

УДК 551.596.9

ИНДИКАЦИЯ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН  
В ОБЛАЧНЫХ СЛОЯХ ПО РАДИОЯРКОСТНЫМ  
КОНТРАСТАМ АТМОСФЕРЫ

*Т. В. Александрова, В. М. Плечков, К. С. Станкевич*

Исследуется возможность обнаружения ВГВ в облачных слоях по радиояркостным контрастам атмосферы на волнах  $\lambda = 0,8$  см,  $\lambda = 1,35$  см. Получены выражения для амплитуды ВГВ, вариаций давления, интегрального влагосодержания и абсолютной влажности в ней. По совокупности экспериментальных данных отношение радиоконтрастов на длинах волн 0,8 и 1,35 см равно 2,8, что близко к теоретическому.

Внутренние волны в нижней тропосфере должны вызывать периодические вариации интегрального содержания водяного пара [1]. Впервые регистрацию внутренних гравитационных волн при СВЧ радиометрических измерениях осуществили с борта самолета [2]. Измерения проводились на волнах 0,8 и 2 см над морем во время ясной безоблачной погоды в направлении надира при высоте полета 1200 м. Предполагалось дистанционное зондирование атмосферных волн по излучению в линиях кислорода и водяного пара [3]. Модуляцию собственного радиоизлучения тумана внутренними гравитационными волнами наблюдали на длине волны 3 мм в [4]. В [5, 6] приведены данные регистрации орографических колебательных процессов в слоистой облачности по изменению яркостной температуры атмосферы на длинах волн 0,8 и 1,35 см. В целом полученные результаты свидетельствуют об эффективности дистанционного зондирования внутренних гравитационных волн различной природы радиометрическими методами. Настоящая работа содержит дальнейшее развитие радиометрической индикации внутренних гравитационных волн в облаках и облачных слоях.

Внутри устойчиво стратифицированных облаков могут возникать колебательные вертикальные перемещения, если в воздушном потоке имеются вертикальные компоненты скорости. Нужные условия создаются с подветренной стороны при обтекании потоком горных хребтов, о чем свидетельствует существование орографических волн. Колебания происходят с частотой Брента - Вайсяля [7]:

$$N = \sqrt{\frac{g}{T'}(\gamma_{ab} - \gamma)}, \quad (1)$$

а величина вертикального смещения равна  $\Delta z = A \sin NT$ , где  $T' = 273 + t$  °С - средняя температура облачного слоя,  $\gamma$  и  $\gamma_{ab}$  - реальный и влажно-адиабатический градиенты температуры.

Вертикальные смещения насыщенных паром масс воздуха описываются влажно-адиабатическим процессом. При подъеме на высоту  $\Delta z$  из-за адиабатического охлаждения конденсируются  $\Delta q$  пара [7]:

$$\Delta q = 0,622 \frac{e_s}{p} \left[ \Lambda \gamma_{ab} - \frac{1}{H} \right] \Delta z, \quad (2)$$

что соответствует изменению абсолютной влажности

$$\Delta \rho = \frac{216}{T'} e_s \left[ \Lambda \gamma_{ab} - \frac{1}{H} \right] \Delta z \text{ г/м}^3, \quad (3)$$

где  $q$  - отношение пара и сухого воздуха,  $e_s$  - упругость насыщенного пара внутри облака,  $p$  - давление,  $H = RT/g \approx 8$  км - шкала высот,  $\Lambda$  - параметр температурной зависимости для упругости при насыщении (при  $t = 10$  °С,  $\Lambda = 0,067$ ).

При колебаниях масс влажного воздуха внутри облака с частотой  $N$  и при изменениях высоты  $\Delta z$  вариации интегрального влагосодержания на луче зрения должны равняться

$$\Delta Q = \Delta \rho \Delta z = \frac{21,6}{T'} e_s \left[ \Lambda \gamma_{ab} - \frac{1}{H} \right] (\Delta z)^2 \text{ г/см}^3 \quad (4)$$

или

$$\Delta Q = \frac{21,6}{T'} e_s \left[ \Lambda \gamma_{ab} - \frac{1}{H} \right] A^2 \sin^2 Nt \text{ г/см}^3. \quad (5)$$

При адиабатическом процессе уменьшения  $\Delta Q$  сопровождается увеличением интегральной водности  $\Delta W$ , и тогда приращение равно

$$\Delta W (\text{г/см}^2) = 10 \Delta W (\text{кг/м}^2) = \frac{216}{T'} e_s \left[ \Lambda \gamma_{ab} - \frac{1}{H} \right] A^2 \cos^2 Nt. \quad (6)$$

Вариации водности и влагосодержания атмосферы меняют ее прозрачность на радиоволнах. Например, на длине волны  $\lambda = 0,8$  см при  $\Delta Q = \Delta W$  поглощение каплями во много раз больше, чем в паре. Поэтому гравитационные волны должны создавать периодическую компоненту в радиоизлучении облачных слоев.

Вычислим контраст поглощения радиоволн в облачной атмосфере с учетом рассматриваемого эффекта на длинах волн 0,8 и 1,35 см, пользуясь выражением для коэффициента поглощения водным паром [8]:

$$\alpha(\text{дБ/км}) = 1,52 \cdot 10^3 \rho \frac{e^{-664/T}}{T^{5/2}} \frac{4\nu^2 \nu_0^2 \Delta\nu}{(\nu_0^2 - \nu^2)^2 + 4\nu^2 (\Delta\nu)^2} + 2,3\rho T^{-5/2} \nu^2 \Delta\nu, \quad (7)$$

где  $\nu$  - частота в ГГц,  $\nu_0 = 22,235$  ГГц,  $\Delta\nu = 2,62(p/760)(T/300)^{-0,626}$  ГГц - ширина линии поглощения и  $\rho$  (г/м<sup>3</sup>) - абсолютная влажность. Для описания полного вертикального поглощения в конденсированной влаге на волнах сантиметрового диапазона достаточна следующая формула [9]:

$$\tau_w = \frac{1}{\lambda} W \cdot 10^{[0,0122(18-t)-1]}. \quad (8)$$

Тогда вариации поглощения электромагнитного излучения при гравитационных колебаниях в слое  $\Delta z$  представим в следующем виде:

$$\Delta\tau(0,8) = 1,4 \cdot 10^{-2} \left(\frac{T_0}{300}\right)^{-3,126} \Delta Q + 0,156 \Delta W \cdot 10^{0,0122(18-t)}; \quad (9)$$

$$\Delta\tau(1,35) = 5,15 \cdot 10^{-2} \Delta Q + 0,055 \Delta W \cdot 10^{0,0122(18-t)}. \quad (10)$$

На волне 1,35 см температурная зависимость поглощения в парах воды определяется множителем

$$\left(\frac{T_0}{300}\right)^{-1,874} (e^{-644/T_0}/0,117), \quad (11)$$

который при  $t > 0$  с изменяет  $\tau(1,35)$  всего на несколько процентов, поэтому его можно опустить.

Известно, что на длинах волн 0,8 и 1,35 см температуру радиоизлучения атмосферы можно представить в виде

$$T_{\text{я}} = T_{\text{ср}} (1 - e^{-(\tau + \Delta\tau)}), \quad (12)$$

где  $T_{\text{ср}}$  - средняя температура атмосферы и  $\tau$  - полное вертикальное поглощение. Как показывают результаты наблюдений, вариации  $\Delta\tau \ll 1$ . Поэтому приращение яркостной температуры при гравитационных колебаниях равно

$$\Delta T_{\text{я}} = T' \Delta\tau e^{-\tau}. \quad (13)$$

Поскольку поглощение на рассматриваемых волнах в среднем равно  $\tau = 0,2$  Нп, то для оценок примем

$$\Delta T_{\text{я}} = 0,8 T' \Delta\tau. \quad (14)$$

Пользуясь (5), (6), (9), (10) и (14), найдем максимальное приращение яркостной температуры в гравитационной волне на длине волны  $\lambda = 0,8$  см:

$$\Delta T_{\text{я}}(0,8)_{\text{max}} \approx 26,4 A^2 \left[ \Delta \gamma_{\text{аб}} - \frac{1}{H} \right] e_s \cdot 10^{0,0122(18-t)}, \quad (15)$$

и амплитуду гравитационной волны:

$$A \approx 0,2 \left[ \frac{\Delta T_{\text{я}}(0,8)_{\text{max}}}{e_s \left[ \Delta \gamma_{\text{аб}} - 1/H \right]} \right]^{0,5} \cdot 10^{-6,1 \cdot 10^{-3}(18-t)} \text{ (км)}. \quad (16)$$

Гравитационные волны традиционно обнаруживают по вариациям давления с помощью микробарографа, можно определить их и на основе радиометрических данных:

$$\Delta P \approx 1,6 P \Delta q = e_s \left[ \Delta \gamma_{\text{аб}} - \frac{1}{H} \right] A \sin Nt; \quad (17)$$

$$\Delta P = 0,2 \left[ \Delta T_{\text{я}}(0,8)_{\text{max}} e_s \left[ \Delta \gamma_{\text{аб}} - \frac{1}{H} \right] \right]^{0,5} \cdot 10^{-6,1 \cdot 10^{-3}(18-t)} \sin Nt. \quad (18)$$

При обнаружении гравитационных волн по радиоконтрастам на длине волны  $\lambda = 1,35$  см получим для максимальной величины следующее выражение:

$$\Delta T_{\text{я}}(1,35)_{\text{max}} \approx 8,64 A^2 \left[ \Delta \gamma_{\text{аб}} - \frac{1}{H} \right] e_s \cdot 10^{0,0122(18-t)}. \quad (19)$$

Таким образом, радиоконтраст на длине волны  $\lambda = 1,35$  см также формируется излучением конденсированной воды и его величина в три раза меньше, чем на длине волны  $\lambda = 0,8$  см.

Экспериментальные исследования радиоизлучения облачных слоев проводились в Крыму. Рельеф местности был типичен для условий возбуждения орографических процессов [10]. Измерительная установка - радиотелескоп с антенной диаметром 2 м - располагалась у основания горной гряды подветренной стороны. Наблюдения проводились одновременно на двух длинах волн: 0,8 и 1,35 см, луч диаграммы проходил над вершиной хребта.

В табл. 1 как примеры приводятся наблюдавшиеся радиотемпературные контрасты  $\Delta T_{\text{я}}(0,8)$  и  $\Delta T_{\text{я}}(1,35)$ , периоды колебаний  $\Pi$ , а также рассчитанные по выше приведенным формулам амплитуды гравитационных волн  $A$ , вариации давления  $\Delta P_{\text{max}}$ , интегрального влагосодержания  $\Delta Q$  и

абсолютной влажности  $\Delta\rho$ . В целом за время наблюдений интервалы изменений составили: амплитуды гравитационной волны  $0,12 \pm 0,7$  км, давления -  $0,3 \pm 2$  мбар, влагосодержания -  $0,07 \pm 0,8$  г/см<sup>2</sup>, абсолютной влажности -  $0,36 \pm 1,3$  г/м<sup>3</sup>.

Таблица 1

$\Delta T_{\text{я}}(0, 8), \text{К}$	$\Delta T_{\text{я}}(1, 35), \text{К}$	$\Pi, \text{мин}$	$A, \text{км}$	$\Delta P_{\text{max}}, \text{мбар}$	$\Delta\rho, \text{г/м}^3$	$\Delta Q, \text{г/см}^2$
8	3	7	0,29	0,74	0,38	0,08
6,7	2,4	10	0,27	0,71	0,40	0,08
20	8	11	0,48	1,14	0,74	0,29
13	4,5	2	0,37	0,86	0,72	0,29
37	15	3	0,66	1,12	0,98	0,58

При известной амплитуде и частоте гравитационной волны (в табл. 1 приводится период) можно оценить вертикальную компоненту скорости воздушного потока  $w_0 = A \cdot N$  [7]. Так, например, 23 апреля в 15 часов при  $\Pi = 10$  мин ( $N = 1,0 \cdot 10^{-2}$  1/с) и  $A = 0,22$  км вертикальная скорость составила  $\sim 2$  м/с.

По совокупности экспериментальных данных отношение радиоконтрастов на длинах волн 0,8 и 1,35 см равно 2,8, что близко к теоретическому.

Таким образом, наилучшие условия для дистанционного обнаружения и исследования внутренних гравитационных волн в облачных покровах реализуются на волнах 8-миллиметрового диапазона.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Госсард Э., Хук У. Волны в атмосфере. - М.: Мир, 1978.
2. Анискович В. М., Забышный А. И. и др. // Труды VI Всесоюзного совещания. - Л.: Гидрометеоиздат, 1984. С. 230.
3. El-Raey M. // Radio Sci. 1982. V. 17. P. 766.
4. Кузенков А. Ф., Троицкий А. В. Препринт НИРФИ N 209. - Н. Новгород, 1986.
5. Александрова Т. В., Плечков В. М., Станкевич К. С. // Тезисы докл. 7-го Всесоюзного совещания по радиометеорологии. - М., 1986. С. 26.
6. Александрова Т. В., Плечков В. М., Станкевич К. С. // Тезисы докл. Междисциплинарной науч.-техн. школы-семинара. - Томск, 1986. Ч. 3. С. 141.
7. Хргиан А. Х. Физика атмосферы. - М.: Гос. ун-т., 1986.
8. Кисляков А. Г., Станкевич К. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 1987. Т. 10. N 9-10. С. 1244.
9. Staelin D. H. // J. G. R. 1966. V. 71. N 12. P. 2875.

Научно-исследовательский  
радиофизический институт

Поступила в редакцию  
15 августа 1990 г.

INDUCTION OF INTERNAL GRAVITY WAVES IN CLOUD LAYERS OVER RADIO  
BRIGHTNESS CONTRASTS OF THE ATMOSPHERE

*T.V.Aleksandrova, V.M.Plechkov, K.S.Stankevich*

A possibility is investigated for the detection of IGW in cloudiness layers over the radio brightness contrasts of the atmosphere at  $\lambda = 0,8$  cm and  $\lambda = 1,35$  cm. Expressions have been obtained for the IGW amplitude, pressure variations, integral humidity and absolute humidity in it. According to the set of experimental data the ratio of radio contrasts at wavelengths of 0,8 and 1,35 cm is equal to 2,8, is close to the theoretical one.