

Радиозондовые исследования внутренних волн в южной приэкваториальной атмосфере Земли

В.Н. Губенко¹, И.А. Кириллович¹, В.Е. Андреев¹

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Московская область, 141190 Фрязино, пл. Введенского, дом 1, E-mail: gubenko@fireras.su, vingubenko@gmail.com.

Радиозондовые данные измерений скорости ветра, выполненные 28 февраля и 15 ноября 2007 года, были использованы для идентификации внутренних гравитационных волн (ВГВ) и определения их характеристик в нижней стратосфере Земли над Кокосовыми островами (координаты: 12.04°S; 96.90°E). Анализ годографа скорости ветра показал, что наблюдаемые флуктуации индуцированы волнами, энергия которых распространяется вверх. Используя результаты анализа годографа скорости ветра, дисперсионное уравнение и поляризационные соотношения, мы определили величины ключевых характеристик ВГВ, таких как собственная частота, амплитуды вертикальных и горизонтальных возмущений скорости ветра, собственная вертикальная и горизонтальная фазовые (и групповые) скорости, кинетическая и потенциальная энергия волн. Предложен оригинальный метод определения волновой частоты в системе отсчета земного наблюдателя и азимутального направления распространения ВГВ в атмосфере. Приложение разработанного метода к радиозондовым измерениям, выполненным 28 февраля 2007 года, дало возможность установить, что волновая частота в системе земного наблюдателя равна $14.0 \cdot 10^{-4}$ рад/с и она соответствует периоду волны $T=1.25$ часа. Ключевые слова: радиозондовые измерения скорости ветра, стратосфера Земли, внутренние гравитационные волны, годограф скорости ветра.

Radiosonde studies of internal waves in the southern near-equatorial atmosphere of the Earth

V.N. Gubenko¹, I.A. Kirillovich¹, V.E. Andreev¹

¹Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS (Fryazino branch)

Radiosonde measurement data of the wind speed, conducted 28 February and 15 November 2007, have been used for the internal gravity waves (IGWs) identification and determination of their parameters in the Earth's lower stratosphere over Cocos Islands (coordinates: 12.04°S; 96.90°E). A wind speed hodograph analysis has shown that observed fluctuations are wave-induced while the wave energy propagates upwards. Using the results of wind speed hodograph analysis, dispersion equation and polarization relationships, we have obtained the magnitudes of key IGW characteristics such as the intrinsic frequency, amplitudes of vertical and horizontal perturbations of the wind velocity, vertical and horizontal wavelengths, intrinsic vertical and horizontal phase (and group) speeds, wave kinetic and potential energy. An original method for the determination of the ground-based wave frequency and azimuth direction of the IGW propagation in the atmosphere has been proposed. An application of the developed method to the radiosonde measurements, conducted 28 February 2007, has given the possibility to establish that the ground-based wave frequency is equal to $14.0 \cdot 10^{-4}$ rad/s and it corresponds to the wave period $T=1.25$ hours. Keywords: radiosonde measurements of wind speed, Earth's stratosphere; internal gravity waves, wind speed hodograph.

Введение

Важной задачей физики атмосферы является изучение волновых процессов, которые определяют атмосферную динамику на всех высотах. Внутренние гравитационные волны (ВГВ) являются характерной особенностью всех устойчиво стратифицированных атмосфер планет. Основные источники внутренних волн находятся в нижней атмосфере Земли, где генерировать ВГВ могут тепловые контрасты вблизи поверхности, топография, сдвиговая неустойчивость ветра, конвекция и фронтальные процессы. Эти

волны могут распространяться вверх и оказывать существенное воздействие на динамику и тепловое состояние средней и верхней атмосферы. Внутренние волны всегда присутствуют в нижней и верхней атмосфере, при этом значимость ВГВ для атмосферной динамики различна на разных высотах. Поскольку волновая энергия пропорциональна плотности воздуха, то амплитуда консервативно распространяющейся гармонической волны тем больше, чем меньше атмосферная плотность. В тропосфере Земли, амплитуды регистрируемых ВГВ относительно небольшие, однако, их важность для динамики возрастает с высотой и влиянием внутренних волн в средней и верхней атмосфере уже нельзя пренебрегать. Одним из наиболее широко распространенных методов исследования квазигармонических ВГВ, наблюдаемых в атмосфере планеты различными наземными и космическими средствами, является метод анализа годографа скорости ветра [1–4].

В настоящее время, метод годографа скорости ветра является стандартным рабочим инструментом в метеорологии. Впервые он был применен для изучения инерционных осцилляций в океане [1], а также для исследования ВГВ в атмосфере Земли [2]. Идея метода годографа состоит в отслеживании движения вектора возмущений скорости с высотой. Согласно теории ВГВ, годограф скорости (траектория, которую описывает конец вектора волновых возмущений скорости ветра) имеет форму эллипса, большая ось которого параллельна направлению горизонтального распространения волны. При этом длины большой и малой полуосей эллипса поляризации являются амплитудами возмущений скорости вдоль горизонтальной составляющей волнового вектора и в поперечном направлении, соответственно. В том случае, когда вертикальный сдвиг фоновой (невозмущенной) скорости ветра незначителен, аксиальное отношение (R) длины малой оси указанного эллипса к длине его большой оси равно отношению (f/ω) инерционной частоты (параметра Кориолиса) f_k собственной частоте ω внутренней волны. Эллиптическая аппроксимация годографа скорости ветра дает возможность не только найти собственную частоту ω , но также определить направление горизонтальной компоненты групповой скорости ВГВ, которое параллельно большой оси эллипса поляризации [3, 4]. Следует отметить, что недостатком метода годографа является установление указанного направления с неопределенностью $\pm 180^\circ$. Поэтому, для однозначного определения частоты волны в системе отсчета земного наблюдателя требуются дополнительные одновременные измерения температуры или плотности в атмосфере.

Целью данной работы является: I) развитие метода годографа скорости ветра для реконструкции характеристик ВГВ в системе отсчета земного наблюдателя и определения азимутального направления волны в атмосфере Земли на основе анализа радиозондовых измерений скорости ветра; II) апробация модернизированного метода анализа годографа скорости на данных зондов в стратосфере планеты над Кокосовыми островами, где были обнаружены внутренние волны.

Определение характеристик эллиптического годографа скорости ветра и анализ радиозондовых измерений в южной приэкваториальной атмосфере Земли

Параметры эллиптического волнового годографа в радиозондовых измерениях скорости ветра могут быть найдены с помощью следующих соотношений:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{\langle 2u'_x v'_y \rangle}{\langle u'^2_x \rangle - \langle v'^2_y \rangle} + \frac{\pi n}{2}, \quad (1)$$

$$a^2, b^2 = \langle u'^2_x \rangle + \langle v'^2_y \rangle \pm \left[\left(\langle u'^2_x \rangle - \langle v'^2_y \rangle \right)^2 + 4 \langle u'_x v'_y \rangle^2 \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где θ – азимутальный угол между горизонтальной осью X (W/E-направление, с запада на восток) и большой осью эллипса поляризации ВГВ (положительные значения угла соответствуют отсчету θ относительно оси X против часовой стрелки); n – произвольное целое число; величины a и b представляют длины большой и малой полу осей указанного эллипса; параметры u'_x и v'_y являются вариациями скорости ветра в зональном (W/E-направление) и меридиональном (S/N-направление, с юга на север) направлениях, соответственно. Угловые скобки означают усреднение соответствующей переменной по вертикальной длине волны. Выражения (1) и (2) были опубликованы ранее в работах [1, 2]. Однако, в обеих вышеуказанных статьях, формула (1) не содержит важного члена $nl/2$, что приводит к ошибочному ограничению области возможных значений угла θ диапазоном $[-\pi/4, \pi/4]$.

Регистрация радиозондовых измерений скорости ветра в атмосфере Земли проводилась с интервалами в 6 сек, что соответствует вертикальному разрешению данных ~ 30 м для средней скорости подъема аэростата ~ 5 м/с. При этом, точность измерения скорости равна ~ 1 м/с [3]. На рис. 1 показаны профили зональной (W/E-компонента) и меридиональной (S/N-компонента) составляющих скорости ветра (панели а и б) для выделенного нами интервала 19.0–20.5 км волновых проявлений, полученные из радиозондовых измерений 28 февраля 2007 года в стратосфере Земли над Кокосовыми островами. Координаты зондируемого района были следующими: широта – 12.04°S , долгота – 96.90°E . Точками обозначены фоновые (средние) профили, вычисленные на основе полиномиальной аппроксимации исходных данных методом наименьших квадратов (МНК) на выделенном интервале. На панели с рис. 1 представлены вертикальные профили вариаций S/N- и W/E-компонент скорости, которые определялись как разности исходных и средних профилей (панели а и б). По ним мы определили вертикальную длину волны $\lambda_z = 800$ м возмущений скорости ветра.

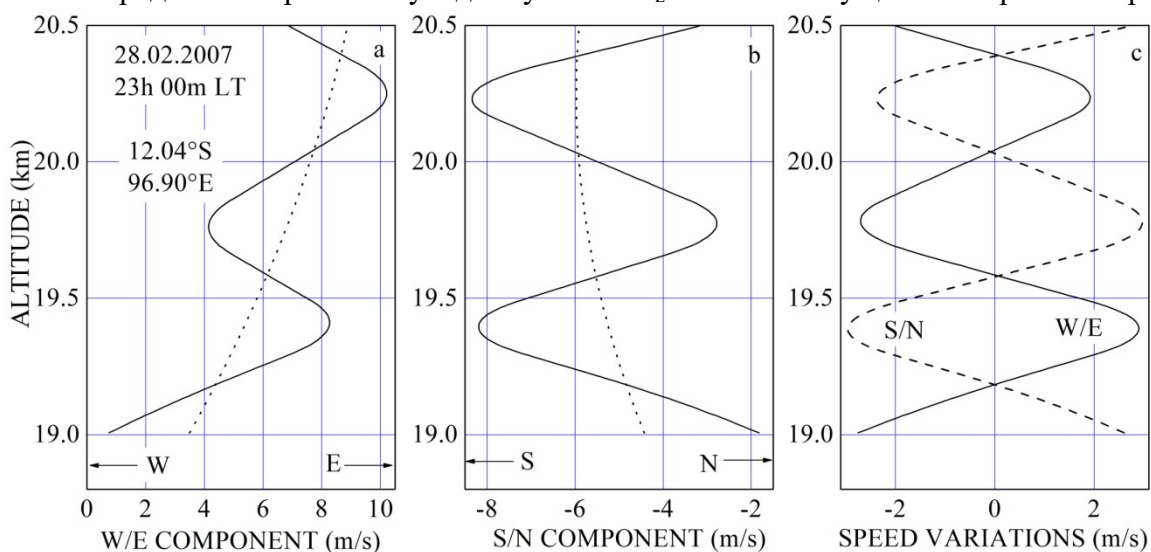


Рис. 1. Высотные профили зональной (W/E-компонента) и меридиональной (S/N-компонента) составляющих скорости ветра (панели а и б), полученные из радиозондовых измерений 28 февраля 2007 года в стратосфере Земли над Кокосовыми островами. Показаны координаты зондируемого района и локальное время (LT) проведения измерений. Пунктиром обозначены фоновые (средние) профили, вычисленные с помощью МНК-аппроксимации исходных данных полиномом 3-ей степени на интервале 19.0–20.5 км. Вертикальные профили вариаций компонент скорости (панель с) определялись как разности исходных и средних профилей.

Для построения годографа скорости ветра и определения характеристик ВГВ в сеансе радиозондовых измерений 28 февраля 2007 года, анализируемый диапазон высот был разделен на пять высотных интервалов. Каждый интервал имел длину около

800м(вертикальная длина волны) и был смещен по отношению к соседнему интервалу примерно на четверть длины волны λ_z . На рис. 2 представлены годографы горизонтальных вариаций скорости для двух высотных интервалов 19.17–20.05 км (левая панель) и 19.57–20.40 км (правая панель). Эллипсы поляризации, аппроксимирующие данные измерений (сплошная линия), показаны на панелях штриховыми линиями. Длины большой a и малой b полуосей этих эллипсов определяют амплитуды $|u'|$ и $|v'|$ горизонтальных возмущений скорости: $|u'|=3.84$ м/с, $|v'| = 0.11$ м/с (левая панель) и $|u'|=3.43$ м/с, $|v'| = 0.14$ м/с (правая панель). Для двух высотных интервалов были найдены значения азимутального угла: $\theta = 133.47^\circ$ (левая панель) и $\theta = 131.27^\circ$ (правая панель). Для анализируемых годографов на рис. 2 установлено, что конец вектора вариаций скорости вращается против часовой стрелки с увеличением высоты. Согласно теории внутренних атмосферных волн, это соответствует распространению фазы вниз и переносу волновой энергии вверх в Южном полушарии Земли. Далее, мы вычисляли значение параметра Кориолиса в пункте наблюдений и, зная аксиальное отношение R для рассматриваемого годографа скорости, находили отношение f/ω , собственную частоту ω и другие характеристики ВГВ. Для определения волновых параметров необходимо было иметь надежную оценку частоты Брента–Вяйсяля N_b (параметр стабильности атмосферной стратификации) для анализируемого высотного диапазона. Применяв выражение (5) работы [3] к среднему профилю температуры для данного сеанса, мы получили значение N_b ; $2.5 \cdot 10^{-2}$ рад/с. Подробное описание процедуры определения волновых параметров по результатам анализа годографа дано в работах [3, 4]. На рис. 3 показаны годографы горизонтальных вариаций скорости ветра в сеансе радиозондовых измерений 28 февраля 2007 года для двух других интервалов высот: 19.30–20.25 км (левая панель) и 19.70–20.50 км (правая панель).

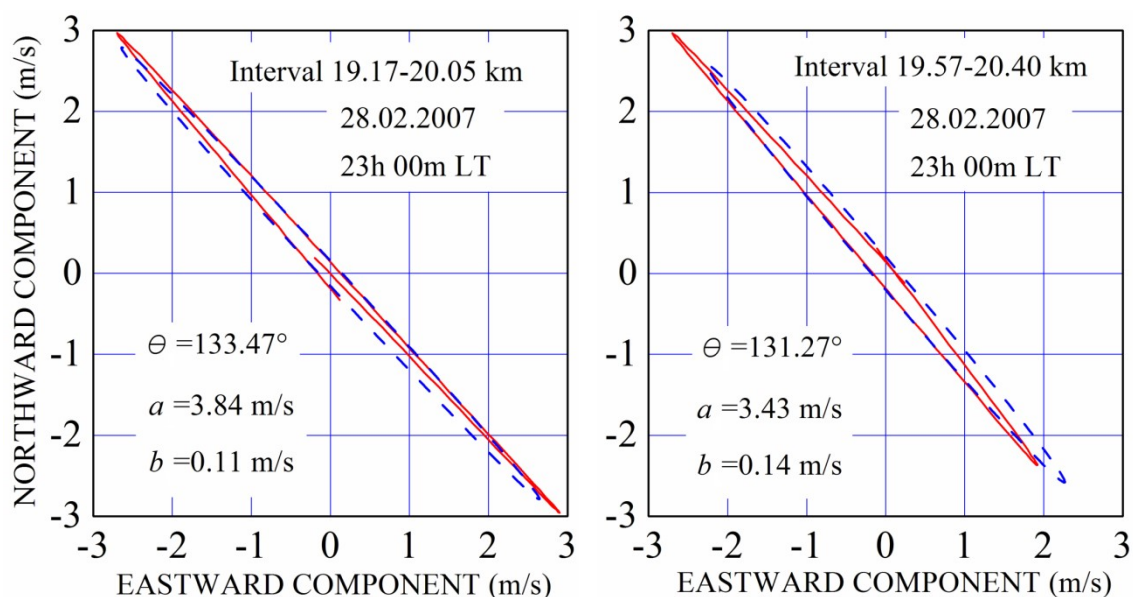


Рис. 2. Результаты анализа годографа для волновых возмущений скорости ветра, которые получены из радиозондовых измерений 28 февраля 2007 года в стратосфере Земли над Кокосовыми островами в двух высотных интервалах 19.17–20.05 км (левая панель) и 19.57–20.40 км (правая панель). Эллипс поляризации, аппроксимирующий данные измерений (сплошная линия), представлен штриховой линией. На панелях рис. 2 также указаны длины большой (a) и малой (b) полуосей эллипса и значение угла θ .

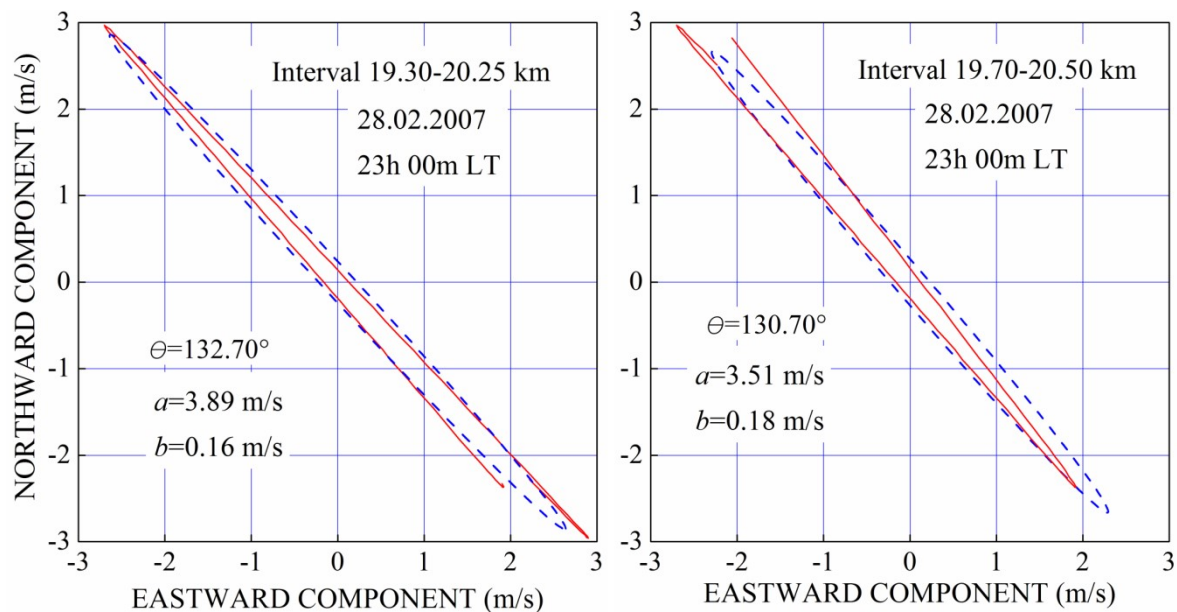


Рис. 3. Результаты анализа годографа для волновых возмущений скорости ветра, которые получены из радиозондовых измерений 28 февраля 2007 года в стратосфере планеты над Кокосовыми островами в двух высотных интервалах 19.30–20.25 км (левая панель) и 19.70–20.50 км (правая панель). Эллипс поляризации, аппроксимирующий данные измерений (сплошная линия), представлен штриховой линией. На панелях рис. 3 указаны длины большой (a) и малой (b) полуосей эллипса и значение угла θ .

Ориентация большой оси эллипса годографа определяет направление горизонтальной составляющей \mathbf{k}_h волнового вектора с неопределенностью $\pm 180^\circ$. Из годографов, представленных на рис. 2 и 3, видно, что это соответствует распространению фазы ВГВ в северо-западном (N/W) или юго-восточном (S/E) направлении. Соотношение для доплеровского смещения между собственной частотой ω и частотой волны σ в системе отсчета земного наблюдателя имеет вид [3]:

$$\omega = \sigma - \mathbf{k}_h \mathbf{V}_b = \sigma - |\mathbf{k}_h| |\mathbf{V}_b| \cos \alpha, \quad (3)$$

где \mathbf{V}_b – средняя скорость ветра, $\mathbf{k}_h \mathbf{V}_b$ – скалярное произведение векторов \mathbf{k}_h и \mathbf{V}_b , α – угол между вышеуказанными векторами.

По данным анализа годографа скорости ветра для пяти рассматриваемых интервалов мы получили среднее значение азимутального угла $\theta = 132.4^\circ$. Также были определены величина модуля средней скорости $|\mathbf{V}_b| = 8.6$ м/с, средние значения угла $\alpha = 7.2^\circ$ между вектором \mathbf{V}_b и S/E-направлением большой оси годографа и горизонтального волнового числа $|\mathbf{k}_h| = k_h = 2.62 \cdot 10^{-4}$ рад/м. Эти данные, а также другие волновые характеристики представлены в Таблице 1. Используя указанные значения, была найдена величина скалярного произведения $\mathbf{k}_h \mathbf{V}_b = 22.36 \cdot 10^{-4}$ рад/с. Проведенный анализ показывает, что северо-западное направление распространения фазы волны невозможно, поскольку в этом случае, согласно (3), величина модуля $|\omega|$ должна быть не меньше $\mathbf{k}_h \mathbf{V}_b = 22.36 \cdot 10^{-4}$ рад/с, а найденное среднее значение $|\omega|$ равно $\omega = 8.36 \cdot 10^{-4}$ рад/с (Таблица 1). Нами также определялись гипотетические частоты σ_2 и σ_3 для двух случаев распространения фазы ВГВ в юго-восточном направлении, когда горизонтальная фазовая скорость волны в системе земного наблюдателя соответственно меньше или больше абсолютной величины проекции средней скорости ветра на S/E-направление волнового распространения. Предполагалось, что свойства источника внутренних волн слабо зависят от времени и истинная частота σ в системе земного наблюдателя должна оставаться практически постоянной за время распространения ВГВ в анализируемом диапазоне высот 19.0–20.5 км.

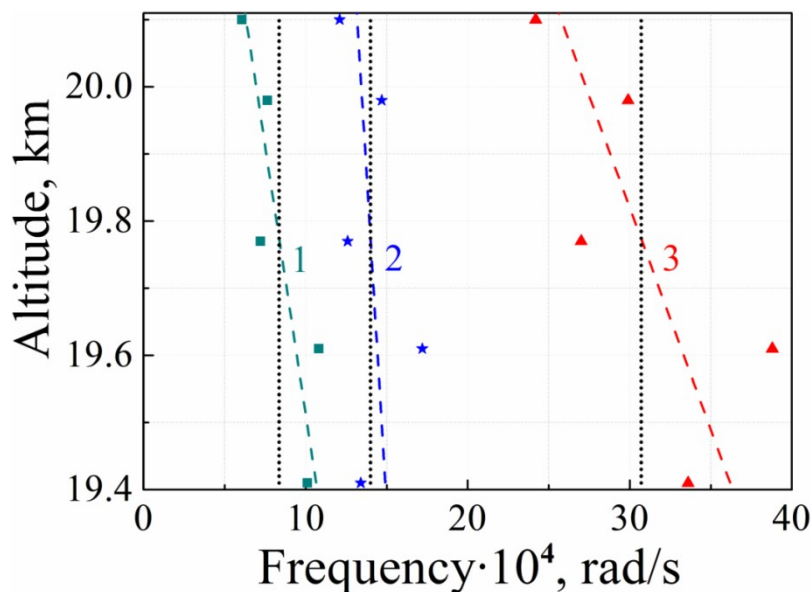


Рис. 4. Величины собственной частоты ω (квадраты) и гипотетических частот σ_2 (звездочки) и σ_3 (треугольники), вычисленные для двух вышеуказанных случаев распространения фазы ВГВ в юго-восточном направлении. Средние значения частот показаны пунктиром, а штриховые линии демонстрируют линейные тренды экспериментальных данных.

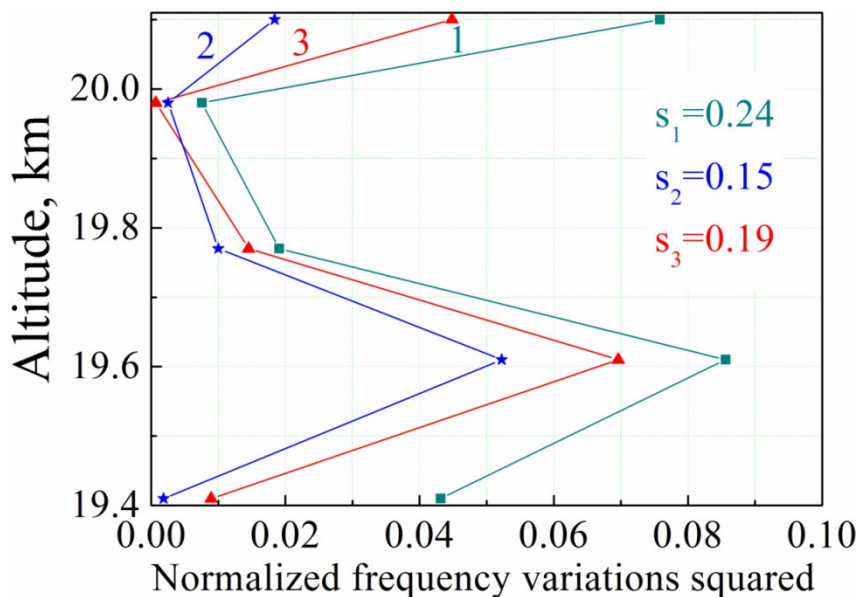


Рис. 5. Вертикальные профили квадратов нормированных вариаций собственной частоты ω (квадраты), гипотетических частот σ_2 (звездочки) и σ_3 (треугольники) ВГВ в системе отсчета земного наблюдателя. Указаны значения нормированных стандартных отклонений (s_1, s_2, s_3) частот от соответствующих средних величин (рис. 4).

На рис. 4 представлены высотные тренды собственной частоты ω (квадраты) и гипотетических частот σ_2 (звездочки) и σ_3 (треугольники), вычисленные для двух вышеуказанных случаев распространения фазы ВГВ в юго-восточном направлении. Средние значения частот показаны пунктиром, а штриховые линии соответствуют высотным трендам данных, полученным на основе линейной аппроксимации результатов эксперимента в интервале 19.0–20.5 км методом наименьших квадратов. Экспериментальные значения частот ВГВ на рис. 4 относятся к серединам пяти высотных интервалов, в которых строились годографы скорости ветра.

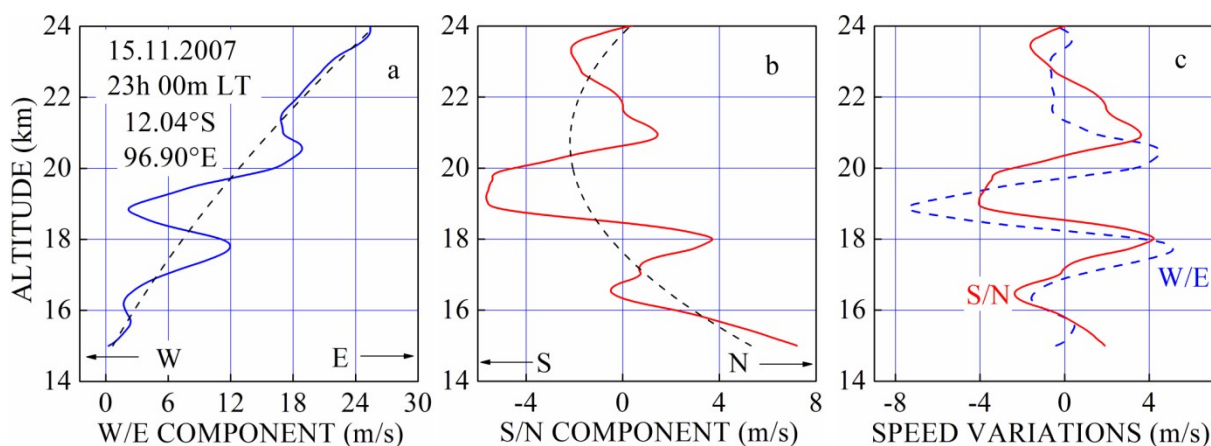


Рис. 6. Высотные профили зональной (W/E-компонента) и меридиональной (S/N-компонента) составляющих скорости ветра (панели а и б), полученные из радиозондовых измерений 15 ноября 2007 года в атмосферном районе над Кокосовыми островами. Показаны координаты зондируемого района и локальное время (LT) проведения измерений. Штриховыми линиями на панелях а и б рис. 6 обозначены фоновые (средние) профили, вычисленные с помощью МНК-аппроксимации исходных данных полиномом 3-ей степени на интервале 14.0–24.0 км. Вертикальные профили вариаций для компонент скорости (панель с) определялись как разности исходных и средних профилей (панели а и б).

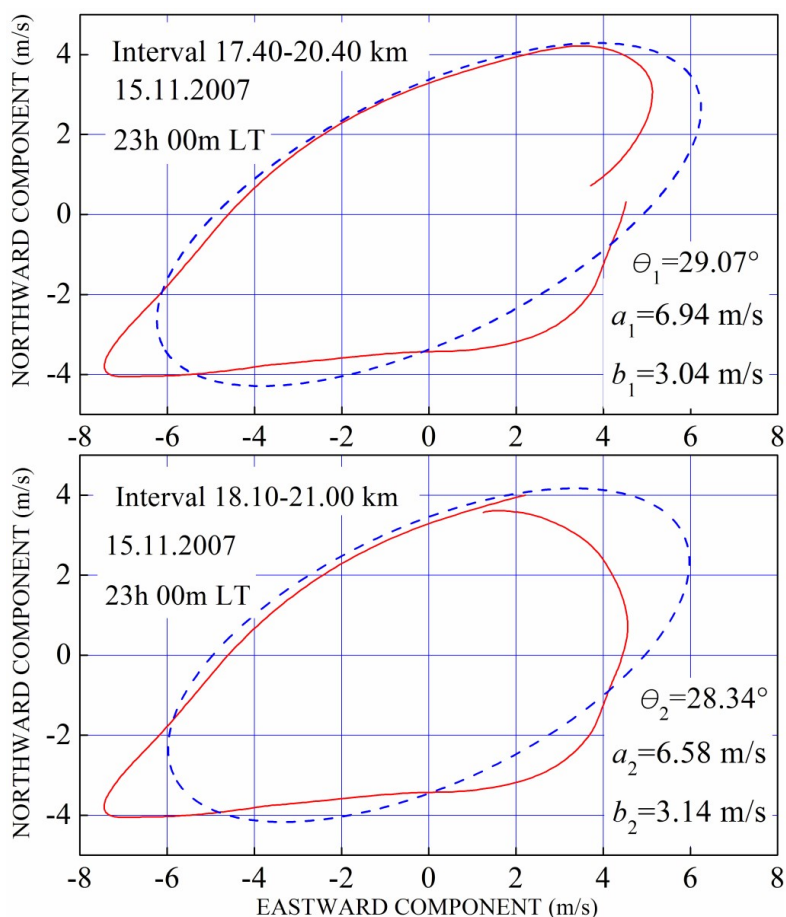


Рис. 7. Результаты анализа годографа для волновых возмущений скорости ветра, которые получены из радиозондовых измерений 15 ноября 2007 года в атмосфере Земли над Кокосовыми островами в двух высотных интервалах 17.40–20.40 км (верх рис. 7) и 19.57–20.40 км (внизу). Описание панелей здесь такое же, как на рис. 2.

Таблица 1. Параметры ВГВ, восстановленные в двух сеансах радиозондовых измерений в районе стратосферы над Кокосовыми островами с помощью анализа годографа скорости ветра. Показаны координаты зондируемого атмосферного района и локальное время (LT) проведения измерений

Measurement	28.02.2007 23h 00m LT 12.04°S, 96.90°E. [19.0÷20.5] km	15.11.2007 23h 00m LT 12.04°S, 96.90°E [17.4÷21.0] km
IGW parameters		
λ_z , km	0.80	2.95
m , 10^{-3} rad/m	7.85	2.13
f/ω , rel. units	0.036	0.458
$ u' $, m/s	3.73	6.76
$ v' $, m/s	0.14	3.09
$ w' $, 10^{-3} m/s	124	14.8
θ , deg	132.4	28.7
N_b , 10^{-2} rad/s	2.5	2.7
λ_h , km	24.0	1348
k_h , 10^{-4} rad/m	2.62	0.047
ω , 10^{-4} rad/s	8.36	0.664
T^{in} , hours	2.09	26.3
$ C_{\text{ph}}^{\text{in}} $, m/s	3.19	14.25
$ C_{\text{pz}}^{\text{in}} $, 10^{-3} m/s	106	31.2
$ C_{\text{gh}}^{\text{in}} $, m/s	3.19	11.27
$ C_{\text{gz}}^{\text{in}} $, 10^{-3} m/s	106	24.68
σ , 10^{-4} rad/s	14.0	-
T , hours	1.25	-
$\tan \phi'$, rel. units	30.0	457
$ V_b $, m/s	8.6	-
α , deg	7.2	-
E_p , m^2/s^2	3.48	9.03
E , m^2/s^2	6.96	22.85
$p = E_k/E_p$, rel. units	1.0	1.53

Представленные на рис. 4 высотные тренды частот указывают на то, что частота σ_2 в большей степени является сохраняющимся инвариантом по сравнению с частотой σ_3 . Об этом также свидетельствуют вертикальные профили нормированных вариаций частот на рис. 5 и значения их стандартных отклонений. Таким образом, устанавливая величину $\sigma = \sigma_2 = 14.0 \cdot 10^{-4}$ рад/с в качестве истинной частоты в системе земного наблюдателя, можно заключить, что в системе отсчета, движущейся со скоростью возмущенного потока, собственная частота ω определяется со знаком “минус”: $\omega = \sigma_2 - \mathbf{k}_h \mathbf{V}_b = -8.36 \cdot 10^{-4}$ рад/с. Это означает, что в указанной системе отсчета внутренняя волна распространяется в северо-западном направлении. При этом следует отметить, что в системе отсчета земного наблюдателя фаза ВГВ распространяется в юго-восточном направлении.

На рис. 6 представлены высотные профили зональной и меридиональной составляющих скорости ветра (панели а и б), полученные из радиозондовых измерений

15 ноября 2007 года в районе стратосферы над Кокосовыми островами. Показаны координаты зондируемого района и локальное время (LT) проведения измерений. Фоновые профили, вычисленные с помощью МНК-аппроксимации исходных данных полиномом 3-ей степени на интервале 14.0–24.0 км, обозначены штриховыми линиями на панелях а и б рис. 6. Вертикальные профили вариаций для компонент скорости (панель с) определялись как разности исходных и средних профилей. На рис. 7 представлены результаты анализа годографа для волновых возмущений скорости ветра, полученные из радиозондовых измерений 15 ноября 2007 года в атмосфере Земли над Кокосовыми островами в двух высотных интервалах 17.40–20.40 км (верх рис. 7) и 19.57–20.40 км (внизу). Описание панелей здесь такое же, как на рис. 2. Внутренняя волна, идентифицированная в сеансе измерений 15 ноября 2007 года, имеет собственный период 26.3 часа ($\omega = 2.2 \cdot f$), где $f = 3.04 \cdot 10^{-5}$ рад/с – параметр Кориолиса (инерционная частота) для пункта наблюдений в атмосфере Земли. Вертикальная и горизонтальная длины волн для этой ВГВ равны 2.95 и 1350 км, соответственно. В Таблице 1 приведены волновые характеристики, полученные по результатам анализа годографа скорости ветра в сеансе измерений 15 ноября 2007 года.

Заключение

Радиозондовые измерения скорости ветра, выполненные 28 февраля и 15 ноября 2007 года, были использованы для идентификации ВГВ и определения их характеристик в нижней стратосфере Земли над Кокосовыми островами (координаты: 12.04°S; 96.90°E). Используя результаты анализа годографа скорости ветра, дисперсионное уравнение и поляризационные соотношения, были определены величины ключевых характеристик ВГВ, таких как собственная частота, амплитуды вертикальных и горизонтальных возмущений скорости ветра, собственная вертикальная и горизонтальная фазовые (и групповые) скорости, кинетическая и потенциальная энергия волн. Внутренние волны, обнаруженные в данных зондов, имели собственные периоды 2.1 часа ($\omega = 27.8 \cdot f$) и 26.3 часа ($\omega = 2.2 \cdot f$), соответственно, где $f = 3.04 \cdot 10^{-5}$ рад/с – параметр Кориолиса для пункта наблюдений в атмосфере Земли. Вертикальные длины волн составляли ~0.8 и ~2.95 км, а горизонтальные длины волн были равны ~24 и ~1350 км, соответственно. Анализ годографа скорости ветра показал циклоническое (против часовой стрелки) вращение вектора скорости ветра с увеличением высоты, что соответствует распространению фазы вниз в Южном полушарии и, следовательно, переносу вверх волновой энергии.

Предложен оригинальный метод определения волновой частоты в системе отсчета земного наблюдателя и азимутального направления распространения ВГВ в атмосфере Земли. Приложение разработанного метода к радиозондовым измерениям, выполненным 28 февраля 2007 года, дало возможность установить волновую частоту $\sigma = 14.0 \cdot 10^{-4}$ рад/с (соответствует периоду волны $T=1.25$ часа), а также другие характеристики ВГВ в системе земного наблюдателя.

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

Литература

1. Kundu, P. K. An analysis of inertial oscillations observed near Oregon coast // J. Phys. Oceanogr. 1976. V. 6. P. 879–893.
2. Cot C., Barat J. Wave-turbulence interaction in the stratosphere: a case study // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. D2. P. 2749–2756.
3. Gubenko V.N., Kirillovich I.A. Diagnostics of internal atmospheric wave saturation and determination of their characteristics in Earth's stratosphere from radiosonde measurements // Solar-Terrestrial Physics 2018. V. 4. No. 2. P. 41–48, doi: 10.12737/stp-42201807.

4. Gubenko V.N., Kirillovich I.A., Andreev V.E. Improvement of methods for studying internal gravity waves in the Earth's atmosphere using radiosonde measurements // Journal of Physics: Conference Series 2020. V. 1632. 012007, doi: 10.1088/1742-6596/1632/1/012007.