

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

Влияние метеорологической обстановки на условия распространения инфразвука

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 12.11.2004 г.

Исследуется изменение азимута прихода микробаром – инфразвуковых сигналов – в зависимости от штормовых образований на акватории Северной Атлантики и Тихого океана, отмеченных по синоптическим картам. Анализируются связь азимутов микробаром с положением источника, а также связи основных характеристик микробаром с положением циклонов по трассе распространения и в пункте приема. Данные эксперимента сравниваются с моделью трассы и распространения инфразвука, построенной на основе современной модели атмосферы MSISE-2000.

Введение

Дальнее распространение инфразвуковых сигналов от штормовых областей морей и океанов – микробаром – обусловлено строением земной атмосферы. Высотное распределение температуры, а также направление ветра таковы, что в атмосфере для распространения инфразвуковых волн возникают атмосферные акустические каналы. Пространственная протяженность этих каналов может составлять несколько тысяч километров. Высоты, соответствующие дальнему распространению, относятся к первому и второму минимумам температуры, соответственно это $H = 15–20$ и $60–80$ км. На сегодняшний день нет ясного понимания механизма захвата и вывода акустической энергии атмосферными каналами и режима их работы. Поэтому ставится общая задача – изучить условия формирования и функционирования атмосферных акустических каналов с помощью естественного акустического излучения морей и океанов (микробаром) с привлечением современных моделей атмосферы и данных аэрологического зондирования атмосферы (высотный профиль направления и скорости ветра). В нашей работе предпринята попытка изучения влияния метеорологической обстановки на условия дальнего распространения и приема инфразвуковых сигналов от штормовых образований – микробаром и сравнения с расчетными данными, полученными на основе атмосферной модели MSISE-2000 [1,2].

Характеристика аэрологических данных

Данные аэрологического зондирования атмосферы получены с помощью ежедневных запусков метеорологических шаров-зондов. Запуски осуществлялись службой Иркутского Гидрометцентра в 1986 г. Использовались данные до высоты 30 км:

высотный профиль температуры, скорости ветра, направление ветра.

Современное состояние проблемы

Большой интерес к инфразвуковым волнам проявлялся в США в 60–70-х гг. W. Donn и D. Rind в результате 10-летней регистрации микробаром (ст. Палисейдс, шт. Нью-Йорк) от штормов в Атлантике, привлекая данные измерений других методов, получили процент времени отражения микробаром от различных высот, характеризующий продолжительное существование сильных восточных приливных ветров, ответственных за акустический канал.

На инфразвуковой станции «Бадары» с 1976 по 1993 г. проводились регулярные непрерывные наблюдения микробаром, приходящих как с Северной Атлантики, так и с северо-запада Тихого океана. Выполнена оценка времени существования акустических каналов для атлантических и тихоокеанских источников [3].

К настоящему времени в связи с тенденцией к запрещению ядерных испытаний организована Международная система мониторинга в рамках Договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний (Comprehensive Nuclear Test-Ban Treaty (CTBT)), в которую входят около 60 инфразвуковых станций, плотная мировая сеть метеорологических наземных станций, а также данные спутникового зондирования атмосферы.

Используемые данные и методы

Для расчета условий распространения инфразвука на большие расстояния необходимо знать структуру атмосферного волноводного канала, т.е. распределение температуры и скорости ветра в диапазоне высот от 15 до 45 км. Для этого используются

стандартные данные аэрологического зондирования атмосферы станций Гидрометцентра, получаемые со скважностью 1 км.

С другой стороны, современные глобальные атмосферные модели, например MSISE-2000 [2], позволяют получить такое распределение над каждой точкой земного шара для любого момента времени. Входными параметрами для модели являются дата, время, координаты места анализа, а также индексы солнечной и магнитной активности.

Без ограничения общности можно считать атмосферу горизонтально однородной средой для длин волн много меньше размеров синоптических образований (т.е. для $\lambda \ll 100 \div 500$ км). Для длин волн много меньше вертикальной неоднородности атмосферы — высоты однородной атмосферы, влияние силы тяжести можно не учитывать, равно как и кривизну земной поверхности. Тогда для гармоника с частотой ω скорость смещения частиц в волне можно записать в виде

$$u = A(z)\exp(-ik_x x), \quad (1)$$

где k_x — горизонтальная компонента волнового вектора; ось z направлена вертикально вверх. При $\lambda < H = c^2/\gamma g$, где $c^2 = \gamma P_{0g}/\rho_0$ (индекс «0» у символа означает, что он соответствует нулевому уровню атмосферы — уровню моря; γ — показатель адиабаты; g — ускорение свободного падения; P_0 — атмосферное давление; ρ — плотность), распространение звука описывается уравнением

$$u'' + Uu = 0, \quad (2)$$

где

$$U = \Omega^2/c^2 - k_x^2$$

— некоторая функция скорости звука (температуры) и скорости горизонтального ветра V , поскольку

$$\Omega = \omega - k_x V.$$

Функцию U мы будем далее условно называть потенциалом [4]. Все пространство, в котором распространяется звук, делится на две области: при $U > 0$ — это область волноводного распространения, при $U < 0$ — свободного распространения звука. Таким образом, анализ потенциала позволяет выделить в пространстве области канализации звука для заданных значений ω и k_x . Очевидно, что в волноводе скорость звука минимальна на оси волновода $z = z_c$ и увеличивается вверх и вниз от оси.

Роль горизонтального ветра сводится к тому, что он меняет частоту волны и величину горизонтальной проекции волнового ветра. При этом ω переходит в $(\omega - kV)$, а k_x в $k_x(1 + V/c)$. Таким образом, «попутный» ветер уменьшает частоту и увеличивает горизонтальное волновое число. Сигнал как бы «прижимается» к оси волновода. Условия канализации при этом, естественно, улучшаются. При «встречном» ветре получается обратная картина. Интересно отметить, что такое действие ветра наблюдается и в действительности. Так, согласно [3] приход микробаром от штормов в Северной Атлантике наблюдается при западном ветре, а от штормов

в Тихом океане — при восточном. Таким образом, для выяснения возможности распространения сигналов на значительные расстояния знание пространственного (прежде всего — высотного) распределения скорости звука и скорости ветра имеет ключевое значение.

Методика анализа экспериментальных данных

Экспериментальные данные азимута прихода микробаром анализировались на основе регулярных измерений на Инфразвукометрической станции ИСЗФ СО РАН. Для примера взят январь 1986 г. как наиболее характерный период зимних условий распространения инфразвука и наиболее высокой штормовой активности в источнике. Следует отметить, что данные за другие годы имеют те же тенденции. Результаты анализа представлены на рис. 1.

По горизонтали отложено время суток, а по вертикали — даты и угловая градация прихода инфразвуковых сигналов и направления ветра, взятого на высоте минимума высотного профиля температуры. Также для анализа и интерпретации углового распределения прихода инфразвуковых сигналов были использованы и метеорологические данные — азимут направления ветра. По минимальному значению температуры уточнялось положение оси атмосферного акустического канала, где определялись направление горизонтального ветра и его соответствие направлению распространения инфразвука. Данные по азимуту прихода микробаром и направления ветра поделены на две градации: 0–180 и 180–360°, т.е. западное и восточное направления. Из этих условий производилась отборка принимаемых инфразвуковых сигналов, соответствующих Северной Атлантике и Тихому океану.

Предварительные результаты анализа экспериментальных данных и сравнение с расчетными

Результаты азимутального распределения углов прихода микробаром показаны на рис. 1, из которого видно, что первые 19 дней января 1986 г. отмечены приходом микробаром с западного направления (Северная Атлантика), а начиная с 20 января наблюдается в основном приход микробаром с северо-запада Тихого океана. Действительно, в январе 1986 г. штормовая активность Северной Атлантики по синоптическим данным была очень высока. На рис. 2 показан пример синоптической ситуации в этом регионе за 12 января 1986 г., где видно наличие обширного циклона с глубиной около 980 мбар.

Из рис. 1 следует, что большую половину января 1986 г. (19 дней) наблюдался приход микробаром с азимутом 180–360° т.е. с северо-запада (источник Северная Атлантика), когда азимут прихода инфразвуковых сигналов совпадал с северо-западным направлением ветра в минимуме температурного профиля (на оси атмосферного волноводного канала).

Дата	Направл. ветра	Азимут	Часы																							
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	СЗ	East																								
		West																								
2	СЗ	East																								
		West																								
3	СЗ	East																								
		West																								
4	СЗ	East																								
		West																								
5	СЗ	East																								
		West																								
6	СЗ	East																								
		West																								
7	СЗ	East																								
		West																								
8	СЗ	East																								
		West																								
9	СЗ	East																								
		West																								
10	СЗ	East																								
		West																								
11	СЗ	East																								
		West																								
12	СЗ	East																								
		West																								
13	СЗ	East																								
		West																								
14	СЗ	East																								
		West																								
15	СЗ	East																								
		West																								
16	СЗ	East																								
		West																								
17	СЗ	East																								
		West																								
18	З	East																								
		West																								
19	СЗ	East																								
		West																								
20	СЗ	East																								
		West																								
21	С	East																								
		West																								
22	СЗ	East																								
		West																								
23	СЗ	East																								
		West																								
24	СЗ	East																								
		West																								
25	СЗ	East																								
		West																								
26	СЗ	East																								
		West																								
27	СЗ	East																								
		West																								
28	ЮЗ	East																								
		West																								
29	З	East																								
		West																								
30	СЗ	East																								
		West																								
31	С	East																								
		West																								

Рис. 1. Азимуты прихода микробаром и направление ветра. Станция «Бадары», январь 1986 г.

Вторую часть января в основном наблюдался приход инфразвуковых сигналов с восточного направления (Тихий океан). В этом случае азимут прихода инфразвуковых сигналов совпадает с направлением ветра, зафиксированным на оси атмосферного акустического канала. Таким образом, ветер на высоте атмосферного волновода обладает фильтрующи-

ми свойствами и определяет пропускную способность атмосферного акустического канала.

К наиболее активным и показательным в изучаемом интервале относятся даты 6 и 12 января 1986 г. (приход инфразвука с Северной Атлантики), а также 21 и 22 января 1986 г. (рис. 3) (приход инфразвука с акватории Тихого океана).

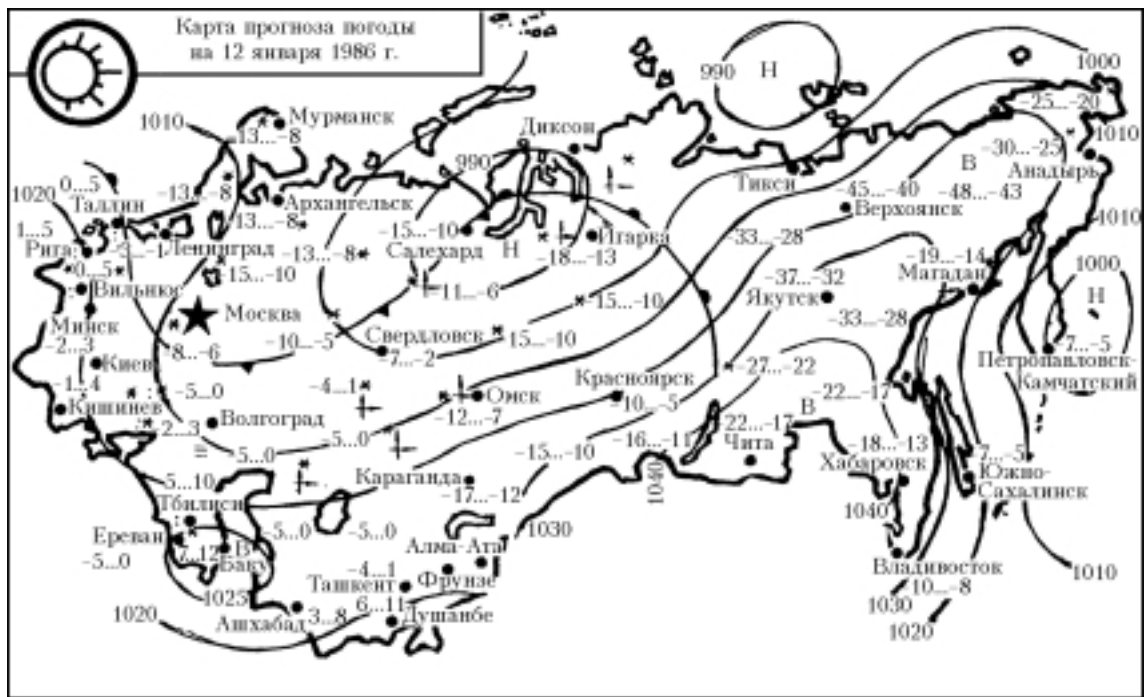


Рис. 2. Пример синоптической ситуации на акватории Северной Атлантики на 12 января 1986 г.

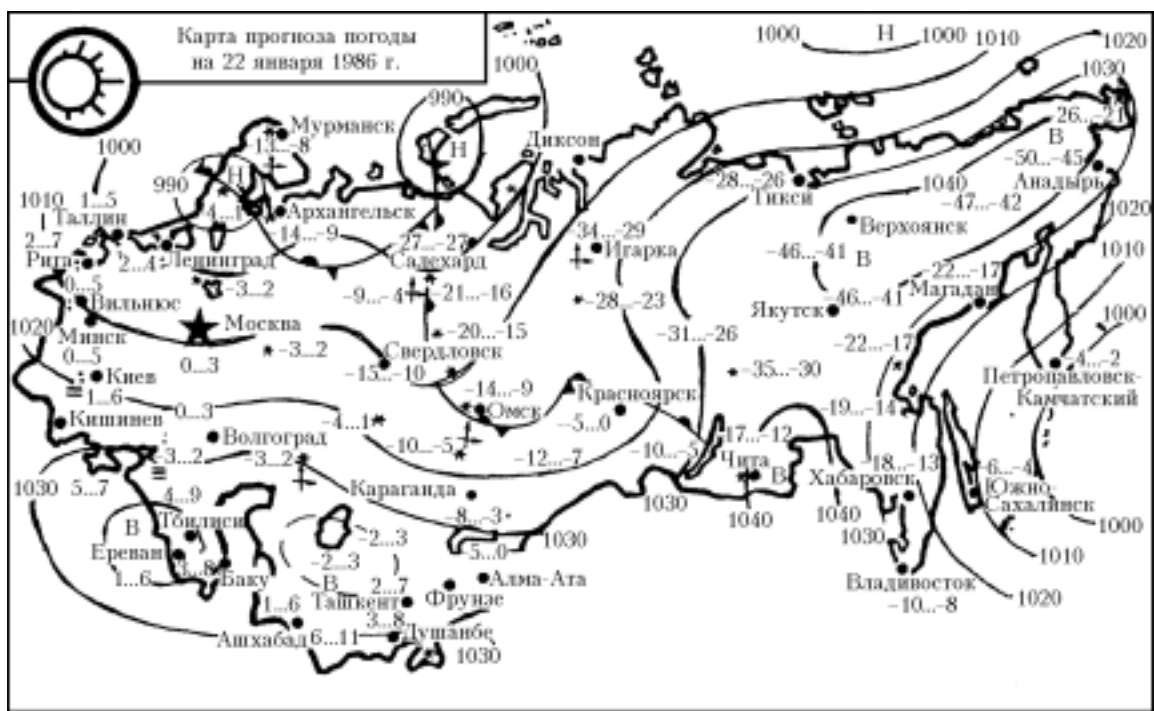
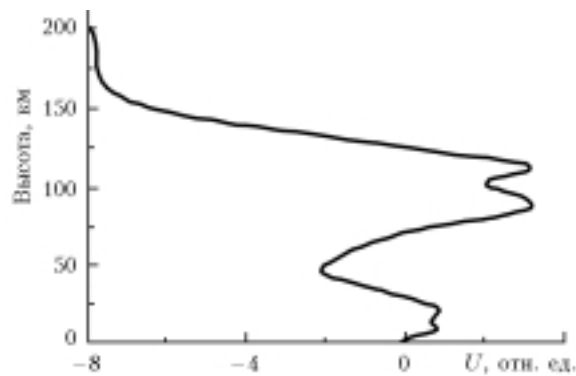


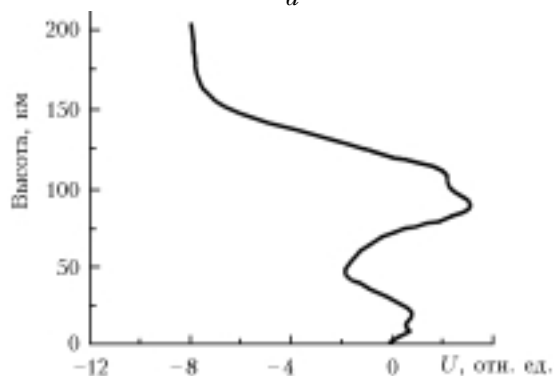
Рис. 3. Пример синоптической ситуации на акватории Тихого океана 22 января 1986 г.

Эти два направления прихода сигналов отвечают, соответственно, северо-западному и северо-восточному направлениям ветра. Посмотрим, как теоретические представления описывают эффективный коэффициент преломления, отвечающий за формирование атмосферного акустического канала — параметр U , условно называемый потенциалом.

На рис. 4 и 5 показаны соответствующие этим датам расчеты эффективного коэффициента преломления акустического канала U в зависимости от высоты. Из расчетов следует, что на высотах ниже 20 км, где $U > 0$, т.е. волновой вектор вещественный, имеет место волноводное распространение инфразвука.



a

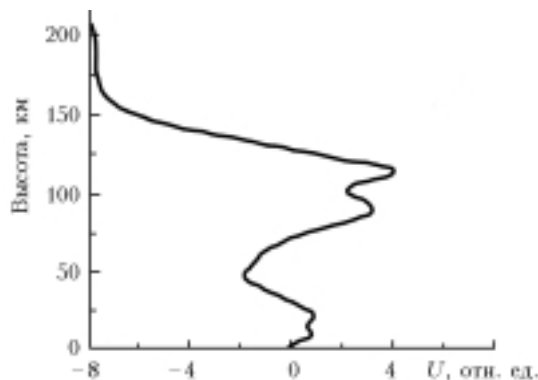


б

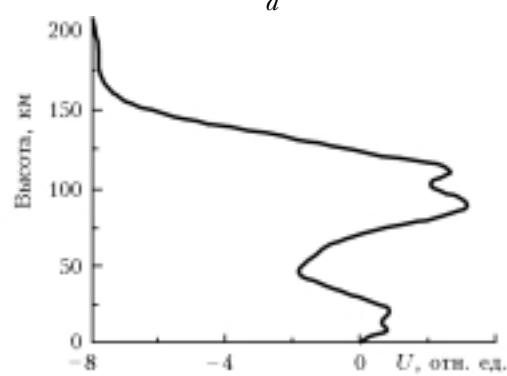
Рис. 4. Эффективный коэффициент преломления: *a* – 6 января 1986 г.; *б* – 12 января 1986 г.

Выше 25 км до высот около 50 км, где параметр $U < 0$ (волновой вектор является мнимым), волновод отсутствует и наблюдается зона свободного распространения инфразвука. На высотах около 100 км параметр U для атмосферного волновода также положителен и свидетельствует о наличии верхнего волноводного канала. Однако, учитывая, что прохождение в этом канале на большие расстояния связано со значительным затуханием сигнала, мы полагаем этот канал малоэффективным.

Прохождение микробаром с акватории Северной Атлантики до внутриконтинентальной Инфразвукометрической станции «Бадары» в Бурятии 6 и 12 января 1986 г. укладывается в рамки классического представления о волноводном распространении инфразвуковых сигналов, и мы имеем удовлетворительное согласие наблюдаемых данных с расчетными. Для дат 21 и 22 января, когда действует тихоокеанский источник (см. рис. 3), расчеты показывают также наличие атмосферного



a



б

Рис. 5. Эффективный коэффициент преломления: *a* – 21 января 1986 г.; *б* – 22 января 1986 г.

акустического канала ($U > 0$, см. рис. 5) на высотах около 20 км.

Работа выполнена при поддержке гранта МНТЦ № 1341.

1. Hedin A.E. Extension of the MSIS Thermosphere Model into the Middle and Lower Atmosphere // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P. 1159 [http://uap-www.nrl.navy.mil/models_web/miss_home/htm].
2. Hedin A.E., Fleming E.L., Manson A.H., Schmidlin F.J., Avery S.K., Clark R.R., Franke S.J., Fraser G.J., Tsuda T., Vial F., Vincent R.A. Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere // J. Atmos. Terr. Phys. 1996. V. 58. P. 1421–1447 [http://nssdc.gsfc.nasa.gov/space/model/atmos/hwm.htm].
3. Сорокин А.Г. Исследование дальнего распространения инфразвука от взрывов и океанских штормов: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Иркутск, 1995. 115 с.
4. Пономарев Е.А., Сорокин А.Г., Руденко Г.В. Исследование характеристик инфразвукового фона для оценки пороговой чувствительности инфразвукового метода контроля за проведением ядерных испытаний: Отчет по проекту МНТЦ 1341. Иркутск, 2003.

I.Yu. Lobycheva, E.A. Ponomarev, G.V. Rudenko, A.G. Sorokin. Influence of meteorological situation on the infrasound propagation.

In this paper, we analyze the change in the azimuth of arrival of microbaroms – infrasound signals from storm formations in the North Atlantic and the Pacific, recorded on weather charts. The relation between the microbarom azimuth and the position of the source is analyzed along with the relations between the main characteristics of microbaroms and the positions of cyclones in the propagation path and at the observation site. Experimental data are compared with the infrasound propagation path model constructed on the basis of the modern MSISE-2000 model of the atmosphere.