

Влияние ветра на свойства акустико-гравитационных волн в полярной ионосфере

А. К. Федоренко, Е. И. Крючков

*Институт космических исследований НАНУ и НКАУ,
пр. Академика Глушкова, 40, корп. 4/1, Киев, 03680, Украина
E-mail: aurora28@i.ua, john_k@i.ua*

Статья поступила в редакцию 21 марта 2011 г.

По данным измерений на спутнике Dynamic Explorer 2 исследовано влияние ветра на распространение и свойства акустико-гравитационных волн (АГВ) в полярной термосфере. Обнаружены эффекты, указывающие на ветровой контроль поведения АГВ: движение волн и ветра систематически происходит в противоположных направлениях; амплитуды волн тем больше, чем выше скорость ветра. Получена эмпирическая зависимость амплитуд волн от скорости ветра. Наблюдаемые спектральные особенности волн над полярными шапками объясняются их модификацией в сильных ветрах полярной циркуляции.

Ключевые слова: акустико-гравитационная волна, ионосфера, термосфера, полярная шапка

1. Введение

Исследование общего динамического режима атмосферы сталкивается с большими трудностями как при получении экспериментальной информации о движениях атмосферы на разных высотах, так и при моделировании. Это связано в первую очередь с большим разнообразием типов и масштабов атмосферных движений (волны, ветры, вихри и др.). Среди разных динамических процессов акустико-гравитационные волны (АГВ) играют особую роль, обеспечивая эффективный перенос энергии возмущений как по горизонтали, так и между разными высотными уровнями в атмосфере. Эти волны исследуются уже более полувека многочисленными наземными методами и, в значительно меньшей степени, с помощью прямых спутниковых измерений. Согласно многолетним наблюдениям перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), а также АГВ по спектральным свойствам принято разделять на две группы [1]: крупномасштабные и среднемасштабные. Для крупномасштабных АГВ характерны горизонтальные длины волн > 1000 км, периоды

от 30 мин до примерно 3 ч и фазовые горизонтальные скорости $400 \div 1000$ м/с. Крупномасштабные АГВ распространяются из полярных областей в направлении к экватору, а частота их появления, как правило, коррелирует с уровнем геомагнитной активности. Среднемасштабные АГВ с длинами волн порядка 100 км, горизонтальными фазовыми скоростями $100 \div 250$ м/с и периодами $15 \text{ мин} \div 1 \text{ ч}$ наблюдаются в разных широтных регионах, часто их происхождение связывают с тропосферными и наземными источниками.

Анализ измерений на спутнике Dynamic Explorer 2 (DE2) показал, что на высотах F2-области ионосферы над полярными шапками обоих полушарий систематически наблюдаются АГВ, амплитуды которых в несколько раз превышают характерные амплитуды АГВ в средних и низких широтах [2, 3], что в принципе можно объяснить мощными источниками возмущений в полярной термосфере. Эти волны характеризуются также выделенными горизонтальными пространственными масштабами (в основном $500 \div 650$ км) и периодами ($12.5 \div 14.0$ мин) [3, 4]. Маловероятно существование в полярных областях сис-

тематического источника, который генерировал бы однотипные волны над обеими шапками в разные сезоны и в достаточно протяженном интервале высот 250 ÷ 400 км. Кроме того, было обнаружено систематическое направление распространения АГВ вблизи полюсов из области ночи в дневную область [2, 3]. Выделенные спектральные свойства и направления движения этих АГВ позволяют предположить, что существует некоторый механизм, во-первых, фильтрующий эти волны по направлению и, во-вторых, ответственный за специфические спектральные характеристики. Возможным механизмом, способным объяснить наблюдаемые особенности полярных АГВ, является ветер.

Влияние ветров на распространение АГВ изучалось одновременно с развитием теории этих волн, и еще в ранних работах, например [5], было показано, что ветер оказывает на АГВ фильтрующее по направлению воздействие. Численное моделирование волнового поля АГВ от приземных источников на высотах ионосферы в реалистичной атмосфере с учетом профиля ветра также показало, что АГВ распространяются предпочтительно против ветра [6]. С учетом вязких потерь, оказывается, что только против ветра АГВ от приземных источников могут достигать ионосферных высот по кратчайшему пути (за счет укорочения лучевых траекторий) и с минимальными потерями энергии [7]. По данным наземных наблюдений было получено, что на высотах F2-области ионосферы ПИВ обнаруживают циркулярное закручивание азимутов распространения вокруг полюсов в обоих полушариях. Эти экспериментальные результаты были интерпретированы как свидетельство распространения ПИВ против ветра [8, 9], однако являются дискуссионными. Так, согласно выводам работы [10], преобладающие азимуты ПИВ в полярных областях объясняются не ветровой фильтрацией, а разной локализацией источников этих волн. Исследование связи АГВ с ветром на основе прямых спутниковых измерений параметров нейтральной атмосферы до сих пор не проводилось. 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 наличия электрических полей и высыпаний частиц. Кроме того, со спутника обеспечивает-

ся глобальность исследования, недоступная наземным методам.

В настоящей работе по измерениям на спутнике DE2 исследована связь направлений движения и характеристик АГВ с ветром в полярных областях. Скорости ветров в полярной термосфере могут составлять примерно от 200 до 800 м/с в зависимости от уровня солнечной и геомагнитной активности [11] 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 особенно ощутимым. Высота орбиты спутника DE2 составляла 250 ÷ 1010 км, ее наклонение – 89.9°, период обращения спутника – около 98 мин. При таком наклонении орбиты спутник на каждом витке пролетал вблизи географических полюсов над полярными шапками. На DE2 были установлены различные датчики параметров нейтральной атмосферы, что позволяло одновременно исследовать ветер и свойства АГВ, комбинируя синхронные измерения разных приборов. Для анализа характеристик волн и ветра в работе были использованы синхронные измерения концентрации и горизонтальной скорости нейтральных частиц. Концентрации разных нейтральных составляющих атмосферы: атомарного кислорода (O), молекулярного азота (N₂), аргона (Ar) и гелия (He) измерялись на DE2 с помощью масс-спектрометра в эксперименте NACS (Neutral Atmosphere Composition Spectrometer) [12]. Горизонтальная составляющая скорости нейтральных частиц вдоль вектора скорости спутника измерялась в эксперименте FPI (Fabry Perrot Interferometer) по доплеровскому сдвигу частоты красной эмиссии атомарного кислорода 630 нм [13]. Отметим, что при наклонении орбиты DE2 89.9° в эксперименте FPI фактически регистрировалась горизонтальная меридиональная составляющая скорости.

2. Идентификация возмущений и направления движения волн

АГВ над полярными шапками систематически регистрируются с борта спутника в виде квазипериодических вариаций разных параметров нейтральной атмосферы (рис. 1, а, б). Не зная заранее о преобладающем масштабе АГВ (предположительно от нескольких сотен до

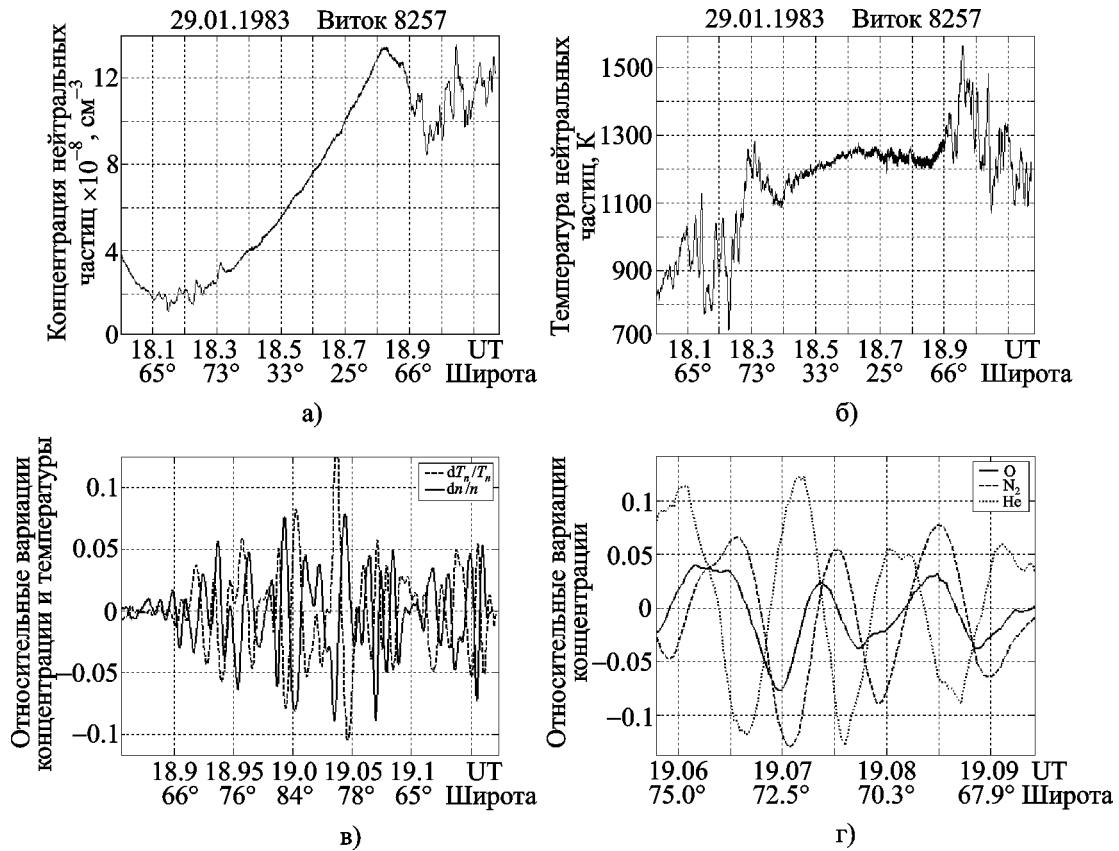


Рис. 1. Регистрация АГВ в данных спутника DE2 на витке 8257: а), б) – соответственно концентрация и температура нейтральных частиц; в) – синхронные относительные вариации концентрации $\delta n/n$ и температуры $\delta T_n/T_n$; г) – сравнение относительных вариаций концентраций разных сортов газов

нескольких тысяч километров), нужно выбрать критерий, позволяющий эффективно отфильтровать АГВ на фоне крупномасштабных процессов (тренда). В качестве такого критерия удобно использовать совпадение горизонтальных масштабов АГВ в разных параметрах. Выделение волновых процессов на фоне монотонных изменений параметров производилось по методу скользящего среднего, при этом количество точек фильтра выбиралось из условия максимальной корреляции вариаций в концентрациях разных газов [4]. На рис. 1, г показаны синхронные относительные вариации концентрации разных газов $\delta n_i/\bar{n}_i$, (где δn_i – волновая составляющая, \bar{n}_i – фоновое невозмущенное значение концентрации) на витке 8257 спутника DE2 над южной полярной шапкой. Поскольку фазовая скорость АГВ (сотни метров в секунду) мала по сравнению со скоростью спутника (8 км/с), с борта космического аппарата наблюдается фактически распределение волнового

процесса вдоль витка в пространстве. Наличие согласованных вариаций в параметрах, измеренных разными датчиками, подтверждает, что это действительно физическая волна, а не следствие обработки данных, вращения спутника или погрешностей измерений. Почти противофазность колебаний концентрации легкого He и температуры и колебаний концентраций тяжелых газов (рис. 1, в, г) является характерным признаком АГВ [4, 14]. Таким образом, качественный анализ экспериментальных квазипериодических вариаций разных параметров дает возможность идентифицировать эти волновые формы как АГВ.

Для определения направления движения АГВ вдоль витка спутника воспользуемся методикой, описанной ранее в работе [4]. Для волны, распространяющейся в пространстве, профиль колебаний вертикальной скорости V_z опережает по фазе профиль колебаний вертикального смещения h на $\pi/2$. Синхронные профили

вариаций вертикальной скорости по измерениям WATS (Wind and Temperature Spectrometer) на DE2 [15] и рассчитанного по масс-спектрометрическим измерениям концентраций вертикального смещения показаны на рис. 2, а. На представленном витке 8286 волна движется навстречу спутнику. Существует возможность определять направление АГВ только по измерениям концентраций, не вычисляя h и не используя для этого измерения V_z . На основе соотношений теории АГВ можно показать, что колебания концентрации относительно легкого атомарного кислорода O по фазе всегда ближе к колебаниям вертикальной скорости, а более тяжелого молекулярного азота N_2 – к вертикальному смещению [4]. Сдвиг фаз между колебаниями концентраций O и N_2 зависит от спектральных свойств волны и, как правило, не превышает 40° , при этом опережение O все-

гда указывает на направление распространения АГВ (рис. 2, б).

Таким образом, необходимый для целей настоящей работы анализ спутниковых данных включал следующие этапы: 1) выделение волновых вариаций на фоне крупномасштабных изменений; 2) идентификацию АГВ на основе сравнения вариаций концентраций разных атмосферных газов; 3) определение направления движения АГВ. Подробнее соответствующие методики описаны в [2, 4].

3. Проявления связи АГВ и ветра в эксперименте

3.1. Направление движения

Горизонтальная скорость ветра вдоль витка измерялась в эксперименте FPI. Положительное значение этой компоненты скорости означает, что ветер и спутник движутся в одном направлении, а отрицательное – в противоположных направлениях. На рис. 3 на примере двух витков в январе 1983 г. синхронно показаны волновые вариации концентрации нейтральных частиц (слева) и измеренная меридиональная компонента скорости ветра W_s (справа). Компонента W_s определялась дистанционно по методу сканирования лимба на основе доплеровского смещения частоты эмиссии атомарного кислорода 630 нм. При такой методике измеренные значения скорости относятся не к реальной высоте спутника, а к эффективной высоте $\sim 220 \div 260$ км, где локализован максимум излучающего слоя. Таким образом, если спутник находится выше этого слоя, измеренные профили скорости ветра будут соответствовать уровню ниже спутника. В связи с этим для анализа были отобраны витки, на которых спутник пролетал над полярными шапками на высотах $250 \div 280$ км, т. е. находился как можно ближе к максимуму излучающего слоя. За счет интегрирования излучающих атомов вдоль луча зрения в лимбовых наблюдениях волновые вариации с масштабами в сотни километров сглаживаются, и в измерениях меридиональной скорости наблюдается только плавный крупномасштабный тренд.

Поскольку орбита DE2 солнечно-синхронная с наклоном 89.9° , половину витка спутник находится в локальном часовом поясе LT1, а другую половину в $LT2 = LT1 \pm 12$ ч. Синхронизация орбиты в январе 1983 г. соответствовала пере-

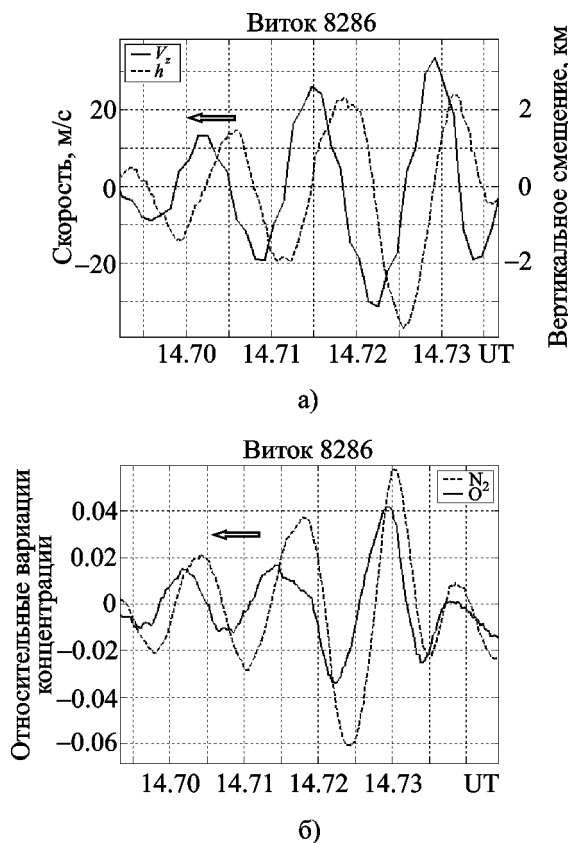


Рис. 2. Определение направления движения АГВ (показано горизонтальными стрелками) вдоль орбиты спутника: а) – вариации вертикальной скорости V_z и вертикального смещения h ; б) – относительные вариации концентраций O и N_2

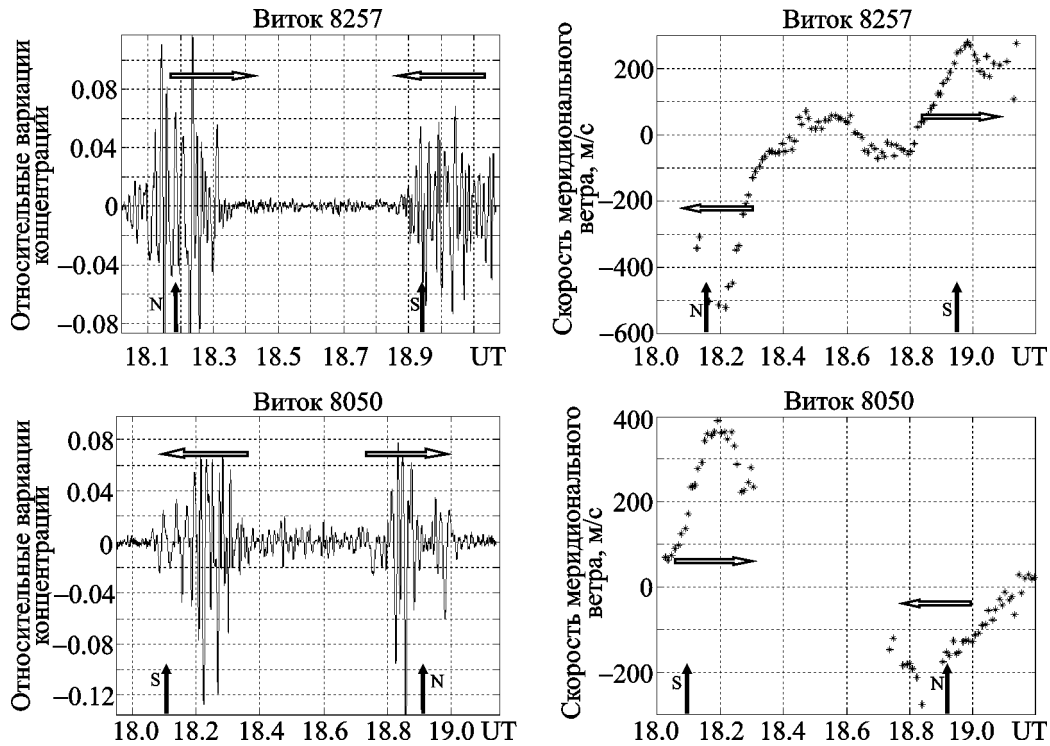


Рис. 3. АГВ в вариациях концентрации нейтральных частиц (слева) и скорость меридионального ветра (справа) по данным измерений на спутнике DE2

ходу ночь—день около северного полюса и день—ночь вблизи южного полюса. В начале месяца орбита находилась в часовом поясе $3.5^h \div 15.5^h$, в конце из-за прецессии переместилась в пояс $1.5^h \div 13.5^h$. Положение географических полюсов на рис. 3 показано вертикальными стрелками (N – северный, а S – южный полюс). На участке витка 8257 спутник большую часть времени находился в области дня, на витке 8050 – в области ночи. Направления движения АГВ и ветра показаны горизонтальными стрелками. Полярные ветры направлены из области дня в область ночи, как и следовало ожидать, а АГВ, наоборот, распространяются из области ночи в область дня. Преобладающее направление движения полярных АГВ из области ночи в область дня характерно не только для января, а проявляется систематически в разные времена года и в обоих полушариях [2].

При ориентации орбиты DE2 в направлении утро—вечер (весной и осенью 1982 г.) спутник иногда пересекал крупномасштабные ветровые структуры, связанные с усилением магнитосферной конвекции [16]. Экспериментальные

данные, полученные в таких условиях, показаны на рис. 4 (ветер над полярной шапкой изменяет направление). На витке 7285 в интервале $1.0 \div 1.15$ UT наблюдается движение ветра навстречу спутнику (значения меридиональной скорости отрицательны), после 1.15 UT – в направлении движения спутника (значения скорости положительны). В вариациях концентрации нейтральных частиц наблюдаются два разделенных волновых цуга, движущихся навстречу друг другу, в то время как ветер направлен в противоположные стороны. Таким образом, при разной ориентации орбиты спутника и разной конфигурации ветров над полярными шапками регистрируется движение АГВ навстречу ветру. Такое направление распространения АГВ, навстречу ветру, наблюдалось систематически на 280 витках DE2 в разные сезоны и при разных уровнях геомагнитной возмущенности.

3.2. Амплитуда АГВ и скорость ветра

Кроме противоположных направлений движения, обнаруживается связь между амплитудами АГВ и величиной скорости ветра. На рис. 5, а, б

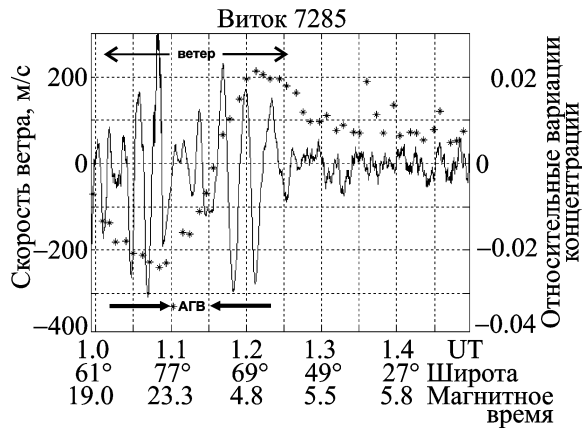


Рис. 4. Скорость ветра и относительные вариации концентрации нейтральных частиц, зарегистрированные спутником DE2 над южной полярной шапкой при движении в направлении утро–вечер на витке 7285. Скорость ветра обозначена на графике звездочками, относительные вариации концентрации – сплошной линией

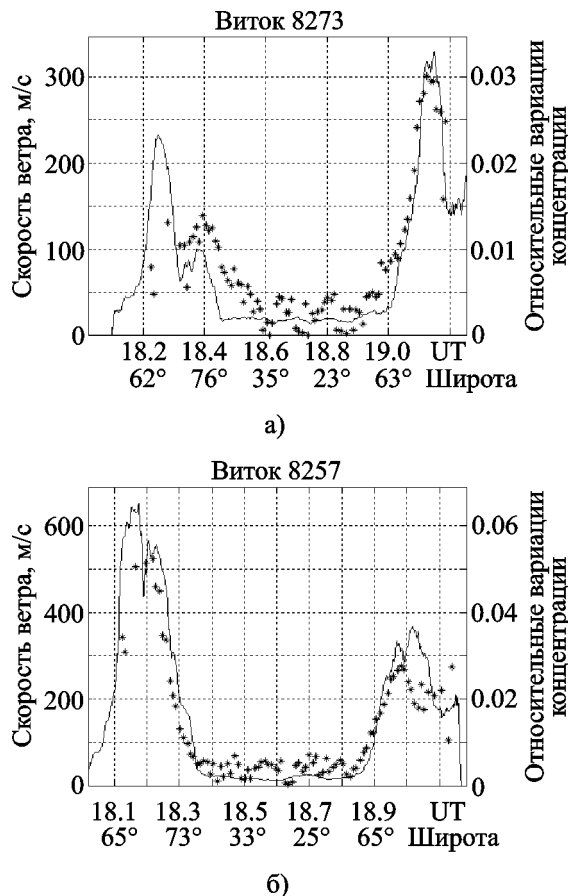


Рис. 5. Распределение амплитуды АГВ и скорости меридионального ветра вдоль двух витков спутника DE2: а) – виток 8273; б) – виток 8257

для двух витков DE2 синхронно показаны модуль меридиональной скорости ветра (звездочки) и модуль вариаций концентрации АГВ, усредненный за 5 периодов колебаний, (сплошная линия). Отчетливо видно, что чем сильнее ветер, тем больше амплитуда АГВ. В средних и низких широтах скорости ветров составляют 50 ÷ 100 м/с, а амплитуды АГВ не превышают 1 %. Полярные области выделяются на рис. 5 значительным одновременным усилением амплитуд волн и ветра. На рассмотренных витках скорости ветров достигали 300 ÷ 600 м/с, а амплитуды волн при этом возрастали до 3 ÷ 5 %. Возрастание и уменьшение амплитуд АГВ и ветра происходит не совсем синхронно из-за дистанционной методики наблюдения ветра. Возрастание скорости ветра наблюдается несколько раньше, если спектрометр ориентирован по движению спутника, или позже, если против движения, чем это было бы при контактных измерениях скорости. С увеличением высоты орбиты по мере удаления от излучающего слоя этот эффект усиливается. Но даже несмотря на это, наблюдается очень хорошее согласование амплитуд волн и скорости ветра.

Интегральная для 8 витков зависимость амплитуды АГВ от меридиональной скорости ветра для южного полушария в январе 1983 г. показана на рис. 6, а. На каждом из этих витков было выбрано 10 ÷ 12 синхронных значений амплитуды волны и скорости ветра. Зависимость между скоростью ветра и амплитудой АГВ аппроксимирована методом линейной регрессии. Представленная на рис. 6, а диаграмма “амплитуда АГВ – скорость ветра” содержит информацию не только о полярных регионах. Нижняя ее часть, для АГВ с относительной амплитудой до 1 %, относится в основном к средним широтам, а верхняя часть, для АГВ с амплитудой больше 2 %, – к высоким широтам. Отметим, что получена зависимость амплитуды волны только от одной – меридиональной – компоненты скорости ветра. При этом на разных витках спутник пересекал ветровой поток под разными углами (в общем случае от 0 до $\pi/2$). На рис. 6, б показано изменение наклона аппроксимирующих прямых из-за разных углов пересечения спутником ветрового потока на отдельных витках. Предположим, что нет систематически выделенного направления ветра относительно движения спутника. В этом случае общая для 8

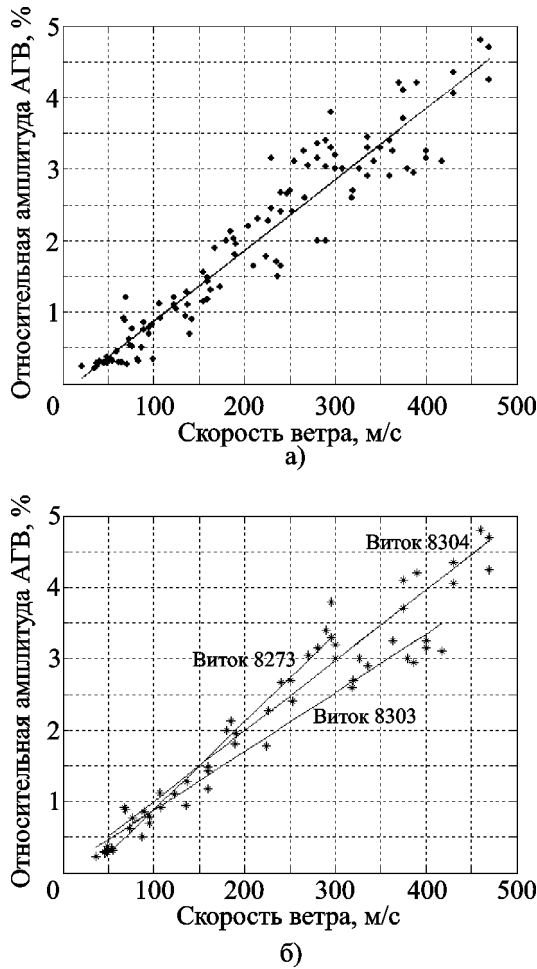


Рис. 6. Зависимость амплитуды АГВ от скорости меридионального ветра: а) – интегральная (для 8 витков); б) – для отдельных витков

витков аппроксимирующая прямая будет соответствовать пересечению спутником ветрового потока под средним углом $\bar{\varphi} \approx 45^\circ$. С учетом этих соображений рассмотрим зависимость амплитуды АГВ не только от меридиональной компоненты, но и от полной скорости ветра. Угловой коэффициент наклона аппроксимирующей прямой на рис. 6, а составляет ≈ 0.01 . Тогда эмпирическая зависимость амплитуды волны от скорости ветра имеет вид:

$$\delta n/n \approx 0.01W_s \approx 0.007W,$$

где $W \approx \sqrt{2}W_s$, – общая скорость ветра, м/с; $\delta n/n$ – относительная амплитуда вариаций концентрации, %.

Таким образом, по данным спутника DE2 над полярными шапками наблюдается отчетливая связь АГВ с ветром: 1) волны систематически распространяются против ветра; 2) области увеличения амплитуды волны и усиления ветра пространственно совпадают; 3) амплитуда АГВ тем больше, чем выше скорость ветра. Диаграмма рис. 6, а наглядно показывает определяющую роль ветра в формировании волнового поля верхней атмосферы в глобальном масштабе. Согласно спутниковым наблюдениям большие амплитуды АГВ в полярных и примыкающих среднеширотных областях наблюдаются только в присутствии сильных ветров.

4. Обсуждение результатов

Эффект преимущественного движения АГВ против ветра на ионосферных высотах теоретически объясняется в литературе уменьшением вязких потерь во встречном ветровом потоке [7]. При такой интерпретации большие амплитуды наблюдаемых во встречном ветре АГВ объясняются уменьшением потерь энергии волной за счет “укорочения” лучевых траекторий. В то же время в попутном ветре лучевые траектории становятся более пологими, вследствие чего оптический путь волны в атмосфере от источника до высоты наблюдения удлиняется. В результате на ионосферных высотах в основном должны наблюдаться АГВ и ПИВ, распространяющиеся против ветра [6]. Возможно, этот механизм действительно играет большую роль при распространении АГВ от приземных источников на ионосферные высоты. Однако для наблюдаемых на спутнике DE2 полярных АГВ расстояние от высоты предположительного источника в E-слое до высоты наблюдения относительно невелико. И объяснить большие амплитуды АГВ, распространяющихся навстречу ветру, при полном отсутствии АГВ попутных за счет изменения оптического пути волны вряд ли возможно. Кроме того, преобладающее направление распространения АГВ – против ветра, по-видимому, носит в атмосфере общий характер и наблюдается для волн разных масштабов, в разных широтных областях и на разных высотных уровнях [8, 9, 17, 18]. Этот эффект всегда проявляется тем отчетливее, чем

больше скорость ветра. Таким образом, АГВ “предпочитают” распространяться против ветра не только вдали от источников. К тому же вязкие потери в нижней и средней атмосфере значительно меньше, чем на ионосферных высотах, и поэтому удлинение пути луча не должно быть настолько критичным, чтобы полностью подавить попутные АГВ.

В последние годы интенсивно исследуется механизм “захвата” АГВ во встречном ветровом потоке [17]. При распространении АГВ во встречном ветре лучевые траектории волн загибаются ближе к вертикали, а волновой вектор, соответственно, становится более горизонтальным. Поэтому при достаточно сильном встречном ветре высокочастотные волны распространяются квазигоризонтально и могут быть захвачены в “волновод”. Попутный ветер, наоборот, способствует свободному распространению АГВ в атмосфере (лучи становятся более пологими, а направление волнового вектора близко к вертикали). Таким образом, квазимонохроматические АГВ с высокими частотами оказываются “привязанными” к высотному уровню, где локализован ветровой поток. Если методика наблюдений также относится к фиксированной высоте, например, при регистрации АГВ по свечению атмосферных эмиссий или с борта спутника, то в потоке ветра должны наблюдаться преимущественно распространяющиеся навстречу ему квазимонохроматические АГВ с высокими частотами. Такая интерпретация хорошо объясняет наблюдаемые на спутнике DE2 особенности полярных АГВ: 1) систематическое движение волн против ветра, 2) высокие частоты, близкие к граничной частоте Брента-Вяйсяля и 3) квазигоризонтальное распространение [4]. Однако не объясняет зависимость амплитуды АГВ от скорости ветра.

По нашему мнению, полученная отчетливая зависимость амплитуды АГВ от скорости ветра (рис. 6, а) указывает на более тесную физическую связь волн с ветром: либо происходит усиление амплитуды волны во встречном ветровом потоке, либо ветер непосредственно участвует в генерации АГВ. В нижней части диаграммы рис. 6, а зависимость амплитуды АГВ от скорости ветра слабее, чем в центральной части, а при сильных ветрах наблюдается некоторое насыщение. Полученная диаграмма качественно очень похожа на известную в гид-

родинамике зависимость скорости поверхностных ветровых волн, распространяющихся против течения, от скорости этого встречного течения. Возможно, такая гидродинамическая аналогия позволит в дальнейшем понять механизм усиления атмосферных АГВ встречным ветровым потоком и объяснить наблюдаемую тесную связь между амплитудами волн и скоростью ветра.

Влияние ветров существенно усложняет отождествление наблюдаемых возмущений с их источниками. На примере полярных областей видно, что сильные ветры совершенно “маскируют” информацию об источнике, оставляя в наблюдаемом спектре только выделенные пространственные и временные масштабы. Пусть импульсный источник генерирует АГВ в широком спектре частот, распространяющиеся от него в разные стороны. При достаточно сильном ветре будут наблюдаться только АГВ, распространяющиеся против ветра с частотами, близкими к частоте Брента-Вяйсяля, и фазовыми горизонтальными скоростями, близкими к скорости звука. Вследствие чего наблюдаемые длины волн λ_x будут близки к величине cT_B , где c – скорость звука, а T_B – период Брента-Вяйсяля, и для условий измерений на DE2 составлять 500 ÷ 600 км. Именно такие горизонтальные масштабы волн преобладают над полярными шапками [4]. Таким образом, ветер не только “фильтрует” АГВ по направлению, но и обуславливает преобладание выделенных спектральных свойств.

Влиянием ветров можно объяснить отличительные особенности волнового поля на ионосферных высотах в дневных и ночных условиях. Согласно многолетним наземным наблюдениям ПИВ, значения их амплитуд в ночное время в относительных вариациях концентрации примерно в 1.5 раза превышают соответствующие значения в дневное время. В спутниковых наблюдениях концентрации нейтральных частиц на высотах F2-области ионосферы также наблюдается фоновый уровень АГВ с относительной амплитудой около 0.5 % ночью и только 0.2 ÷ 0.3 % днем. Характерные для среднеширотной термосферы скорости ветров составляют в среднем 100 ÷ 200 м/с ночью и 50 ÷ 100 м/с днем. Такое изменение амплитуд ПИВ в течение суток может быть обусловлено разными скоростями ночных и дневных ветров.

5. Заключение

По данным прямых измерений параметров нейтральной атмосферы на спутнике DE2 исследована связь полярных АГВ с ветром. Обнаружены отчетливые проявления взаимодействия волн и ветра: 1) АГВ систематически распространяются навстречу ветру; 2) чем выше скорость ветра, тем больше наблюдаемая амплитуда волны. Получена эмпирическая зависимость амплитуд АГВ от скорости ветра.

Наблюдаемые в полярных регионах спектральные параметры АГВ объясняются модификацией при взаимодействии с сильным ветром полярной термосферной циркуляции, в результате чего эти волны, распространяясь против ветра, приобретают однотипные свойства (фазовые горизонтальные скорости $600 \div 700$ м/с, периоды $12.5 \div 14$ мин, длины волн $500 \div 650$ км).

Таким образом, формирование волнового поля над полярными шапками обуславливается преимущественно ветрами. Возможно, ветровой контроль не ограничивается только полярными областями, а в значительной мере определяет волновую активность на высотах F2-области ионосферы в масштабе всего земного шара.

Представленные в работе исследования выполнены в рамках НИР “Арктика” и “Шпицберген-2011”.

Литература

- Francis S. H. Global propagation of atmospheric gravity waves: A review // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1975. – Vol. 37, No. 6-7. – P. 1011-1054.
- Федоренко А. К., Крючков Е. И. Распределение среднemasштабных АГВ в полярных регионах по данным спутниковых измерений // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 2011. – Т. 51, №4.
- Johnson F. S., Hanson W. B., Hodges R. R., Coley W. R., Carignan G. R., and Spencer N. W. Gravity waves near 300 km over the polar caps // *J. Geophys. Res.* – 1995. – Vol. 100, No. A12. – P. 23993-24002.
- Федоренко А. К. Восстановление характеристик атмосферных гравитационных волн в полярных регионах на основе масс-спектрометрических спутниковых измерений // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2009. – Т. 14, №3. – С. 254-265.
- Cowling D. H., Webb H. D., and Yeh K. C. Group rays of internal gravity waves in a wind-stratified atmosphere // *J. Geophys. Res.* – 1971. – Vol. 76, No. 1. – P. 213-220.
- Sun L., Wan W., Ding F., and Mao T. Gravity wave propagation in the realistic atmosphere based on a three-dimensional transfer function model // *Ann. Geophys.* – 2007. – Vol. 25. – P. 1979-1986. <www.ann-geophys.net/25/1979/2007/>.
- Ding F., Wan W., and Yuan H. The influence of background winds and attenuation on the propagation of atmospheric gravity waves // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 2003. – Vol. 65. – P. 857-869.
- Crowley G., Jones T. B., and Dudeney J. R. Comparison of short period TID morphologies in Antarctica during geomagnetically quiet and active intervals // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1987. – Vol. 49. – P. 1155-1162.
- Waldock J. A. and Jones T. B. HF Doppler observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed at mid latitudes // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1986. – Vol. 48, No. 3. – P. 245-260.
- Jacobson A. R., Carlos R. C., Massey R. S., and Wu G. Observations of traveling ionospheric disturbances with a satellite-beacon radio interferometer: seasonal and local time behaviour // *J. Geophys. Res.* – 1995. – Vol. 100, No. A2. – P. 1653-1665.
- Killeen T. L., Won Y. I., Niciejewski R. J., and 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. – Vol. 100. – P. 21327-21342.
- Carignan G. R., Block B. P., Maurer J. C., Hedin A. E., Reber C. A., and Spencer N. W. The neutral mass Spectrometer on Dynamics Explorer // *Space Sci. Instrum.* – 1981. – Vol. 5. – P. 429-441.
- Hays P. B., Killeen T. L., and Kennedy B. C. The Fabry-Perot interferometer on Dynamics Explorer // *Space Sci. Instrum.* – 1981. – Vol. 5. – P. 395-416.
- Dudis J. J. and Reber C. A. Composition effects in thermospheric gravity waves // *Geophys. Res. Lett.* – 1976. – Vol. 3, No. 12. – P. 727-730.
- Spencer N. W., Wharton L. E., Niemann H. B., Hedin A. E., Carignan G. R., and Maurer J. C. The Dynamics Explorer wind and temperature spectrometer // *Space Sci. Instrum.* – 1981. – Vol. 5. – P. 417-428.
- Lühr H., Rentz S., Ritter P., Liu H., and Häusler K. Average thermospheric wind pattern over the polar regions, as observed by CHAMP // *Ann. Geophys.* – 2007. – Vol. 25, No. 5. – P. 1093-1101. <www.ann-geophys.net/25/1093/2007/>.
- Yu. Y. and Hickey M. P. Simulated ducting of high-frequency atmospheric gravity waves in the presence of background winds // *Geophys. Res. Lett.* – 2007. – Vol. 34, Is. 11. – L11103.
- Scheffler A. O. and Liu C. H. The effects of Doppler shift on gravity wave spectra observed by MST radar // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1986. – Vol. 48, Iss. 11-12. – P. 1225-1231.

**Вплив вітру на властивості
акустико-гравітаційних хвиль
у полярній іоносфері**

А. К. Федоренко, Є. І. Крючков

За даними вимірювань на супутнику Dynamics Explorer 2 досліджено вплив вітру на поширення та властивості акустико-гравітаційних хвиль (АГХ) у полярній термосфері. Виявлено ефекти, що вказують на вітровий контроль поведінки АГХ: поширення хвиль і вітру систематично відбувається в протилежних напрямках; амплітуди хвиль тим більші, чим більша швидкість вітру. Отримано емпіричну залежність амплітуд хвиль від швидкості вітру. Спостережувані спектральні особливості хвиль над полярними шапками обумовлені їх модифікацією в сильних вітрах полярної циркуляції.

**Wind Influence on the Acoustic Gravity
Waves Characteristics
in the Polar Ionosphere**

A. K. Fedorenko and Y. I. Kryuchkov

The wind influence on the acoustic gravity wave (AGW) propagation and characteristics is investigated in the polar thermosphere using the Dynamics Explorer 2 satellite data. The effects indicating the wind control of the AGW behavior are revealed: AGW and wind are systematically propagating in the opposite directions; the stronger the wind velocity, the larger the wave amplitude. The empirical dependence of wave amplitudes on the wind velocity is proved. Observed spectral peculiarities of the waves above the polar caps are determined by their modification in strong winds of polar circulation.