Солнечно-земная физика. Вып. 14 (2009) С. 114–118

УДК 551.596

О МОДЕЛИРОВАНИИ АТМОСФЕРНОГО АКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА ДЛЯ НЕКОТОРЫХ ЯДЕРНЫХ ТЕСТОВ В РАЙОНЕ БЫВШЕГО СОВЕТСКОГО СЕМИПАЛАТИНСКОГО ПОЛИГОНА

А.Г. Сорокин, И.Ю. Лобычева

ON SIMULATION OF ATMOSPHERIC ACOUSTIC CHANNEL FOR SOME NUCLEAR TESTS AT THE FORMER SOVIET TEST SITE OF SEMIPALATINSK

A.G. Sorokin, I.Yu. Lobycheva

В работе приводятся данные регистрации инфразвука от удаленных ядерных взрывов, произведенных в районе бывшего Семипалатинского полигона, на инфразвуковой станции ИСЗФ СО РАН Бадары в Тункинском районе Республики Бурятии. Оценивается состояние атмосферного акустического канала (ААК) по трассе распространения, результаты моделирования ААК сопоставляются с данными эксперимента.

This paper presents data on recording of infrasound from distant nuclear explosions, set off in the former soviet test site of Semipalatinsk. The data were obtained at infrasonic station Badary of the Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS in the Tunkinsky region in the Buryat Republic. We assess the state of the atmospheric acoustic channel (AAC) along the propagation path. Results of the AAC simulation are compared with experimental findings.

Введение

В 1970-е годы СибИЗМИР СО АН СССР была создана инфразвуковая станция СибИЗМИР для исследования малоамплитудного инфразвука естественного происхождения (микробаром). Технические характеристики приемной станции и методика обработки данных регистрации приводятся в [Пономарев и др., 1974; Афраймович идр., 1990].

В 1980-е годы была осуществлена попытка регистрации инфразвуковых сигналов от подземных ядерных взрывов (ПЯВ), производимых на бывшем советском ядерном полигоне в районе Семипалатинска. Из четырех ядерных взрывов, произведенных в 1988 г., инфразвуковые сигналы были зарегистрированы только для двух. С развитием баз данных по пространственно-временной структуре поля ветра и температуры появилась возможность построить модель распространения инфразвуковых сигналов от источников различного типа, важную для понимания функционирования атмосферного акустического канала (ААК). Оценка состояния ААК в моменты ПЯВ позволяет понять, почему некоторые из сигналов от ПЯВ не были зарегистрированы в СибИЗМИР.

Характеристика атмосферного шума в районе расположения инфразвуковой станции ИСЗФ СО РАН

Для успешного наблюдения в данном месте инфразвука малой амплитуды от удаленных источников необходимо знание метеорологической обстановки и среднего уровня инфразвукового шума в регистрируемом диапазоне. Высотное распределение метеорологических параметров (температура, направление и скорость ветра) определяет состояние акустического канала в зоне приема, в то же время ветровые пульсации на уровне земной поверхности приводят к увеличению атмосферного шума, препятствующего уверенной регистрации инфразвуковых сигналов.

С целью определения потенциальных возможностей приема сигналов от удаленных импульсных источников были проведены непрерывные измерения инфраакустического шума в диапазоне 0.1–1 Гц в течение длительного периода времени. Измерялись также соответствующие метеорологические величины – скорость и направление ветра, температура, статическое давление атмосферы. Синхронные измерения инфразвукового шума и соответствующих метеопараметров осуществлялись в течение первых 100 с каждого часа. На основе полученных данных рассчитывались среднемесячные значения параметров.

В табл. 1 и 2 представлены некоторые данные, характеризующие метеорологическую обстановку и средний инфразвуковой фон соответственно за зимний период 1986 г. (январь–март, октябрь–декабрь). При этом размах колебаний давления приводится отдельно для различных видов атмосферного шума (тип P1 – коррелированный инфразвуковой шум, тип P2 – шум в безветренную погоду отдельно и тип P3 – шум в присутствии ветра плюс шум в безветренную погоду. Из табл. 1 и 2 видно, что увеличение шума типа P3 в феврале и марте прямо связано с увеличением средней скорости ветра в этот же период [Ерущенков и др., 1991].

Данные, представленные в табл. 1 и 2, показывают также, что среднемесячный шум в присутствии

Таблица 1

Среднемесячные данные метеорологических величин за период 1986 г.

Месяц, 1986 г.	Скорость ветра, м/с		Направление ветра, град		Температура, град	
	1	2	1	2	1	2
Январь	744	0.3	284	126	744	–23
Февраль	672	0.5	283	130	672	–19
Март	744	1.3	171	140	744	–7
Октябрь	744	0.5	381	115	744	3
Ноябрь	696	0.5	439	120	696	–13
Декабрь	695	0.3	269	106	696	–23

Таблица 2

Средний размах колебаний инфразвукового фона в диапазоне 0.1–1 Гц, 10^{-1} Па

Месяц, 1986 год	Кол-во часов в месяце	P1		P2		P3	
		1	2	1	2	1	2
Январь	744	247	1.2	601	1.1	744	1.2
Февраль	672	119	1.0	548	0.8	672	1.3
Март	744	33	0.8	423	0.8	744	1.9
Октябрь	744	68	1.8	544	0.7	744	1.0
Ноябрь	720	218	1.6	524	1.1	680	1.3
Декабрь	744	122	1.3	483	1.3	591	1.4
Общее время	4368	807		3123		4175	

Примечание: 1 – количество часов наблюдений, 2 – среднее значение.

ветра плюс шум в безветренную погоду (Р3) достигает 0.19 Па (в марте 1986 г.), а средняя амплитуда фонового инфразвука Р1 составляет около 0.18 Па (в октябре 1986 г).

Видно, что в течение некоторого времени (~19 % от общей продолжительности регистрации) наблюдается инфразвуковой шум Р1 (микробаромы) с максимальным размахом 0.18 Па. Это естественным образом ограничивает нижний порог регистрируемых инфразвуковых сигналов.

Шум в отсутствие ветра Р2 с максимальным размахом 0.13 Па наблюдается большую часть времени (71 %), что также снижает возможности нижнего порога обнаружения инфразвуковых сигналов на уровне 0.13 Па. Остальное время приходится на ветреный период, когда при скорости ветра больше 5 м/с пространственные инфраакустические фильтры становятся неэффективными, а прием инфразвуковых сигналов невозможным.

В табл. 3 показаны характеристики нескольких ядерных взрывов, регистрация которых была организована на станции СибИЗМИР в 1988 г. Видно, что из четырех взрывов реально наблюдались только два. При этом азимут зарегистрированных сигналов соответствует азимуту Семипалатинска и позволяет однозначно идентифицировать инфразвуковые сигналы. Заметим, что уровень атмосферного шума, присутствовавший на момент наблюдения взрыва 06.02.1988 г. на станции, был высок для уверенной регистрации, и, возможно, поэтому сигнал ПЯВ не был обнаружен. Таким образом, можно считать, что условия приема удаленных инфразвуковых сигналов на станции управляются не только локальными метеорологическими условиями, определяющими уровень атмосферного шума, а вообще и метеорологическим состоянием верхней и средней атмосферы, влияющим на формирование атмосферных акустических каналов. Для того чтобы сформировать представление о дальнем распространении инфразвука, в этой работе используются принцип модельного описания трассы распространения в ААК.

Напомним, что принципы модельного описания трассы распространения в ААК обсуждались ранее [Ponomarev, et al., 2006; Sorokin, Ponomarev., 2008], и здесь применяется методика анализа условий распространения сигнала по акустическому волноводу, основанная на использовании некоторого интегрального показателя – «потенциала ААК»:

$$U = (\omega - k_x V_{x)})^2 / c^2 - k_x{}^2, \qquad (1)$$

где ω – круговая частота звуковой волны, k_x – горизонтальное волновое число, c – скорость звука, V_x – скорость ветра в направлении распространения волны. Сигнал свободно распространяется в атмосфере, когда $U>0$, и не распространяется там, где $U<0$. Предполагается, что на «стенке» ААК (в точке отражения) расположен узел скорости частиц в волне, и скорость ветра невелика по сравнению со скоростью звука. Ниже мы рассмотрим состояние ААК по трассе Семипалатинск–Иркутск для ядерных взрывов, приведенных на сайте Международной системы мониторинга ядерных взрывов [http://www.seismo.ethz.ch/bsv/nuclear_explosions/soviet_union.html] и показанных на рис. 1 и в табл. 3.

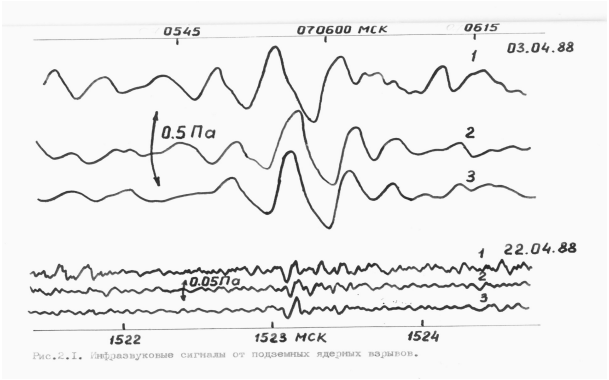


Рис. 1. Инфразвуковые сигналы от подземных ядерных взрывов, зарегистрированные на инфразвуковой станции СибИЗМИР 3 апреля 1988 г. и 22 апреля 1988 г. Вверху – инфразвуковой сигнал, зарегистрированный 3 апреля 1988 г., а внизу – 22 апреля 1988 г. Время московское (мск).

Пространственно-временное распределение потенциала ААК по данным IDEAS

На рис. 2 приведены результаты расчетов потенциала U акустического канала для некоторых характерных пунктов исследуемой трассы на основе данных системы IDEAS. В этой системе аэрологические данные привязаны к узлам координатной сетки и интерполируются по долготе и широте с разрешением 2.5, 5 и 30 град. Максимальная высота зондирования достигает 10 мбар (около 30 км). Более подробные сведения можно получить на сайтах системы IDEAS (серверы проекта IDEAS в России – http://teos1.wdcb.ru/esse, в США – http://ideas.ngdc.noaa.gov) и в http://teos1.wdcb.ru/esse.

На рис. 2, *а* представлен высотный разрез годового хода потенциала U для Иркутска. Черным цветом показан потенциал $U<0$, отображающий зоны запирания (нераспространения), а светлым – потенциал $U>0$, указывающий на зоны свободного распространения сигнала. По оси ординат отложены изобарические высоты (миллибары, геометрическая высота растет вниз), по оси абсцисс – время в единицах запусков метеозондов. Таким образом, представленные значения потенциала U имеют вид высотных разрезов годового хода состояния акустического канала для указанных пунктов. Отчетливо видны чередующиеся состояния ААК с периодом 7–10 дней, по-видимому, связанные с синоптическими явлениями. На рис. 2, *б* показана схема прохождения акустической трассы Семипалатинск–Иркутск.

Для исследования общего состояния трассы ААК были рассчитаны потенциалы ААК в направлении инфразвуковой станции Иркутск–Бадары на северо-восток. В направлении станции Иркутск–Бадары представлены расчеты для шести пунктов. Это пункты: Семипалатинск (50° N, 80° E;), Усть-Каменогорск (50° N; 87.5° E), Горно-Алтайск (52.5° N; 95° E), Иркутск (52.5° N; 105° E), Улан-Удэ (52.5° N; 107.5° E), Чита (52.5° N; 113.5° E) (рис. 2, *в*). В северо-восточном направлении трасса акустического канала имеет вид эпизодически образующихся зон ААК, обеспечивающих прохождение инфразвукового сигнала.

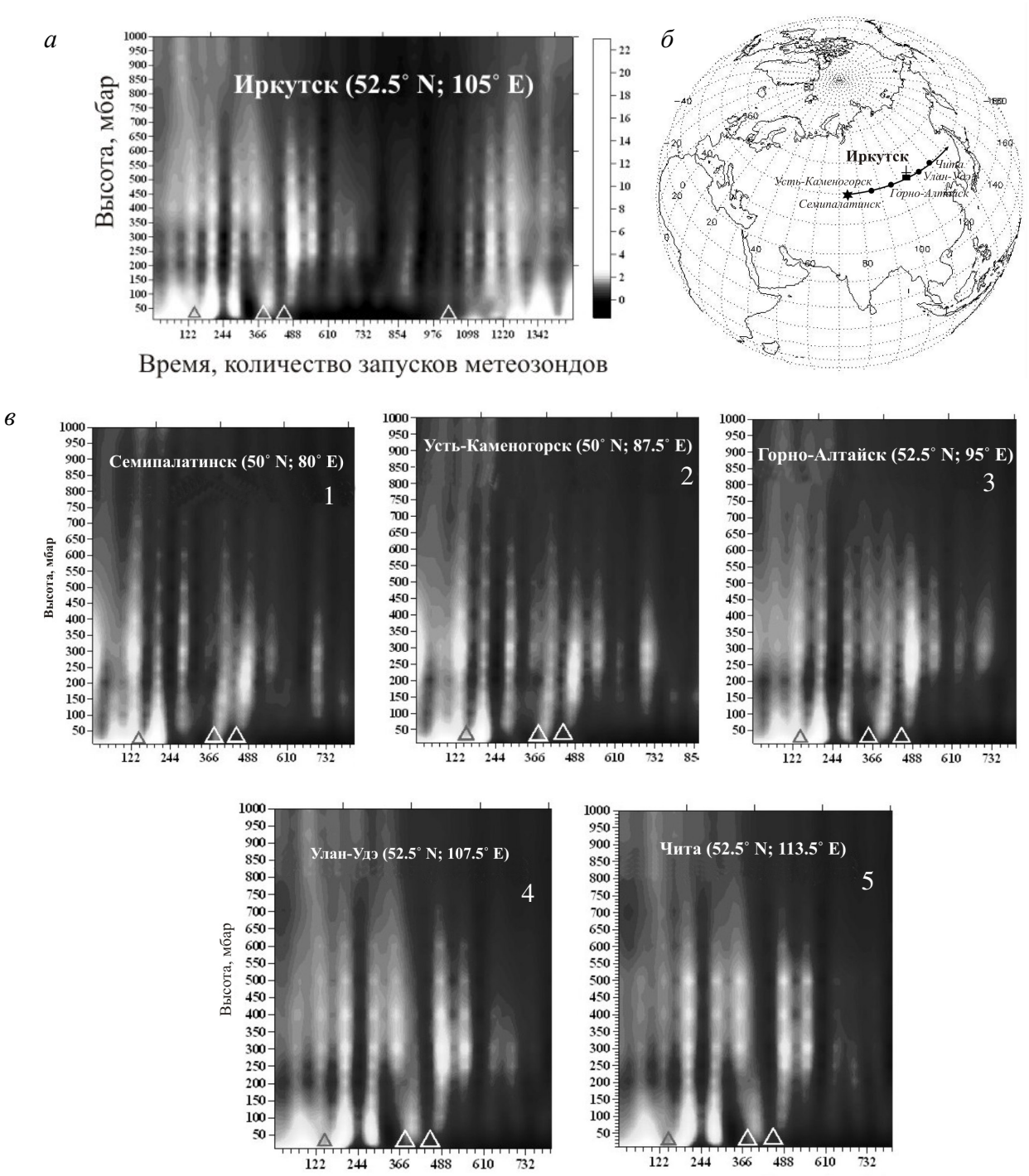


Рис. 2. Расчет ААК для некоторых пунктов трассы Иркутск–Семипалатинск, построенный на основе данных IDEAS за 1988 г.:

а) пространственно-временное распределение потенциала ААК для пункта Иркутск в 1988 г.;

б) общая схема трассы акустического атмосферного канала Семипалатинск–Иркутск;

в) фрагменты годового распределения потенциала ААК для некоторых пунктов трассы ААК. 1 – Семипалатинск; 2 – Усть-Каменогорск; 3 – Горно-Алтайск; 4 – Улан-Удэ; 5 – Чита.

Примечание: по горизонтальной оси отложено время в единицах запусков метеозондов, по вертикальной оси – высота в миллибарах (высота растет вниз).

Наибольший интерес представляют состояния ААК в моменты проведения взрывов, подтвержденных наблюдениями. Действительно, из серии тестовых взрывов были зарегистрированы только два инфразвуковых сигнала (рис. 1) – 3 апреля 1988 г., мощность 150 кт, и 22 апреля 1988 г., мощность 20 кт. На рис. 2, *а*, соответствующем пункту Иркутск, момент регистрации взрыва 3 апреля 1988 г. соответствует позиции оси на абсцисс 380, дата взрыва 22 апреля 1988 г. соответствует позиции на оси абсцисс 452, а взрыв 14 сентября 1988 г. соответствует позиции 1033 (показаны треугольными метками). Видно, что зона ААК с положительным потенциалом 3 апреля 1988 г. могла способствовать прохождению инфразвукового сигнала на станцию Иркутск–Бадары на высоте до 30 км, однако границы ААК размыты и

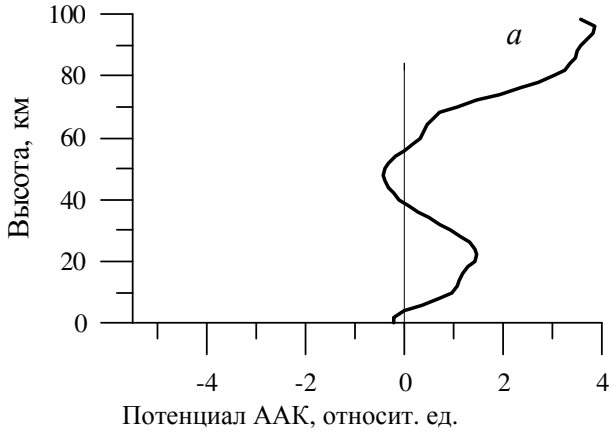
запирающий слой отсутствует, что говорит в пользу только свободного распространения, а 22 апреля 1988 г. канала вообще нет, поскольку потенциал ААК в этой зоне близок к отрицательным значениям и соответствует зоне нераспространения.

Тестовый взрыв мощностью 150 кт, произведенный 14 сентября 1988 г. на Семипалатинском полигоне, регистрировался средствами инфразвукового мониторинга на инфразвуковой станции Иркутск–Бада-ры. В результате мониторинга инфразвуковой сигнал от взрыва не был зарегистрирован. Наличие зоны нераспространения в ААК с отрицательным потенциалом (черный цвет) на рис. 2, *а* (пункт Иркутск) на момент 14 сентября 1988 г. может объяснить отсутствие инфразвукового сигнала. Результаты моделирования показывают, что отсутствие действующего ААК на момент взрыва 14 сентября 1988 г. связано с образованием на высотах до 30 км зоны нераспространения с $U<0$ (темный цвет) и, соответственно, объясняет отсутствие инфразвукового сигнала на приемной станции на момент регистрации.

По данным IDEAS на нижних высотах (до 30 км, рис. 2), для события 03.04.1988 г. имеются условия для свободного распространения. Однако зарегистрированный инфразвуковой сигнал от события 22.04.1988 г. не может быть удовлетворительно объяснен только на основе данных IDEAS, которые, к тому же, ограничены высотой 30 км. Поэтому далее обращаемся к модели MSIS-2000, которая охватывает больший диапазон высот.

При моделировании дальнего распространения инфразвука важно знать структуру атмосферного акустического канала. Структура ААК определяется пространственным распределением температуры, скорости и направления ветра. Такие данные можно получить, используя такую известную глобальную модель атмосферы, как MSIS-2000 и модель ветров HWM-93.

На рис. 3 показано высотное распределение потенциала ААК [Ponomarev, et al., 2006; Sorokin, Ponomarev., 2008], построенное на основе моделей MSIS-2000 и HWM-93 и соответствующее датам взрывов на Семипалатинском полигоне 03.04.1988, 22.04.1988 и 14.09.1988 г. Волноводному распространению соответствует условие, когда потенциал ААК $U<0$ (имеется запирающий слой). При $U>0$ происходит скачковое распространение либо сигнал уходит в термосферу.



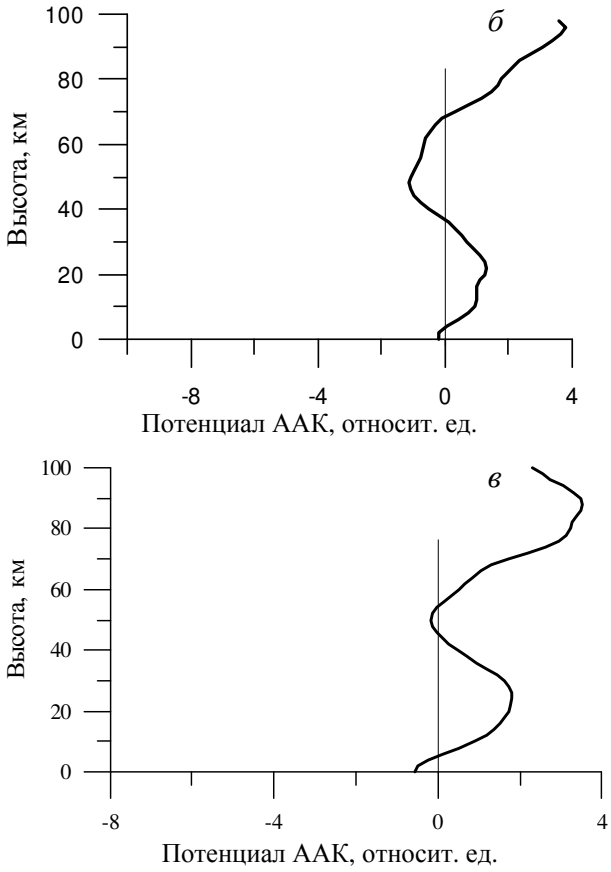


Рис. 3. Высотный профиль потенциала ААК U для Иркутска на момент взрыва: 03.04.1988 – *а*; 22.04.1988 – *б*; 14.09.1988 – *в*.

На рис. 3, *а* представлен вид вертикального профиля потенциала акустического канала, характеризующего его волноводные свойства на 03.04.1988 г. для Иркутска. Здесь, в районе приемной инфразвуковой станции Иркутск–Бадары, расчеты по модели MSIS-2000 и HWM-93 на высотах около 50 км дают отрицательные значения потенциала ААК, указывающие на наличие запирающего слоя. В пространстве атмосферы между запирающим слоем и земной поверхностью обычно и образуется ААК с эффективной шириной, соответствующей интервалу высот между двумя запирающими слоями. Таким образом, согласно моделям MSIS-2000 и HWM-93 для даты 3 апреля 1988 г., на высоте около 50 км виден запирающий слой, обеспечивающий существование атмосферного акустического канала.

При распространении сигнала в ААК представляет интерес поведение границ АКК, особенно верхней (зона запирания А), где $U<0$ (выражение (1)), поскольку эта зона является потенциальным барьером для акустической энергии, уходящей в верхнюю атмосферу. Эффективность такого барьера можно оценить, интегрируя потенциал U акустического канала от некоторой высоты h_1 до h_2 и следуя методике [Ponomarev, et al., 2006; Sorokin, Ponomarev., 2008]:

$$I_A = \exp(A), \text{ где } A = \int_{h1}^{h2} \sqrt{|U|}\,dh. \qquad (2)$$

Далее мы будем считать «запирание» сигнала в волноводе эффективным, если просачивание через запирающий слой будет не более 0.1 от величины сигнала. Толщину запирающего слоя и его эффективность можно оценить, используя выражение (2). Так, согласно модели MSIS, запирающий слой начинает проявляться от высоты 38.8 км, где величина $U<0$. Необходимая толщина запирающего слоя с 10-кратным эффектом запирания наблюдается уже на высоте 44.26 км. Толщина эффективного запирающего слоя составляет около 5.45 км.

Состояние ААК на 22 апреля 1988 г. (рис. 3, *б*) аналогично состоянию ААК 3 апреля 1988 г., при этом здесь мощность источника существенно ниже (около 20 кт). Тем не менее, как видно из рис. 1, инфразвуковой сигнал прошел через ААК и был обнаружен на станции Иркутск–Бадары. На высоте около 50 км, согласно модели MSIS-2000, в этом случае также наблюдается запирающий слой, способствующий формированию ААК. Следуя выражению (2) для расчета структурных параметров ААК, получаем, что необходимая толщина запирающего слоя с 10-кратным эффектом запирания наблюдается на высоте 47.22 км. При этом толщина эффективного запирающего слоя составляет около 5.52 км. Вероятно, был обеспечен атмосферный акустический канал на высоте около 50 км.

Если обратиться к дате 14 сентября 1988 г. и рассмотреть высотный профиль потенциала ААК для Иркутска (рис. 3, *в*), то можно увидеть, что профиль потенциала практически не переходит через ноль, т. е. почти не имеет отрицательных значений на стратосферных высотах. В этом случае запирающий слой очень слабый или вообще отсутствует, и поэтому существование ААК на этих высотах невозможно.

Рисунки 3, *а* и 3, *в* соответствуют двум разным подземным ядерным взрывам с одинаковой мощностью, произведенным на Семипалатинском полигоне. Разница состоит в том, что инфразвуковой сигнал 3 апреля 1988 г. (рис. 3, *а*) был зарегистрирован, а сигнал от взрыва 14 сентября 1988 г. (рис. 3, *в*) – нет. Анализ соответствующих распределений потенциала акустического канала показывает, что в первом случае приемная инфразвуковая станция Иркутск–Бадары находилась в зоне волноводного распространения, во втором – вне ее.

Можно предположить, что искомые инфразвуковые сигналы 3 апреля и 22 апреля 1988 г. были приняты отраженными в атмосфере на высоте около 50 км. Следует заметить, что приведенные примеры характеризуют метод весьма условно, поскольку содержат некоторые допущения.

Выводы

Приведенная выше методика оценки состояния атмосферного акустического канала была апробирована на тестовых источниках инфразвука. Эта методика позволяет объяснить прохождение либо отсутствие инфразвука на станции регистрации соответствующим состоянием атмосферного акустического канала. Если канал существует и функционирует, то можно определить его высотное положение, эффективную толщину запирающего слоя и положение виртуальных «стенок». Реальная картина распространения в атмосферном волноводе много сложнее, и существует еще достаточно сложных процессов, которые следует учитывать в реальном распространении. Для ясного понимания результатов дальнего распространения инфразвука явно недостаточно знания «средних» параметров атмосферы, поэтому необходимо развивать более точные модели атмосферы и разрабатывать новые методы расчета сложных акустических трасс. Работа выполнена при поддержке грантов МНТЦ 1341 и 2845. Авторы выражают благодарность Г.В. Руденко за помощь в выполнении расчетов по модели MSIS-2000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афраймович Э.Л., Воробьев Н.Н., Ерущенков А.И., Сорокин А.Г. Геофизический комплекс для измерения природного инфразвука в диапазоне 0.1–1 Гц // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. Вып. 90. М.: Наука. 1990. С. 207–216.

Ерущенков А.И., Смирнова Н.А, Сорокин А.Г. Уровень инфразвукового шума атмосферного давления в диапазоне частот 0.1–1 Гц // XI Всесоюзная акустическая конференция. Москва. 1991. С. 13–16.

Пономарев Е.А., Ерущенков А.И., Турчанинов И.П. Прибор для регистрации инфраакустических и гравитационных атмосферных волн // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. Вып. 34. Иркутск. 1974. С. 50–57.

Ponomarev E.A., Rudenko G.V., Sorokin A.G., et al. The normal-mode method for probing the infrasonic propagation for purposes of CTBT // J. Atm. and Solar-Terr. Phys. March. 2006. V 68. P. 559–614.

Sorokin A.G., Ponomarev E.A. Assessing the state of the Atmospheric Acoustic Channel using the IDEAS data on long-distance microbarom propagation // J. Atm. and Solar-Terr. Phys., May. 2008. V. 70, Iss. 7. P. 1110–1121. DOI: 10.1016/j.jastp.2008.01.011.

Интернет-сайт Международной системы мониторинга Договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний (IMS CTBT): http://www.seismo.ethz.ch/bsv/nuclear_explosions/soviet_union.html.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск