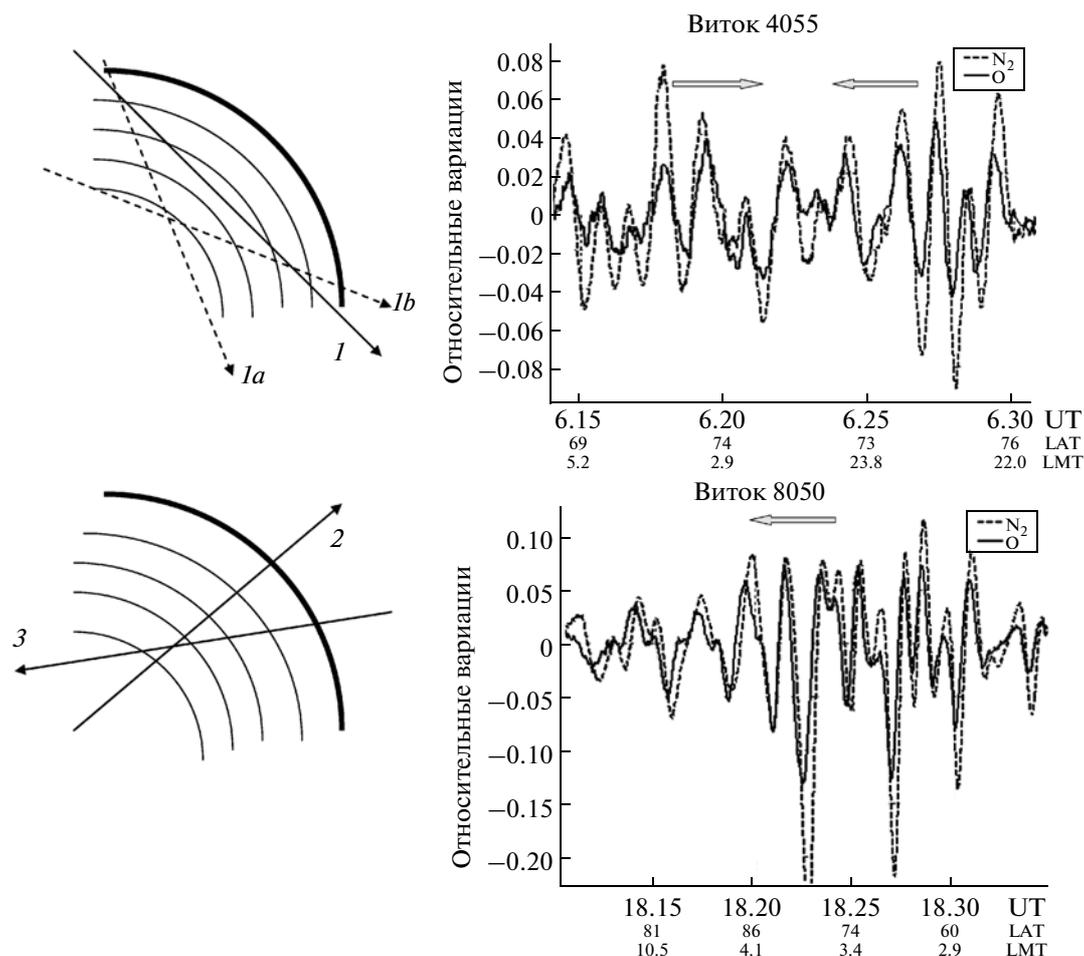


Рис. 5. Варианты пересечений волновых фронтов полярных АГВ (слева), соответствующие вариации концентраций (справа). На витке 4055 спутник пересекает фронт в направлении утро–вечер ($8.1^{\text{h}}-20.1^{\text{h}}$), на витке 8050 – день–ночь ($14.7^{\text{h}}-2.7^{\text{h}}$).

атмосферных газов, а гравитационные составляющие отличаются из-за разного хода концентраций этих газов с высотой. Более легкий O по фазе оказывается близок к колебаниям скорости, а тяжелый N_2 – к вертикальному смещению. Результирующие профили колебаний концентраций O и N_2 как бы “зажаты” между профилями колебаний скорости и смещения [Федоренко, 2009]. Сдвиг фаз между колебаниями O и N_2 зависит от спектральных свойств волны и, как правило, не превышает 40° , при этом опережение колебаний O указывает на направление распространения АГВ (рис. 4в, г).

Орбита DE2 солнечно-синхронная с наклоном 89.9° , поэтому, если спутник половину витка летит в часовом поясе LT1, то другую половину – в $LT2 = LT1 \pm 12^{\text{h}}$. Переход день–ночь или утро–вечер происходит вблизи географических полюсов. В таблице приведены три отдельных блока с результатами наблюдений АГВ для разных локальных часовых по-

ясов. Блоки 1 и 3 относятся к периоду, когда орбита DE2 была синхронизирована в поясах день–ночь, блок 2 – утро–вечер. Из наблюдений полярных АГВ следует: при синхронизации орбиты в широком диапазоне часовых поясов $22-04^{\text{h}}$ и $10-16^{\text{h}}$ по местному солнечному времени наблюдается систематическое направление движения АГВ из ночи в день (таблица). Такая ситуация реализуется в обоих полушариях и в разные времена года. При синхронизации орбиты в поясах $6-9^{\text{h}}$ и $18-21^{\text{h}}$ (утро–вечер) направление распространения не является систематическим: встречаются АГВ, движущиеся как навстречу спутнику, так и от него, а также расщепление волновой области на две с встречными движениями (“ $\rightarrow\leftarrow$ ”, таблица). Иногда сдвиг фаз между колебаниями O и N_2 не выражен и нельзя определить, куда движется волна.

На основе анализа наблюдений можно сделать вывод, что гипотетический источник полярных АГВ должен быть сосредоточен в ночном секторе овала и

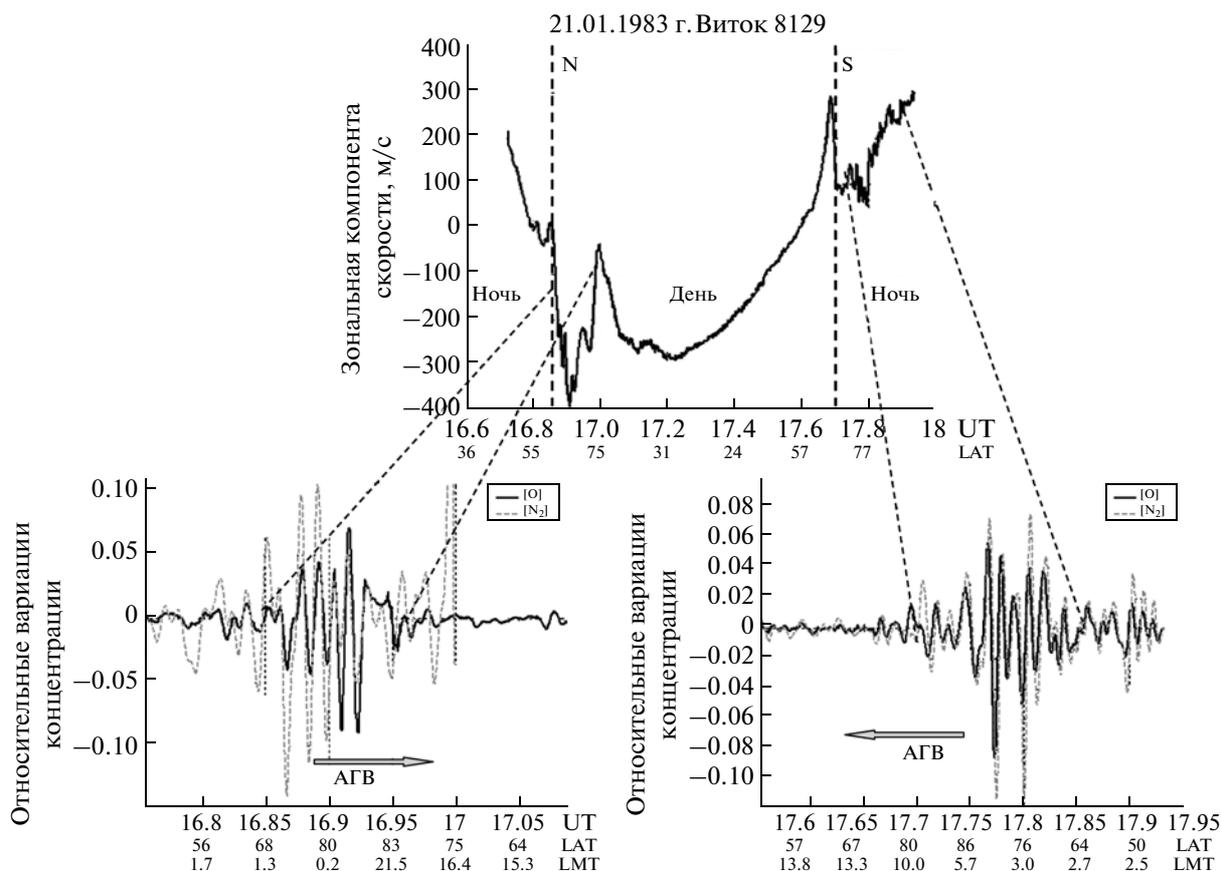


Рис. 6. Зональная компонента скорости нейтральных частиц (верхний фрагмент) и вариации концентрации в полярных регионах северного и южного полушарий (нижний фрагмент) на витке 8129, LAT – инвариантная широта, LMT – местное магнитное время. Стрелка указывает направление движения АГВ.

является достаточно протяженным (около 6-ти часовых поясов). В течение суток такой источник описывает круг относительно географического полюса и оказывается по-разному расположенным относительно него в зависимости от момента времени UT. Как видно из таблицы, встречные волновые движения наблюдаются над южной полярной шапкой в интервале UT примерно от 3 до 7 часов. Именно в эти часы ночной сектор овала находится ближе всего к южному географическому полюсу и, соответственно, спутник пролетает ближе всего к источнику.

Наблюдаемые особенности можно понять, если представить волновые фронты в виде дуг, повторяющих конфигурацию ночного участка овала. Возможные варианты пересечения волновых фронтов спутником показаны на рис. 5 слева, а соответствующие им вариации в газах – справа. Жирной дугой обозначен гипотетический источник, от которого волны распространяются внутрь овала. Чаще всего реализуются варианты, когда волна движется или навстречу спутнику (стрелка 3), или в одном с ним направлении (стрелка 2). На рис. 5 внизу справа в вариациях концентрации показано случай 2 – волна

движется навстречу спутнику. Направление распространения отчетливо видно в систематическом отставании профиля колебаний O относительно N₂ вдоль витка. В случае 1 будет наблюдаться расщепление волновой области на две с встречными движениями. Такая ситуация реализуется, например, на витке 4055, когда спутник летит из утра (8.1^h) в вечер (20.1^h) по местному солнечному времени. Вдоль траектории 1 проекция фазовой скорости на направление спутника вначале положительна, затем становится близкой к нулю и, наконец, отрицательной. Это отражается в сдвиге фаз колебаний O по движению спутника опережением колебаний O относительно N₂ сменяется отставанием (рис. 5, фрагмент вверху справа). Отметим, что встречные движения указывают на распространение волн именно внутрь овала, а не наружу, в противном случае движения были бы в разные стороны. Такие встречные направления движений никогда не наблюдались при синхронизации спутника в поясах день–ночь.

Поскольку геомагнитный и географический полюса не совпадают, даже в случае синхронизации орбиты в географическом поясе утро–вечер, вблизи

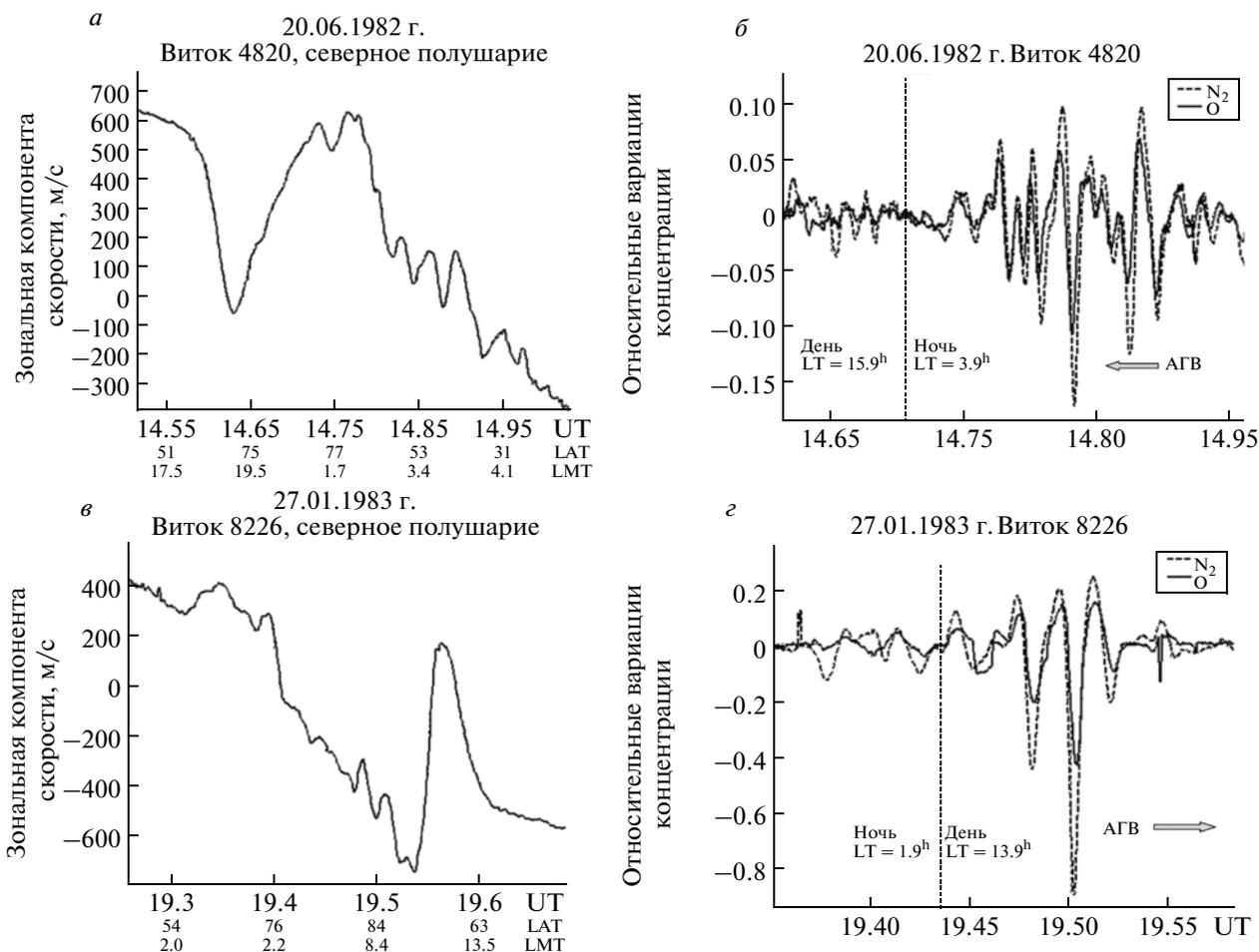


Рис. 7. Зональная компонента скорости нейтральной атмосферы (слева), вариации концентраций O и N₂ (справа): а, б – северное полушарие, июнь; в, г – северное полушарие, январь; д, е – южное полушарие, январь; ж, з – южное полушарие, июль

полюса геомагнитное время может существенно отличаться от солнечного, и тогда вариант 1 не обязательно будет наблюдаться. Если геомагнитное время, соответствующее началу или концу волнового пуга, значительно отличается от солнечного, возможны варианты 1b или 1a вместо 1. Тогда будет видна только часть фронта с встречными или в одну сторону со спутником движениями.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АГВ С ВЕТРОМ

Рассмотрим подробнее область ограничения волновой активности полярных АГВ в дневном секторе. Для этого, кроме концентраций, проанализируем также поведение ветра в области локализации пугов полярных АГВ на основе измерений скорости в эксперименте WATS [Carignan et al., 1981].

На ИСЗ DE2 измерялись две компоненты скорости ветра: вертикальная и горизонтальная, перпендикулярная к вектору скорости спутника. Посколь-

ку спутник летит примерно вдоль меридиана, фактически регистрируется горизонтальная зональная (запад–восток) компонента. Распределение зональной составляющей скорости нейтральных частиц на витке 8129 (21 января 1983 г.) показано на рис. 6. Вначале спутник летит в ночном секторе (LT = 2.3^h), в момент UT = 16.9^h пролетает вблизи северного географического полюса и попадает в день (LT = 14.3^h), в момент UT = 17.7^h пролетает вблизи южного полюса, опять попадая в ночь. Амплитуда вариаций концентраций O возрастает в полярных областях обоих полушарий примерно до 5%. опережение колебаний концентрации O относительно N₂ указывает на направление движения АГВ. Волновые вариации заметны также в горизонтальной зональной компоненте скорости нейтральных частиц на фоне трендов, связанных с вращением Земли и наличием ветров. Как видно из нижних рисунков, в обоих полушариях АГВ распространяются из ночного сектора в дневной. При этом волновые пуги достаточно резко ограничиваются в дневном секторе в про-

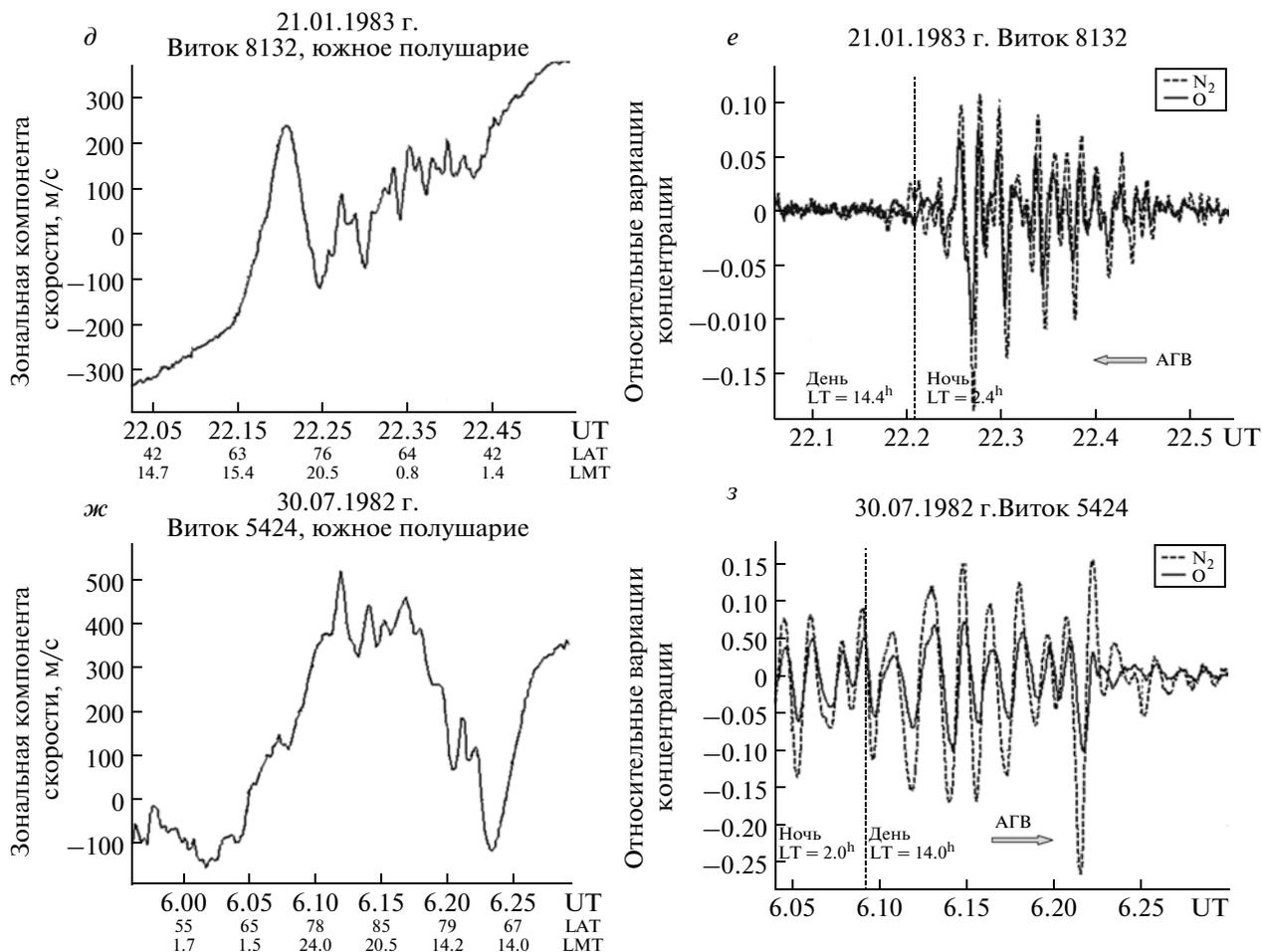


Рис. 7. Окончание.

странственной области, совпадающей с ветровыми потоками. Первая ветровая структура (видна в интервале UT = 16.85^h ... 17.1^h) ограничивает цуг АГВ в полярных областях северного полушария, другая структура (UT = 17.62...17.7^h) – в южном полушарии. Скорости ветров в этих областях достигают 200...400 м/с.

Наблюдаемая картина повторяется в разные сезоны и в обоих полушариях. Конфигурация орбиты DE2 такая, что в январе спутник вблизи южного полюса систематически влетает из дневного сектора в ночной, вблизи северного полюса – из ночного сектора в дневной. В июле, наоборот, вблизи южного полюса происходит переход ночь—день, а около северного полюса день—ночь. При этом АГВ систематически распространяются из ночи в день, и в обоих полушариях реализуются ситуации, показанные на рис. 7. Из сравнения фрагментов слева и справа видно, что систематически область уменьшения волновой активности днем пространственно совпадает с зональным ветровым потоком. На всех рассмотренных витках, над обоими полушариями, в разные

времена года АГВ всегда движутся к ветровому потоку и никогда от него. При затухании АГВ за счет вязкости наблюдалось бы постепенное уменьшение амплитуды, но полярные волны разрушаются внезапно, часто на фоне возрастающей амплитуды. Отметим, что этот зональный поток ветра в обоих полушариях направлен против вращения Земли.

При взаимодействии АГВ с ветром в общем случае возможны следующие сценарии: 1) отражение волн на критических ветровых сдвигах при совпадении фазовой горизонтальной скорости АГВ со скоростью ветра; 2) отклонение волны от первоначального направления распространения; 3) поглощение энергии АГВ ветром. Наблюдаемые на ИСЗ DE2 волны идут в направлении к ветровому потоку, и не наблюдаются после него, как это было бы при обычном сносе волны ветром. Не наблюдаются также и встречные волны – отраженные от потока. Таким образом, анализ экспериментальных данных, скорее всего, указывает на разрушение волн в потоке ветра. Особенно отчетливо это видно на витке 8132, где в области, пространственно совпадающей с по-

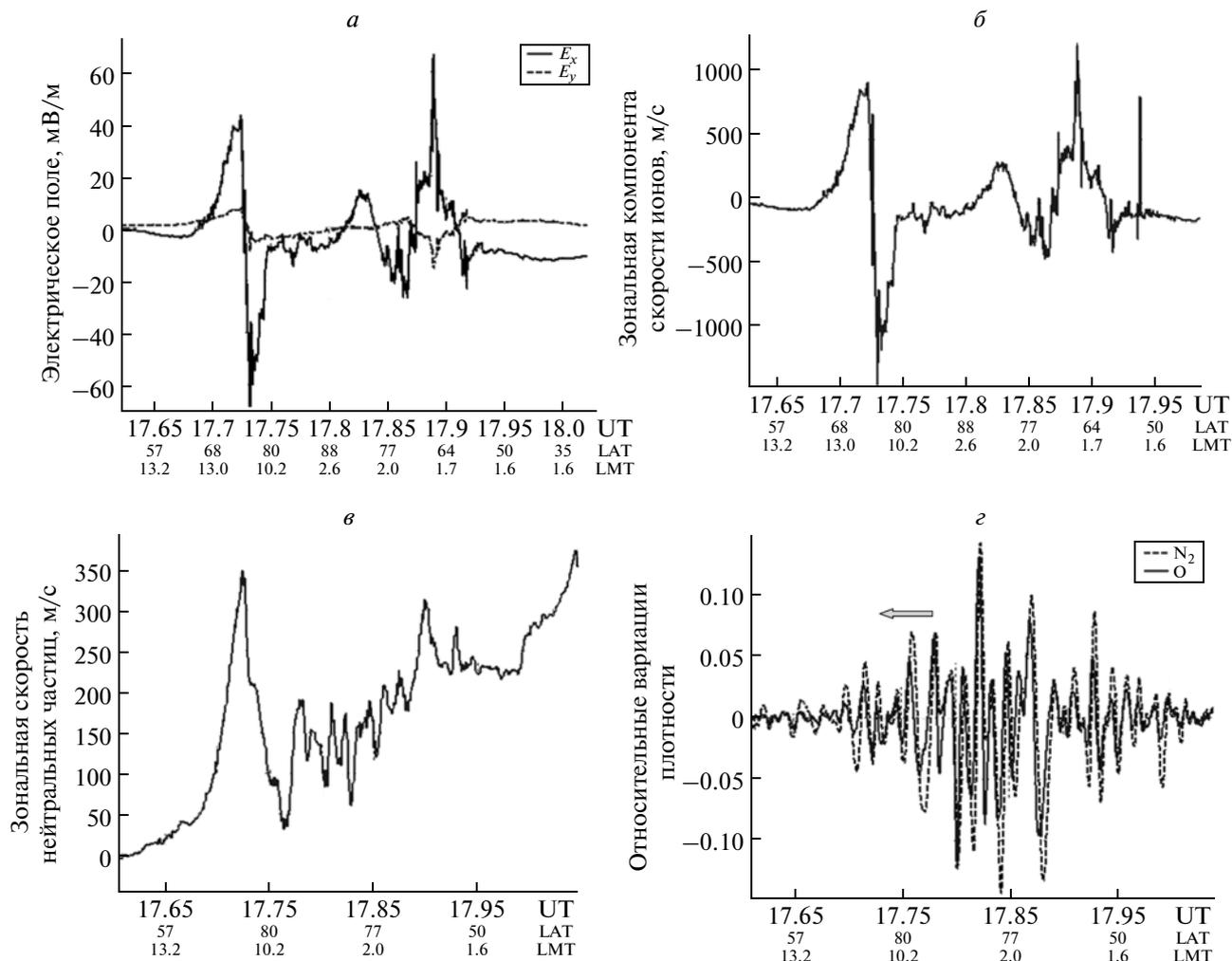


Рис. 8. Синхронные измерения вариаций нейтральной атмосферы и характеристик полей и плазмы на витке 8304: *a* – вертикальная (E_y) и горизонтальная меридиональная (E_x) компоненты электрического поля; *б*, *в* – зональные компоненты скоростей ионов и нейтральных частиц; *з* – относительные вариации концентраций O и N₂.

током (UT = 22.15–20.25^h), видны остатки волны (рис. 7*д*, *е*).

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экспериментально обнаруженные особенности поведения полярных АГВ (генерация в ночном секторе овала, выделенное направление распространения из ночи в день, разрушение на дневной стороне овала) отражают сложную картину взаимодействий в системе магнитосфера–ионосфера–атмосфера. Аномально большие значения скоростей ветров в полярной термосфере (до 800 м/с и более), традиционно связывают с передачей импульса от ионов к нейтральной компоненте. Ионы разгоняются за счет $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$ дрейфа в электрических полях магнитосферной конвекции. Синхронные измерения зональных компонент скоростей нейтральных частиц и плазмы, а также напряженности электрического

поля показаны на примере витка 8304 (рис. 8). Зональная компонента скорости ионов фактически повторяет конфигурацию меридиональной составляющей электрического поля (рис. 8*а*, *б*), что отражает дрейф плазмы в скрещенных полях. В интервале UT = 17.70–17.75^h (пространственный масштаб около 1400 км), структура в электрическом поле и скорости ионов направлена в разные стороны, что вероятно отражает двойную систему токов, втекающих в ионосферу и вытекающих из нее [Iijima and Potemra, 1976]. Нейтральный ветровой поток возникает пространственно в этой же области, но, в отличие от плазмы, является однонаправленным (рис. 8*в*), причем в обоих полушариях систематически формируется в направлении против вращения Земли. Если предположить, что за формирование зонального потока нейтрального ветра целиком ответственны ионы, не совсем понятно, почему этот поток всегда однонаправленный, в то время как в

ионах чаще всего в этой области наблюдаются движения в разные стороны. На основе анализа экспериментальных данных на ИСЗ DE2 можно предположить еще одну гипотетическую возможность для возникновения этого потока ветра. Если источник полярных АГВ сосредоточен в ночном секторе овала и достаточно протяженный, а волны движутся внутрь овала, плотность их энергии должна неизбежно увеличиваться за счет самофокусировки. Эффективность такой фокусировки сильно зависит от степени когерентности источника. Признаками фокусировки являются увеличение амплитуды волны и внезапное разрушение при достижении некоторого критического уровня. На многих витках разрушение полярных АГВ действительно происходит внезапно на фоне возрастающей амплитуды (рис. 6, 7). При этом увеличение амплитуды может маскироваться влиянием конкурирующего процесса — вязкой диссипации. При разрушении АГВ за счет фокусировки ее энергия и импульс будут приноситься в компактную область пространства — своеобразный фокус. Поскольку полярные АГВ носят систематический характер и имеют преобладающее направление распространения, они осуществляют направленный перенос значительного количества энергии и импульса, которые должны куда-то деваться после разрушения волн. Систематическое пространственное совпадение области разрушения АГВ с ветровым потоком вряд ли может быть случайным. Наиболее вероятно, что происходит постоянная подкачка зонального потока ветра энергией и импульсом разрушающихся АГВ. Плотность энергии полярных АГВ составляет около 10^{-7} эрг/см³, при этом мало изменяется в интервале высот 250–400 км [Johnson et al., 1995; Федоренко, 2010]. Выше 350 км эта энергия по порядку величины сравнима с кинетической энергией ветра $\rho_0 v_0^2 / 2$, который дует со скоростью около 300 м/с. Таким образом, с точки зрения энергетики полярные АГВ действительно могут существенно влиять на зональный ветровой поток. Возможный вклад полярных среднемасштабных АГВ в формирование и поддержание этого потока требует дальнейшего исследования.

7. ВЫВОДЫ

На основе данных измерений на спутнике DE2 проанализировано поведение полярных среднемасштабных АГВ. Эти волны систематически наблюдаются на высотах 250–400 км и заполняют практически всю полярную область, ограниченную авроральным овалом. В широком диапазоне часовых поясов

(протяженностью не менее 6-ти) наблюдается систематическое направление движения АГВ из ночи в день. На основе этого высказано предположение, что область генерации сосредоточена в ночном секторе овала, а сам источник должен быть достаточно протяженным. Волны распространяются внутрь овала и практически не наблюдаются с его внешней стороны, за исключением “хвостов” небольшой амплитуды (рис. 3*в*, *е*). На распространение волн внутрь овала указывают также встречные волновые движения, которые наблюдаются при синхронизации спутника в направлении утро-вечер. В дневном секторе волновая активность, как правило, резко ограничивается на геомагнитных широтах 65...75°. Обнаружен эффект пространственного совпадения области ограничения полярных АГВ на дневной стороне с зональным потоком ветра. Предполагается, что взаимодействие волн с этим потоком приводит к разрушению АГВ и подпитке потока их энергией и импульсом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Федоренко А.К. Восстановление характеристик атмосферных гравитационных волн в полярных регионах на основе масс-спектрометрических спутниковых измерений // Радиопизика и радиоастрономия. Т. 14. № 3. С. 254–265. 2009.
- Федоренко А.К. Энергетический баланс акустико-гравитационных волн над полярными шапками по данным спутниковых измерений // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 50. № 1. С. 111–122. 2010.
- Carignan G.R., Block B.P., Maurer J.C., Hedin A.E., Reber C.A., Spencer N.W. The neutral mass Spectrometer on Dynamics Explorer // Space Sci. Instrum. V. 5. P. 429. 1981.
- Dudis J.J., Reber C.A. Composition effects in thermospheric gravity waves // Geophys. Res. Letters. V. 3. № 12. P. 727–730. 1976.
- Hocke K, Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982–1995 // Ann. Geophysicae. V. 14. P. 917–940. 1996.
- Hunsucker R. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: a review // Rev. Geophys. Space Phys. V. 20. P. 293–315. 1982.
- Johnson F.S., Hanson W.B., Hodges R.R., Coley W.R., Carignan G.R., Spencer N.W. Gravity waves near 300 km over the polar caps // J. Geophys. Res. V. 100. P. 23993–24002. 1995.
- Iijima T., Potemra T.A. Field-aligned currents in the day-side cusp observed by Triad // J. Geophys. Res. V. 81. P. 5971. 1976.
- Spencer N.W., Wharton L.E., Niemann H.B., Hedin A.E., Carignan G.R., Maurer J.C. The Dynamics Explorer wind and temperature spectrometer // Space Sci. Instruments. V. 5. P. 417. 1981.