

Федеральное агенство по науке и инновациям

Федеральное государственное научное учреждение  
"Научно-исследовательский радиопизический институт"

Препринт № 503

**РАДИОАКУСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
МЕЗОСФЕРЫ**

В. О. Рапопорт  
П. А. Беспалов  
Н. А. Митяков  
Н. А. Рыжов

Нижний Новгород 2005

Рапопорт В. О., Беспалов П. А., Митяков Н. А., Рыжов Н. А. Радиоакустическое исследование мезосферы // Препринт № 503. — Нижний Новгород: НИРФИ, 2005. 10 с.

УДК 534.231:533.9.08

Предложен новый метод измерения параметров мезосферы, основанный на радиоакустическом зондировании ионосферной плазмы. Метод базируется на брэгговском рассеянии радиоволн на неоднородностях электронной концентрации D- или E-слоя ионосферы, образованных бегущей акустической волной. Приведены оценки величин рассеянного сигнала.

## Введение

Как известно, радиоакустическое атмосферное зондирование (РАЗ) основано на брэгговском рассеянии электромагнитной волны на периодических неоднородностях плотности нейтральной компоненты атмосферы, образованных акустической волной (см., например [1]). Коэффициент отражения электромагнитной волны от такой решетки чрезвычайно мал, однако интенсивность сигнала резко увеличивается за счет фокусировки радиоволн от сферической волны звука. В результате мощность рассеянного сигнала на входе приемника радара имеет следующий вид [2]:

$$P_{sc} = \frac{P_a P_t \alpha k^2 L_a^2 N^2 \eta_a \eta_t}{8z^2} F(L_a, L_t, L_r). \quad (1)$$

Здесь  $P_a$  и  $P_t$  – мощности акустического излучателя и передатчика локатора,  $k$  – волновое число электромагнитной волны,  $L_a$  – линейный размер акустического излучателя,  $N$  – число периодов акустического сигнала в импульсе,  $\eta_a, \eta_t$  – коэффициенты ослабления акустического и радиосигнала,  $z$  – высота местоположения акустического импульса,  $\alpha = 4.7 \cdot 10^{-15}$  м<sup>2</sup>/Вт – параметр, пропорциональный поперечнику рассеяния радиоволн на звуковой волне в воздухе. Безразмерный фактор определяется размерами антенн акустического излучателя  $L_a$ , передатчика радара  $L_t$  и его приемника  $L_r$ :

$$F = \frac{4L_t^2 L_r^2}{(4L_a^2 + L_t^2 + L_r^2)^2}. \quad (2)$$

Возможности эффективной работы систем РАЗ в большом диапазоне высот ограничены рядом факторов: мощностью и размерами акустического и электромагнитного излучателей, ветровым сносом "акустического зеркала", ослаблением акустической волны за счет турбулентности и вязкости атмосферы [3, 4]. Влияние турбулентности и вязкости атмосферы на РАЗ уменьшается с ростом длины акустической волны. Ветровой снос акустической решетки приведет к смещению на поверхности Земли за пределы апертуры приемной антенны

радара центра пятна электромагнитного сигнала, рассеянного решеткой, образованной сферической звуковой волной. Эффективный размер пятна определяется размером передающей антенны радара. При скорости ветра 5 м/с для высоты зондирования 3 км величина смещения пятна составляет около 100 м. Для увеличения вероятности приема рассеянного сигнала в системах РАЗ, работающих в метровом диапазоне волн, обычно используют несколько разнесенных акустических излучателей [3]. Системы РАЗ, работающие в декаметровом диапазоне волн, менее чувствительны к ветровому сносу пятна, поскольку размеры антенн локатора обычно превышают 100 м.

В данной работе мы хотим обратить внимание на то, что декаметровые системы РАЗ могут быть использованы для исследования мезосферы на высотах порядка  $80 \div 100$  км, где поглощение инфразвука из-за вязкости еще невелико, а обратное рассеяние радиоволн определяется квазипериодической решеткой ионосферной плазмы.

Коэффициент отражения радиоволн от неоднородностей плазмы на много порядков больше, чем от неоднородностей нейтральной атмосферы. Оценки показывают, что интенсивность сигнала, рассеянного на неоднородностях электронной концентрации, образованных звуковой волной в мезосфере, оказывается достаточной для того, чтобы предложить новый метод радиоакустического исследования мезосферы (РИМ). В плазме мезосферы будет бежать волна плотности, повторяющая акустическую волну с относительной амплитудой, равной числу Маха. Именно поэтому метод РИМ полностью сохраняет возможности РАЗ и с его помощью можно получать профили температуры и исследовать динамику вертикальных движений в мезосфере. Дополнительно к возможностям РАЗ метод РИМ, например, позволяет измерить плотность нейтральных частиц по затуханию звука. Для частоты 20 Гц поглощение звука резко возрастает выше 80 км. Кроме того, метод РИМ позволяет определить профиль электронной концентрации в мезосфере по величине рассеянного сигнала на разных высотах.

# Особенности радиоакустического исследования мезосферы

Закономерности распространения акустических волн в атмосфере в первую очередь зависят от высотного профиля температуры. Используя стандартную методику геометрической оптики, мы рассчитали траектории лучей от наземного источника звука для стандартного температурного профиля, приведенного на рис. 1 (На рисунке высотный профиль температуры показан линией с точками. Геометрооптические лучи от наземного акустического источника показаны сплошными линиями. Числа около линий — угол, под которым они уходят с земной поверхности.) Расчеты показывают, что акустические волны испытывают значительную рефракцию, особенно сильную на высотах 35–40 км. Поверхность фронта волны на больших высотах отличается от сферы. Форма фронта акустической волны может варьироваться в широких пределах от случая к случаю. Поскольку точная форма волнового фронта акустической волны неизвестна, для оценок величины сигнала РИМ будем считать фронт акустической волны плоским.

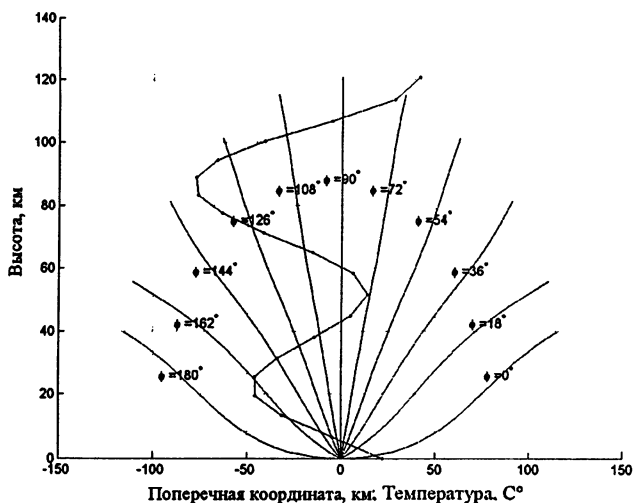


Рисунок 1.

На рис. 2 приведены графики зависимости от высоты плотности атмосферы, а также числа Маха в акустической волне для мощности источника звука 1000 Вт на частотах 20, 5 и 1 Гц. Высотный профиль плотности атмосферы показан пунктирной линией,  $\rho_E$  – плотность на земной поверхности. Расчетные среднеквадратичные числа Маха показаны сплошными линиями.

Средний квадрат числа Маха  $M$  в звуковой волне рассчитывался с использованием уравнения переноса для звука [5]. В результате простых выкладок получается формула

$$\langle M^2 \rangle = \frac{P_a}{2\pi z^2 \rho c_s^2} \exp\left(-\int_0^z \Gamma dz\right), \quad (3)$$

где  $P_a$ ; – мощность акустического источника,  $\rho_E$  – плотность атмосферы на высоте  $z$ ,  $c_s$  – скорость звука. Коэффициент поглощения звука по интенсивности  $\Gamma$  определяется выражением

$$\Gamma = \frac{16\pi^2 f^2 \eta}{3\rho c_s^3},$$

где  $f$  – частота волны,  $\eta = 1.8 \cdot 10^{-4}$  Н/мс – динамическая вязкость воздуха.

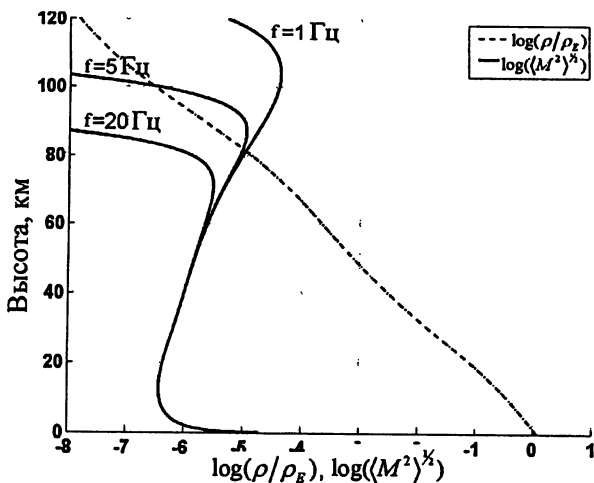


Рисунок 2.

В формуле (3) считается, что плотность энергии звука обратно пропорциональна квадрату высоты. Как видно на рис.1, такой закон с достаточной точностью выполняется в области высот  $60 \div 100$  км. Максимальная высота  $z_{max}$ , выше которой звук резко затухает, определяется условием  $\int_0^{z_{max}} \Gamma dz \geq 1$  и зависит от частоты волны. Если на частоте 1 Гц звук достигает высоты 120 км, то на частоте 20 Гц звуковая волна доходит только до 80 км. Разумеется, максимальная высота  $z_{max}$  зависит от распределения плотности и температуры в атмосфере.

Для оценки рассеяния на акустической решетке в приближении малых возмущений воспользуемся выражением [1]:

$$\vec{E}_{sc}(\vec{r}, t) = \int \delta\varepsilon(\vec{r}', t - \frac{r'}{c}) \vec{E}_0(\vec{r}', t - \frac{r'}{t}) \frac{d^3\vec{r}'}{r}.$$

Здесь  $\delta\varepsilon$  – возмущение диэлектрической проницаемости,  $\vec{E}_0$  – поле падающей волны,  $\vec{E}_{sc}$  – поле рассеянной волны. Считая, что рассеяние происходит на плоской синусоидальной решетке и существенно только в зоне Френеля, легко получить выражение для коэффициента отражения радиоволны  $R$  от плоского фронта акустической волны в плазме в брегговском приближении:

$$R = kLM \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad (4)$$

где  $L$  – размер области синхронизма (или длительность акустического импульса, если последний короче), а  $k$  – по-прежнему волновое число радиоволны. Мощность сигнала РИМ, частично отраженного от плоской решетки, на входе приемника может быть вычислена по формуле

$$P_{sc} = \frac{P_t G S R^2}{4\pi(2z)^2}, \quad (5)$$

где  $P_t$  – мощность передатчика радара,  $G$  – коэффициент направленного действия передающей антенны,  $S$  – площадь приемной антенны.

## Диагностические возможности метода РИМ

Выражения (3)–(5) позволяют рассчитать ожидаемую интенсивность сигнала при радиоакустическом исследовании мезосферы. Приведем оценки величины сигнала РИМ для параметров системы РАЗ, созданной в 2004 году на базе стенда СУРА вблизи от Нижнего Новгорода [6, 7]. Мощность используемого радара равна 1000 Вт, частота – 9 МГц, размеры приемной и передающей антенн  $100 \times 300$  м. Акустическая система типа сирена-рупор имеет мощность излучения около 1000 Вт в диапазоне частот  $18 \div 20$  Гц. Для оценок будем считать, что частота звуковой волны равна 20 Гц, а параметры антенн радара  $G = 300$ ,  $S = 100$  м<sup>2</sup>. Будем полагать, что на высоте 80 км в мезосфере электронная концентрация равна  $n_e = 10^3$  см<sup>-3</sup>, что соответствует плазменной частоте около 0.3 МГц, а размер синхронизма (или длительность акустического импульса)  $L = 300$  м. В этом случае величина полезного сигнала на входе приемника составит  $P_{sc} = 5 \cdot 10^{-18}$  Вт. Мощность шума в полосе 1 Гц при температуре космического фона  $T = 10^5$  градусов Кельвина равна  $P_N = 1.2 \cdot 10^{-18}$  Вт.

Достаточно большое превышение сигнала над шумом позволяет измерять температурные профили и регистрировать вертикальные движения в мезосфере по методикам, разработанным для исследования тропосферы методом РАЗ [4]. В дополнении к этому метод РИМ позволяет измерять профили электронной концентрации путем регистрации интенсивности сигнала, рассеянного на различных высотах. Одновременно с этим по характеру спада сигнала выше 80 км можно определять плотность нейтрального газа. Ни один из известных нам дистанционных методов диагностики не дает такой обширной информации о параметрах мезосферы. По нашему мнению, использование метода РИМ позволит получить новые данные о физических процессах в мезосфере и организовать мониторинг состояния мезосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке INTAS, грант No. 01-0456 и Российского фонда фундаментальных исследований, гранты № 01-02-16680 и № 04-02-16612.



## Список литературы

- [1] Гурвич А.С., Кон А.И., Татарский В.И. Рассеяние электромагнитных волн на звуке в связи с задачами зондирования атмосферы //Изв. вузов Радиофизика. 1987. Т.30. №4. С.451-473.
- [2] Рапопорт В.О., Митяков Н.А., Зиничев В.А., Белова Н.И. Роль температурных градиентов и ветров в атмосфере при оценках энергетического потенциала систем радиоакустического зондирования //Изв. вузов Радиофизика. 1997. Т.40. №5. С.616-625.
- [3] Lataitis R.J. Signal power radio acoustic sounding of temperature: The effects of horizontal winds, turbulence, and vertical temperature gradients //Radio Sci. 1992. V.27. N3. P.369-385.
- [4] Рапопорт В.О., Митяков Н.А., Зиничев В.А., Белова Н.И., Сазонов Ю.А. Исследование малых вариаций параметров тропосферы методом радиоакустического зондирования //Изв. вузов Радиофизика. 1997. Т.40. №11. С.1355-1364.
- [5] Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Гидродинамика. -М.: Наука. 1986.
- [6] Митяков Н.А., Рапопорт В.О., Зиничев В.А., Комраков Г.П., Сазонов Ю.А., Рыжов Н.А. Система радиоакустического зондирования атмосферы на основе стенда "Сура"//Тр. XX Всерос. конф. по распространению радиоволн, 2-4 июля 2002 г. - Нижний Новгород:ТАЛАМ. 2002. С.411-412.
- [7] Рапопорт В.О.Митяков Н.А., Зиничев В.А., Комраков Г.П., Сазонов Ю.А., Рыжов Н.А. Результаты первых экспериментов с использованием комплекса "Сура-Саунд"// Сб. докл. XXI Всерос. конф. по распространению радиоволн, 25-27 мая 2005 г. - Йошкар-Ола:МарГТУ. 2005. Т.2, С.236-239.

Рапопорт Виктор Овсеевич  
Беспалов Петр Алексеевич  
Митяков Николай Анатольевич  
Рыжов Николай Александрович

Радиоакустическое исследование мезосферы

---

Подписано в печать 07. 12. 05 г. Формат 60 × 84/16.  
Бумага писчая. Объем 0,62 усл. п. л. Заказ 5554. Тираж 50.

---

Отпечатано в НИРФИ