

Научно-исследовательский радиофизический институт

Министерство науки, высшей школы и технической политики  
Российской Федерации

Препринт N 445

**ВЛИЯНИЕ НЕТОЧНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ  
ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРОФИЛЕЙ СКОРОСТЕЙ  
ЗВУКА И ВЕТРА НА РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ  
ПОЛЯ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ В  
ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ**

А. В. Разин

Нижегород, 1998

Разин А. В.

Влияние неточностей измерений вертикальных профилей скоростей звука и ветра на результаты расчетов поля акустического излучателя в приземном слое атмосферы // Препринт N 445. — Нижний Новгород: НИРФИ, 1998. 9 с.

УДК 534.222.1 ÷ 551.596.1

Приведены результаты численного исследования (в приближении геометрической акустики) влияния малых возмущений высотных зависимостей скоростей звука и ветра на распределение поля точечного акустического гармонического источника в приземном слое атмосферы. Показано, что в тех условиях, когда в точку наблюдения приходят один или два луча, возмущения профилей скоростей звука и ветра, составляющие по величине несколько процентов от их средних значений, меняют звуковое поле не более, чем на 1 – 1,5 дБ. При многолучевом распространении звука в атмосферном рефракционном волноводе малые изменения профилей метеопараметров способны приводить к изменениям звукового давления в отдельных точках на 20 – 30 дБ для разных реализаций этих изменений.

Андрей Владимирович Разин

**ВЛИЯНИЕ НЕТОЧНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ ВЕРТИКАЛЬНЫХ  
ПРОФИЛЕЙ СКОРОСТЕЙ ЗВУКА И ВЕТРА НА  
РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ПОЛЯ АКУСТИЧЕСКОГО  
ИЗЛУЧАТЕЛЯ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ**

---

Подписано в печать 25.06.98 г. Формат 60 × 84/16.

Бумага писчая. Объем 0,51 усл. п. л. Заказ 5476. Тираж 50.

---

Отпечатано в НИРФИ

В работе [1] в приближении геометрической акустики были выполнены численные исследования влияния различных высотных зависимостей скоростей звука и ветра на поле точечного гармонического звукового излучателя в приземном слое атмосферы. Было, в частности, показано, что в приповерхностном волноводе рефракционные эффекты могут приводить к изменению звукового поля в среднем на  $\pm 15$  дБ по сравнению с законом сферической расходимости. При расчетах в [1] использовались аналитически заданные гладкие профили скоростей звука и ветра.

В приложениях часто возникает необходимость вычисления звуковых полей для экспериментально полученных высотных распределений метеопараметров. Метеоданные обычно снимаются на нескольких горизонтах наблюдения, высоты которых считаются известными и интерполируются затем различными способами. При этом неизбежно возникают ошибки, связанные с неточностью измерения как самих величин температуры воздуха и скорости ветра, так и высот, на которых эти параметры атмосферы фиксируются. В связи с этим возникает необходимость оценки влияния ошибок в измерении профилей метеопараметров на результаты расчетов звукового поля. Решению этой задачи посвящена настоящая работа.

Расчеты звуковых полей в приземном слое атмосферы при наличии возмущений высотных зависимостей скоростей звука и ветра представляют интерес также в связи с тем, что в реальных условиях и температура воздуха, и скорость и направление ветра испытывают флуктуации. Конечно, параметры турбулентной атмосферы случайным образом зависят от всех трех пространственных координат и от времени, однако приводимые ниже результаты могут рассматриваться как некоторое приближение к реальной ситуации.

Как и в [1], воспользуемся моделью плоско-слоистой атмосферы, т. е. будем считать, что поверхность Земли плоская, ветер горизонтален, а его скорость, также как и скорость звука, зави-

сит только от вертикальной координаты. Кроме того, примем, что ветер не меняет с высотой своего направления.

Поскольку основной вклад в рефракцию акустических волн в приземном слое атмосферы дает ветер, будем считать, что средняя скорость звука постоянна и равна  $\langle c \rangle = 340$  м/с. Зависимость средней скорости ветра  $\langle w \rangle$  от высоты выберем в виде степенной функции [2]

$$\langle w \rangle = \langle w(10) \rangle \left( \frac{z}{10} \right)^{1/7}, \quad (1)$$

где  $z$  — высота в метрах, и  $\langle w(10) \rangle$  — средняя скорость ветра на высоте 10 м, измеряемая в метрах в секунду. При расчетах положим  $\langle w(10) \rangle = 5$  м/с.

Возникающие при снятии метеоданных ошибки можно моделировать различными способами. Для расчетов удобно принять, что возмущения профилей скоростей звука и ветра имеют вид гауссовых функций:

$$c = \langle c \rangle + \sum_{i=1}^M \Delta c_i \exp \left[ - \left( \frac{z - z_{ci}}{L_{ci}} \right)^2 \right], \quad (2)$$

$$w = \langle w \rangle + \sum_{j=1}^N \Delta w_j \exp \left[ - \left( \frac{z - z_{wj}}{L_{wj}} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

В (2) и (3)  $\Delta c_i$  и  $\Delta w_j$  — амплитуды малых возмущений, порядок величины которых составляет несколько сантиметров в секунду,  $z_{ci}$  и  $z_{wj}$  — высоты, на которых вариации скоростей звука и ветра максимальны,  $M$ ,  $N$  и  $L_{ci}$ ,  $L_{wj}$  — соответственно числа и характерные масштабы изменения добавок к средним скоростям звука и ветра.

Для сравнения рассмотрим также возмущения средних профилей скоростей звука и ветра в виде синусоидальных функций:

$$c = \langle c \rangle \left[ 1 + \alpha \sin(z/L_c) \right], \quad (4)$$

$$w = \langle w \rangle \left[ 1 + \beta \sin(z/L_w) \right], \quad (5)$$

где  $L_c$  и  $L_w$  характеризуют периоды синусоидальных изменений

метеопараметров, а  $\alpha$  и  $\beta$  — малые численные коэффициенты:  $\alpha \ll 1$ ,  $\beta \ll 1$ , причем по порядку величины  $\alpha \approx \beta \langle w \rangle / \langle c \rangle$ .

Характерные пространственные масштабы изменения малых возмущений профилей скоростей звука и ветра определяются величинами  $L_{ci}$ ,  $L_{wj}$ ,  $L_c$  и  $L_w$ . Необходимым условием применимости лучевого приближения является малость изменения эффективного показателя преломления движущейся среды [3] на расстоянии порядка длины звуковой волны [4, 5, 6, 7]. Очевидно, что рефракционные эффекты определяются высотными зависимостями профилей (2)–(5) в целом. При расчетах звуковых полей величины  $\Delta c_i$ ,  $\Delta w_j$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  будем ограничивать сверху таким образом, чтобы функции  $c(z)$  и  $w(z)$  были монотонными, в частности, чтобы скорость ветра всюду нарастала с высотой. Необходимо отметить, что если значения  $\Delta c_i$ ,  $\Delta w_j$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  достаточно малы, то масштабы  $L_{ci}$ ,  $L_{wj}$ ,  $L_c$  и  $L_w$  могут быть сравнимы с длиной звуковой волны или даже быть меньше ее. При этом пределы применимости приближения геометрической акустики будут определяться видом невозмущенного профиля (1), для которого лучевая теория может быть использована, по-видимому, для частот выше 15-20 герц [1].

С целью устранения эффектов, связанных с конечностью импеданса земной поверхности, будем считать ее абсолютно отражающей.

Расчеты акустических полей точечных источников, выполненные с использованием программы [1] для профилей метеопараметров вида (1)–(5), показали, что когда в приемник приходит один луч (точки наблюдения находятся на поверхности земли, а источник звука на некоторой высоте над ней), возмущения скоростей звука и ветра приводят к незначительным (менее 0,5 дБ) вариациям звукового давления.

Если в точку наблюдения приходят два луча — “прямой” и отраженный от земной поверхности, то флуктуации профилей скоростей звука и ветра оказывают более существенное влияние на распределение звукового поля в пространстве, что объясняется изменениями как амплитуд, так и фаз этих двух лучей, интерфе-

рирующих в точке приема. Однако и в этом случае результаты расчетов звукового поля точечного гармонического монополя для профилей метеопараметров (1)–(5) отличаются не более, чем на 1 – 1,5 дБ.

Таким образом, можно сделать вывод, что если в приемник приходит один или два луча, то ошибки в измерениях метеоданных не повлияют существенно на результаты расчетов звуковых полей.

Иная картина наблюдается при распространении звука в атмосферном рефракционном волноводе. В этом случае возмущения скоростей звука и ветра, составляющие по величине несколько процентов от их средних значений, приводят к значительным изменениям звукового поля. Пример расчетов поля точечного акустического монополя, находящегося в приповерхностном волноводе, образованном усиливающимся с высотой ветром, приведен на рис. 1. Вычисления проведены для следующих условий: звук частоты  $f_0 = 300$  Гц распространяется по ветру, имеющему скорость  $\langle w(10) \rangle = 5$  м/с, скорость звука постоянна и равна 340 м/с, высота источника  $h_S = 3$  м, точки наблюдения находятся на поверхности земли ( $h_R = 0$ ).

Из рассмотрения рис. 1 следует, что в условиях многолучевости вызванные возмущениями профилей метеопараметров вариации звукового давления составляют в отдельных точках около 30 дБ. Для большинства точек наблюдения количества приходящих лучей одинаковы для каждого из профилей (1), (3), (5). Интенсивности отдельных лучей и времена их прихода также практически не меняются. Разброс уровней звукового давления при возмущениях профилей метеопараметров в условиях многолучевого распространения акустических волн объясняется тем, что даже незначительные сдвиги фаз отдельных лучей приводят к заметным искажениям интерференционной картины.

Проведенные численные исследования влияния малых возмущений скоростей звука и ветра на распределение поля акустического гармонического монополя в приземном слое атмосферы позволяет сделать следующие выводы.

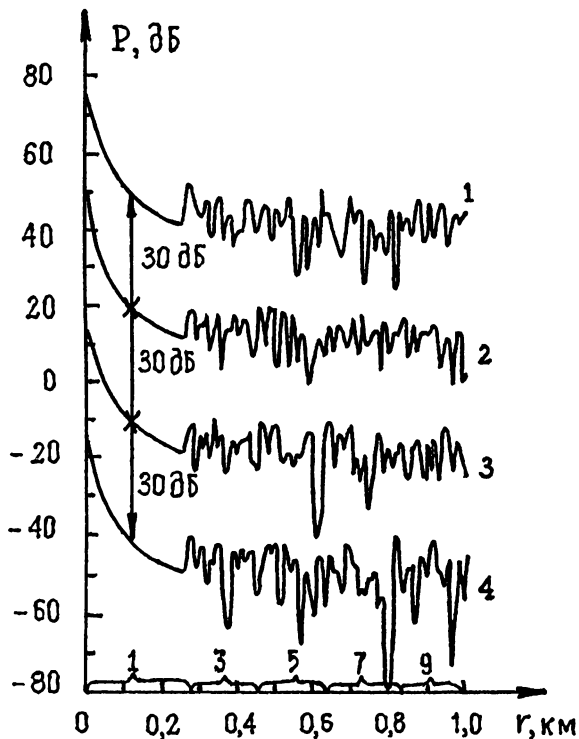


Рис. 1. Зависимость звукового давления  $p$  от горизонтального расстояния  $r$  при различных возмущениях профиля средней скорости ветра.

1 — Ветровой профиль (3) при  $N = 1$ ,  $\Delta w_1 = 0,02$  м/с,  $L_{w1} = 0,5$  м,  $z_{w1} = 3$  м. 2 — Ветровой профиль (5) при  $\beta = 0,01$  м и  $L_w = 10$  м. 3 — Ветровой профиль (3) при  $N = 2$ ,  $\Delta w_1 = 0,01$  м/с,  $L_{w1} = 0,5$  м,  $z_{w1} = 1$  м,  $\Delta w_2 = 0,025$  см/с,  $L_{w2} = 1$  м,  $z_{w2} = 10$  м. 4 — Невозмущенный ветровой профиль (1). Каждая из кривых 1 — 3 искусственно сдвинута вверх на 30 дБ относительно предыдущей. Цифры над фигурными скобками у оси  $r$  — число лучей, приходящих в точку наблюдения.

1. В тех условиях, когда в точку наблюдения приходит один луч (или источник, или приемник звука находятся на земле), а также два луча ("прямой" и отраженный от земной поверхности), возмущения профилей скоростей звука и ветра, составляющие несколько сантиметров в секунду, меняют звуковое поле не более, чем на 1 – 1,5 дБ. При этом следует ожидать, что погрешности измерений высотных зависимостей температуры воздуха и скорости ветра, используемых затем при расчете акустических полей, не приведут к ошибкам, превышающим точность измерения звукового давления.

2. При многолучевом распространении звука в атмосферном рефракционном волноводе флуктуации скоростей звука и ветра, составляющие по величине несколько процентов от их средних значений, способны приводить к изменениям звукового давления в отдельных точках на 20 – 30 дБ для разных реализаций этих флуктуаций. В этих условиях при расчетах более целесообразно, по-видимому, пользоваться некогерентным суммированием лучей (т.е. сложением их интенсивностей без учета фаз), поскольку получаемая в результате этой операции величина остается практически постоянной при малых возмущениях профилей метеопараметров.

3. Как и в случае монотонных гладких профилей скоростей звука и ветра рефракционные эффекты при наличии малых возмущений этих профилей приводят к изменению звукового поля в приповерхностном волноводе на  $\pm 15$  дБ по сравнению с законом сферической расходимости.

Отметим, что последний вывод количественно согласуется с результатами расчетов, выполненных в [3] различными методами для случая, когда звуковой источник расположен в приземном рефракционном волноводе с линейно нарастающей с высотой скоростью звука.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант РФФИ N 97-05-65938)



## ЛИТЕРАТУРА

1. Разин А. В. Численное моделирование звуковых полей в стратифицированной движущейся атмосфере // Изв. РАН. ФАО. 1995. Т. 31. № 6. С. 761–766.
2. Заварина М. В. Расчетные скорости ветра на высотах нижнего слоя атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 164 с.
3. Годин О. А., Михин Д. Ю., Молчанов С. Я. О приближении эффективной скорости звука в акустике движущихся сред // Изв. РАН. ФАО. 1993. Т. 29. № 2. С. 194–201.
4. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
5. Кравцов Ю. А., Орлов Ю. И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 304 с.
6. Подильчук Ю. Н., Рубцов Ю. К. Лучевые методы в теории распространения и рассеяния волн. Киев: Наук. Думка, 1988. 220 с.
7. Бреховских Л. М., Годин О. А. Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989. 416 с.
8. Attenborough K., Taherzadeh S., Bass H. E., Di X., Raspet R., Becker G. R., Gudesen A., Chrestman A., Daigle G. A., L'Esperance A., Gabillet Y., Gilbert K. E., Li Y. L., White M. J., Naz P., Noble J. M., van Hoof H. A. J. M. Benchmark cases for outdoor sound propagation models // J. Acoust. Soc. Amer. 1995. V. 97. No. 1. P. 173–191.