

УДК 550.383

ВЕТРОВОЙ КОНТРОЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ПОЛЯРНОЙ ТЕРМОСФЕРЕ

© 2013 г. А. К. Федоренко, Е. И. Крючков

Институт космических исследований НАНУ и НКАУ, г. Киев, Украина

e-mail: aurora28@i.ua; john_k@i.ua

Поступила в редакцию 01.03.2011 г.

После доработки 13.10.2011 г.

На основе анализа данных измерений на спутнике *Dynamics Explorer 2* исследована связь направлений движения полярных акустико-гравитационных волн с ветром на высотах 250–350 км. Представлена методика, позволяющая по одноточечным измерениям разных параметров нейтральной атмосферы определить направление движения этих волн относительно вектора скорости спутника. Установлено, что наблюдаемые над полярными шапками акустико-гравитационные волны систематически распространяются против ветра, что свидетельствует в пользу их пространственной ветровой фильтрации. В полярных областях волны в основном распространяются в двух направлениях: к магнитному полудню и в направлении к 15–16 ч магнитного местного времени. Над северной полярной шапкой заметна тенденция движения волн против часовой стрелки, над южной полярной шапкой – по часовой стрелке.

DOI: 10.7868/S0016794013030061

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение связи акустико-гравитационных волн (АГВ) с атмосферными динамическими процессами более крупных масштабов (конвекцией, планетарными волнами, атмосферными приливами) очень важно для понимания роли этих волн в общей динамике верхней атмосферы. Влияние ветров на распространение АГВ изучалось одновременно с развитием теории этих волн, и еще в ранних работах, например, [Cowling et al., 1971], было показано, что ветер оказывает на АГВ фильтрующее по направлению воздействие. В наземных наблюдениях показано, что на высотах F -области ионосферы в обоих полушариях среднемасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) распространяются против ветра [Waldock and Jones, 1986]. Численное моделирование волнового поля АГВ на высотах слоя $F2$ ионосферы от приземных источников в реалистичной атмосфере с учетом профиля ветра также показало, что АГВ предпочтительно распространяются против ветра [Sun et al., 2007]. С учетом вязких потерь, оказывается, что только против ветра АГВ от источников снизу могут достигать ионосферных высот по кратчайшему пути и с минимальными потерями энергии [Ding et al., 2003]. Особенно значительным должно быть влияние ветров на распространение АГВ в полярных регионах, где скорости ветров составляют от ~200 до 800 м/с в зависимости от уровня солнечной и геомагнитной активности [Killeen et al., 1995] и фактически перекры-

вают возможный диапазон фазовых горизонтальных скоростей АГВ в атмосфере.

Представляет значительный интерес исследование связи направлений движения АГВ и ветра в полярных областях на основе спутниковых наблюдений нейтральной атмосферы. Во-первых, в полярных областях ветры достигают максимально возможных значений, и эффекты их взаимодействия с АГВ должны быть наиболее ощутимы. Во-вторых, спутниковые измерения обеспечивают глобальность, недоступную наземным методам. В-третьих, есть возможность анализировать волны в нейтральной атмосфере, а не только в ионосферной плазме, поведение которой существенно усложняется в высоких широтах из-за электрических полей и высыпаний заряженных частиц.

В данной работе по измерениям на спутнике *Dynamics Explorer 2* (DE 2) исследована связь направлений движения ветра и среднемасштабных АГВ в полярных областях. Спутник DE 2 был запущен в начале 80-х г. и с тех пор не было ни одного низкоорбитального аппарата с подходящим комплексом научной аппаратуры для прямых исследований АГВ на ионосферных высотах. Поэтому базы данных этого проекта являются уникальными для изучения АГВ. Высота орбиты DE 2 составляла ~250–1010 км, наклонение 89.9°, период обращения ~98 мин. При такой конфигурации спутник на каждом витке пролетал вблизи географических полюсов и пересекал полярные шапки. На ИСЗ DE2 были установлены разные

датчики параметров нейтральной атмосферы, что позволяет не только изучать глобальную картину термосферных ветров, но и одновременно исследовать особенности поведения АГВ, комбинируя синхронные измерения разных датчиков. Для анализа характеристик АГВ и ветра были использованы измерения скорости нейтральных частиц и их концентрации. Концентрации нейтральных составляющих: атомарного кислорода (O), молекулярного азота (N₂), аргона (Ar) и гелия (He) измерялись на DE 2 с помощью масс-спектрометра в эксперименте NACS (Neutral Atmosphere Composition Spectrometer) [Carignan et al., 1981]. Температура и две составляющие скорости нейтральных частиц: вертикальная и горизонтальная, перпендикулярные к вектору скорости спутника V_s , измерялись в эксперименте WATS (Wind and Temperature Spectrometer) [Spencer et al., 1981]. Горизонтальная составляющая скорости нейтральных частиц вдоль V_s измерялась в эксперименте FPI с помощью интерферометра Фабри–Перо по доплеровскому сдвигу частоты красной кислородной эмиссии O 630.0 нм [Hauss et al., 1981].

2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Над полярными областями на высотах 250–400 км регистрируются отчетливые квазипериодические вариации в разных параметрах нейтральной атмосферы. Изменение общей концентрации и температуры на примере витка 8257 спутника DE 2 показано на рис. 1а, б в зависимости от геомагнитной широты. Над полярными шапками отчетливо видны квазипериодические вариации в температуре и плотности. Эти вариации регистрируются на фоне крупномасштабных изменений другой природы (суточный ход, высота орбиты и др.), так называемого тренда. Наиболее наглядным является изменение высоты спутника в измерениях концентрации (рис. 1а). На представленном участке витка высота уменьшалась от ~370 до 250 км, что составляет на этих высотах ~2H, где H – высота однородной атмосферы. В соответствии с гидростатическим распределением, фоновая концентрация при этом увеличивается в e^2 раз, что примерно и наблюдается. Над полярными шапками плавный ход концентрации с высотой искажается крупномасштабными динамическими процессами. В измерениях температуры отражаются суточные вариации из-за изменения условий инсоляции и локальные области разогрева в авроральном овале.

АГВ на высотах термосферы характеризуются масштабами от нескольких сотен до нескольких тысяч км. Поскольку скорость спутника (~8 км/с) значительно превышает фазовые горизонтальные скорости АГВ (сотни м/с), с борта фактически регистрируется квазистационарная картина волно-

вого процесса в пространстве. Проблема выделения волновых вариаций состоит в исключении крупномасштабных по сравнению с АГВ процессов (тренда) и мелкомасштабных изменений. Не зная заранее о преобладающем масштабе АГВ, нужно выбрать критерий, позволяющий отфильтровать эти волны более эффективно. В качестве этого критерия удобно использовать совпадение масштабов АГВ в разных параметрах. Отделение волновых изменений от крупномасштабного хода параметров производилось по методу скользящего среднего, при этом количество точек фильтра выбиралось из условия максимальной корреляции вариаций в концентрациях разных газов [Федоренко, 2009]. Синхронные относительные вариации концентрации $\delta n/n$ и температуры $\delta T_n/T_n$ (нормирование производится на невозмущенные усредненные значения) показаны на рис. 1в, г. АГВ в полярных областях по относительной амплитуде на порядок превышают уровень возмущений на средних и в низких широтах. Протяженность областей полярной волновой активности, показанной на рис. 1, составляет ~5.5 тыс. км над северной шапкой (UT = 18.1–18.3^h) и более 7 тыс. км – над южной шапкой (UT = 18.9–19.15^h). Синхронные относительные вариации этих же компонент на витке 8257 показаны на рис. 1д в более крупном масштабе над южной полярной шапкой. Волновые формы имеют одинаковый пространственный масштаб в разных параметрах и систематический сдвиг по фазе колебаний (близкий к противофазе). Наличие согласованных вариаций в параметрах, измеренных разными датчиками, является признаком того, что это действительно физическая волна, а не следствие обработки данных, вращения спутника или особенностей измерений. Сравнение экспериментальных зависимостей с теоретическими соотношениями, связывающими разные параметры, дает возможность идентифицировать эти волновые формы как АГВ. Преобладание относительной амплитуды колебаний в тяжелых газах, опережение или отставание профиля колебаний концентрации O относительно N₂ и Ar (рис. 1е), почти противофазность колебаний температуры относительно концентрации тяжелых газов (рис. 1д), – все это характерные признаки АГВ [Dudis and Reber, 1976; Федоренко, 2009].

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ АГВ ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

Для определения направления движения АГВ относительно спутника используем измерения

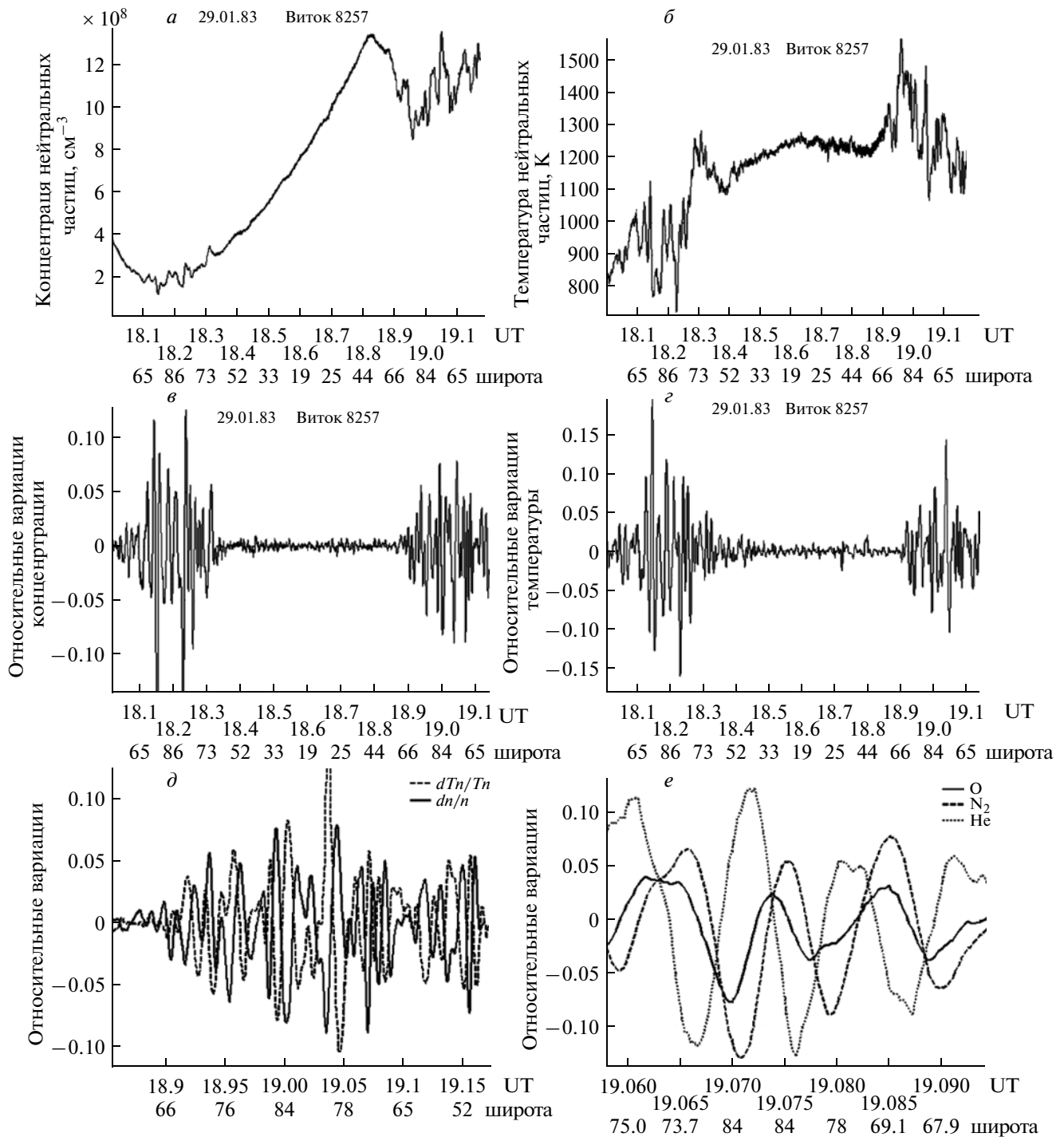


Рис. 1. АГВ в данных измерений спутника DE 2 на витке 8257: *a* – концентрация нейтральных частиц n ; *b* – температура нейтральных частиц T_n ; *в, г* – относительные вариации концентрации $\delta n/n$ и температуры $\delta T_n/T_n$; *д* – сопоставление относительных вариаций концентрации и температуры; *е* – относительные вариации в отдельных газах.

концентрации и скорости нейтральных частиц. Скорость измеряется в системе координат спутника (СКС) DE 2, показанной на рис. 2. Ось X_s выбрана вдоль вектора скорости спутника \mathbf{V}_s , Y_s – направлена вертикально вверх, Z_s – дополняет правую тройку векторов. Каждые полгода в целях

теплового контроля спутник переворачивался, что соответствует переходу из системы координат $\{X_s, Y_s, Z_s\}$ в $\{X'_s, Y'_s, Z'_s\}$, что надо учитывать при анализе измеряемых компонент скорости. В эксперименте WATS производились контактные из-

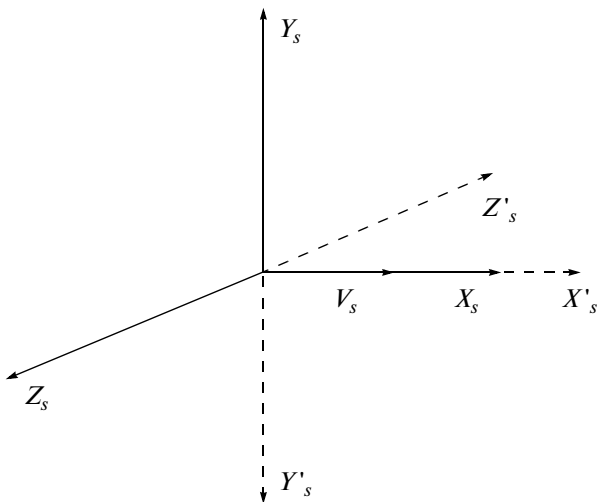


Рис. 2. Система координат спутника. Прямая мода: X_s – вдоль вектора скорости спутника, Y_s – вертикально вверх, Z_s – дополняет правую тройку векторов; перевернутая мода: X'_s – вдоль вектора скорости, Y'_s – вертикально вниз, Z'_s – дополняет правую тройку векторов.

мерения 2-х компонент скорости – вертикальной V_{ys} и горизонтальной V_{zs} , перпендикулярной к V_s . Отметим, что при конфигурации орбиты DE 2 (наклонение 89.9°) в эксперименте WATS фактически измерялась горизонтальная зональная (вдоль параллели) составляющая, а в FPI – горизонтальная меридиональная (вдоль V_s) составляющая.

Для определения направления движения АГВ вдоль V_s воспользуемся методикой, описанной в работе [Федоренко и Крючков, 2011]. Для волны, распространяющейся в пространстве, профиль колебаний вертикального смещения опережает по фазе профиль колебаний вертикальной скоро-

сти на $\pi/2$. Синхронные профили вариаций вертикальной скорости по измерениям WATS и рассчитанного по масс-спектрометрическим измерениям концентраций вертикального смещения h , показаны на рис. 3а. На представленном витке 8286 АГВ движется навстречу спутнику. Существует возможность определять направление АГВ еще проще: только по измерениям концентраций разных сортов газов. На основе соотношений теории АГВ можно показать, что колебания концентрации относительно легкого O по фазе всегда ближе к колебаниям вертикальной скорости, а более тяжелого N_2 – к вертикальному смещению. 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 всегда указывает на направление распространения АГВ (рис. 3б).

Направление движения АГВ, перпендикулярно к V_s , определим на основе анализа волновых форм в скорости нейтральных частиц. Рассмотрим исходные ряды измерений компонент скорости V_{zs} (зональная) и V_{ys} (вертикальная) (рис. 4, слева) и волновые вариации в этих же компонентах $V_{zs} - \bar{V}_{zs}$ и $V_{ys} - \bar{V}_{ys}$ после исключения тренда (рис. 4, справа) на примере нескольких витков. Сглаженные кривые \bar{V}_{zs} и \bar{V}_{ys} получены с использованием фильтра скользящего среднего, размеры окна которого выбирались исходя из преобладающей длины волны в ряде измерений V_{ys} . В этом параметре тренды незначительны и поэтому даже без предварительной обработки, используя стандартные методы спектрального анализа, легко определить преобладающую горизонтальную длину волны. В параметре V_{zs} видны эффекты,

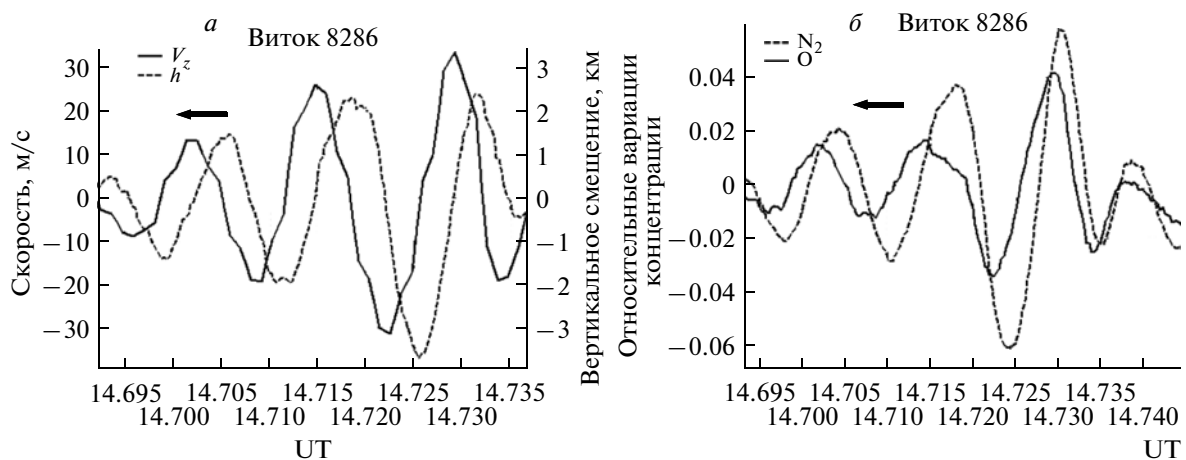


Рис. 3. Определение направления движения АГВ вдоль траектории орбиты спутника: а – вариации вертикальной скорости и смещения; б – относительные вариации концентраций O и N_2 .

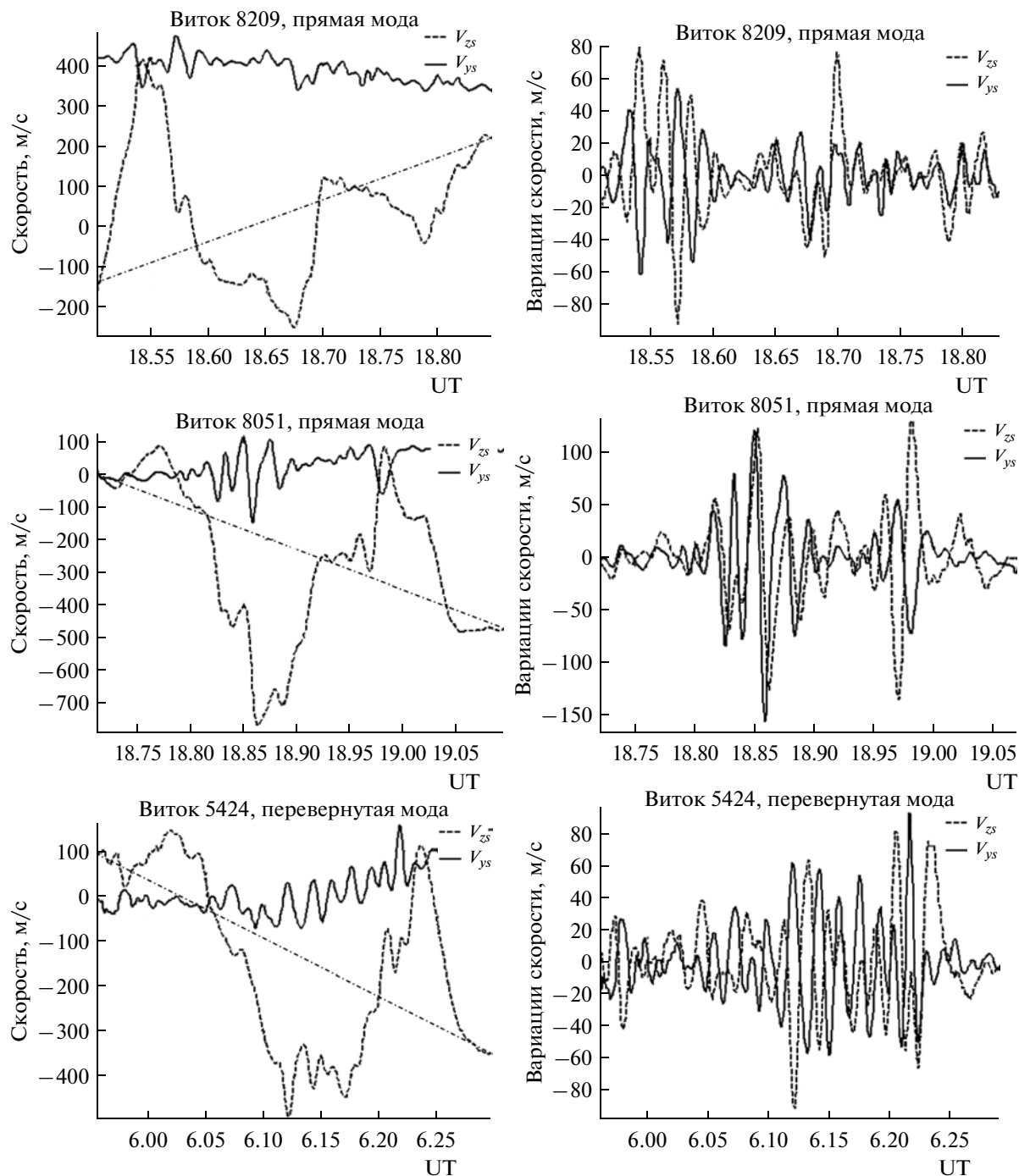


Рис. 4. Вертикальная (V_{zs}) и горизонтальная (V_{ys}) компоненты скорости в СКС Dynamic Explorer 2 на витках 8209 (южная полярная шапка, прямая мода), 8051 (северная полярная шапка, прямая мода) и 5424 (южная шапка, перевернутая мода): слева – исходные ряды измерений; справа – волновые вариации.

связанные с вращением Земли (схематически показано штрихпунктирной линией) и с зональными ветрами. Отметим, что в полученных волновых вариациях наблюдается или почти синфазный, или почти противофазный характер колебаний в измеренных компонентах скорости.

Согласно теории АГВ, колебания горизонтальной и вертикальной компонент скорости частиц связаны соотношением [Hines, 1960]

$$\frac{V_x}{V_z} = \frac{-k_z + i\eta}{k_x [1 - (U_x/c)^2]}, \quad (1)$$

где $\eta = (1 - \gamma/2)g/c^2$ – параметр среды, g – ускорение свободного падения, γ – показатель адиабаты, U_x – горизонтальная фазовая скорость волны, c – скорость звука, V_x – горизонтальная и V_z – вертикальная компоненты скорости частиц в системе координат, связанной с АГВ: ось X лежит в горизонтальной плоскости и направлена вдоль волнового вектора \mathbf{k} , ось Z – вертикально вверх.

Как видно из соотношения (1), сдвиг фаз между колебаниями компонент скорости определяется только значением k_z и свойствами среды: $\varphi = \arctg(\eta/k_z)$. Для $k_z < 0$ (АГВ распространяются снизу вверх) во всем диапазоне возможных значений вертикальных волновых чисел этот угол теоретически может изменяться в интервале $0-\pi/2$, но для реально наблюдаемых АГВ обычно не превышает 30° . Поскольку спутник летает выше 250 км, резонно предположить, что источники АГВ находятся ниже его уровня. Как проверить для АГВ знак k_z , покажем в следующем разделе. Пока просто предположим, что $k_z < 0$, и для этого случая рассмотрим, как связаны системы координат АГВ и СКС. В прямой моде вертикальная компонента скорости АГВ совпадает с вертикальной компонентой скорости в СКС $V_{zs} = V_z$. Связь между V_{zs} и V_x определяется углом, под которым распространяется в горизонтальной плоскости АГВ относительно оси Z_s . Возможные варианты направлений движения АГВ относительно спутника в горизонтальной плоскости (стрелки 1–4) в прямой моде показаны на рис. 5. Если проекция волнового вектора на ось Z_s положительна (стрелки 1 и 2), между колебаниями компонент V_{zs} и V_{ys} будет наблюдаться почти синфазность, если отрицательна (стрелки 3, 4) – противофазность. Независимо от того, движется волна в одну сторону со спутником (варианты 1, 4) или ему навстречу (2, 3), синфазность колебаний измеряемых компонент V_{zs} и V_{ys} означает, что волна распространяется вправо от спутника, а их противофазность – влево от спутника. Нетрудно убедиться, что и в перевернутой спутниковой моде (рис. 2), это правило сохраняется.

Таким образом, анализируя характер колебаний двух измеряемых в эксперименте WATS компонент скорости, можно определить, к востоку или к западу движется АГВ. А по синхронным измерениям концентраций O и N_2 можно определить также и направление распространения волн вдоль меридиана.

4. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОЛНОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ЧАСТИЦ В АГВ

Непосредственно определить вариации V_x вдоль волнового вектора, комбинируя данные из

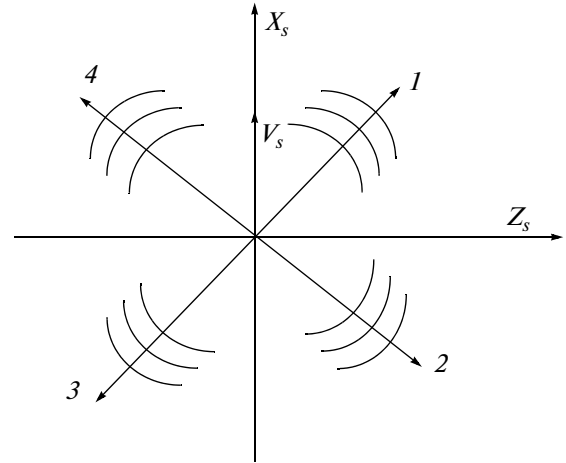


Рис. 5. Варианты распространения АГВ относительно направления движения спутника в горизонтальной плоскости: в случаях 1, 2 регистрируются синфазные вариации колебаний измеренных компонент V_{zs} и V_{ys} , в случаях 3, 4 – противофазные.

экспериментов WATS и FPI, не представляется возможным из-за различной методики измерений зональной и меридиональной составляющих скорости. Но существует возможность восстановить полную горизонтальную компоненту V_x и определить знак k_z на основе масс-спектрометрических измерений концентрации. Вариации плотности, вызванные распространением АГВ, можно приближенно представить в виде [Makhlof et al., 1990]:

$$\frac{\delta\rho}{\rho_0} = \left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right) \frac{h}{H} + \frac{V_x U_x}{c^2}, \quad (2)$$

где ρ_0 – невозмущенное значение плотности, h – вертикальное смещение элементарного объема, $H = kT/\bar{m}g$ – высота однородной атмосферы, k – постоянная Больцмана, T – температура нейтральной компоненты, \bar{m} – средняя масса частиц. Выразим из уравнения (2) горизонтальную скорость частиц:

$$V_x = \frac{c^2}{U_x} \left(\frac{\delta\rho}{\rho_0} - \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{h}{H} \right). \quad (3)$$

Отношение $\delta\rho/\rho_0$ определяется непосредственно из измерений. Величину h/H можно вычислить через относительные вариации концентраций разных сортов газов. На высотах DE 2 $\gamma \approx 1.6$ (по относительному вкладу одно- и двухатомного газа), скорость звука $c \approx 850$ м/с, фазовые горизонтальные скорости полярных АГВ по оценкам составляют $U_x \approx 650-700$ м/с [Федоренко, 2010].

На рисунке 6а синхронно показаны вертикальная компонента скорости V_{zs} , измеряемая в прямой моде, и горизонтальная, вычисленная по формуле (3) компонента V_x для витка 8209. По-

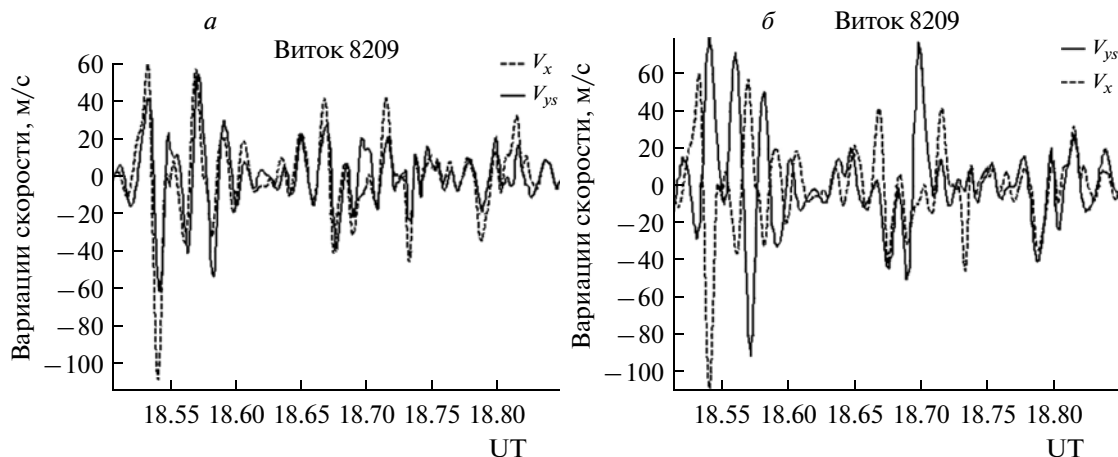


Рис. 6. Сравнение измеренных компонент скорости V_{ys} и V_{zs} с восстановленной по измерениям концентрации компонентой V_x .

скольку колебания V_x и $V_{ys} = V_z$ близки по фазе, то, как следует из выражения (1), в этом случае k_z должно быть меньше нуля, иначе наблюдалась бы их противофазность. Условие $k_z < 0$ выполнялось для всех анализируемых витков АГВ. На рисунке 6б вычисленная горизонтальная компонента V_x сравнивается с измеренной горизонтальной компонентой V_{zs} . Когда эти составляющие в фазе, проекция волнового вектора на ось Z_s положительна, когда в противофазе — отрицательна. Амплитуда V_x вычисляется приблизительно из-за неопределенности отдельных параметров в выражении (3), поэтому судить об истинном угле распространения АГВ трудно. Однако синфазность или противофазность колебаний компонент V_{zs} и V_x позволяют сразу сказать, вправо или влево от спутника распространяется волна. Таким образом, восстанавливая по измерениям концентраций полную горизонтальную скорость, можно определить знак k_z , и еще одним способом определить направление движения волны, перпендикулярно к вектору скорости спутника.

5. МЕРИДИОНАЛЬНАЯ И ЗОНАЛЬНАЯ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ДВИЖЕНИЯ АГВ

На основе экспериментальных данных рассмотрим, как связаны движения АГВ и ветра в меридиональном и зональном направлениях.

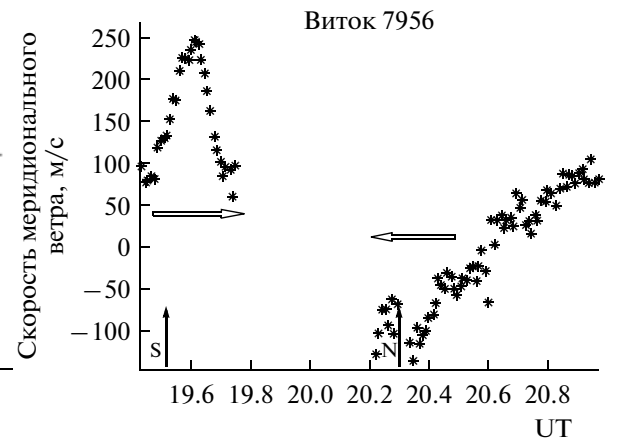
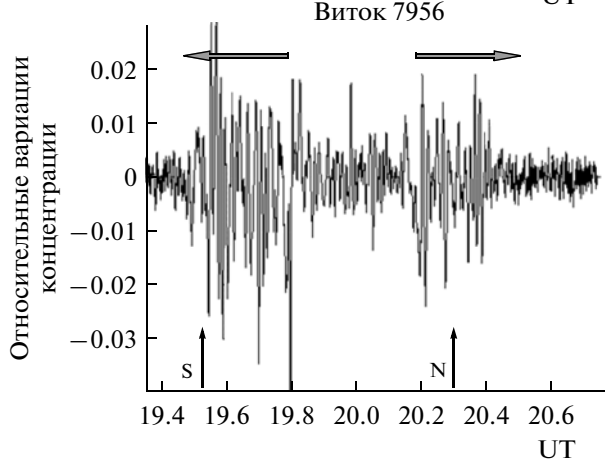
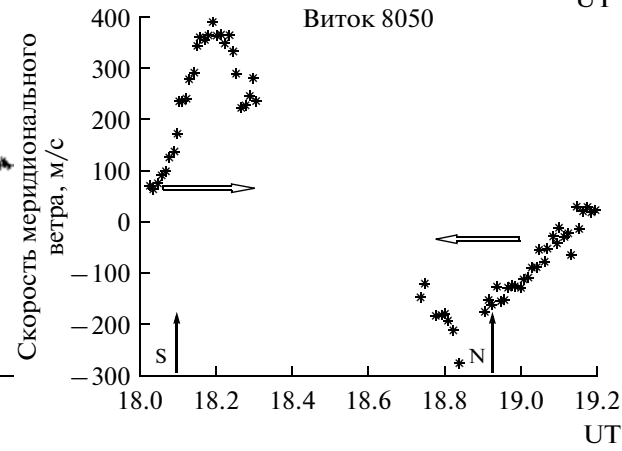
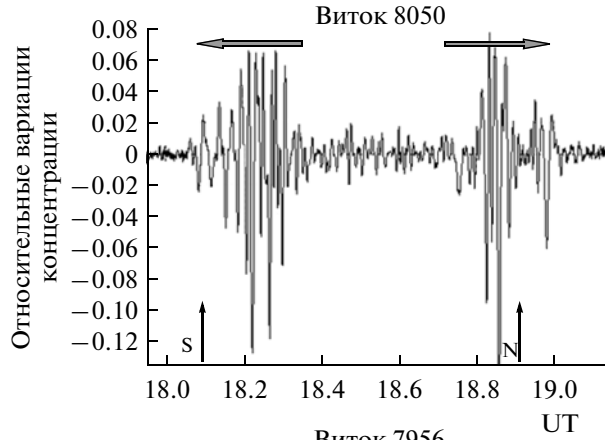
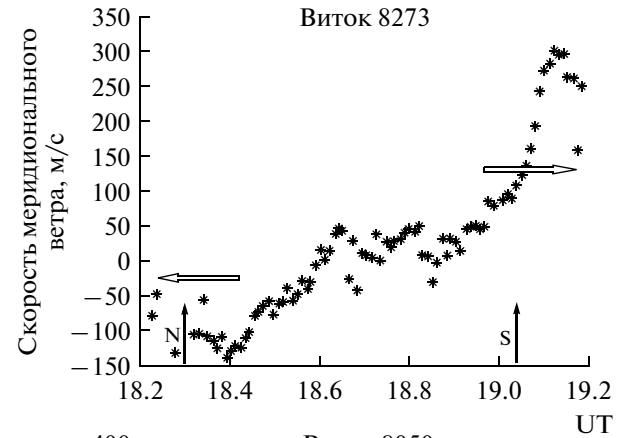
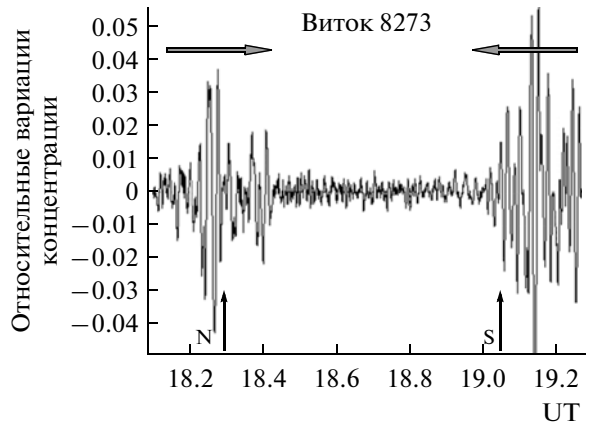
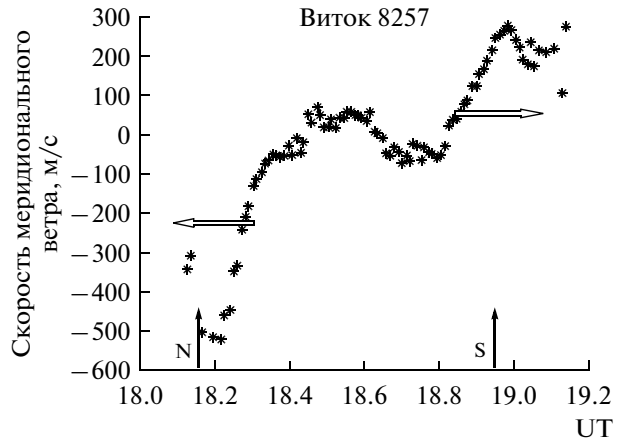
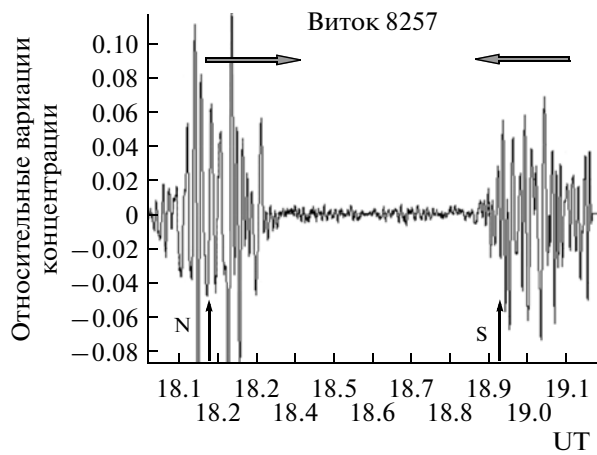
Зональное направление. Вернемся к рис. 4. В прямой моде спутника, если зональный ветер положительный (выпуклость направлена вверх), наблюдается почти противофазность колебаний из-

меренных компонент скорости V_{ys} и V_{zs} , а если ветер отрицательный — колебания компонент, близки к синфазным. В перевернутой моде все происходит наоборот. Как было установлено в разделе 3, синфазный характер колебаний V_{ys} и V_{zs} указывает на движение в положительном направлении оси Z_s , а противофазный — в отрицательном направлении оси Z_s (в перевернутой моде — наоборот). На основе этого из рис. 4 следует, что АГВ вдоль параллели движутся против ветра.

Меридиональное направление. Меридиональная скорость ветра измерялась в эксперименте FPI. И в прямой, и в обратной моде спутника положительное значение меридиональной компоненты скорости означает, что ветер и спутник движутся в одну сторону, а отрицательное — в противоположных направлениях.

На рисунке 7 на примере четырех витков в январе 1983 г. синхронно показаны волновые вариации нейтральной концентрации (слева) и скорость меридионального ветра (справа). Поскольку орбита DE 2 солнечно-синхронная с наклоном 89.9° , половину витка спутник находится в часовом поясе LT1, а другую половину — в $LT2 = LT1 \pm 12^h$. В январе 1983 г. около Северного полюса спутник переходил из ночи в день, а вблизи южного полюса — из дня в ночь. В начале месяца орбита находилась в часовом поясе $3.5^h - 15.5^h$, в конце из-за прецессии переместилась в $1.5^h - 13.5^h$. Положение географических полюсов показано вертикальными стрелками: N — северного, а S — южного. На двух верхних участках витков, показанных на рис. 7, спутник большую часть времени нахо-

Рис. 7. АГВ (слева) в вариациях нейтральной концентрации и скорость меридионального ветра (справа) по данным измерений на спутнике DE 2. Горизонтальные стрелки на левой панели указывают направление движения АГВ, а на правой — ветра. Вертикальные стрелки показывают положение географических полюсов. Концентрация нейтральных частиц измерялась в эксперименте NACS, меридиональная скорость ветра — в FPI.



дился в дневном секторе, на двух нижних — в ночном секторе. Вдоль меридиана полярные ветры дуют из дня в ночь, а волны, наоборот, распространяются из ночи в день. Преобладающее направление движения полярных АГВ из ночи в день является систематическим, наблюдается в разные времена года и в разных полушариях [Федоренко и Крючков, 2011].

Над обеими полярными шапками наблюдаются следующие проявления связи АГВ с ветром: 1) области усиления волновой интенсивности пространственно совпадают с областями усиления встречного ветра; 2) амплитуда АГВ в вариациях нейтральной концентрации в целом тем больше, чем больше скорость ветра; 3) волны распространяются против ветра. Меридиональная скорость ветра определена по доплеровскому смещению частоты красной кислородной эмиссии OI 630.0 нм и относится к эффективной высоте 220–260 км, где локализован максимум светящегося слоя. Поскольку меридиональные профили скорости ветра соответствуют уровню несколько ниже спутника (для спутника на высоте 300 км примерно на одну высоту однородной атмосферы), фактически мы видим ветер, сквозь который АГВ уже прошла, поднимаясь снизу вверх.

6. ОБЩАЯ КАРТИНА ДВИЖЕНИЙ АГВ

Построим общую картину движений АГВ для обеих полярных шапок. Направление движения АГВ вдоль витка спутника (меридиональную компоненту) определяем по сдвигу фаз колебаний концентраций O и N₂, для проверки также анализируем синхронные профили вертикального смещения и измеренной компоненты скорости V_{ys} (раздел 3). Направление движения АГВ вдоль параллели (перпендикулярно к вектору скорости спутника) определяем по синфазе или противофазе вертикальной и горизонтальной компонент скорости (раздел 3). Комбинируя результаты по меридиональному и зональному направлениям, определяем квадрант, в котором распространяется волна. На орбитальный трек под углом 45° нанесем стрелку, начало которой совпадает с положением максимума амплитуды волнового цуга, а величина соответствует амплитуде АГВ в компоненте V_{ys} . Такой выбор амплитудного параметра обусловлен тем, что вертикальная составляющая скорости мало искажена трендом. При таком графическом представлении информация о протяженности волновых цугов не отражается. Границы полярной волновой активности в геомагнитных координатах показаны на рис. 3 в работе [Федоренко и Крючков, 2011]. Предполагая, что полярные АГВ связаны с авроральным источником, целесообразно представлять направления их движений в геомагнитных координатах. Построенная таким образом картина преобладающих на-

правлений движения АГВ показана на рис. 8 над обеими шапками в январе 1983 г. (вверху) и июне—июле 1982 г. (внизу). Отобрано 85 витков с отчетливо выраженными 110-ю цугами АГВ в интервале высот 250–350 км. Анализируемые витки относятся к разным моментам UT и разному уровню геомагнитной возмущенности (в основном это — низкая и умеренная активность). Для иллюстрации различия этих условий некоторые из рассмотренных витков показаны в таблице.

Полученная интегральная картина преобладающих движений АГВ демонстрирует отчетливые сезонные отличия над южной и северной шапками в январе и в июле. В январе над северной шапкой АГВ сгруппированы достаточно кучно внутри аврорального овала и движутся преимущественно против часовой стрелки (по вращению Земли). Над южной шапкой, помимо волн внутри овала, отчетливо проявляется составляющая движения в направлении к 16^h. С ночной стороны волновые цуги, убывающие по амплитуде, наблюдаются далеко за пределами аврорального овала, иногда даже вблизи геомагнитного экватора [Федоренко и Крючков, 2011]. Поскольку АГВ движутся к овалу, их источники должны быть сосредоточены на средних и в низких широтах. С дневной стороны над обеими шапками ниже геомагнитной широты каспа АГВ не проникают. В июле ситуация изменяется: над южной шапкой становится выраженным вращение по часовой стрелке, а над северной, помимо циркулярного вращения против часовой стрелки, усиливается выраженная составляющая движения АГВ в направлении к 14–15^h. В целом над южной полярной шапкой АГВ располагаются менее кучно, чем над северной шапкой, а также имеют меньшие амплитуды.

Было проведено сравнение полученной картины движений АГВ с преобладающими в полярных областях ветрами. Сравнивая рис. 8 из данной работы с рис. 1 из работы [Rees et al., 1983], где представлены измерения скоростей ветров по данным того же спутника DE 2, видим, что наблюдаемые АГВ отчетливо “выстраиваются” вдоль преобладающих направлений ветра и движутся ему навстречу. Динамика полярной термосферы в основном определяется двумя ветровыми системами. Первая система — это ветры, обусловленные разогревом термосферы из-за поглощения солнечного ультрафиолетового излучения, дующие от послеполюденной области низких широт (от 14–16 ч по местному солнечному времени). Вторая ветровая система связана с локальными авроральными источниками: возмущенный поток термосферной циркуляции направлен от дневного каспа через геомагнитный полюс на ночную сторону. Наиболее полная на сегодня картина термосферной полярной циркуляции

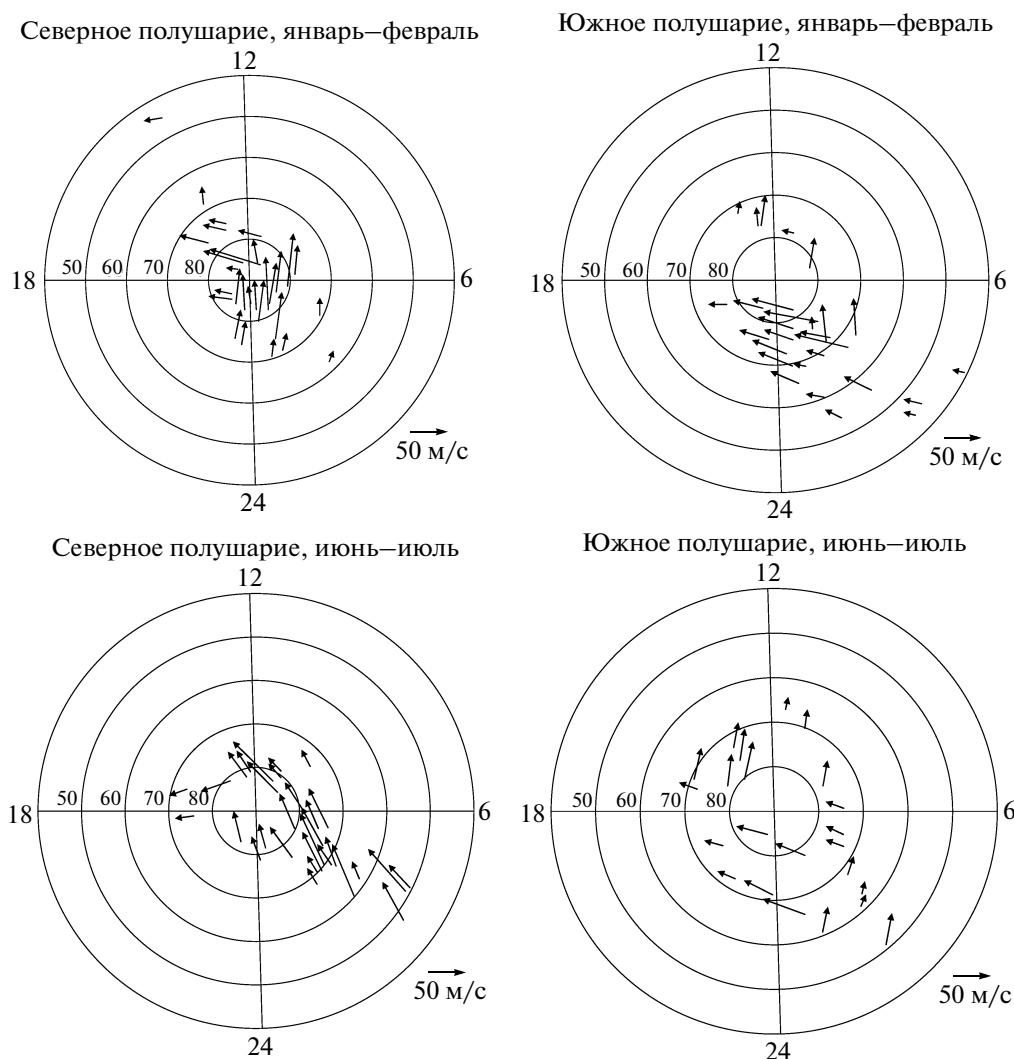


Рис. 8. Направления движения АГВ над полярными шапками в координатах магнитная широта и магнитное местное время. Вверху – январь–февраль 1983 г., внизу июнь–июль 1982 г. Длина стрелки соответствует амплитуде колебаний вертикальной скорости частиц в АГВ.

получена на спутнике CHAMP [Luhr et al., 2007]. В условиях полярной ночи и полярного дня вклад каждой из этих ветровых систем над обеими шапками различен. В период полярной ночи динамика полярной шапки в большей степени определяется локальным нагревом в каспе. Когда шапки освещены Солнцем, влияние глобального ветрового потока от разогрева за счет солнечного ультрафиолетового излучения возрастает и “маскирует” локальную полярную ветровую систему. Все эти основные особенности динамики полярных ветров отразились в движениях полярных АГВ (рис. 8).

Сравним полученные результаты с данными наземных наблюдений перемещающихся ионосферных возмущений. Как следует из анализа данных спутника DE 2 (рис. 8), нет противоречия в результатах, полученных в наземных наблюде-

ниях относительно циркулярного закручивания азимутов ПИВ вокруг полюсов [Waldock and Jones, 1986; Crowley et al., 1987] и существования двух выделенных потоков ПИВ [Jacobson et al., 1995]. В полученной со спутника картине движений АГВ в нейтральной атмосфере присутствуют и тот, и другой эффекты: есть тенденция к циркулярному закручиванию и в то же время преобладают два потока. Наличие этих двух выделенных азимутов ПИВ не отрицает ветровую фильтрацию, как заключили авторы работы [Jacobson et al., 1995], а скорее свидетельствует в ее пользу, отражая две основные системы ветров в полярной термосфере. В южном полушарии статистические исследования по данным спутника NNSS указывают на два суточных максимума частоты появления среднемасштабных ПИВ [Ogawa et al., 1987]: ~14–16 ч местного солнечного времени и вблизи

Характеристики витков ИСЗ DE 2 и соответствующие геофизические условия: 1 — номер витка, 2 — дата, 3 — всемирное время, 4 — амплитуда вертикальной компоненты скорости, 5 и 6 — индексы геомагнитной активности

Виток	Дата	UT	V_{ys}	Kp	Ap
1	2	3	4	5	6
Южная шапка					
7866	5 января 1983 г.	2.7	20	1	4
7874	5 января 1983 г.	15.0	10	3	15
7878	5 января 1983 г.	21.1	40	1—	3
8088	19 января 1983 г.	3.7	40	4—	22
8092	19 января 1983 г.	9.9	20	3+	18
8101	19 января 1983 г.	23.5	20	2+	9
8121	21 января 1983 г.	5.6	40	4—	22
8122	21 января 1983 г.	7.1	50	2+	9
8123	21 января 1983 г.	8.7	10	2+	9
8215	27 января 1983 г.	3.6	50	3	15
8216	27 января 1983 г.	5.1	50	3	15
Северная шапка					
7872	5 января 1983 г.	11.0	20	2+	9
7875	5 января 1983 г.	15.6	30	3	15
7877	5 января 1983 г.	18.7	20	1—	3
8087	19 января 1983 г.	1.3	20	2+	9
8088	19 января 1983 г.	2.9	40	2+	9
8091	19 января 1983 г.	7.4	40	4—	22
8097	19 января 1983 г.	16.5	50	3	15
8100	19 января 1983 г.	21.0	60	2	7
8101	19 января 1983 г.	22.5	90	2+	9
8201	26 января 1983 г.	5.7	30	3—	12
8203	26 января 1983 г.	8.7	40	3—	12
8205	26 января 1983 г.	11.7	40	3+	18
8208	26 января 1983 г.	16.3	50	3	15

полуночи. В северном полушарии в Канаде с помощью радара некогерентного рассеяния обнаружены две основные области генерации ПИВ: вблизи дневного каспа и ~16 ч магнитного местного времени на геомагнитной широте 75° [Bristow et al., 1994]. Все эти результаты, по-видимому, указывают на наличие двух основных азимутов движения АГВ и ПИВ в полярной термосфере: 1) навстречу ветру полярной циркуляции от ночного овала в сторону дневного каспа и 2) навстречу глобальному ветру, дующему из низких широт.

Согласно теоретическим представлениям [Ding et al., 2003], при встречном ветре лучевые траектории АГВ загибаются вверх и поэтому волны достигают ионосферных высот по кратчайшему пути и, соответственно, с минимальными потерями энергии за счет вязкости и теплопроводности. В такой ситуации не понятно, что вносит больший вклад в наблюдаемую амплитуду АГВ: мощность источ-

ника волн или скорость фильтрующего ветра. Вполне вероятно, что источники возмущенной термосферной циркуляции (в дневном каспе) и АГВ (в ночном секторе овала) могут быть связаны физически, так как первопричиной усиления обоих процессов служат возмущения солнечного ветра, запускающие сложную цепочку взаимодействий в системе магнитосфера–ионосфера–нейтральная атмосфера.

7. ВЫВОДЫ

Предложена методика, позволяющая по односточечным спутниковым измерениям параметров нейтральной атмосферы определить направление распространения АГВ относительно вектора скорости спутника.

На основе данных измерений спутника DE 2 с помощью этой методики установлено, что в по-

лярной термосфере АГВ систематически распространяются против ветра. Таким образом, по данным прямых спутниковых измерений подтверждается эффект, обнаруженный ранее в наземных наблюдениях ПИВ, свидетельствующий в пользу ветровой фильтрации АГВ. Этот эффект отчетливо проявляется как в меридиональном, так и в зональном направлении: полярные АГВ вдоль меридиана распространяются из ночи в день, а вдоль параллели — по вращению Земли.

Исследованы направления движения полярных АГВ в обоих полушариях в условиях полярного дня и полярной ночи. Наблюдается тенденция азимутов движения этих волн закручиваться циркулярно вокруг геомагнитных полюсов, но при этом основная часть волн группируется в два выделенных направления: к магнитному полудню и в направлении к 14–16 ч. В период полярной ночи направления движения АГВ определяются преимущественно локальной полярной ветровой системой. Когда полярные шапки освещены Солнцем и усиливается ветер, дующий из низких широт, соответственно усиливается и составляющая движения АГВ навстречу этому ветру.

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 аэронавигация. Т. 50. № 1. С. 111–122. 2010.
- Федоренко А.К., Крючков Е.И. Распределение среднemasштабных АГВ в полярных регионах по данным спутниковых измерений // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 51. № 4. С. 527–539. 2011.
- Bristow W.A., Greenwald R.A., Samson J.C. Identification of high-latitude acoustic gravity wave sources using the Goose Bay HF radar // J. Geophys. Res. V. 99. № A1. P. 319–331. 1994.
- 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. № 4. P. 429–441. 1981.
- Cowling D.H., Webb H.D., Yeh K.C. Group rays of internal gravity waves in a wind-stratified atmosphere // J. Geophys. Res. V. 76. № 1. P. 213–220. 1971.
- Crowley G., Jones T.B., Dudeney J.R. Comparison of short period TID morphologies in Antarctica during geomagnetically quiet and active intervals // J. Atmos. Terr. Phys. V. 49. № 11–12. P. 1155–1162. 1987.
- Ding F., Wan W., Yuan H. The influence of background winds and attenuation on the propagation of atmospheric gravity waves // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 65. № 7. P. 857–869. 2003.
- Dudis J.J., Reber C.A. Composition effects in thermospheric gravity waves // Geophys. Res. Lett. V. 3. № 12. P. 727–730. 1976.
- Hays P.B., Killeen T.L., Kennedy B.C. The Fabry-Perot interferometer on Dynamics Explorer // Space Sci. Instrum. V. 5. № 4. P. 395–416. 1981.
- Hines C.O. Internal gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys. V. 38. P. 1441–1481. 1960.
- Jacobson A.R., Carlos R.C., Massey R.S., Wu G. Observations of traveling ionospheric disturbances with a satellite-beacon radio interferometer: seasonal and local time behaviour // J. Geophys. Res. V. 100. № A2. P. 1653–1665. 1995.
- Killeen T.L., Won Y.I., Niciejewski R.J., Burns A.G. Upper thermosphere winds and temperatures in the geomagnetic polar cap: Solar cycle, geomagnetic activity, and interplanetary magnetic fields dependencies // J. Geophys. Res. V. 100. № A11. P. 21327–21342. 1995.
- Lühr H., Rentz S., Ritter P., Liu H., Häusler K. Average thermospheric wind pattern over the polar regions, as observed by CHAMP // Ann. Geophysicae. V. 25. № 5. P. 1093–1101. 2007.
- Makhlouf U., Dewan E., Isler I.J., Tuan T.F. On the importance of the purely gravitationally induced density, pressure and temperature variations in gravity waves: Their application to airglow observations // J. Geophys. Res. V. 95. № A4. P. 4103–4111. 1990.
- Ogawa T., Igarashi K., Aikyo K., Maeno H. NNSS satellite observation of medium scale travelling ionospheric disturbances at southern high latitudes // J. Geomagn. Geoelectr. V. 39. № 12. P. 709–721. 1987.
- Rees D., Fuller-Rowell T.J., Gordon R., Killeen T.L., Hays P.B., Wharton L., Spencer N.W. A comparison of wind observations of the upper thermosphere from the Dynamics Explorer satellite with the predictions of a global time-dependent model // Planet. Space Sci. V. 31. № 11. P. 1299–1314. 1983.
- 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. Instrum. V. 5. № 4. P. 417–428. 1981.
- Sun L., Wan W., Ding F., Mao T. Gravity wave propagation in the realistic atmosphere based on a three-dimensional transfer function model // Ann. Geophysicae. V. 25. № 9. P. 1979–1986. 2007.
- Waldock J.A., Jones T.B. HF Doppler observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed at mid latitudes // J. Atmos. Terr. Phys. V. 48. № 3. P. 245–260. 1986.