

О МОДЕЛИРОВАНИИ АТМОСФЕРНОГО АКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА

А.Г. Сорокин, Е.А. Пономарев, И.Ю. Лобычева

ABOUT SIMULATION OF AN ATMOSPHERIC ACOUSTIC CHANNEL

A.G. Sorokin, E.A. Ponomarev, I.Yu. Lobycheva

Для расчета условий распространения инфразвуковых сигналов на большие расстояния необходимо знать структуру атмосферного акустического канала (ААК), т.е. распределение температуры и скорости ветра. Такое распределение можно получить из глобальных моделей атмосферы, например MSIS и открытых оперативных метеорологических данных NOAA (США), полученных в рамках совместного проекта IDEAS (Investigation of Distributed Environmental Archives System), которые достаточно полно описывают поле температуры и ветра. В работе вводится параметр $U = \frac{\Omega^2}{c^2} - k_x^2$,

условно называемый потенциалом, где $\Omega = \omega - k_x \cdot V_x$, а ω , V , c – соответственно частота, скорость ветра и скорость звука. Все пространство делится на две области: 1) $U > 0$ – это зона волноводного распространения инфразвука 2) $U < 0$ – зона свободного распространения инфразвука. Таким образом, анализ потенциала позволяет выделять в пространстве зоны канализации инфразвуковых сигналов для заданных значений ω и k_x . В работе обсуждается распределение зон канализации инфразвука по выбранной трассе.

For calculation of propagation conditions of infrasonic signals on large distances it is necessary to know structure of an atmospheric acoustic channel i.e. distribution of temperature and wind velocity. Such distribution is possible to receive from global atmospheric models, for example MSIS and open operating weather data NOAA (USA), obtained within the framework of the joint project IDEAS (Investigation of Distributed Environmental Archives System), which is full enough describe a field of temperature and wind.

In activity parameter $U = \frac{\Omega^2}{c^2} - k_x^2$, conditionally called as a potential, where $\Omega = \omega - k \cdot V$; ω , V , C – accordingly frequency, wind velocity and speed of a sound is entered. All space is divided into two areas: 1) $U > 0$ is a zone of wave-guide distribution of an infrasound 2) $U < 0$ - zone of free distribution of an infrasound. Thus, the analysis of a potential allows to select in space of zone of the channel of infrasonic signals for values ω , k_x .

In activity the distribution of zones of the channel of an infrasound on a selected line and matching with experimental data of observations by a microbar is considered.

Оценка условий дальнего распространения микробаром на трассе Тромсе-Пекин

Акустические процессы играют весьма важную роль в физике атмосферы, обеспечивая передачу энергии как вдоль спектра от больших масштабов к малым, так и в пространстве. Поэтому акустические средства являются важным элементом мониторинга атмосферы, а так же основой дистанционного контроля за промышленной и военной деятельностью. При этом важным элементом систем контроля и мониторинга является модель акустического канала, позволяющая делать оценки доступности или недоступности источника сигнала в зависимости от координат и метеорологической обстановки. Фундаментальное и прикладное значение этой задачи таково, что в мире этим вопросом занимается много мощных научных групп, (в США, во Франции, Голландии, Швеции, Индии, а так же в Монголии) [1, 2]. Наметилось три подхода к решению проблемы:

1. Чисто эмпирический, заимствованный у сейсмологов – определение передаточных функций избранных трасс путем обработки большого материала по сезонам, времени суток и типу погоды;
2. путем адаптации существующих моделей атмосферы с учетом ветра на разных высотах;
3. путем расчета условий распространения на основе использования текущих данных аэрологического зондирования. В этой работе приводятся результаты исследования длинной трассы в духе третьего подхода.

Мы исходим из того, что классический, «скачковый» механизм позволяет хорошо объяснить распространение сигналов до расстояний порядка полутора тысяч километров. Поглощение (главным образом – нелинейное) на такой трассе относительно велико из-за того, что сигнал несколько раз «ныряет» в верхнюю атмосферу – область с сильным поглощением. При этом большая амплитуда сигнала не играет роли. Она обрезается при первом же заходе в нижнюю ионосферу. Таким образом, основным каналом распространения на большие расстояния является акустический волновод в области минимума температур при благоприятном направлении ветра.

Анализ условий распространения сигнала по акустическому волноводу основан на использовании некоторого интегрального показателя – «потенциала волновода»:

$$U = ((\omega - k_x \cdot V_x)^2 / c^2 - k_x^2), \quad (1)$$

где ω – круговая частота звуковой волны, k_x – горизонтальное волновое число, c – скорость звука, V_x – скорость ветра в направлении распространения волны. Сигнал проходит, когда U – положительное число. Предполагается, что на «стенке» волновода (в точке отражения) расположен узел скорости частиц в волне. Тогда получаем условие «квантования»:

$$2\pi \cdot n = U \cdot H \quad (2)$$

где H – эффективная высота волновода, n – целое число. Если θ – угол между направлением распространения и вертикалью, то:

$$\sin \Theta_n = [1 - (n \cdot \lambda / H)^2]^{1/2} - V_x / c \quad (3)$$

где λ – длина звуковой волны. Число $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ номер моды. Например, при $H = 10$ км, $\lambda = 3$ км в волноводе (без ветра) могут существовать четыре моды – нулевая, распространяющаяся вдоль оси волновода, первая, с $\theta_1 = 72.5^\circ$, вторая с $\theta_2 = 53.1^\circ$ и третья с $\theta_3 = 25.8^\circ$. Ветер существенно меняет эти углы. Например, встречный ветер 50 м/с «задирает» θ_2 до 75° (при скорости звука 300 м/с). На самом деле, вычисление эффективной высоты волновода достаточно сложная процедура и мы ее здесь касаться не будем.

Использование данных Интерактивной системы архивных метеоданных IDEAS

При моделировании дальнего распространения инфразвука важно знать структуру атмосферного канала (ААК). Структура ААК определяется пространственным распределением метеопараметров – температуры, силы и направления ветра. Такие данные можно получить, используя известные глобальные модели атмосферы, как MSISE 2000. Однако, эта модель воспроизводит пространственное распределение поля ветра недостаточно точно. В настоящей работе используются оперативные данные аэрологического зондирования атмосферы, полученные в рамках российско-американского проекта IDEAS (Investigation of Distributed Environmental Archives System). В этой системе аэрологические данные привязаны к узлам координатной сетки и интерполируются по долготе и широте с разрешением в 5 и 30 градусов. Метеорологические данные обеспечены практически в любой точке земной поверхности, включая градацию по высоте на уровнях 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20 и 10 миллибар. Таким образом, каждой координатной точке в системе IDEAS соответствует файл данных, содержащий информацию о временном распределении необходимых метеорологических параметров (температура, скорость и направление ветра) на 17 высотных уровнях. Анализируемый интервал времени охватывает 1986 год по 17 выбранным координатным точкам. Это пункты Тромсё (Норвегия), Мурманск (Печенга), остров Колгуев, Амдерма, Хальмер-Ю, Ныда (Ямал), Тарко-Сале (Ямал), Ратта (Ямал), Бахта (Красноярск. Кр.), Тея, Мотыгино, Красноярск, Тайшет, Иркутск, Улан-Уде, Улан-Батор и Пекин. Исследуемая трасса ориентирована на северо-восток Атлантики с азимутом около 320 градусов, что соответствует доминирующему приходу микробаромов по данным Инфразвукометрической станции ИСЗФ СО РАН «Бадары» в 1986 г. (рис. 1).

Результаты реконструкции инфразвуковой трассы

Следует сказать о некоторых важных ограничениях, которые были использованы в этой работе. Во-первых, при расчете условий распространения

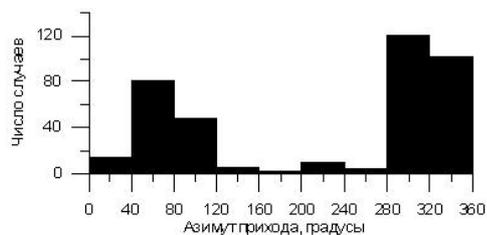


Рис. 1. Доминирующие направления прихода микробаромов на станции ИСЗФ СО РАН.

инфразвуковых сигналов по трассе положение источника полагалось фиксированным. Во-вторых, в расчетах пренебрегалось влиянием вертикальных компонент ветра. Действительно, величина вертикального ветра составляет всего 5–7 процентов от зонального ветра. На рис. 2 приведены результаты расчетов потенциала акустического канала U для некоторых характерных пунктов исследуемой трассы. Здесь представлен высотный разрез годового хода потенциала U . На рисунках черным цветом показаны минимальные значения U , а светлым цветом максимальные. По осям: вверх отложены геопотенциальные высоты (миллибары, геометрическая высота растет вниз), по оси абсцисс – время в единицах запусков метеозондов (4 раза в сутки, всего в году 1460 отсчетов). Таким образом, представленные на рис. 2 значения потенциала U имеют вид вы-

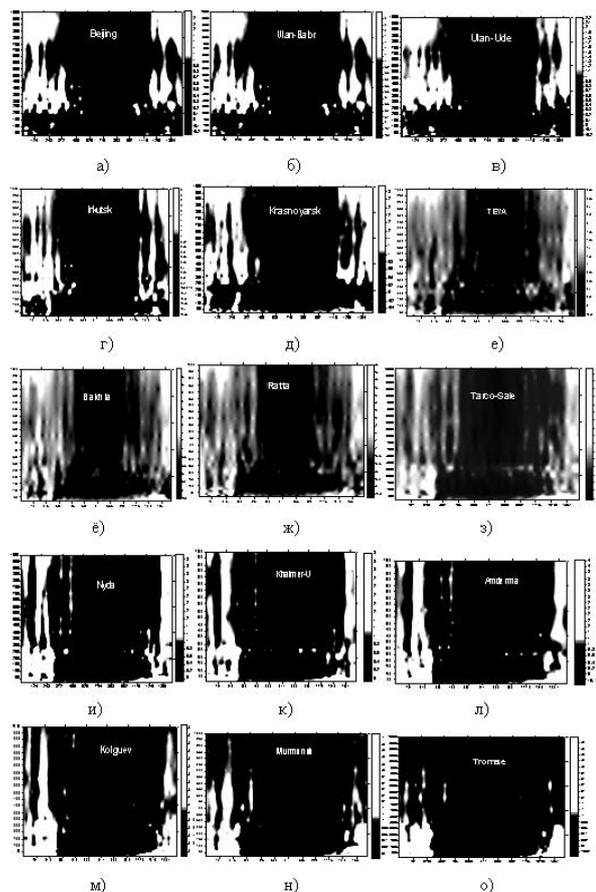


Рис. 2. Пространственно – временное изображение потенциала акустического канала. а – Beijing, б – Улан-Батор, в – Улан-Уде, г – Иркутск, д – Красноярск, е – Тея, ж – Бахта, з – Ратта, и – Тарко-Сале, к – Ныда, л – Хальмер-Ю, м – Амдерма, н – остров Колгуев, о – Мурманск (Печенга), о – Тромсё (Норвегия).

сотных разрезов его годового хода для пунктов а) - о). Характерными общими признаками всех исследуемых пунктов является то, что летом значения U минимальны (черный цвет). Зимой, напротив, величина U растет, и достигает максимального значения. Следует заметить, что зимой почти везде возникает приземный волновод, это видно на всех пунктах кроме м), н) и о) на рис. 2. Из представленных графиков можно видеть, что кроме явной летне-зимней асимметрии, в поведении потенциала U выделяются три характерные зоны. Первая зона – это область умеренно-низких температур атмосферы и умеренных ветров. Это область простирается от Пекина примерно до Красноярска. На рис. 2 а, б, в, г, д видно, что максимальные значения потенциала U группируются вокруг геопотенциальных высот 500-200 миллибар (5.5–11.8 км). Модовый состав акустического канала, например, для Иркутска, как следует из (3) при $H = 6.3$ км, $\lambda = 1.5$ км, $V_x = 40$ м/с, $c = 310$ м/с определяется, соответственно $\Theta_1 = 57.3^\circ$, $\Theta_2 = 48.5^\circ$ и $\Theta_3 = 34.6^\circ$. Вторая зона – охватывает область высоких широт и, следовательно, очень низких температур. Это север Красноярского края и Ямал. Например, на оси акустического волновода (пункт Ныда, геопотенциальная высота 150 миллибар) минимальная температура достигает минус 83°C при скорости ветра около 15 м/с. По - видимому, из-за значительного охлаждения зимней атмосферы ось акустического канала на Ямале смещается в область высот до 13.6 км (150 миллибар, рис. 2 з, и, к, л). Кро-

ме того, в этой зоне наблюдаются области с размытой по высоте формой потенциала U . Это пункты Тея (е), Бахта (ё), Ратта (ж). Здесь, вероятно, имеет место сложная ветровая система со встречным направлением, и распространение акустической энергии происходит с переходом в разное время с одного высотного уровня на другой. Наконец, третья зона, это область Северной Атлантики, для которой на некоторых высотных уровнях характерны умеренные ветра (~ 20 м/с) и также низкие температуры ($- 70^\circ\text{C}$). Акустический канал здесь наблюдается на высотах 10-12 км (150–200 миллибар). При этом в этой зоне отсутствует приземный волновод. В заключение выражаем глубокую благодарность Жижиному М.Н., руководителю Лаборатории Информационных Технологий МЦД за советы и ценные консультации по использованию системы IDEAS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Douglas P. Drob, 2003. Detailed specifications of the atmosphere for infrasound propagation modeling // SRR 2003 Proceedings 25th Seismic Research Review – Nuclear Explosion Monitoring: Building and Knowledge Base, 23-25 September, 2003, Tucson Arizona, <https://www.nemre.nnsa.doe.gov/review2003/papers/07-04.pdf>
2. Liszka L. Long distance propagation of infrasound from artificial sources // J. Acoust. Soc. Am. 1974. V. 56. P. 1383–1388.