

УДК 551:501

АКТИВНОСТЬ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В СЕВЕРНОЙ ПОЛЯРНОЙ АТМОСФЕРЕ ВЕНЕРЫ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОЗАТМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ СИГНАЛОВ ($\lambda = 32$ СМ) СО СПУТНИКОВ ВЕНЕРА-15 И -16

© 2021 г. В. Н. Губенко^{а,*,**}, И. А. Кириллович^а, Д. В. Губенко^а,
В. Е. Андреев^а, Т. В. Губенко^а

^аФрязинский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Московская область, Фрязино, Россия

*E-mail: vngubenko@gmail.com

**E-mail: gubenko@fireras.su

Поступила в редакцию 14.04.2020 г.

После доработки 20.07.2020 г.

Принята к публикации 07.08.2020 г.

Радиозатменные измерения интенсивности сигнала ($\lambda = 32$ см) спутников Венера-15 и -16, проведенные в период с 16 по 31 октября 1983 года, используются для анализа активности внутренних волн в северной полярной атмосфере Венеры. Наблюдения интенсивности радиоволн обеспечивают важную информацию о мелкомасштабной структуре атмосферы планеты. Сравнение радиозатменных измерений и результатов стандартной волновой теории показывает, что мелкомасштабные флуктуации интенсивности принимаемого сигнала обусловлены спектром вертикально распространяющихся внутренних гравитационных волн. Вертикальная длина этих флуктуаций на высотах более 61.5 км составляет около ~ 1 км. Разработанная модель для радиационного затухания флуктуаций интенсивности с высотой в атмосфере Венеры предполагает, что собственные частоты идентифицированных внутренних волн (измеряемые в системе отсчета, движущейся вместе с невозмущенным потоком) в исследуемых сеансах изменяются от 3.5×10^{-4} до 9.5×10^{-4} рад/с, а отношение горизонтальной и вертикальной длин волн заключено в интервале от 57 до 21.

Ключевые слова: радиозатменные измерения, флуктуации интенсивности сигнала, атмосфера Венеры, радиационный демпинг, внутренние гравитационные волны

DOI: 10.31857/S0320930X21010047

ВВЕДЕНИЕ

Волновые процессы оказывают значительное влияние на циркуляцию, химический состав, тепловой режим и изменчивость атмосфер планет. Важная роль внутренних гравитационных волн (ВГВ) связана с обеспечением ими эффективного механизма переноса энергии и импульса с нижних атмосферных уровней на верхние. Источниками генерации внутренних волн в атмосфере могут быть тепловые контрасты вблизи поверхности, топография, сдвиговая и конвективная неустойчивости ветра, фронтальные процессы и др. В отсутствие диссипации энергии, амплитуда волновых возмущений скорости ветра или температуры растет примерно экспоненциально с увеличением высоты в атмосфере Земли, поэтому возмущения с малой амплитудой вблизи поверхности могут производить значительные эффекты

на больших высотах, где происходит обрушение волн и передача энергии и импульса в невозмущенный поток. Поскольку ВГВ являются характерной особенностью устойчиво стратифицированной атмосферы, то аналогичные эффекты можно ожидать в атмосферах Венеры и Марса. Интерпретация наблюдений флуктуаций скорости ветра, температуры или плотности в атмосфере планеты нередко основывается на модели широкого спектра волн, порождающих эти флуктуации. Спектральное описание подразумевает, что волновое поле флуктуаций состоит из многих компонент с различными масштабами. Во многих случаях экспериментальные спектры флуктуаций температуры, плотности или скорости ветра в атмосфере демонстрируют на фоне гладкого спектра дискретные (отдельные) узкие пики, которые указывают на квазипериодическую струк-

туру возмущений в некотором диапазоне высот. Результаты прямых зондовых измерений в стратосфере Земли свидетельствуют о том, что формирование такой структуры может быть обусловлено распространением монохроматической волны, которая находится в состоянии насыщения вследствие сдвиговой неустойчивости в атмосфере.

Преимуществом радиозатменных измерений является широкий географический и временной охват исследуемых районов, позволяющий проводить глобальный мониторинг состояния атмосферы (Губенко и др., 2016а; 2016б; 2018). В период с октября 1983 по сентябрь 1984 г. с помощью спутников Венера-15 и -16 нами были выполнены интенсивные радиозатменные исследования атмосферы Венеры. Орбиты указанных спутников были такими, что их заходы за планету имели место в Северном полушарии, а выходы – в Южном. Двухчастотные радионаблюдения (длины волн 5 и 32 см) были проведены в 176 атмосферных районах, расположенных на дневной и ночной стороне Северного и Южного полушарий планеты. В приполярной и полярной области Южного полушария Венеры, где ранее проводились только единичные измерения, были получены новые данные об атмосферных характеристиках для 20 районов. Результаты, найденные на основе этих измерений, включают: (I) вертикальные профили плотности, давления, температуры, а также характерные параметры для 42 районов полярной и приполярной атмосферы на высотах 42–90 км и оценки ошибок определяемых величин (Yakovlev и др., 1991); (II) характеристики тонких регулярных слоев в атмосфере Венеры (Gubenko, Andreev, 2003; Gubenko и др., 2008а); (III) вертикальные профили содержания паров серной кислоты и поглощения радиоволн диапазона 5 см в атмосфере планеты (Gubenko и др., 2001); (IV) высотные и широтные зависимости зональной скорости ветра в атмосфере Венеры (Губенко и др., 1992; Ваганов и др., 1992; Gubenko, Kirillovich, 2018а); (V) вертикальные профили температуры, давления и градиентов температуры для средних широт планеты на высотах 40–90 км (Матюгов и др., 1994).

Мы используем некоторые из полученных нами ранее результатов и измерения интенсивности радиозатменных сигналов (длина волны $\lambda = 32$ см) со спутников Венера-15 и -16 для исследования мелкомасштабных внутренних волн в северной полярной атмосфере Венеры на высотах более 61.5 км. Целью работы является анализ измерений интенсивности радиоволн, проведенных в период с 16 по 31 октября 1983 г., для изучения внутренних волн в полярной атмосфере планеты, который базируется на модели радиационного затухания флуктуаций интенсивности с увеличением высоты. Отсчет высоты производится от уровня поверхности Венеры с радиусом 6051 км.

РАДИАЦИОННОЕ ЗАТУХАНИЕ ВНУТРЕННИХ АТМОСФЕРНЫХ ВОЛН: АНАЛИЗ РАДИОЗАТМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ СИГНАЛОВ СО СПУТНИКОВ ВЕНЕРА-15 И -16

Наблюдения интенсивности радиозатменных сигналов обеспечивают важную информацию о мелкомасштабной структуре атмосферы планеты. Во многих аспектах наш метод определения характеристик атмосферных волн аналогичен методу, предложенному ранее в работах Hinson, Jenkins (1995) и Tellmann и др. (2012). Авторы указанных работ полагали, что радиационное затухание волновых возмущений с высотой в радиозатменных экспериментах является основным процессом, вносящим вклад в диссипацию энергии ВГВ с вертикальной длиной волны < 4 км. На рис. 1 представлены примеры измерений нормированной интенсивности (I) сигнала с $\lambda = 32$ см для трех анализируемых радиозатменных сеансов Венера-15 и -16. Величина I определяется как отношение значений интенсивности сигнала, измеряемых в данный момент и в свободном пространстве до входа в атмосферу планеты. Нормированная интенсивность I является безразмерной величиной, и она остается примерно постоянной (~ 1.0) до тех пор, пока не начинается просвечивание нейтральной атмосферы (относительное время ~ 0 с, высота ~ 100 км). На рис. 1 хорошо виден отклик радиоволн при прохождении дневной ионосферы вблизи терминатора (зенитный угол Солнца равен $Z_{\odot} = 85.8^{\circ}$ для сеанса 24 и $Z_{\odot} = 87.2^{\circ}$ для сеанса 30) и ночной ионосферы вблизи терминатора ($Z_{\odot} = 95.4^{\circ}$ для сеанса 42). Так как минимумы интенсивности радиозатменного сигнала соответствуют локальным максимумам электронной концентрации (Gubenko и др., 2018; Gubenko, Kirillovich, 2019), то из представленных на рис. 1 данных следует, что структура ионосферы Венеры вблизи терминатора на дневной стороне является двухслойной, а на ночной стороне – однослойной. Учитывая, что вертикальная скорость опускания радиолуча здесь равна ~ 4.3 км/с (Gubenko и др., 2008а), можно найти, что ионосферные максимумы вблизи терминатора на дневной и ночной стороне планеты расположены на высотах ~ 150 км.

Параметры радиозатменных сеансов Венера-15 и -16, которые были проанализированы нами для мониторинга активности внутренних волн и определения их характеристик в северной полярной атмосфере Венеры, представлены в табл. 1. Здесь указаны: номер и время проведения сеанса измерений, аппарат, широта и долгота зондируемого района, зенитный угол Солнца (Z_{\odot}), высота тропопаузы (h_t) и высота минимума температуры (h_{\min}) для района измерений. Эти характеристики были найдены при обработке данных с целью

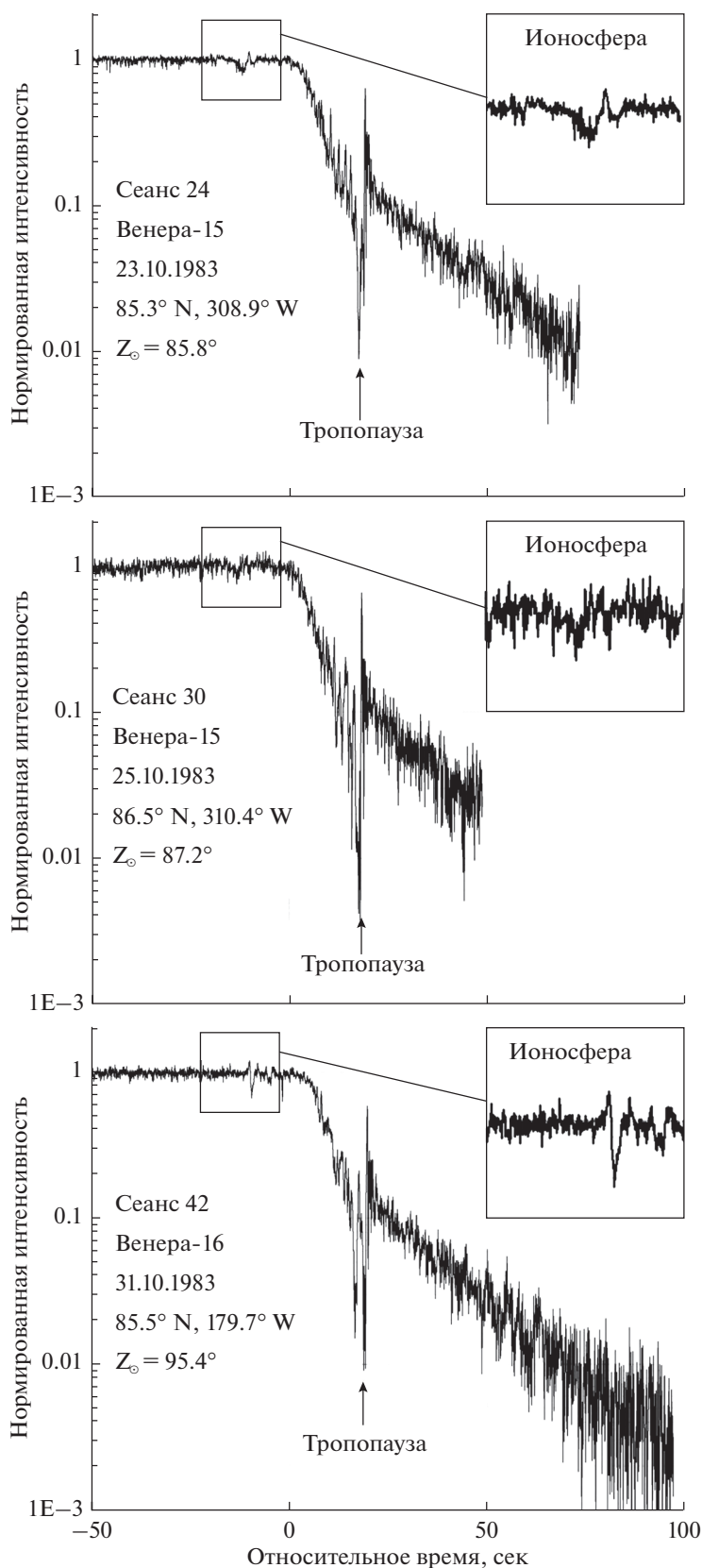


Рис. 1. Зависимости интенсивности сигнала с $\lambda = 32$ см от времени в северной полярной атмосфере Венеры для радиозатменных сеансов 24, 30 и 42 (заходы) спутников Венера-15 и -16. Относительное время $t = 0$ с соответствует высоте перигея луча ~ 100 км над поверхностью планеты с радиусом 6051 км. Тропопаузы зондируемых районов атмосферы расположены на высотах: ~ 57.6 км (сеансы 24, 30) и ~ 59.0 км (сеанс 42) (Yakovlev и др., 1991).

Таблица 1. Параметры радиозатменных сеансов, в которых определялись характеристики внутренних волн в северной полярной атмосфере Венеры

Сеанс 10	Сеанс 12	Сеанс 20	Сеанс 24	Сеанс 30	Сеанс 32	Сеанс 42
Венера-16	Венера-16	Венера-15	Венера-15	Венера-15	Венера-16	Венера-16
16.10.1983	17.10.1983	21.10.1983	23.10.1983	25.10.1983	25.10.1983	31.10.1983
83.9° N, 290.0° W	83.1° N, 296.3° W	83.8° N, 306.9° W	85.3° N, 308.9° W	86.5° N, 310.4° W	88.5° N, 225.3° W	85.5° N, 179.7° W
$Z_{\odot} = 83.9^{\circ}$	$Z_{\odot} = 83.2^{\circ}$	$Z_{\odot} = 84.1^{\circ}$	$Z_{\odot} = 85.8^{\circ}$	$Z_{\odot} = 87.2^{\circ}$	$Z_{\odot} = 90.9^{\circ}$	$Z_{\odot} = 95.4^{\circ}$
$h_t = 57.5$ км	$h_t = 57.6$ км	$h_t = 57.3$ км	$h_t = 57.6$ км	$h_t = 57.6$ км	$h_t = 57.4$ км	$h_t = 59.0$ км
$h_{\min} = 58.7$ км	$h_{\min} = 58.7$ км	$h_{\min} = 57.9$ км	$h_{\min} = 58.4$ км	$h_{\min} = 58.4$ км	$h_{\min} = 58.9$ км	$h_{\min} = 59.0$ км

восстановления атмосферных профилей плотности, давления и температуры (Yakovlev и др., 1991).

Радиозатменные измерения, анализируемые в этой работе, проводились во время практически вертикальных заходов спутников Венера-15 и -16 за планету (Yakovlev и др., 1991; Gubenko и др., 2008a). Геометрия эксперимента радиопросвечивания была такова, что точка перигея лучевой траектории почти не смещалась по горизонтали за время сеанса измерений (~2 мин). Радиальная скорость V_n указанных спутников, перпендикулярная траектории радиолуча, была равна $V_n = 4.3$ км/с. Вертикальная скорость опускания радиолуча в атмосфере V_r определяется значением скорости V_n и величиной среднего рефракционного ослабления сигнала $\langle X \rangle$ с помощью соотношения $V_r = V_n \langle X \rangle$ (Gubenko и др., 2008a). Вертикальная скорость радиолуча при входе его в атмосферу (высота ~100 км, $\langle X \rangle \approx 1.0$) была равна ~4.3 км/с. При прохождении лучом более низких атмосферных уровней (~62 км, $\langle X \rangle \approx 0.1$), расположенных вблизи тропоспаузы, ее величина составляла ~0.43 км/с. Указанные значения скорости опускания луча во много раз превышают средние скорости зондируемых структур в атмосфере. Обычно, продолжительность радиозатменного сеанса составляет около 2 мин, поэтому спутниковая радиоголограмма содержит практически мгновенное (замороженное) изображение состояния окружающей среды в зондируемом районе атмосферы Венеры. Вариации частоты радиозатменного сигнала ($\lambda = 32$ см) и известные баллистические данные спутников Венера-15 и -16 были нами ранее использованы для определения зависимостей угла рефракции от прицельного параметра лучевой траектории (Yakovlev и др., 1991). Затем, на основе применения обратного преобразования Абея к полученным вертикальным профилям угла рефракции, определялись высотные зависимости коэффициента преломления в нейтральной атмосфере планеты. Учет химического состава атмосферы (96.5% CO₂

и 3.5% N₂) дал возможность найти вертикальные профили плотности, а с помощью уравнений гидростатического равновесия и газового состояния были восстановлены атмосферные профили давления и температуры (Yakovlev и др., 1991).

Данные об интенсивности радиозатменного сигнала удобно представлять в виде функции высоты лучевой траектории (высоты перигея луча). Здесь термин “лучевая траектория” обозначает траекторию фотона, движущегося от спутника к приемной антенне на Земле. Высота перигея луча как функция времени определялась естественным образом в процессе обработки и анализа измерений при получении атмосферных профилей (Yakovlev и др., 1991). Мы применили фильтр высокой частоты к данным об интенсивности радиозатменного сигнала для отделения высокочастотных флуктуаций от медленных фоновых вариаций интенсивности. Этот фильтр действует следующим образом:

$$i(h) \equiv \frac{I(h) - \langle I(h) \rangle}{\langle I(h) \rangle}. \quad (1)$$

Здесь $I(h)$ – измеряемая интенсивность сигнала, h – высота перигея луча. Угловые скобки обозначают локальное среднее, вычисленное на основе аппроксимации полиномом второй степени значений $I(h)$ на интервале 4 км, центр которого находится в точке с высотой h . Так как интенсивность сигнала $I(h)$ является положительно определяемой величиной, то нормированные флуктуации интенсивности $i(h)$ удовлетворяет неравенству $i(h) > -1$. В экспериментах часто наблюдаются мощные всплески интенсивности радиозатменного сигнала, вследствие чего величина $i(h)$ может существенно превосходить значение +1. По этой причине, когда значения модуля $|i(h)|$ приближаются к единице, наблюдаемая картина флуктуаций становится асимметричной относительно нуля (Hinson, Jenkins, 1995).

При выполнении условия ($|i(h)| \ll 1$) слабого рассеяния, флуктуации интенсивности сигнала

$i(h)$ пропорциональны флуктуациям атмосферной плотности $\rho'(h)$, т.е. $i(h) \propto \rho'(h)$ (Hinson, Tyler, 1983). Согласно волновой теории имеем (Hinson, Jenkins, 1995):

$$\rho' \propto G_p(h) \exp \left[j \int^h m(h) dh \right], \quad (2)$$

где $m = 2\pi/\lambda_z$ – вертикальное волновое число, λ_z – вертикальная длина волны, j – мнимая единица, а амплитудная функция G_p определяется с помощью формулы (3), в которой: ρ_b и N_b – невозмущенные (фоновые) значения атмосферной плотности и частоты Брента–Вяйсяля, соответственно; L_r – вертикальный масштаб длины радиационного затухания (демпинга):

$$G_p(h) \equiv (\rho_b N_b^3)^{1/2} \exp \left[- \int^h \frac{dh}{L_r(h)} \right]. \quad (3)$$

Из соотношения (3) следует, что в отсутствие диссипации энергии, амплитудные функции флуктуаций атмосферной плотности $\rho'(h)$ и интенсивности сигнала $i(h)$ будут изменяться с высотой пропорционально величине $\sqrt{\rho_b(h)}$, но с дополнительной модуляцией вследствие вертикальных вариаций $\sqrt{N_b^3(h)}$. При наличии радиационного демпинга в атмосфере, изменение амплитуды флуктуаций интенсивности с высотой зависит также от вертикального масштаба радиационного затухания L_r , который связан со временем радиационной релаксации τ_r простым выражением (Hinson, Jenkins, 1995):

$$L_r \equiv 2 \left| \frac{\omega}{m} \right| \tau_r, \quad (4)$$

где ω – собственная частота внутренней волны, измеряемая в системе отсчета, движущейся вместе с невозмущенным потоком (Gubenko и др., 2008b; 2011; 2012; 2015), τ_r – время радиационной релаксации в атмосфере Венеры (Fels, 1982). Собственная частота ω и частота σ внутренней волны, найденная в системе отсчета земного наблюдателя, связаны известным соотношением, определяющим доплеровское смещение между ними (Gubenko и др., 2018; Gubenko, Kirillovich, 2018b):

$$\sigma = \omega + \mathbf{k}_h \mathbf{V}_b = \omega + |k_h| |V_b| \cos \angle \mathbf{k}_h, \mathbf{V}_b, \quad (5)$$

где $\mathbf{k}_h \mathbf{V}_b$ – скалярное произведение горизонтального волнового вектора \mathbf{k}_h и вектора невозмущенной скорости ветра \mathbf{V}_b , $|k_h| = 2\pi/\lambda_h$ – модуль вектора \mathbf{k}_h , λ_h – горизонтальная длина внутренней волны, $|V_b|$ – модуль вектора \mathbf{V}_b .

На рис. 2 представлены высотные зависимости времени радиационной релаксации $\tau_r(h)$ в атмосфере Венеры для вертикальных длин волн 5 км (штриховая), 2.5 км (пунктир) и 1 км (сплошная), найденные путем экстраполяции результатов мо-

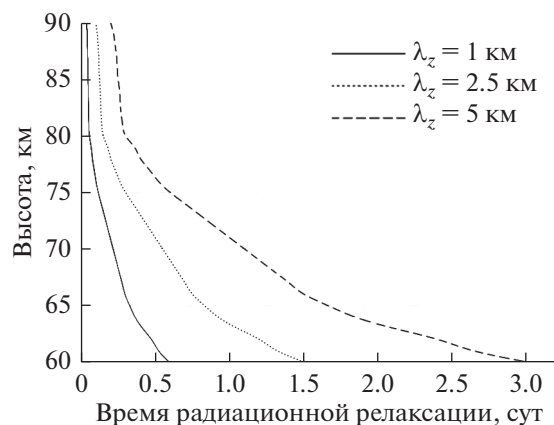


Рис. 2. Высотные профили времени радиационной релаксации $\tau_r(h)$ в атмосфере Венеры для вертикальных длин волн 5 км (штриховая линия), 2.5 км (пунктир) и 1 км (сплошная), найденные путем экстраполяции результатов модели Crisp (1989) для вертикальной длины волны $\lambda_z = 7$ км, в предположении, что τ_r пропорционально λ_z .

дели Crisp (1989) для $\lambda_z = 7$ км, в предположении, что время затухания τ_r пропорционально вертикальной длине волны λ_z . Зависимость $\tau_r(h)$ для вертикальной длины волны $\lambda_z = 1$ км была определена нами с целью анализа флуктуаций интенсивности сигнала $i(h)$, а профили $\tau_r(h)$ для длин волн 5 и 2.5 км, полученные ранее в работе Ando и др. (2015, Fig. 7), приведены на рис. 2 для сравнения.

На рис. 3–5 представлены примеры профилей высокочастотных флуктуаций (сцинтилляций) интенсивности сигнала $i(h)$, наблюдаемых в радиозатменных сеансах 24, 30 и 42 (зубчатые линии). Высота лучевой траектории отсчитывается здесь от уровня средней поверхности планеты с радиусом 6051 км. Наиболее высокочастотные сцинтилляции, обусловленные мелкомасштабными неоднородностями показателя преломления (плотности) в атмосфере Венеры, представляют собой дифракционные эффекты. Как следует из результатов работы Gubenko и др. (2008a), дифракционную картину в полярной атмосфере Венеры на высотах вблизи тропопаузы формируют неоднородности с вертикальными размерами меньше радиуса первой зоны Френеля (~0.32 км). Зарегистрированные в радиозатменных экспериментах флуктуации интенсивности сигнала, вертикальный размер которых превышает френелевский радиус, не связаны с дифракцией и они могут быть обусловлены влиянием регулярных тонких слоев или внутренних атмосферных волн (Gubenko и др., 2008a). В отличие от аналоговых измерений частоты сигнала, которая определялась 1 раз в секунду, радиозатменные измерения интенсивности проводились с достаточно высокой частотой.

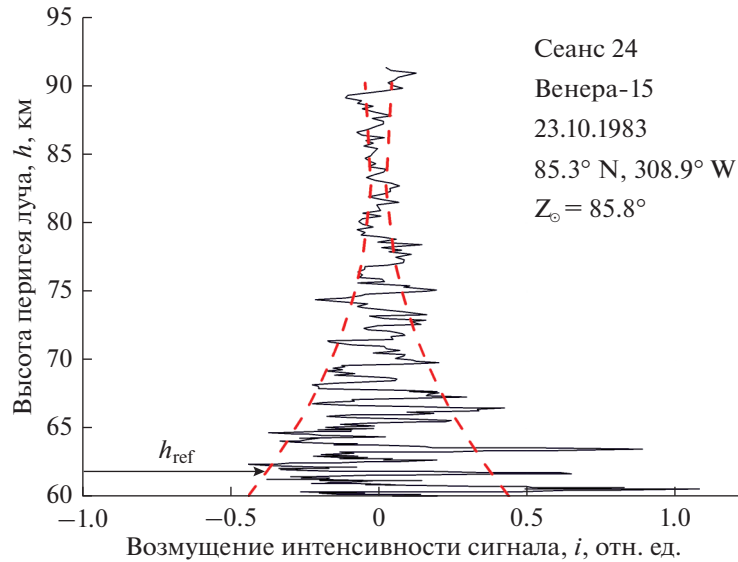


Рис. 3. Нормированные флуктуации интенсивности сигнала $i(h)$, наблюдаемые в радиозатменном сеансе 24 измерений спутника Венера-15 (зубчатая линия). Гладкая штриховая линия показывает, как амплитудная функция $G_p(h)$ изменяется с высотой согласно волновой теории (включая эффект радиационного затухания). Вертикальный масштаб длины L_r радиационного затухания в атмосфере Венеры равен $L_r = 8700$ м ($h_{\text{ref}} = 61.8$ км) для сеанса 24.

той выборки ~ 19 Гц. В этом случае вертикальное разрешение δh данных об интенсивности радиозатменного сигнала на уровне тропопаузы в атмосфере Венеры определяется вертикальным размером зоны (радиуса) Френеля. Учитывая рефракционное ослабление сигнала, получаем следующую оценку вертикального разрешения для анализируемых данных об интенсивности: $\delta h = r_f \langle X \rangle^{1/2} = (\lambda L \langle X \rangle)^{1/2} \approx 0.32$ км (Gubenko и др., 2008a). Здесь, $r_f = (\lambda L)^{1/2} \approx 1$ км – радиус первой зоны Френеля в свободном пространстве вне атмосферы, $\lambda = 0.32$ м – длина волны сигнала, $L \approx 3470$ км – расстояние от спутника до лимба планеты, $\langle X \rangle = \langle I(h) \rangle \approx 0.1$ – локальное среднее значение рефракционного ослабления (интенсивности) радиозатменного сигнала вблизи уровня тропопаузы в атмосфере Венеры. Столь высокого вертикального разрешения удалось достигнуть из-за достаточно высокой частоты выборки радиозатменных измерений интенсивности радиоволн, а также благодаря значительному сжатию френелевского объема луча в вертикальном направлении за счет эффекта рефракционного ослабления интенсивности сигнала.

Способ определения доминантного вертикального масштаба λ_z подробно описан в работе (Gubenko и др., 2008a), и его суть состоит в следующем. На интервале высот от ~ 61.5 до ~ 70.0 км, с помощью быстрого преобразования Фурье, находились спектры мощности флуктуаций интенсивности сигнала для анализируемых сеансов, и определялся максимум спектральной простран-

ственной частоты. Установлено, что на высотах более ~ 61.5 км, где эффекты радиационного затухания в атмосфере становятся заметными, доминирующий вертикальный размер флуктуаций интенсивности λ_z составляет ~ 1 км.

Поскольку высотная корреляция флуктуаций, регистрируемых в разных сеансах измерений (близких по месту и времени проведения), здесь отсутствует, то эти флуктуации, вероятно, обусловлены мелкомасштабными ВГВ, а не регулярными слоями в атмосфере (Gubenko и др., 2008a). Гладкие штриховые линии на рис. 3–5 показывают, как амплитудные функции $G_p(h)$ изменяется с высотой в сеансах 24, 30 и 42 согласно волновой теории (включая эффект радиационного затухания). Для определения вертикального масштаба длины L_r радиационного затухания в анализируемом сеансе измерений, необходимо из профиля амплитудной функции $G_p(h)$ выделить “чистый” эффект, связанный с радиационным демпингом флуктуаций интенсивности в атмосфере. Полученные ранее результаты восстановления средних профилей плотности $\rho_b(h)$ и частоты Брента–Вайсяля $N_b(h)$ (Yakovlev и др., 1991) были использованы нами для вычисления корректирующей функции $k(h)$:

$$k(h) = \sqrt{\frac{\rho_b(h_{\text{ref}}) N_b^3(h_{\text{ref}})}{\rho_b(h) N_b^3(h)}}, \quad (6)$$

где h_{ref} – начальная высота отсчета на нижней границе сеанса измерений. Скорректированная амплитудная функция $G_p^*(h) = G_p(h)k(h)$ определяется

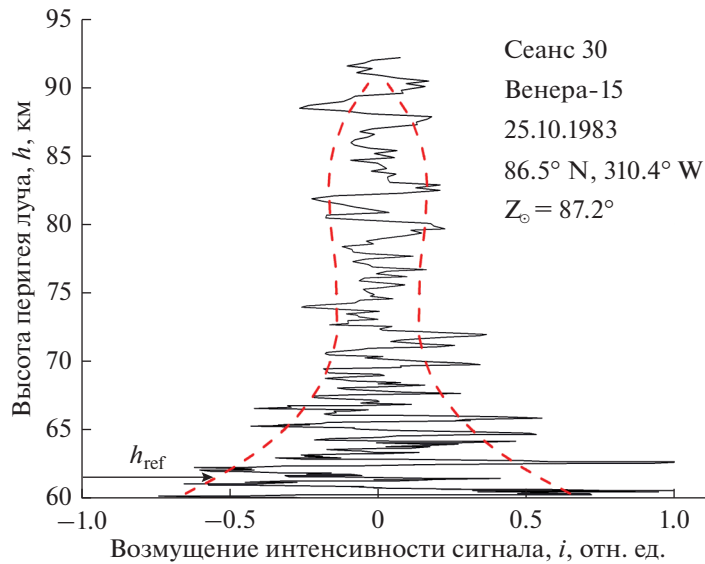


Рис. 4. Высотный профиль высокочастотных флуктуаций интенсивности сигнала $i(h)$, полученный в радиозатменном сеансе 30 измерений спутника Венера-15 (зубчатая линия). Вертикальный масштаб длины L_r радиационного затухания в атмосфере планеты составляет $L_r = 6500$ м ($h_{ref} = 61.5$ км) для сеанса 30.

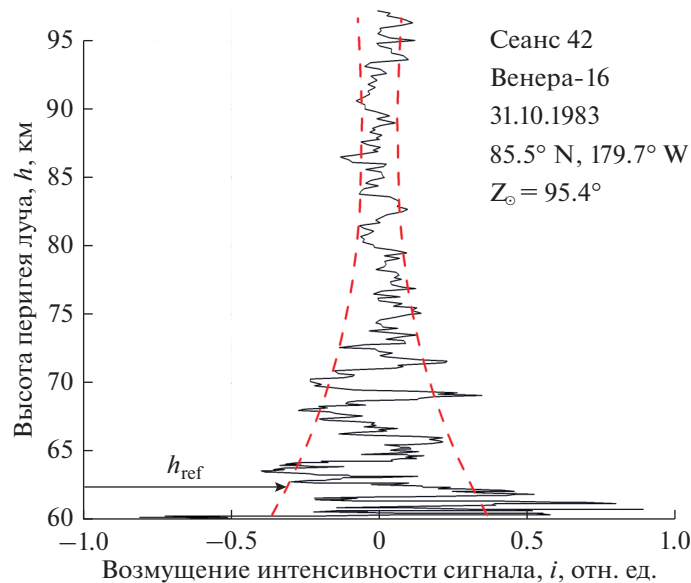


Рис. 5. Вертикальный профиль нормированных флуктуаций интенсивности сигнала $i(h)$, наблюдаемых в радиозатменном сеансе 42 измерений спутника Венера-16 (зубчатая линия). Величина L_r равна $L_r = 12000$ м ($h_{ref} = 62.3$ км) для сеанса 42.

только вертикальным масштабом длины L_r радиационного затухания флуктуаций в атмосфере и не зависит от изменений $\rho_b(h)$ и вариаций $N_b(h)$ с высотой. С учетом соотношений (3) и (6) нетрудно видеть, что выражение для скорректированной амплитудной функции $G_p^*(h)$ имеет следующий вид:

$$G_p^*(h) \equiv G_p(h)k(h) \equiv \left[\rho_b(h_{ref})N_b^3(h_{ref}) \right]^{1/2} \exp \left[-\int_{h_{ref}}^h \frac{dh}{L_r(h)} \right]. \quad (7)$$

Коррекция указанным способом амплитудных функций $G_p(h)$, показанных на рис. 3–5 гладкими штриховыми линиями, позволяет определить со-

Таблица 2. Характеристики ВГВ в атмосфере Венеры, полученные на основе анализа семи сеансов радиозатменных измерений интенсивности сигнала

Номер сеанса	h_{ref} , км	L_r , м	τ_r , с	$L_r/(2\tau_r)$, м/с	ω , рад/с	τ_i , час	N_b , рад/с	λ_z , м	λ_h , м	$ c_{ph}^{in} $, м/с	$ c_{pz}^{in} $, м/с
10	62.2	4.6×10^3	41.0×10^3	0.056	3.5×10^{-4}	5.0	2.0×10^{-2}	$\sim 10^3$	57×10^3	3.2	5.6×10^{-2}
12	63.0	5.2×10^3	36.7×10^3	0.071	4.5×10^{-4}	3.9	2.0×10^{-2}	$\sim 10^3$	44×10^3	3.2	7.1×10^{-2}
20	62.4	8.4×10^3	39.8×10^3	0.106	6.6×10^{-4}	2.6	2.0×10^{-2}	$\sim 10^3$	30×10^3	3.2	10.6×10^{-2}
24	61.8	8.7×10^3	43.2×10^3	0.101	6.3×10^{-4}	2.8	2.0×10^{-2}	$\sim 10^3$	32×10^3	3.2	10.1×10^{-2}
30	61.5	6.5×10^3	44.3×10^3	0.073	4.6×10^{-4}	3.8	2.0×10^{-2}	$\sim 10^3$	43×10^3	3.2	7.3×10^{-2}
32	62.3	12.2×10^3	40.1×10^3	0.152	9.5×10^{-4}	1.8	2.0×10^{-2}	$\sim 10^3$	21×10^3	3.2	15.2×10^{-2}
42	62.3	12.0×10^3	40.1×10^3	0.150	9.4×10^{-4}	1.9	2.0×10^{-2}	$\sim 10^3$	21×10^3	3.2	15×10^{-2}

ответствующие функции $G_p^*(h)$. Анализ амплитудного профиля $G_p^*(h)$ дает возможность найти длину интервала, на котором скорректированная амплитуда флуктуаций уменьшается в e раз. Указанная длина определяет вертикальный масштаб L_r для радиационного затухания флуктуаций интенсивности сигнала в атмосфере Венеры. Учитывая реальное вертикальное разрешение радиозатменных данных (~ 430 м) и найденные величины параметра L_r (см. табл. 2), можно заключить, что относительная погрешность восстановления L_r не превышает 10%. Таким образом, нами были найдены следующие значения вертикального масштаба L_r для анализируемых сеансов: $L_r = 8700$ м ($h_{\text{ref}} = 61.8$ км, рис. 3) для сеанса 24; $L_r = 6500$ м ($h_{\text{ref}} = 61.5$ км, рис. 4) для сеанса 30; $L_r = 12000$ м ($h_{\text{ref}} = 62.3$ км, рис. 5) для сеанса 42.

Ключевые характеристики внутренних гравитационных волн в полярной атмосфере Венеры, полученные из анализа семи радиозатменных сеансов измерений интенсивности сигнала ($\lambda = 32$ см) спутников Венера-15 и -16, приведены в табл. 2. Метод вычисления волновых параметров базируется на использовании формулы (4). Сначала, по результатам анализа вертикального профиля флуктуаций интенсивности сигнала, определяется вертикальный масштаб L_r радиационного затухания для данного сеанса измерений. На следующем этапе вычисляется время радиационной релаксации в атмосфере Венеры τ_r для анализируемых флуктуаций интенсивности с вертикальной длиной волны $\lambda_z = 1$ км, локализованных в заданном интервале высот (см. рис. 2). Затем, с помощью выражения (4), определяется собственная частота ω идентифицируемой внутренней волны. Далее, на основе дисперсионного уравнения $\omega/N_b = |k_h|/|m| = \lambda_z/\lambda_h$ для внутренних волн в интервале промежуточных собственных частот ($f^2 \ll \omega^2 \ll N_b^2$) и консервативной оценки невозмущенной частоты

Брента–Вайсяля $N_b = 0.02$ рад/с находится горизонтальная длина волны λ_h . На последнем этапе определяются собственные горизонтальная ($|c_{ph}^{in}| = \omega/|k_h|$) и вертикальная ($|c_{pz}^{in}| = \omega/|m|$) фазовые скорости, а также собственный период ($\tau_i = 2\pi/\omega$) для ВГВ (Gubenko и др., 2008b; 2011; 2012; 2015; 2018). При вычислении волновых характеристик, мы использовали величину времени радиационной релаксации τ_r , которая соответствует высоте h_{ref} на нижней границы измерений. Поэтому, приведенные в табл. 2 значения параметров ВГВ относятся к начальной высоте h_{ref} для анализируемого радиозатменного сеанса. Разработанная модель для радиационного затухания флуктуаций интенсивности с высотой в атмосфере Венеры предполагает, что собственные частоты для идентифицированных внутренних атмосферных волн в исследуемых сеансах изменяются от 3.5×10^{-4} до 9.5×10^{-4} рад/с, а отношение горизонтальной и вертикальной длин волн заключено в интервале от 57 до 21. Собственные периоды ВГВ составляют от 1.8 до 5 ч, а горизонтальные длины волн изменяются в пределах 21–57 км (см. табл. 2).

Ранее, Hinson и Jenkins (1995), анализируя сцинтилляции интенсивности сигнала в радиозатменном эксперименте Magellan, обнаружили, что измеряемый вертикальный профиль вариаций интенсивности согласуется с ВГВ, свободно распространяющимися в атмосфере без ветрового сдвига. Они нашли, что внутренние волны, которые обуславливают эти сцинтилляции интенсивности, имеют вертикальные длины волн ~ 1 км и горизонтальные фазовые скорости ~ 3 м/с. Сравнение между теорией и наблюдениями показало, что $\omega\tau_r \approx 70$ на высоте 65 км. Полученное значение $\omega\tau_r$ примерно в 5 раз больше, чем для внутренней волны ($\lambda_z \approx 2.5$ км), обнаруженной по результатам анализа температурных измерений миссии Magellan. Это предполагает, что собствен-

ная частота ω мелкомасштабных ВГВ также в несколько раз превышает частоту ($\omega = 2 \times 10^{-4}$ рад/с) волны, упомянутой выше. Отметим, что погрешность восстановления волновых характеристик в эксперименте Magellan составляет $\sim 50\%$ (Hinson, Jenkins, 1995).

Сравнение наших результатов с полученными в работе (Hinson, Jenkins, 1995) показывает, что ВГВ, обуславливающие сцинтилляции интенсивности сигнала в радиозатменных экспериментах спутников Magellan и Венера-15, -16, имеют примерно одинаковую горизонтальную фазовую скорость (3–3.2 м/с) и вертикальную длину волны (~ 1 км). По результатам анализа 7 сеансов измерений найдено, что величина $\omega\tau$, на высоте ~ 62 км заключена в интервале от ~ 14 до ~ 38 . При этом собственные частоты идентифицированных ВГВ изменялись от $\sim 3.5 \times 10^{-4}$ до $\sim 9.5 \times 10^{-4}$ рад/с, что, с учетом погрешностей восстановления волновых характеристик, согласуется с результатами, полученными в работе (Hinson, Jenkins, 1995).

По результатам радиозатменных измерений Венера-15 (сеанс 30), Gubenko и др. (2008a) провели сравнение тепловой и мелкомасштабной структур атмосферы Венеры на высотах от 58.0 до 77.0 км. На рис. 7 работы (Gubenko и др., 2008a) представлены вертикальные профили температуры (левая панель), вариаций температуры (средняя панель) и нормированных флуктуаций амплитуды сигнала (правая панель). Результаты восстановления температуры из односекундных данных о частоте сигнала (диапазон $\lambda = 32$ см) показаны точками. Вертикальное разрешение экспериментальных данных о температуре характеризуется величиной интервала выборки для профиля температуры (расстояние по вертикали между соседними точками) и является неоднородным на разных уровнях. Здесь оно определяется вертикальной скоростью опускания радиолуча и изменяется от величины ~ 0.4 км на высоте ~ 59 до ~ 1.1 км на ~ 65 км. Для корректного сравнения с данными о температуре, исходные амплитудные данные усреднялись методом скользящего среднего в односекундных интервалах. Профили температуры и амплитуды сигнала, показанные на рис. 7 работы (Gubenko и др., 2008a), демонстрируют на высотах от ~ 59 до ~ 65 км квазипериодические вариации с вертикальной длиной от ~ 3.1 до ~ 4.0 км. Амплитуда волнообразных вариаций температуры примерно постоянна в указанном высотном интервале и составляет ~ 1.5 К. Отметим, что вертикального разрешения анализируемых данных о температуре недостаточно для обнаружения влияния мелкомасштабной структуры атмосферы (ВГВ с вертикальной длиной волны ~ 1 км) на профили температуры в атмосфере Венеры.

Imamura и др. (2018) применили метод обращения полного спектра (Full Spectrum Inversion, FSI-метод) к радиозатменным данным миссий Venus Express и Akatsuki с целью восстановления мелкомасштабных структур в атмосфере Венеры на уровне облаков. Температурные профили, полученные FSI-методом, имеют вертикальное разрешение ~ 150 м, которое значительно лучше типичного разрешения ~ 400 – 700 м для геометрической оптики. Применение этого радиологического метода к радиозатменным данным позволяет разрешать тонкие атмосферные структуры (в том числе и в зонах многолучевости), которые не воспроизводятся при анализе измерений методами геометрической оптики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиозатменные измерения интенсивности сигнала ($\lambda = 32$ см) спутников Венера-15 и -16, проведенные в период с 16 по 31 октября 1983 г., используются для анализа активности внутренних волн в северной полярной атмосфере Венеры. Наблюдения интенсивности радиоволн обеспечивают важную информацию о мелкомасштабной структуре атмосферы. Сравнение радиозатменных измерений и результатов стандартной волновой теории показывает, что мелкомасштабные флуктуации интенсивности принимаемого сигнала обусловлены распространяющимися ВГВ с вертикальной длиной волны ~ 1 км на высотах более 61.5 км. Разработанная модель радиационного затухания флуктуаций интенсивности с высотой в атмосфере Венеры предполагает, что собственные частоты для идентифицированных внутренних атмосферных волн в исследуемых сеансах изменяются от 3.5×10^{-4} до 9.5×10^{-4} рад/с, а отношение горизонтальной и вертикальной длин волн заключено в интервале от 57 до 21. Собственные периоды ВГВ составляют от 1.8 до 5 ч, а горизонтальные длины волн изменяются в пределах от 21 до 57 км.

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ № 19-02-00083 А) и Программой № 12 Президиума РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ваганов И.Р., Яковлев О.И., Матюгов С.С., Губенко В.Н. Ветер в северной полярной атмосфере Венеры // Космич. исслед. 1992. Т. 30. № 5. С. 695–699.
- Губенко В.Н., Матюгов С.С., Яковлев О.И., Ваганов И.Р. Зональный ветер в южных полярных областях Венеры по данным радиопросвечивания // Космич. исслед. 1992. Т. 30. № 3. С. 390–395.
- Губенко В.Н., Кириллович И.А., Павельев А.Г., Андреев В.Е. Обнаружение насыщенных внутренних гравитационных волн и реконструкция их характеристик

- в атмосфере Марса // Известия ВУЗов. Физика. 2016а. Т. 59. № 12-2. С. 46–49.
- Gubenko V.N., Kirillovich I.A., Liou Y.-A., Pavelyev A.G.* Мониторинг активности внутренних гравитационных волн в атмосфере Арктики и Антарктики // Известия ВУЗов. Физика. 2016б. Т. 59. № 12-3. С. 80–85.
- Gubenko V.N., Pavelyev A.G., Andreev V.E., Kirillovich I.A., Salimzyanov R.P.* Радиозатменные исследования внутренних волн и слоистых структур в атмосферах Земли, Марса и Венеры // Современные достижения в плазменной гелиогеофизике / Ред. Зеленый Л.М., Петрукович А.А., Веселовский И.С. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2018. 688 с.
- Матюгов С.С., Губенко В.Н., Яковлев О.И., Ваганов И.Р.* Атмосфера Венеры в средних широтах по данным радиопросвечивания // Космич. исслед. 1994. Т. 32. № 3. С. 108–114.
- Ando H., Imamura T., Tsuda T., Tellmann S., Patzold M., Hausler B.* Vertical wavenumber spectra of gravity waves in the Venus atmosphere obtained from *Venus Express* radio occultation data: Evidence for saturation // *J. Atmos. Sci.* 2015. V. 72. P. 2318–2329. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0315.1>
- Crisp D.* Radiative forcing of the Venus mesosphere. II. Thermal fluxes, cooling rates, and radiative equilibrium temperatures // *Icarus.* 1989. V. 77. P. 391–413.
- Fels S.B.* A parameterization of scale-dependent radiative damping grace in the middle atmosphere // *J. Atmos. Sci.* 1982. V. 39. P. 1141–1152.
- Gubenko V.N., Yakovlev O.I., Matyugov S.S.* Radio occultation measurements of the radio wave absorption and the sulfuric acid vapor content in the atmosphere of Venus // *Cosmic Res.* 2001. V. 39. № 5. P. 439–445. <https://doi.org/10.1023/A:1012336911928>
- Gubenko V.N., Andreev V.E.* Radio wave fluctuations and layered structure of the upper region of Venusian clouds from radio occultation data // *Cosmic Res.* 2003. V. 41. № 2. P. 135–140. <https://doi.org/10.1023/A:1023378829327>
- Gubenko V.N., Andreev V.E., Pavelyev A.G.* Detection of layering in the upper cloud layer of Venus northern polar atmosphere observed from radio occultation data // *J. Geophys. Res.* 2008a. V. 113. № E03001. <https://doi.org/10.1029/2007JE002940>
- Gubenko V.N., Pavelyev A.G., Andreev V.E.* Determination of the intrinsic frequency and other wave parameters from a single vertical temperature or density profile measurement // *J. Geophys. Res.* 2008b. V. 113. № D08109. <https://doi.org/10.1029/2007JD008920>
- Gubenko V.N., Pavelyev A.G., Salimzyanov R.R., Pavelyev A.A.* Reconstruction of internal gravity wave parameters from radio occultation retrievals of vertical temperature profiles in the Earth's atmosphere // *Atmos. Meas. Tech.* 2011. V. 4. № 10. P. 2153–2162. <https://doi.org/10.5194/amt-4-2153-2011>
- Gubenko V.N., Pavelyev A.G., Salimzyanov R.R., Andreev V.E.* A method for determination of internal gravity wave parameters from a vertical temperature or density profile measurement in the Earth's atmosphere // *Cosmic Res.* 2012. V. 50. № 1. P. 21–31. <https://doi.org/10.1134/S0010952512010029>
- Gubenko V.N., Kirillovich I.A., Pavelyev A.G.* Characteristics of internal waves in the Martian atmosphere obtained on the basis of an analysis of vertical temperature profiles of the Mars Global Surveyor mission // *Cosmic Res.* 2015. V. 53. № 2. P. 133–142. <https://doi.org/10.1134/S0010952515020021>
- Gubenko V.N., Pavelyev A.G., Kirillovich I.A., Liou Y.-A.* Case study of inclined sporadic E layers in the Earth's ionosphere observed by CHAMP/GPS radio occultations: coupling between the tilted plasma layers and internal waves // *Adv. Space Res.* 2018. V. 61. № 7. P. 1702–1716. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.001>
- Gubenko V.N., Kirillovich I.A.* The study of zonal circulation of Venus's atmosphere by data analysis of radio occultation measurements made by Venera-15 and -16 satellites // *Cosmic Res.* 2018a. V. 56. № 6. P. 471–479. <https://doi.org/10.1134/S0010952518060047>
- Gubenko V.N., Kirillovich I.A.* Diagnostics of internal atmospheric wave saturation and determination of their characteristics in Earth's stratosphere from radiosonde measurements // *Sol.-Terr. Phys.* 2018b. V. 4. № 2. P. 41–48. <https://doi.org/10.12737/stp-42201807>
- Gubenko V.N., Kirillovich I.A.* Modulation of sporadic E layers by small-scale atmospheric waves in Earth's high-latitude ionosphere // *Sol.-Terr. Phys.* 2019. V. 5. № 3. P. 98–108. <https://doi.org/10.12737/stp-53201912>
- Hinson D.P., Tyler G.L.* Internal gravity waves in Titan's atmosphere observed by Voyager radio occultation // *Icarus.* 1983. V. 54. P. 337–352.
- Hinson D.P., Jenkins J.M.* Magellan radio occultation measurements of atmospheric waves on Venus // *Icarus.* 1995. V. 114. P. 310–327.
- Imamura T., Miyamoto M., Ando H., Hausler B., Patzold M., Tellmann S., Tsuda T., Aoyama Y., Murata Y., Takeuchi H., Yamazaki A., Toda T., Tomiki A.* Fine vertical structures at the cloud heights of Venus revealed by radio holographic analysis of Venus Express and Akatsuki radio occultation data // *J. Geophys. Res.* 2018. V. 123. P. 2151–2161.
- Tellmann S., Hausler B., Hinson D.P., Tyler G.L., Andert T.P., Bird M.K., Imamura T., Patzold M., Remus S.* Small-scale temperature fluctuations seen by the VeRa radio science experiment on Venus Express // *Icarus.* 2012. V. 221. P. 471–480. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.08.023>
- Yakovlev O.I., Matyugov S.S., Gubenko V.N.* Venera-15 and -16 middle atmosphere profiles from radio occultations: Polar and near-polar atmosphere of Venus // *Icarus.* 1991. V. 94. № 2. P. 493–510. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(91\)90243-M](https://doi.org/10.1016/0019-1035(91)90243-M)