

УДК 550.388, 551.520.3

**А. К. Федоренко**

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

## НАПРАВЛЕННЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН НАД ПОЛЯРНЫМИ ШАПКАМИ ЗЕМЛИ

---

*За даними вимірювань на супутнику «Dynamics Explorer 2» досліджено напрямки розповсюдження середньомасштабних акустико-гравітаційних хвиль (АГХ) в полярних областях. Встановлено, що АГХ над полярними шапками систематично розповсюджуються назустріч вітру на висотах 250–350 км. Над північною полярною шапкою помітна тенденція поширення АГХ проти годинникової стрілки, над південною полярною шапкою – за годинниковою стрілкою. При цьому основна частина хвиль згрупована переважно за двома напрямками: 1) до магнітного полудня — назустріч вітру збуреної полярної циркуляції і 2) в напрямку до 14–16 годин — назустріч глобальному термосферному вітру, що дме з області низьких широт. В умовах полярного дня і полярної ночі картина рухів АГХ змінюється в обох півкулях у повній відповідності з сезонною перебудовою динаміки полярних вітрів.*

---

### ВВЕДЕНИЕ

Акустико-гравитационные волны (АГВ) играют важную роль в динамике и энергетике верхней атмосферы, обеспечивая перераспределение энергии атмосферных возмущений в глобальном масштабе. Эти волны исследуются уже более полувека многочисленными наземными методами диагностики ионосферы и, в значительной степени, на основе прямых спутниковых измерений. Анализ измерений на спутнике «Dynamics Explorer-2» (DE2) показал, что над полярными шапками обоих полушарий на высотах F2-области ионосферы систематически наблюдаются АГВ с большими относительными амплитудами (до 10 %) и выделенными спектральными свойствами: горизонтальными длинами волн 500–650 км, периодами 12.5–14.0 мин [2, 11]. Помимо специфических спектральных свойств, для этих волн характерно систематическое направление распространения из ночи в

день [4]. Указанные особенности полярных АГВ позволяют предположить наличие фильтрующего эти волны глобального механизма. Таким механизмом может быть ветер.

Влияние ветров на распространение АГВ изучалось одновременно с развитием теории этих волн. Например, в работе [6] было показано, что ветер оказывает на АГВ фильтрующее по направлению воздействие. По данным наземных наблюдений получены экспериментальные свидетельства ветровой фильтрации. В частности, получено, что на высотах F-области ионосферы в обоих полушариях среднемасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) обнаруживают циркулярное закручивание азимутов в направлении против ветра [7, 17]. Численное моделирование волнового поля АГВ на высотах F2-области ионосферы от приземных источников в реалистичной атмосфере с учетом профиля ветра также показало, что АГВ предпочтительно распространяются против ветра [16]. С учетом вязких потерь оказывается, что только против ветра АГВ от источников снизу могут достигать ионосфер-

ных высот по кратчайшему пути (за счет укорочения лучевых траекторий) с минимальными потерями энергии [8].

Исследование связи АГВ с ветром на основе спутниковых измерений параметров нейтральной атмосферы до сих пор не проводилось. Главная причина этого — отсутствие методик, позволяющих восстанавливать направление АГВ в спутниковых измерениях *in situ*. В данной работе с использованием оригинальной методики определены преобладающие азимуты распространения АГВ в полярных областях и исследована их связь с ветром по данным спутника DE2. Контактные спутниковые измерения позволяют изучать волны непосредственно в нейтральной атмосфере, а не только в ионосферной плазме, поведение которой существенно усложняется в высоких широтах из-за влияния электрических полей и высыпаний заряженных частиц. Кроме того, со спутника обеспечивается глобальность исследования, недоступная наземным методам. Скорости термосферных полярных ветров составляют 200—800 м/с в зависимости от уровня солнечной и геомагнитной активности [12] и, таким образом, перекрывают весь возможный в атмосфере Земли диапазон фазовых горизонтальных скоростей АГВ. Поэтому влияние ветров на распространение АГВ в полярных областях должно быть очень значительным, возможно, даже определяющим.

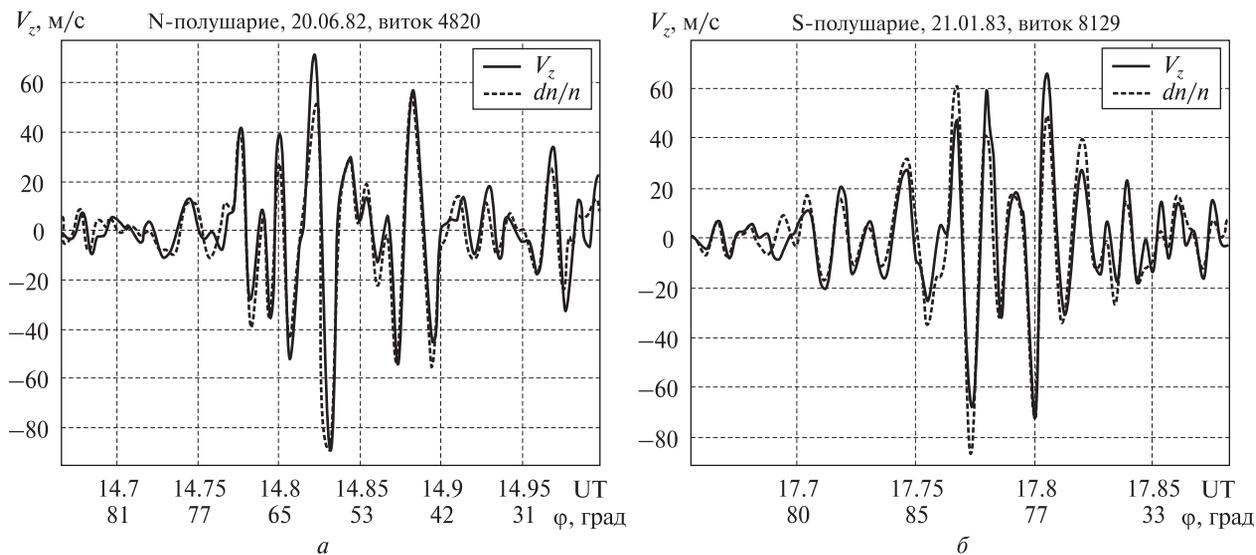
Орбита спутника DE 2 — эллиптическая с высотой 250...1010 км, наклонение  $89.9^\circ$ , период обращения 98 мин. Благодаря такой конфигурации спутник на каждом витке пролетал вблизи географических полюсов и пересекал полярные шапки. На DE2 были установлены датчики параметров нейтральной атмосферы, что позволяет одновременно исследовать ветер и характеристики АГВ, комбинируя синхронные измерения разных приборов. Для анализа АГВ и ветра в работе были использованы измерения концентрации и скорости нейтральных частиц на участках витков ниже 400 км. Концентрации нейтральных составляющих: атомарного кислорода (O), молекулярного азота ( $N_2$ ), аргона (Ar) и гелия (He) измерялись на DE2 с помощью масс-спектрометра в эксперименте NACS (Neutral Atmosphere

Composition Spectrometer) [5]. На нижних участках витков DE2 горизонтальная составляющая скорости спутника на порядок превышает вертикальную составляющую, поэтому движение спутника можно считать почти горизонтальным. Составляющая скорости нейтральных частиц вдоль вектора  $V_s$  скорости спутника измерялась в эксперименте FPI (Fabry-Perot Interferometer) по доплеровскому сдвигу частоты красной кислородной эмиссии  $O \lambda 630.0$  нм [9]. Температура и две составляющие скорости нейтральных частиц: вертикальная и горизонтальная, перпендикулярная к вектору  $V_s$  скорости спутника, измерялись в эксперименте WATS (Wind and Temperature Spectrometer) [15]. Отметим, что при наклонении орбиты DE2  $89.9^\circ$  в эксперименте FPI фактически измерялась горизонтальная меридиональная составляющая скорости, а в эксперименте WATS — горизонтальная зональная.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В КОНТАКТНЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

С борта спутника непосредственно измеряется только горизонтальная составляющая длины волны вдоль витка. Однако наличие синхронных измерений разных атмосферных параметров позволяет восстанавливать многие свойства АГВ: временной период, фазовую скорость, направление распространения [2, 3]. Для исследования связи АГВ с ветром в первую очередь необходимо знать направление движения волн относительно спутника. Вначале покажем, как можно по спутниковым измерениям определить направление распространения АГВ по вертикали, затем исследуем возможность определения горизонтальных азимутов волн.

**Определение знака  $k_z$ .** Характерной особенностью АГВ является то, что по горизонтали энергия и фаза волны распространяются в одном и том же направлении, а по вертикали — в противоположных направлениях. О распространении АГВ снизу вверх обычно говорят в смысле направления переноса энергии, при этом фаза волны распространяется вниз [1]. При изучении АГВ обычно вводят неподвижную декартову систему координат, в которой ось  $X$  лежит в



**Рис. 1.** Колебания вертикальной компоненты скорости  $V_z$  и относительные вариации концентрации  $\delta n/n$  по измерениям на спутнике DE2: *a* — северная полярная шапка, июнь; *б* — южная полярная шапка, январь

горизонтальной плоскости и направлена вдоль распространения волны, а ось  $Z$  направлена вертикально вверх. В такой системе координат распространению АГВ снизу вверх соответствует условие  $k_z < 0$ . Знак  $k_z$  можно определить, сравнивая экспериментальные зависимости для разных параметров с теоретическими соотношениями. Удобно использовать для этого измерения концентрации и скорости нейтральных частиц. Теоретическая зависимость между вертикальной составляющей скорости  $V_z$  и относительными вариациями концентрации  $\delta n/n$  в АГВ имеет вид [10]

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

где  $H = kT_n / \bar{m}g$  — высота однородной атмосферы,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T_n$  — температура нейтрального компонента,  $\bar{m}$  — средняя масса атомов и молекул,  $g$  — ускорение свободного падения,  $\gamma$  — показатель адиабаты,  $k_x, k_z$  — горизонтальная и вертикальная составляющие волнового вектора,  $\omega$  — частота волны,  $\omega_B = g\sqrt{(\gamma - 1)}/c$  — частота Брента — Вайсяля,  $c$  — скорость звука.

Экспериментальные зависимости колебаний  $V_z$  и  $\delta n/n$  показаны на рис. 1 для двух витков DE2 по данным работы [3]. Для получения из исходных рядов данных вариаций АГВ производилась предварительная обработка, включающая: 1) отделение волновых форм от трендов с использованием фильтра скользящего среднего; 2) идентификацию типа волн по амплитудно-фазовым соотношениям между разными параметрами [3]. Относительные вариации концентрации  $\delta n/n$  получены путем нормирования волновых изменений на усредненные фоновые значения. Согласованный характер волновых форм в параметрах, измеренных разными датчиками, подтверждает адекватность процедуры снятия тренда. Поскольку горизонтальные фазовые скорости АГВ на порядок меньше скорости спутника DE2 (7.9 км/с), с борта регистрируется фактически распределение волнового процесса в пространстве. Поэтому зависимость параметров от UT на рис. 1 дает информацию о пространственном масштабе волнового процесса вдоль витка спутника  $\Delta x = V_s \Delta UT$ , а не о временном периоде.

Колебания  $V_z$  и  $\delta n/n$  в полярных АГВ оказались близки к синфазным. Приравнивая к нулю мнимую часть и учитывая, что  $c^2 = \gamma gH$ , из (1)

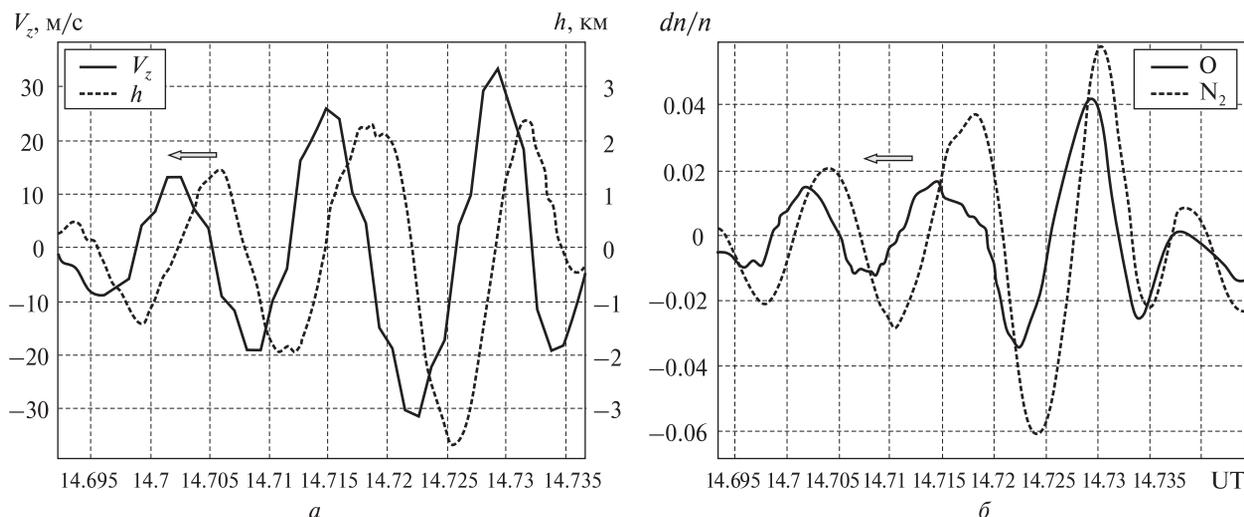


Рис. 2. Направления движения акустико-гравитационных волн вдоль орбиты спутника на 8286 витке: а — вариации вертикальной скорости и смещения; б — относительные вариации концентраций  $O$  и  $N_2$

получим

$$V_z \approx \frac{\omega}{k_z} \left[ 1 - \left( \frac{c}{U_x} \right)^2 \right] \frac{\delta n}{n}, \quad (2)$$

где  $U_x = \omega/k_x$  — фазовая горизонтальная скорость волны. Из дисперсионного уравнения следует, что для АГВ всегда выполняется условие  $U_x < c$  [10]. Поэтому показанный на рис. 1 характер колебаний концентрации и скорости возможен только при  $k_z < 0$ . Таким образом, заключаем, что источники наблюдаемых АГВ находятся ниже уровня спутника.

**Направление движения АГВ вдоль вектора скорости спутника.** Определить направление АГВ вдоль  $\mathbf{V}_s$  можно достаточно просто при наличии синхронных измерений скорости и концентрации нейтральных частиц [4]. Скорость на DE2 измерялась в системе координат спутника (СКС): 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 соответствовало переходу из системы координат  $\{X_s, Y_s, Z_s\}$  в  $\{X_s, -Y_s, -Z_s\}$ . Это нужно учитывать при анализе измеряемых составляющих скорости. В эксперименте FPI дистанционно измерялась горизонтальная составляющая  $V_{zs}$ , направленная вдоль  $\mathbf{V}_s$ . В эк-

сперименте WATS производились контактные измерения двух составляющих скорости — вертикальной  $V_{zs}$  и горизонтальной  $V_{zs}$ , перпендикулярной к  $\mathbf{V}_s$ .

Для волны, распространяющейся в пространстве, профиль колебаний вертикальной скорости опережает по фазе колебания вертикального смещения на  $\pi/2$ . Синхронные вариации вертикальной скорости по измерениям WATS и вертикального смещения  $h$ , рассчитанного по масс-спектрометрическим измерениям концентраций, показаны на рис. 2, а. На представленном витке АГВ движется навстречу спутнику. Есть возможность определять направление АГВ еще проще — только по измерениям концентраций двух сортов атмосферных газов [2]. На основе соотношений теории АГВ легко показать, что колебания концентрации относительно легкого  $O$  по фазе всегда ближе к колебаниям вертикальной скорости, а более тяжелого  $N_2$  — к вертикальному смещению. В результате профили колебаний концентраций  $O$  и  $N_2$  как бы «зажаты» между профилями колебаний скорости и смещения. Сдвиг фаз между колебаниями  $n(O)$  и  $n(N_2)$  зависит от спектральных свойств волны, но, как правило, не превышает  $40^\circ$ , при этом опережение колебаний  $O$  всегда указывает на направление движения АГВ (рис. 2, б).

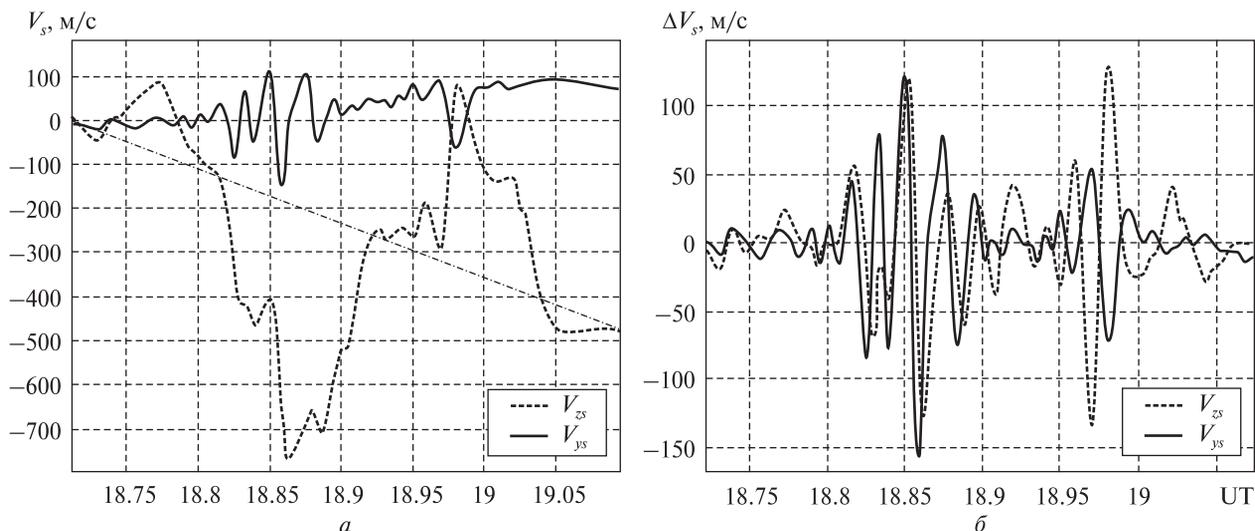


Рис. 3. Вертикальная ( $V_{ys}$ ) и горизонтальная ( $V_{zs}$ ) составляющие скорости в СКС «Dynamic Explorer-2» на витке 8051 (северная полярная шапка, прямая мода): а — исходные ряды измерений, б — волновые вариации после исключения тренда

**Направление движения акустико-гравитационных волн перпендикулярно к вектору скорости спутника.** Направление движения АГВ, перпендикулярное к вектору скорости спутника, можно определить на основе анализа измерений составляющих скорости. Рассмотрим исходные ряды измерений скорости  $V_{zs}$  (зональная) и  $V_{ys}$  (вертикальная) (рис. 3, а) и волновые вариации в этих же компонентах  $V_{zs} - \bar{V}_{zs}$  и  $V_{ys} - \bar{V}_{ys}$  после исключения тренда (рис. 3, б) на витке 8051, когда измерения проводились в прямой моде. 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 компоненте  $V_{ys}$ . В распределении вертикальной скорости  $V_{ys}$  тренды незначительны, и поэтому горизонтальную длину волны можно определять стандартными методами спектрального анализа непосредственно по исходным рядам измерений (без предварительного снятия тренда). В параметре  $V_{zs}$  волновые вариации едва заметны на фоне сильных зональных ветров. Наблюдается также эффект вращения Земли, который схематически показан пунктирной линией. После исключения тренда наблюдается или почти синфазный, или почти противофазный характер колебаний измерен-

ных вертикальной и горизонтальной составляющих скорости (рис. 3, б).

Согласно теории АГВ колебания горизонтальной и вертикальной составляющих скорости частиц связаны соотношением [10]

$$\frac{V_x}{V_z} = \frac{-k_z + i\eta}{k_x [1 - (U_x/c)^2]}, \quad (3)$$

где  $\eta = (1 - \gamma/2)g/c^2$  — параметр среды,  $V_x$  — горизонтальная и  $V_z$  — вертикальная составляющие скорости частиц в системе координат АГВ. Как видно из (3), сдвиг фаз между колебаниями составляющих скорости определяется только значением  $k_z$  и свойствами среды:  $\varphi = -\arctg(\eta/k_z)$ . Для  $k_z < 0$  во всем диапазоне возможных значений вертикальных волновых чисел этот угол теоретически может изменяться от 0 до  $\pi/2$ , но при типичных спектральных характеристиках волн он обычно не превышает  $30^\circ$ . Для случая  $k_z < 0$  рассмотрим, как связаны системы координат АГВ и спутника. В прямой моде вертикальная составляющая скорости АГВ совпадает с вертикальной составляющей скорости в СКС  $V_{ys} = V_z$ . В горизонтальной плоскости связь между  $V_{zs}$  и  $V_x$  определяется углом, под которым распространяется АГВ относительно оси  $Z_s$ . Возможные варианты направлений движе-

ния АГВ относительно спутника (стрелки 1–4) в прямой моде показаны на рис. 4. Если проекция волнового вектора на ось  $Z_s$  положительна (1 и 2), между колебаниями составляющих  $V_{zs}$  и  $V_{ys}$  будет наблюдаться почти синфазность, если отрицательна (3, 4) — противофазность. Независимо от того, движется волна в одну сторону со спутником (1, 4), или ему навстречу (2, 3), синфазность колебаний измеряемых составляющих  $V_{zs}$  и  $V_{ys}$  означает, что волна распространяется вправо от спутника, а их противофазность — влево от спутника. Нетрудно убедиться, что в перевернутой спутниковой моде это правило сохраняется. Таким образом, анализируя характер колебаний двух измеряемых в эксперименте WATS составляющих скорости, можно определить, к востоку или к западу движется АГВ.

#### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ

Используя рассмотренные в предыдущем разделе способы определения направления движения АГВ, построим общую картину азимутов этих волн над обеими полярными шапками. Направление движения АГВ вдоль витка спутника DE2 (меридиональную составляющую) определяем по сдвигу фаз колебаний концентраций  $O$  и  $N_2$ , для проверки также анализируем синхронные профили вертикального смещения и измеренной составляющей скорости  $V_{ys}$ . Направление движения АГВ перпендикулярно к вектору скорости спутника (вдоль параллели) определяем по синфазности или противофазности колебаний вертикальной и горизонтальной составляющих скорости. Комбинируя результаты по меридиональному и зональному направлениям, определим квадрант, в котором распространяется волна. Предполагая, что полярные АГВ связаны с авроральным источником, целесообразно представлять направления их движений в геомагнитных координатах. На орбитальный трек под углом  $45^\circ$  нанесем стрелку, начало которой совпадает с максимумом амплитуды волнового цуга, а величина соответствует амплитуде АГВ в составляющей  $V_{ys}$ . Результирующая картина преобладающих направлений движения АГВ для северной полярной области показана на

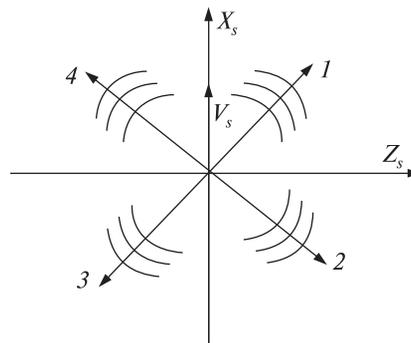
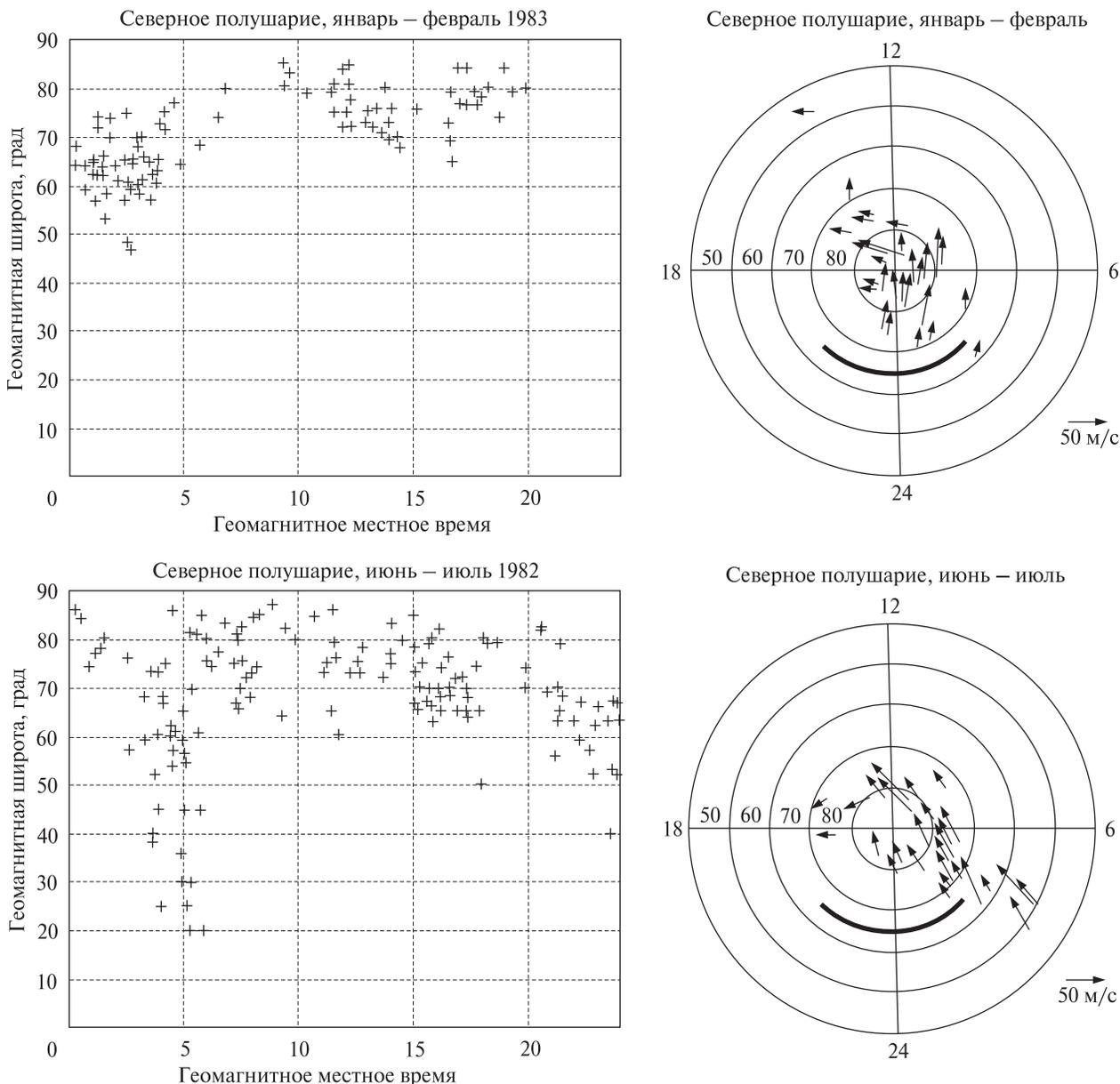


Рис. 4. Варианты распространения акустико-гравитационных волн относительно направления движения спутника в горизонтальной плоскости: в случаях 1, 2 регистрируются синфазные вариации колебаний измеренных составляющих  $V_{zs}$  и  $V_{ys}$ , в случаях 3, 4 — противофазные

рис. 5 справа: вверху — январь-февраль, внизу — июнь — июль. В таком графическом представлении видны основные азимуты движения полярных АГВ, но информация о протяженности волновых цугов не отражается. Поэтому положение границ полярной волновой активности дополнительно показано на рис. 5 слева (по данным [4]). Дугой обозначено положение гипотетического источника в ночном секторе овала. В северном полушарии исследовано 35 витков с отчетливо выраженными 62 цугами АГВ в интервале высот 250–350 км. Анализируемые витки относятся к разным моментам UT и разному уровню геомагнитной возмущенности (в основном слабая и умеренная возмущенность).

В северном полушарии заметна общая тенденция закручивания азимутов АГВ против часовой стрелки (по вращению Земли). В положении границ цугов и азимутах движения АГВ заметны значительные сезонные отличия. В период полярной ночи (январь — февраль) АГВ группируются достаточно кучно внутри аврорального овала и почти не наблюдаются с его внешней стороны. Когда северная шапка освещена Солнцем (июнь — июль), заметно усиливается составляющая движения АГВ в направлении к  $14\text{--}15^h$ . С ночной стороны волны этой группы простираются далеко за пределы овала, вплоть до  $20^\circ$  геомагнитной широты, образуя своеобразный «хвост». В дневном секторе АГВ огра-



**Рис. 5.** Границы волновой активности (слева) и направления движения полярных АГВ (справа) в северном полушарии: вверху — январь — февраль 1983 г., внизу — июнь — июль 1982 г.

ничиваются геомагнитными широтами овала и никогда не достигают средних и низких геомагнитных широт.

Подобный анализ проводился для 53 волновых цугов в южном полушарии. Над южной полярной шапкой в целом наблюдается антисимметричная северному полушарию картина (рис. 6.)

Также наблюдается тенденция циркулярного закручивания азимутов, но уже по часовой стрелке. Когда южная шапка освещена Солнцем (январь — февраль), отчетливо проявляется составляющая движения АГВ в направлении примерно к  $16^h$ . В июне — июле АГВ располагаются в основном внутри

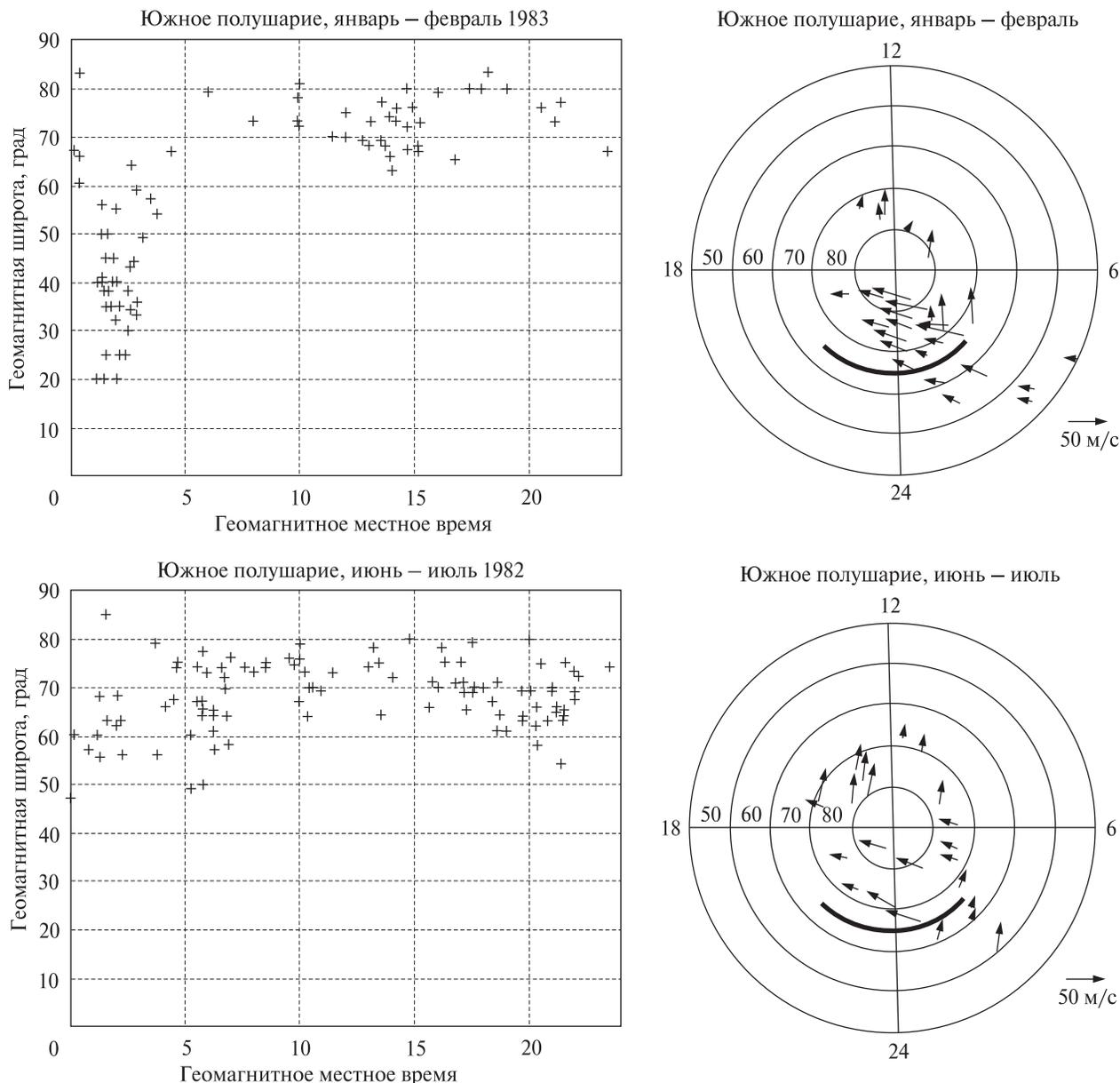
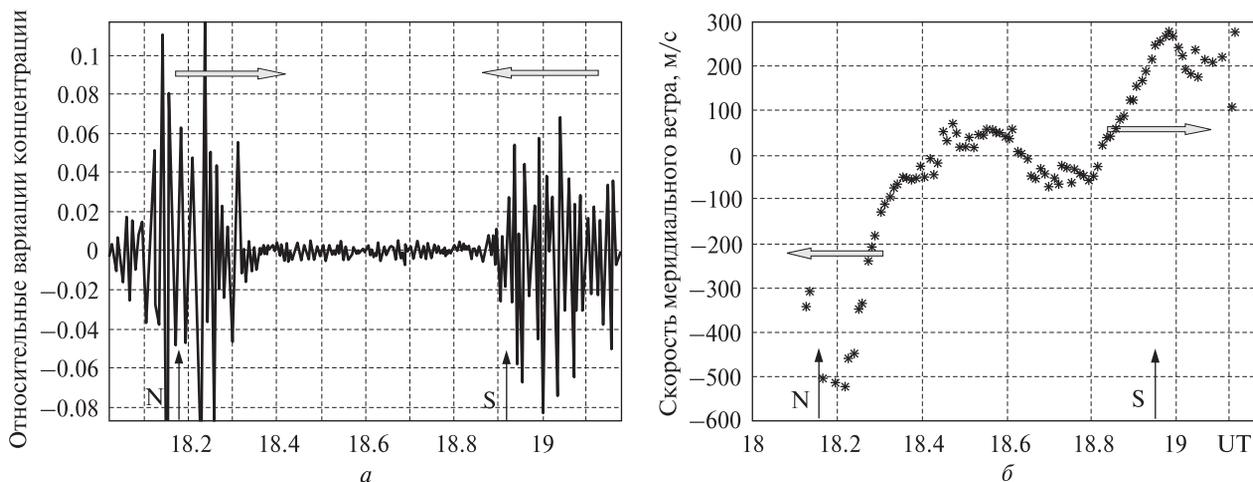


Рис. 6. Границы волновой активности (слева) и направления движения полярных АГВ (справа) в южном полушарии: сверху — январь — февраль 1983 г., внизу — июнь — июль 1982 г.

овала, а в январе — феврале наблюдается протяженный «хвост», как в северном полушарии.

Полученная картина преобладающих движений АГВ в целом почти симметрична над обеими полярными шапками. В обоих полушариях заметна тенденция закручивания азимутов АГВ вокруг полюсов по вращению Земли. Прояв-

ляются похожие сезонные отличия, наиболее интересное среди которых — ночные «хвосты», простирающиеся до низких геомагнитных широт. Поскольку эти АГВ движутся в направлении к авроральному овалу, непонятно их происхождение, скорее всего источники этих волн сосредоточены в средних или низких широтах. Среди



**Рис. 7.** Акустико-гравитационные волны в вариациях нейтральной концентрации (а) и скорость меридионального ветра (б) по данным измерений на спутнике DE2. Горизонтальные стрелки указывают направления движения акустико-гравитационных волн и ветра, вертикальные стрелки — положение географических полюсов

отличий в разных полушариях можно отметить, что над южной шапкой АГВ располагаются менее кучно, чем над северной шапкой, а также в среднем имеют меньшие амплитуды.

**СРАВНЕНИЕ АЗИМУТОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН С ВЕТРОМ**

Вначале сравним направления движения АГВ и ветра вдоль вектора скорости спутника. На рис. 7 синхронно показаны волновые вариации нейтральной концентрации и скорость меридионального ветра на витке 8257. Положительное значение меридиональной составляющей скорости означает, что ветер и спутник движутся в одну сторону, а отрицательное — в противоположных направлениях. Поскольку орбита DE2 солнечно-синхронная с наклоном  $89.9^\circ$ , половину витка спутник находится в часовом поясе LT1, а другую половину в  $LT2 = LT1 \pm 12^h$ . На витке 8257 синхронизация орбиты соответствовала переходу ночь — день (1.8—13.8<sup>h</sup>) около северного полюса и день — ночь (13.8—1.8<sup>h</sup>) вблизи южного полюса. Положение географических полюсов показано вертикальными стрелками: N — северного, S — южного. Направления движения АГВ и ветра показаны горизонтальными стрелками. Полярные ветры, как и следовало ожидать, направлены из дня в ночь, а АГВ, наоборот, рас-

пространяются из ночи в день. Преобладающее направление движения полярных АГВ из ночи в день проявляется систематически в разные времена года и в обоих полушариях [4].

Сравним направления движения АГВ и ветра перпендикулярно к вектору скорости спутника (вдоль параллели). На рис. 3 в прямой моде спутника, если зональный ветер положительный (выпуклость направлена вверх), наблюдается почти противофазность колебаний измеренных составляющих скорости  $V_{ys}$  и  $V_{zs}$ , а если ветер отрицательный — колебания близки к синфазным. Синфазный характер колебаний  $V_{ys}$  и  $V_{zs}$  указывает на движение в положительном направлении оси  $Z_s$ , а противофазный — в отрицательном направлении оси  $Z_s$ . На основе этого можно заключить, что на витке 8051 АГВ вдоль параллели движутся против ветра.

Подобный анализ был проведен для всех волновых цугов, представленных на рис. 5 и 6. Для всех полярных АГВ, как вдоль вектора скорости спутника, так и перпендикулярно к нему наблюдаются встречные движения волн и ветра. Сравнивая полученные азимуты полярных АГВ (правые части рис. 5 и 6) с рис. 1 из работы [14], где представлены измерения скорости ветра по данным того же спутника DE2, видим, что АГВ отчетливо выстраиваются вдоль направлений

основных ветров, двигаясь при этом им 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 в основном от дневного каспа через геомагнитный полюс на ночную сторону. Наиболее полная на сегодня картина термосферной полярной циркуляции была получена на спутнике СНАМП [13]. 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 шапка освещена Солнцем, влияние глобального ветрового потока из низких широт на полярные области становится более существенным.

Все эти основные особенности динамики полярных ветров находят отражение в азимутах АГВ (рис. 5, 6). Для обоих полушарий в условиях полярной ночи волны в основном сосредоточены внутри авроральных овалов и их азимуты преимущественно определяются ветрами возмущенной полярной циркуляции. В периоды, когда шапки освещены Солнцем, усиливается поток АГВ навстречу ветру, дующему из области максимального разогрева термосферы, в результате чего и образуются «хвосты» в распределении АГВ.

## ВЫВОДЫ

На основе спутниковых измерений параметров нейтральной атмосферы исследована связь направлений движения среднемасштабных АГВ с ветром в полярной термосфере. Установлено, что азимуты АГВ систематически направлены против ветра. Этот эффект отчетливо проявляется как в меридиональном, так и в зональном направлении: вдоль меридиана полярные АГВ распространяются из ночи в день, а вдоль парал-

лели — по вращению Земли. Таким образом, по данным прямых спутниковых измерений подтвердился эффект, обнаруженный ранее в наземных наблюдениях и свидетельствующий в пользу пространственной ветровой фильтрации АГВ [7, 17].

Наблюдается тенденция азимутов АГВ циркулярно закручиваться вокруг геомагнитных полюсов. При этом волны над полярными шапками группируются преимущественно по двум направлениям: 1) к магнитному полудню — навстречу ветру полярной циркуляции, направленного от ночного овала в сторону дневного каспа; 2) 14—16 ч — навстречу глобальному ветру, дующему из области низких широт. Относительный вклад этих потоков изменяется в зависимости от освещенности Солнцем полярной шапки, отражая различный характер динамики полярных ветров в периоды полярной ночи и полярного дня. В полярную ночь 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.

1. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988. — 527 с.
2. Федоренко А. К. Восстановление характеристик атмосферных гравитационных волн в полярных регионах на основе масс-спектрометрических спутниковых измерений // Радиофизика и радиоастрономия. — 2009. — **14**, № 3. — С. 254—265.
3. Федоренко А. К. Энергетический баланс акустико-гравитационных волн над полярными шапками по данным спутниковых измерений // Геомагнетизм и аэрономия. — 2010. — **50**, № 1. — С. 111—122.
4. Федоренко А. К., Крючков Е. И. Распределение среднемасштабных АГВ в полярных регионах по данным спутниковых измерений // Геомагнетизм и аэрономия. — 2011. — **51**, № 4. — С. 527—539.
5. Carignan G. R., Block B. P., Maurer J. C., et al. The neutral mass Spectrometer on Dynamics Explorer // Space Sci. Instrum. — 1981. — **5**. — P. 429—441.
6. Cowling D. H., Webb H. D., Yeh K. C. Group rays of internal gravity waves in a wind-stratified atmosphere // J. Geophys. Res. — 1971. — **76**. — P. 213—220.
7. Crowley G., Jones T. B., Dudeney J. R. Comparison of short period TID morphologies in Antarctica during geo-

- magnetically quiet and active intervals // *J. Atmos. Terr. Phys.* — 1987. — **49**. — P. 1155—1162.
8. *Ding F., Wan W., Yuan H.* The influence of background winds and attenuation on the propagation of atmospheric gravity waves // *J. Atmos. Terr. Phys.* — 2003. — **65**. — P. 857—869.
  9. *Hays P. B., Killeen T. L., Kennedy B. C.* The Fabry-Perot interferometer on Dynamics Explorer // *Space Sci. Instrum.* — 1981. — **5**. — P. 395—416.
  10. *Hines C. O.* Internal gravity waves at ionospheric heights // *Can. J. Phys.* — 1960. — **38**. — P. 1441—1481.
  11. *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.
  12. *Killeen T. L., Won Y. I., Nickeyewski 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.* — 1995. — **100**. — P. 21327—21342.
  13. *Lühr H., Rentz S., Ritter P., et al.* Average thermospheric wind pattern over the polar regions, as observed by CHAMP // *Ann. Geophys.* — 2007. — **25**. — P. 1093—1101. — ([www.ann-geophys.net/25/1093/2007](http://www.ann-geophys.net/25/1093/2007)).
  14. *Rees D., Fuller-Rowell T. J., Gordon R., et al.* 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.* — 1983. — **31**, N 11. — P. 1299—1314.
  15. *Spencer, N. W., Wharton L. E., Niemann H. B., et al.* The Dynamics Explorer wind and temperature spectrometer // *Space Sci. Instrum.* — 1981. — **5**. — P. 417—428.
  16. *Sun L., Wan W., Ding F., Mao T.* Gravity wave propagation in the realistic atmosphere based on a three-dimensional transfer function model // *Ann. Geophys.* — 2007. — **25**. — P. 1979—1986. — ([www.ann-geophys.net/25/1979/2007](http://www.ann-geophys.net/25/1979/2007)).
  17. *Waldock J. A., Jones T. B.* HF Doppler observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed at mid latitudes // *J. Atmos. Terr. Phys.* — 1986. — **48**. — P. 245—260.

Надійшла до редакції 12.01.11

A. K. Fedorenko

#### PROPAGATION DIRECTIONS OF ACOUSTIC GRAVITY WAVES ABOVE THE POLAR CAPS OF THE EARTH

Propagation directions of middle-scale acoustic gravity waves (AGW) in the polar regions are investigated using the Dynamics Explorer 2 satellite data. It is found that the AGW above the polar caps are systematically propagated opposite to wind at altitudes of 250 to 350 km. The tendency for anti-clockwise rotations of AGW propagation directions is noticeable above the north polar cap and the tendency for clockwise rotations is observed above the south polar cap. The polar waves are gathered in the next main directions: 1) to the magnetic noon that is towards the wind of disturbed polar circulation; 2) to 15–16 hours of magnetic local time that is towards the global thermospheric wind blowing from low latitude regions. Under the polar day and polar night conditions the directions of AGW propagations are changed in the both hemisphere according to seasonal reconstruction of polar wind dynamics.