

УДК 551.51; 534.2,534-6

## МЕТОД ДЕКОМПОЗИЦИИ В ЗАДАЧЕ АКУСТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АНИЗОТРОПНОЙ СТРУКТУРЫ АТМОСФЕРЫ

© 2023 г. М. Н. Закиров<sup>1,2</sup>, С. Н. Куличков<sup>1,2,\*</sup>, А. И. Чуличков<sup>1,2</sup>, И. П. Чунчuzов<sup>1</sup>, О. Е. Попов<sup>2</sup>,  
А. А. Мишенин<sup>1</sup>, Г. А. Буш<sup>1</sup>, Н. Д. Цыбульская<sup>1</sup>, Е. В. Голикова<sup>1</sup>

Представлено академиком РАН Г.С. Голицыным 30.01.2023 г.

Поступило 30.01.2023 г.

После доработки 02.02.2023 г.

Принято к публикации 13.03.2023 г.

Представлен новый метод декомпозиции (разложение на N и U-волны) инфразвуковых сигналов, соответствующих частичному отражению зондирующих импульсов N – волны от анизотропных атмосферных слоев и регистрируемых в областях геометрической тени на больших расстояниях от взрывов и извержений вулканов. Метод декомпозиции позволяет определять недоступные для определения другими методами вертикальные градиенты эффективной скорости звука (скорость звука плюс скорость ветра в направлении распространения).

*Ключевые слова:* инфразвуковые волны, анизотропная структура атмосферы, зондирование, метод декомпозиции

**DOI:** 10.31857/S2686739723600145, **EDN:** RXLYEK

### ВВЕДЕНИЕ

В 80-х годах XX века академик А.М. Обухов – выдающийся ученый в области физики атмосферы высказал предположение, что земная атмосфера по своей структуре напоминает “кочан капусты” с многочисленными слоями [1].

На это указывает выявленная за последние десятилетия тонкослоистая структура атмосферы [2] в виде долгоживущих и спорадически возникающих анизотропных неоднородностей с вертикальными масштабами от десятков метров до единиц километров; горизонтальные масштабы в десятки и сотни раз превышают вертикальные; имеющих значительные (на порядок превышающие средние значения) вертикальные градиенты температуры и ветра на высотах верхней атмосферы (условно, 20–130 км).

Нами, впервые, было предложено, теоретически проработано и экспериментально реализовано новое направление изучения атмосферы – дистанционное акустическое зондирование анизотропной тонкой структуры нижней и верхней атмосферы (высоты 0–1 и 20–130 км) [3].

Разработанные методы основаны на исследованном нами явлении частичного (френелевского) отражения акустических волн от тонкослоистых неоднородностей в нижней и верхней атмосфере [3]. Для зондирования нижней атмосферы использовались акустические волны от детонационного генератора. Зондирование верхних слоев атмосферы осуществлялось с использованием инфразвуковых волн от наземных взрывов различной энергии и извержений вулканов на Камчатке и в Эквадоре [4].

Акустические методы, в отличие от традиционных, позволяют получить информацию о “мгновенных”, а не осредненных, как в других методах, вертикальных профилях температуры и ветра. При этом акустический метод не имеет ограничений для использования в наименее исследованной области стратомезосферы (высоты 30–60 км).

### МЕТОД ДЕКОМПОЗИЦИИ ИНФРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ

В основе акустического зондирования лежит явление на отражения звуковых волн от тонкослоистых неоднородных структур в атмосфере. При этом в области тени регистрируются только частично отраженные сигналы, анализируя которые можно оценить вертикальное распределение и параметры тонкослоистой структуры атмосферы (вертикальные градиенты, толщины слоев).

<sup>1</sup> Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова  
Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет  
имени М.В. Ломоносова, физический факультет,  
Москва, Россия

\*E-mail: snk@ifaran.ru

Ранее нами был предложен способ восстановления вертикального распределения анизотропных структур в верхней атмосфере на основе взаимосвязи спектров зарегистрированных на земной поверхности инфразвуковых сигналов, рассеянных на анизотропных неоднородностях температуры и скорости ветра и спектров вертикального распределения самих этих неоднородностей [4]. Второй метод основан на разложении (декомпозиции) регистрируемого в области геометрической тени продолжительного акустического сигнала на отдельные его составляющие, соответствующие различным высотам частичного отражения от неоднородностей и приходящих в пункт наблюдений с различными интервалами времени.

Форма волновых профилей акустических сигналов, частично отраженных от отдельных неоднородных слоев, формируется из формы  $N$ -волны путем сдвига фаз всех ее спектральных компонент на фазу  $\Phi$ -коэффициента отражения,  $\Phi \in [-\pi/2; +\pi/2]$ . При  $\Phi = \pi/2$  отраженная волна имеет вид, названный  $U$ -волной, и все отраженные волны можно представить в виде суперпозиции  $U$ - и  $N$ -волн, сумма квадратов модулей их коэффициентов дает энергию отраженной волны. Фазу коэффициента частичного отражения звука можно определять, в частности, с использованием различных моделей кусочно-линейного вертикального профиля квадрата акустического показателя преломления [3].

Метод декомпозиции определим как метод разложения регистрируемого продолжительного акустического сигнала на отдельные его составляющие в виде  $N$ - и  $U$ -волн, соответствующих различным высотам частичного отражения и приходящих в пункт наблюдений с различными интервалами времени.

Предлагаемый метод имеет некоторую схожесть с общеизвестным методом вейвлет-анализа,

но здесь регистрируемый сигнал разлагается на отдельные его составляющие  $N$ - и  $U$ -волны, имеющие ясную физическую природу, а не на некоторые вейвлеты, физический смысл которых не так очевиден [5].

Амплитуда  $N$ -волны дается формулой:

$$N(t) = \begin{cases} -t, & |t| \leq \delta \\ 0, & |t| > \delta \end{cases}, \quad (1)$$

а Фурье-спектр  $U$ -волны отличается от спектра  $N$ -волны умножением всех ее отрицательных составляющих на  $e^{+i\pi/2}$ , а положительных – на  $e^{-i\pi/2}$ .

Зададим регистрируемый сигнал  $\xi(t)$  как суперпозицию  $U$ - и  $N$ -волн, поступающих на приемные акустические микрофоны с некоторой задержкой, и шумовой погрешности:

$$\xi(t) = \sum_{k=1}^K [a_k N(t - t_{0,k}) + b_k U(t - t_{0,k})] + v(t), \quad (2)$$

$$t = t_1, \dots, t_n.$$

Сигнал регистрируется в моменты времени  $t = t_1, \dots, t_n$ , погрешности  $v(t)$ ,  $t = t_1, \dots, t_n$ , – некоррелированы, обладают нулевым средним, дисперсией  $\sigma^2$ , не зависящей от  $t$ .

При оценке ширины  $\delta$  для  $N$ -волны используется связь  $\delta$  с частотой  $f_{\max}$ , на которой достигается максимум спектральной мощности суперпозиции  $U$ - и  $N$ -волн:  $\delta \approx 1/(3f_{\max})$ .

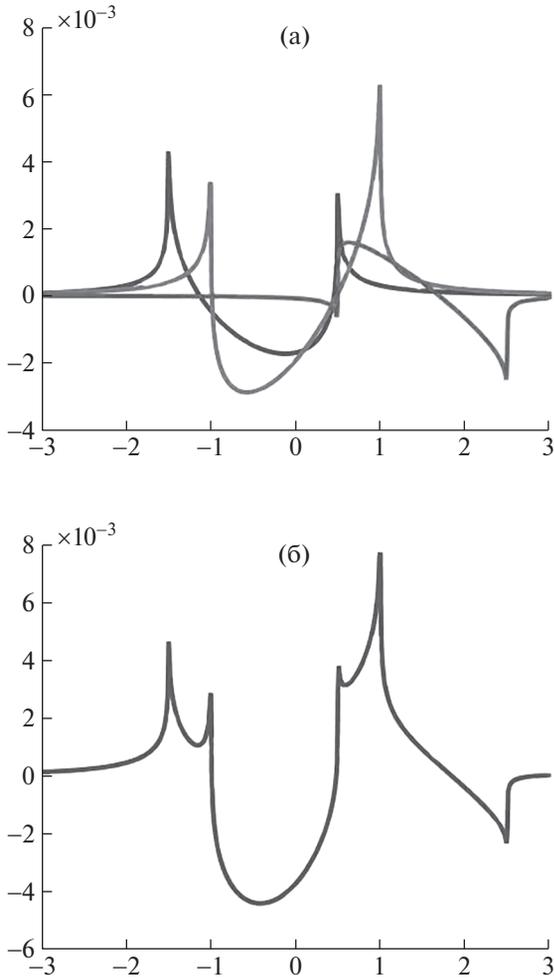
Задача декомпозиции состоит в оценке числа  $K$  регистрируемых  $U$ - и  $N$ -волн, их амплитуд  $a_k, b_k$  и времен задержек  $t_{0,k}$ ,  $k = 1, \dots, K$ .

При заданном  $K$  при гауссовой погрешности оценки параметров  $t_{0,k}, a_k, b_k$ ,  $k = 1, \dots, K$ , получим как оценки максимального правдоподобия, что приводит к задаче на минимум:

$$\inf_{t_{0,1}, \dots, t_{0,K}, a_1, \dots, a_K, b_1, \dots, b_K} \inf_f \frac{1}{\sigma^2} \sum_{j=1}^n \left| \xi(t_j) - \sum_{k=1}^K [a_k N(t_j - t_{0,k}) + b_k U(t_j - t_{0,k})] \right|^2. \quad (3)$$

Для оценки числа волн  $K$  обозначим через  $\alpha_K(\bar{\xi})$  значение минимума в (3) и заметим, что распределение  $\alpha_K(\bar{\xi})$  аппроксимируется распределением Пирсона  $\chi^2_{n-3K}$  с  $n - 3K$  степенями свободы. Максимум плотности этого распределения достигается при  $x = x_0 = n - 3K - 2$ , следовательно, наиболее вероятные значения  $\alpha_K(\bar{\xi})$  лежат в окрестности  $x_0$ . Таким образом, увеличивая число слагаемых в (2) и (3), начиная с  $K = 1$ , добиваемся того, чтобы значение случайной величины  $\alpha_K(\bar{\xi})$  попало в окрестность  $n - 3K - 2$ .

Оценки числа волн  $K$  и времен задержек  $t_{0,k}$ ,  $k = 1, \dots, K$ , получаем минимизацией (3). При заданном  $K$  используется стандартная процедура нелинейной минимизации. Важную роль при этом играет выбор начального приближения. Для этого предполагается, что в (2) формально  $K = n$ , т.е. в каждой точке  $t = t_1, \dots, t_n$  начинается участок  $N$ -волны с коэффициентом  $a_k$  и участок  $U$ -волны с коэффициентом  $b_k$ ,  $t = t_1, \dots, t_n$ , однако большинство из этих коэффициентов равно нулю. Не принимая во внимание равенств этих коэффициентов нулю, оценим значения коэффициентов  $a_k, b_k$ ,  $t = t_1, \dots, t_n$ , методами линейной ре-

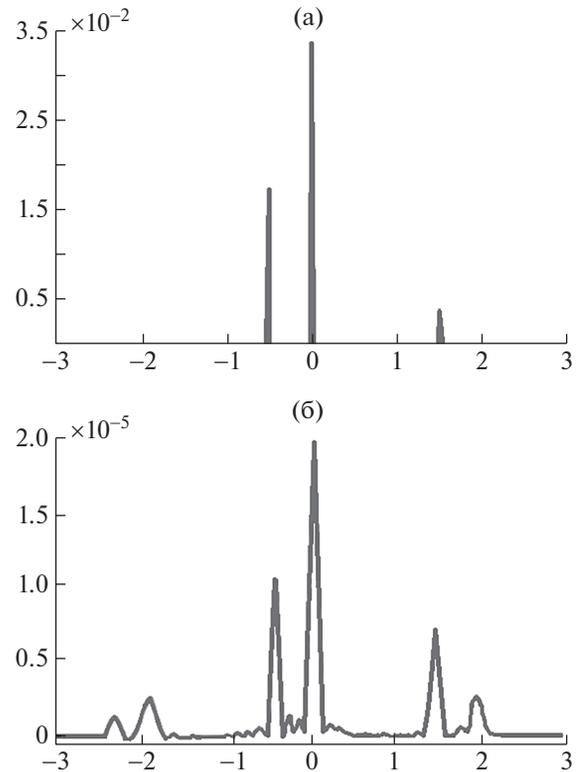


**Рис. 1.** Три составляющие сигнала в виде комбинаций  $U$ - и  $N$ -волн (а) и их сумма (б).

грессии либо, если погрешность линейной регрессии неприемлемо велика, методами теории измерительно-вычислительных систем [6]. График оценки энергии  $|\hat{a}_k|^2 + |\hat{b}_k|^2$   $k$ -й волны,  $k = 1, \dots, N$ , от  $k$  выглядит как набор пиков, энергия которых превышает энергию шумовой погрешности, задает число  $K$   $U$ - и  $N$ -волн, их положение на временной оси соответствует временам задержек  $t_{0,k}$ ,  $k = 1, \dots, K$ .

Пример декомпозиции сигнала приведен на рис. 1, сверху – график амплитуд этих волн с разными фазовыми множителями и временами задержек в зависимости от времени, снизу – их суперпозиция. Используются условные единицы.

На рис. 2 – график зависимости энергии  $|\hat{a}_k|^2 + |\hat{b}_k|^2$   $U$ - и  $N$ -волн на каждом участке,  $k = 1, \dots, n$ , полученные методом линейной регрессии и методом теории измерительно-вычислительных систем соответственно.

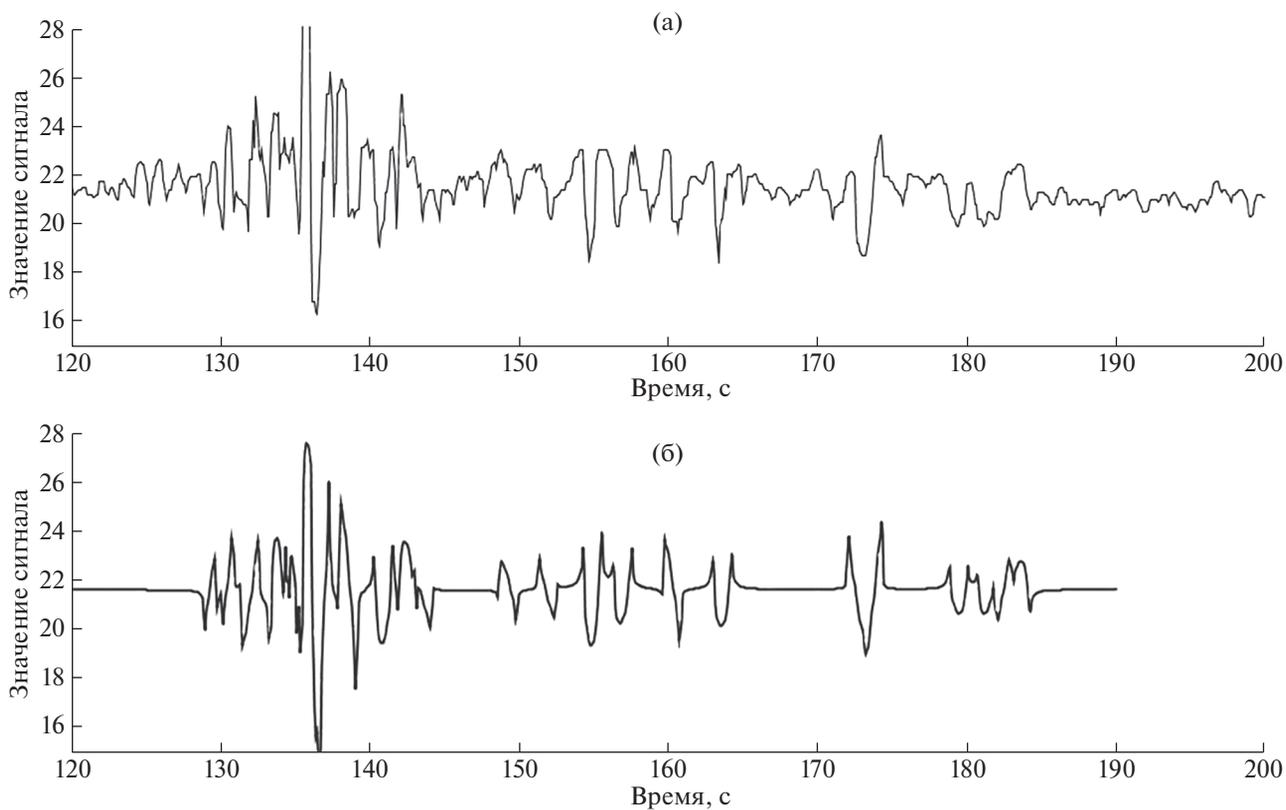


**Рис. 2.** По вертикали – оценка энергии  $U$ - и  $N$ -волн (усл. ед.), начинающихся в момент времени  $t$  (по горизонтали, усл. ед.): методом линейной регрессии (а), методом теории измерительно-вычислительных систем (усл. ед.) (б).

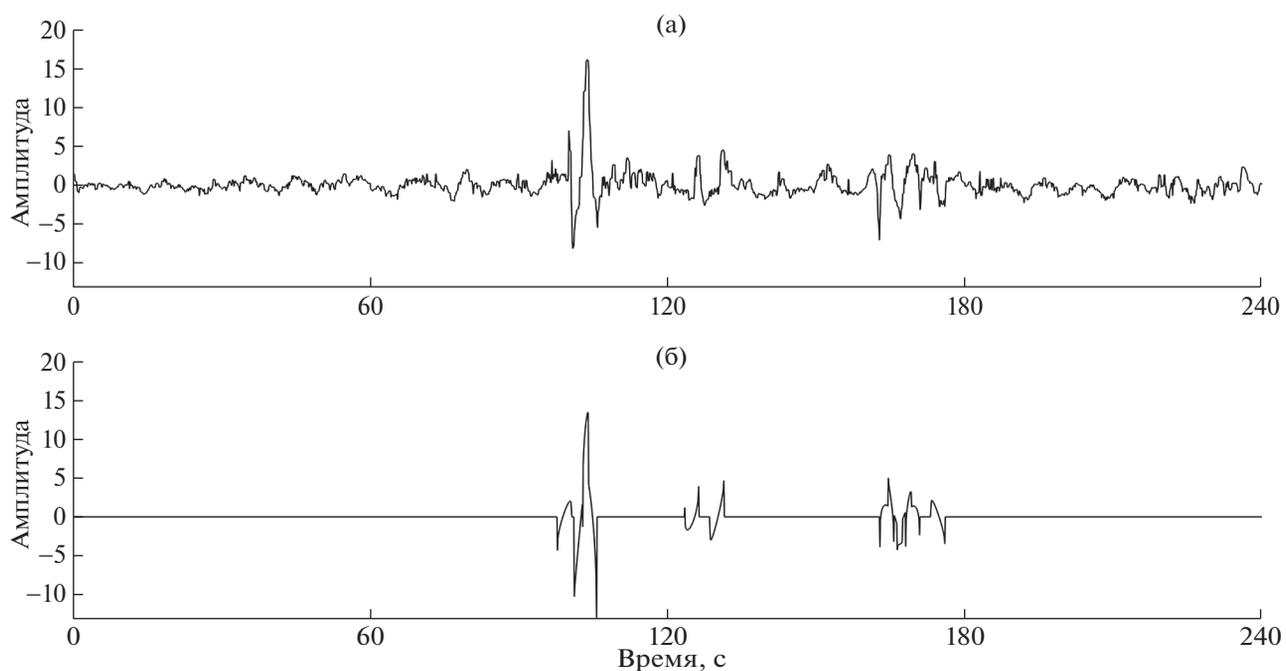
Видны три пика, соответствующие временам задержек каждой из трех  $U$ - и  $N$ -волн. Наиболее адекватной оценкой времен задержек в этом случае является оценка линейной регрессии – четко видно три пика, соответствующие трем линейным комбинациям  $U$ - и  $N$ - волн. На практике разумно воспользоваться методами теории измерительно-вычислительных систем, дающими устойчивые оценки [6].

Пример результата разложения методом декомпозиции инфразвукового сигнала, зарегистрированного в области геометрической тени на расстоянии 305 км от взрыва, показан на рис. 3.

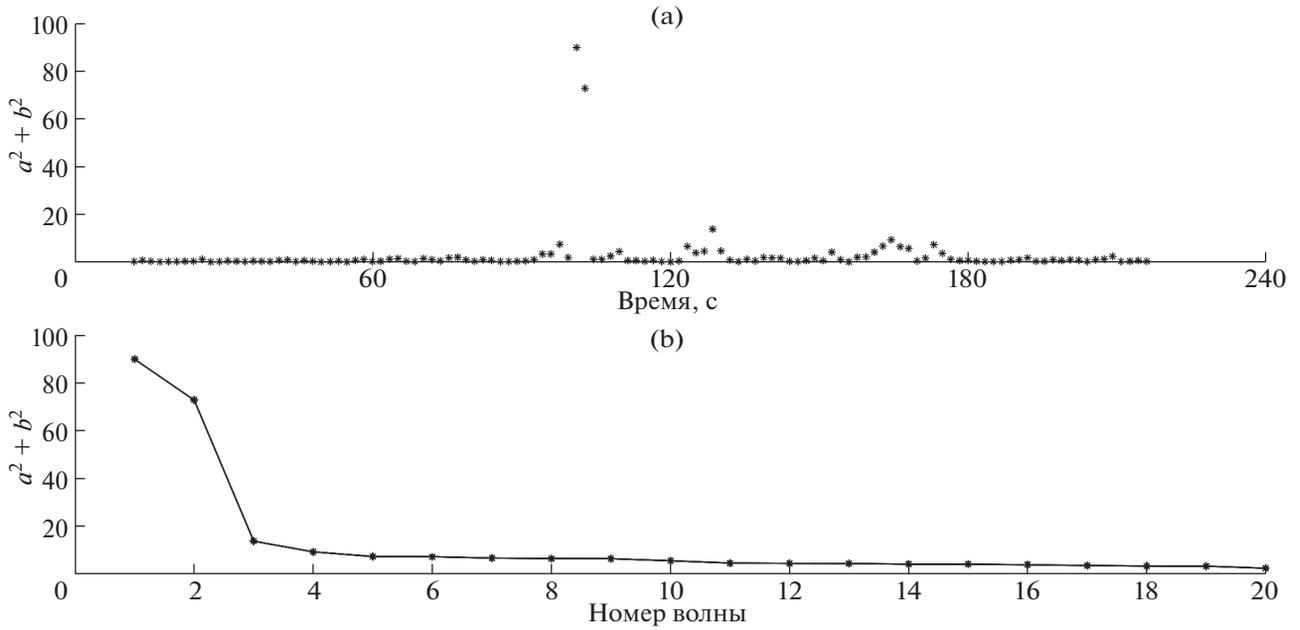
Рассмотрим работу алгоритма на сигналах, полученных 19 апреля 1991 г. в Цимлянске. На рис. 4 а показан исходный сигнал, рис. 4 б содержит результат декомпозиции с использованием первых 10 волн с наибольшей амплитудой. Видно, что метод аппроксимирует всплески сигнала, причем основная энергия сосредоточена в паре волн в районе 105 с, также имеются приходы около 130 и 170 с с гораздо меньшей амплитудой. Рисунок 5 а иллюстрирует зависимость квадрата амплитуд волн от их положения: точки на графике характеризуют величину коэффициентов вол-



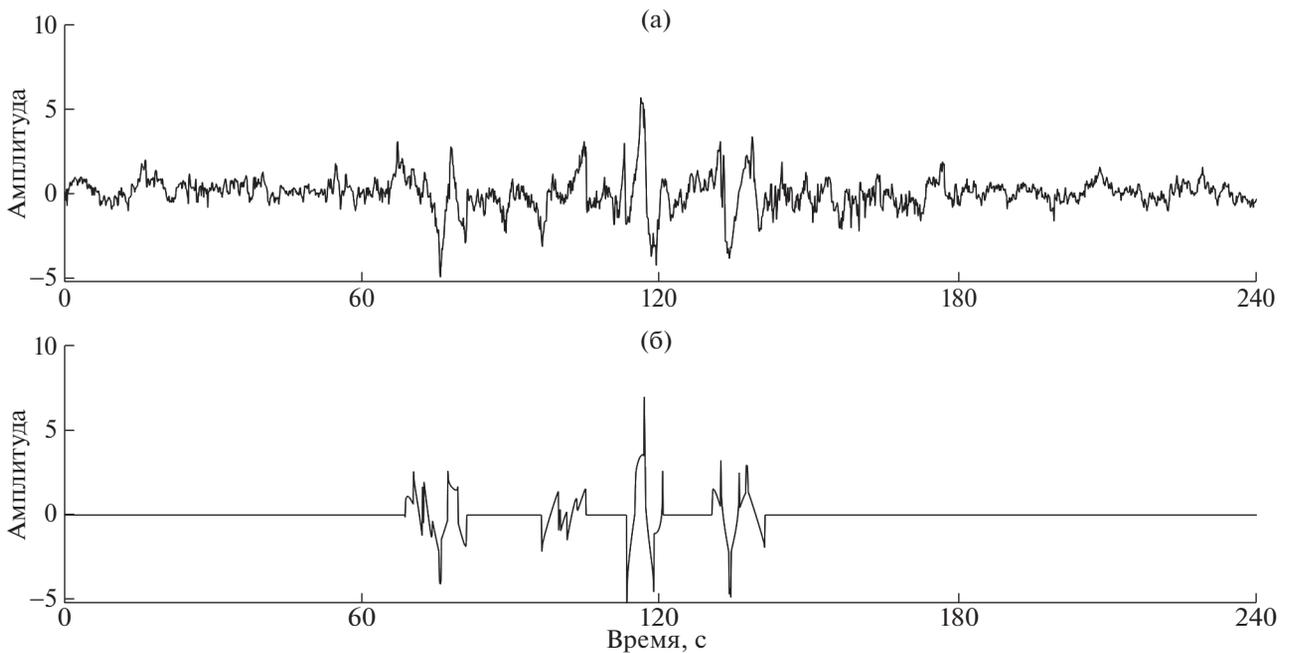
**Рис. 3.** Инфразвуковой сигнал, зарегистрированный в области геометрической тени (а) и результат его разложения (б) методом декомпозиции.



**Рис. 4.** Инфразвуковой сигнал, полученный в Цимлянске (а), начало соответствует 19.04.91 15:03, и его аппроксимация с помощью 10 первых *N*- и *U*-волн (б).



**Рис. 5.** Зависимость квадрата амплитуды волн от их положения (а) и график распределения коэффициентов, отсортированных по убыванию (б).



**Рис. 6.** Инфразвуковой сигнал (а), начало соответствует 19.04.91 16:03, и результат его декомпозиции на 15 волн (б).

ны, начинающейся в данный момент времени; видно, что большая часть коэффициентов близки к нулю. На рис. 5 б показано распределение квадратов амплитуд по убыванию квадрата их амплитуды. Можно видеть, что основной вклад вносят первые две волны.

Пример другого сигнала и результат его декомпозиции приведены на рис. 6. Видим, что метод стремится приблизить всплески, похожие по форме на *N*- и *U*-волны, можно также заметить, что в этом сигнале содержится несколько крупных всплесков и энергия сигнала более равно-

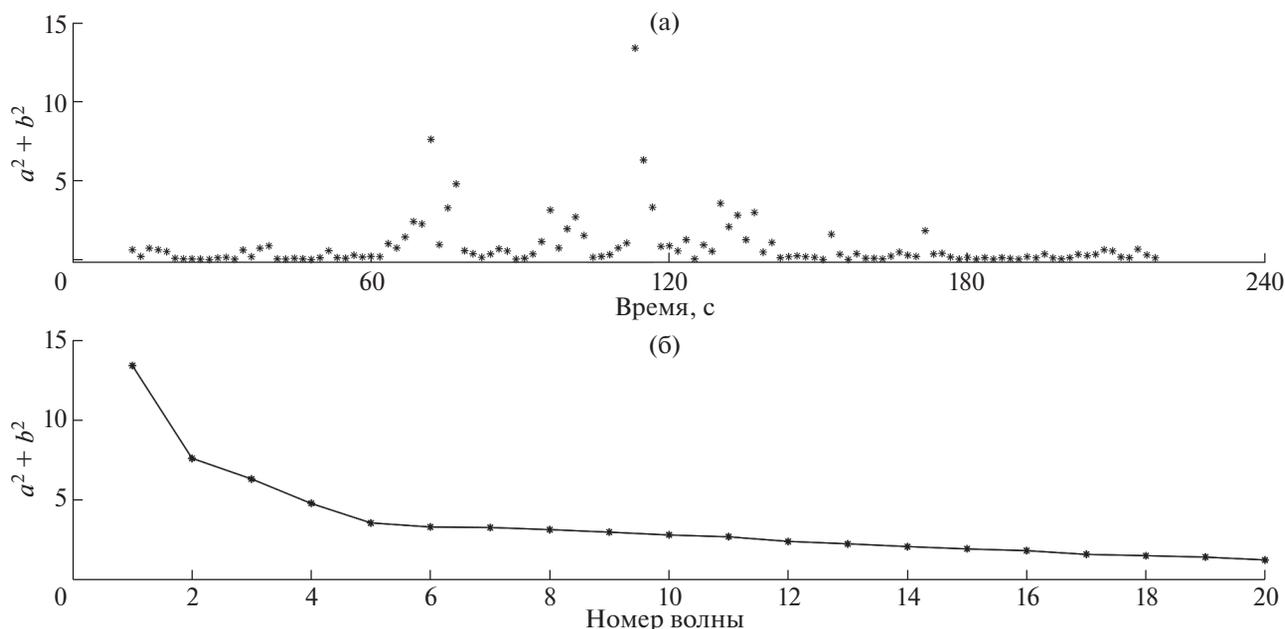


Рис. 7. Зависимость квадрата коэффициентов от положения волны (а) и распределение их по убыванию (б).

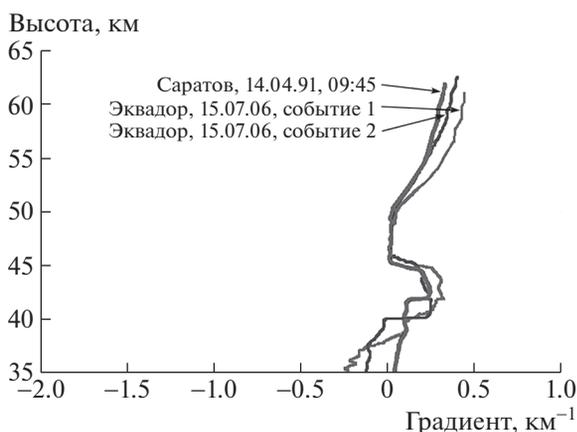


Рис. 8. Пример расчета вертикального градиента квадрата акустического показателя преломления методом декомпозиции на основе регистрации инфразвука от взрыва и извержений вулкана в Эквадоре.

мерно распределена по большему числу волн (рис. 7).

Предложенный метод может быть использован как для идентификации сигнала от конкретного источника, так и для зондирования среды. Пример расчета вертикального профиля градиента квадрата акустического показателя преломления методом декомпозиции на основе регистрации инфразвука от взрыва и извержений вулкана в Эквадоре показан на рис. 8.

Установлено наличие слоев с большими величинами вертикального градиента эффективной

скорости звука, в несколько раз превышающими средние значения, тонкая слоистая структура заполняет практически всю толщу атмосферы и является стабильной на протяжении значимых интервалов времени.

Тем самым, согласно предположению академика А.М. Обухова, структуру земной атмосферы можно образно описать в виде “кочана капусты” с многочисленными слоями.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа была выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 21-17-00021.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Загадки атмосферных вихрей. 1984. <https://youtu.be/90Usezl846g>
2. *Whiteway J., Carswell A.I.* Rayleigh Lidar Observations of Thermal Structure and Gravity Wave Activity in the High Arctic during a Stratospheric Warming // *J. Atmos. Sci.* 1994. V. 51. No 21. P. 3122–3136.
3. *Куличков С.Н.* Об акустическом зондировании неоднородных структур в средней атмосфере // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 1998. Т. 34. № 1. С. 5–11.
4. *Чунчuzов И.П., Куличков С.Н., Попов О.Е. и др.* Характеристики тонкой вертикальной структуры поля скорости ветра в стратосфере и нижней термосфере, полученные по инфразвуковым сигналам в области акустической тени// *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.* 2015. Т. 51. № 1. С. 69–87.
5. *Welch P.D.* The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time

Averaging Over Short, Modified Periodograms // IEEE® Transactions on Audio and Electroacoustics. 1967. V. AU-15. P. 70–73.

6. *Пытьев Ю.П.* Методы математического моделирования измерительно-вычислительных систем. Изд. 3. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 428 с.

## ACOUSTIC PROBING OF THE ANISOTROPIC STRUCTURE OF THE ATMOSPHERE

**M. N. Zakirov<sup>a,b</sup>, S. N. Kulichkov<sup>a,b,#</sup>, A. I. Chulichkov<sup>a,b</sup>, I. P. Chunchuzov<sup>a</sup>, O. E. Popov<sup>a</sup>, A. A. Mishenin<sup>a</sup>, G. A. Bush<sup>a</sup>, N. D. Tsybulskaya<sup>a</sup>, and E. V. Golikova<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> *Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>b</sup> *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russian Federation*

<sup>#</sup> *E-mail: snk@ifaran.ru*

Presented by Academician of the RAS G.S. Golitsyn January 30, 2023

A new decomposition method (decomposition into N and U-waves) of infrasonic signals corresponding to partial reflection of N-wave sounding pulses from anisotropic atmospheric layers and recorded in areas of geometric shadow at large distances from explosions and volcanic eruptions is presented. The decomposition method makes it possible to determine the vertical gradients of the effective sound speed (sound speed plus wind speed in the direction of propagation) that are not available for determination by other methods.

*Keywords:* infrasonic waves, anisotropic structure of the atmosphere, sounding, decomposition method