

УДК 551.501

НАУЧНОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И
ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКААрам А. ВАРДАНЯН, Г.Е. АЙВАЗЯН, Арман А. ВАРДАНЯН, И.П. ЧУНЧУЗОВ,
В.Г. ПЕРЕПЕЛКИНЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ С
ПОМОЩЬЮ ПРОТИВОГРАДОВОГО АКУСТИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

Представлены результаты зондирования атмосферного пограничного слоя (АПС) в интервале высот 240...700 м с помощью акустического генератора противогодовой установки. Показана пространственно-временная изменчивость тонкой слоистой структуры АПС.

Ключевые слова: акустическое зондирование, акустический генератор, противогодовая установка, атмосферный пограничный слой.

Введение. Погода и климат планеты определяются различными процессами, протекающими в толще атмосферы. Для достоверного предсказания поведения атмосферы необходимо знать ее характеристики на различных высотах, в различных районах, в различные моменты времени. В последние годы наряду с совершенствованием традиционных методов измерений метеорологических параметров большое развитие получил метод дистанционного акустического зондирования атмосферы с помощью содаров [1, 2]. Метод основан на способности акустических волн рассеиваться на неоднородностях показателя преломления, образованных атмосферной турбулентностью.

Областью применения акустического зондирования является нижняя часть атмосферы до высот порядка одного километра, называемая атмосферным пограничным слоем. Для этого слоя характерны большая изменчивость и разнообразие термической стратификации, определяемой орографией местности, свойствами подстилающей поверхности, радиационными условиями, а также синоптическими процессами [3, 4]. Измерения профилей скорости ветра в устойчиво стратифицированном АПС с помощью содаров обычно ограничиваются высотой в 300 м, т.к. выше этой высоты резко возрастают ошибки измерения.

В [5,6] показана принципиальная возможность применения акустического генератора противогодовой установки “Зенит” для акустического зондирования АПС. Такой мощный источник акустических импульсов может обеспечить мониторинг структуры АПС на больших расстояниях. В настоящей работе с помощью противогодового акустического генератора исследованы

пространственно-временные характеристики тонкой слоистой структуры АПС до высоты 700 м.

Генерация и регистрация акустических импульсов. Конструкция акустического генератора противорадовой установки “Зенит” описана в [7, 8]. Генерация акустических импульсов необходимой мощности происходит посредством периодически повторяющихся взрывов смеси бутан-пропан в объеме специальной камеры сгорания, имеющей форму воронки с направленным вертикально вверх открытым соплом (сопло Лавая). Количество инжектируемого газа подбирается таким образом, чтобы концентрация смеси оказалась в диапазоне взрывного горения (2,3...9,5% - для пропана и 1,7...8,5% - для бутана) и была близка к концентрации оптимального состава смеси, дающего максимальное давление взрыва (4,6% - для пропана и 3,6% - для бутана). Зажигание горючей смеси осуществляется с помощью автомобильной свечи зажигания, расположенной по оси камеры сгорания.

По сравнению с ранее проведенными экспериментами [5, 6], была использована улучшенная конструкция акустического генератора с более длинным соплом Лавая, что увеличивало амплитуду генерируемых импульсов примерно в 1,5 раза [9].

Регистрация осциллограмм акустических сигналов производилась акустическими микрофонами Briel & Kjaer на поверхности Земли и на разных высотах. На поверхности Земли микрофоны располагались в двух точках на расстояниях 2250 и 2750 м от генератора. При этом в каждой точке с помощью трех микрофонов (I, II, III) образовывали треугольную приемную антенну со сторонами 30 м. Когерентный анализ сигналов от этих микрофонов позволяет выделять интервалы времени, в течение которых все парные функции когерентности сигналов на трех микрофонах достигают максимума одновременно с обращением в нуль суммы разностей фаз между тремя парами микрофонов I-II, II-III, III-I треугольной антенны [10, 11]. В каждой точке в ночное время, когда формируется устойчивая стратификация, было зарегистрировано 5 сигналов, следующих от генератора с периодом в 1 мин. Измерения сигналов на разных высотах (до 300 м) проводили с помощью квадрокоптера DJI Phantom 3 вместе с записывающим устройством Data Logger PRNTEMP 110.

Исследования проводились в октябре 2018 г. на экспериментальном полигоне Инновационного центра “Барва” (г. Талин, Армения, www.barva.am).

Результаты исследования и обсуждение. На рис. 1 приведены спектры акустического сигнала вблизи конца сопла генератора ($z = 0$) и на высоте $z = 70$ м, а на рис. 2 показано ослабление амплитуды переднего фронта сигнала с высотой.

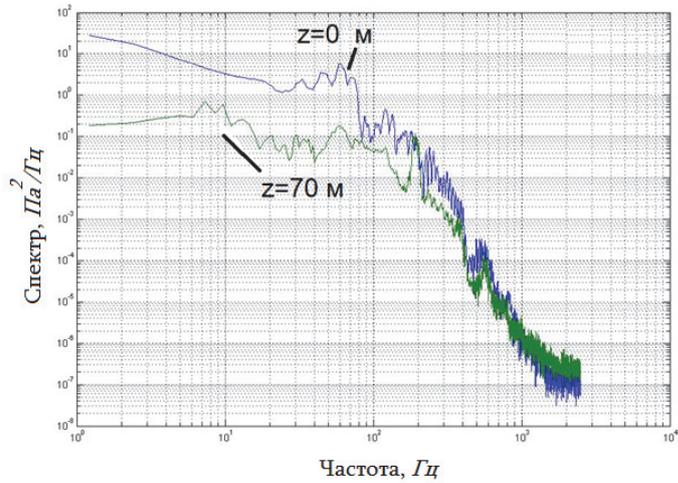


Рис. 1. Спектры акустического сигнала вблизи конца сопла генератора ($z = 0$) и на высоте $z = 70$ м

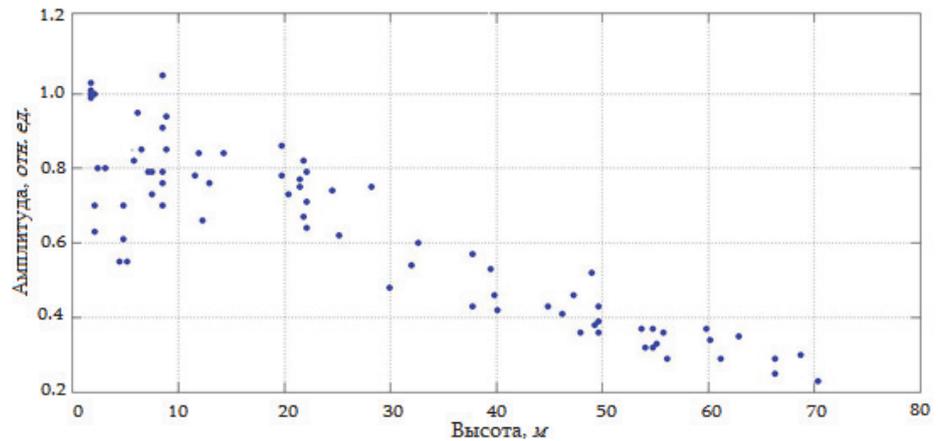


Рис. 2. Ослабление амплитуды переднего фронта сигнала в относительных единицах по высоте

Из рис. 1 видно, что спектральный максимум на частоте 60 Гц для сигнала, зарегистрированного вблизи конца сопла, смещается с ростом высоты в сторону низких частот, достигая частоты 10 Гц при $z = 70$ м. Этот факт можно объяснить небольшим нелинейным удлинением положительной фазы импульса с ударным фронтом с ростом расстояния от источника. Заметим также, что ослабление амплитуды переднего фронта сигнала с высотой z , начиная примерно с $z = 10$ м и до $z = 70$ м, происходит несколько медленнее, чем ослабление сферической волны по закону $1/r$, где r - расстояние от точечного источника (рис. 2). Это может быть связано с определенной

направленностью источника звука на высоких частотах (выше 500 Гц), формирующих ударный фронт сигнала и слабо расходящийся в пространстве звуковой пучок в непосредственной близости от конца сопла генератора. Кроме этого, из-за отражения сигнала от поверхности земли происходит конструктивная интерференция прямого и отраженного сигналов в определенных направлениях от генератора. Отметим также, что на расстояниях выше 70 м ослабление происходило практически по сферическому закону $1/r$.

Был проведен теоретический расчет ослабления с расстоянием положительной фазы импульса с ударным фронтом и амплитудой акустического давления P_m на сфере радиуса r_0 . Учитывая, что на частотах ниже 100 Гц размеры излучателя (генератора) сравнимы с длиной волны, излучатель можно считать точечным на столь низких частотах. В этом случае закон уменьшения амплитуды давления p на ударном фронте сферической волны с ростом расстояния r описывается следующим образом [12]:

$$p = 2P_m(r_0/r)[1 + 2Z_0 \ln(r_0/r)^{1/2}]^{-1},$$

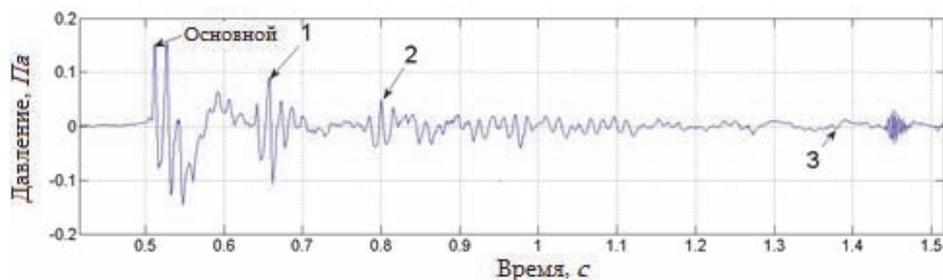
где $Z_0 = r_0/x_p$, $x_p = 1/\varepsilon k_0 M_m$ - расстояние образования разрыва в плоской гармонической волне с частотой ω и волновым числом $k_0 = \omega/c_0$, $\varepsilon = (\gamma + 1)/2 = 1,2$; γ - показатель адиабаты; M_m - число Маха на расстоянии r_0 от сферического источника.

Уменьшение амплитуды на ударном фронте положительной фазы импульса длительностью τ_m сопровождается увеличением ее длительности τ с ростом расстояния r :

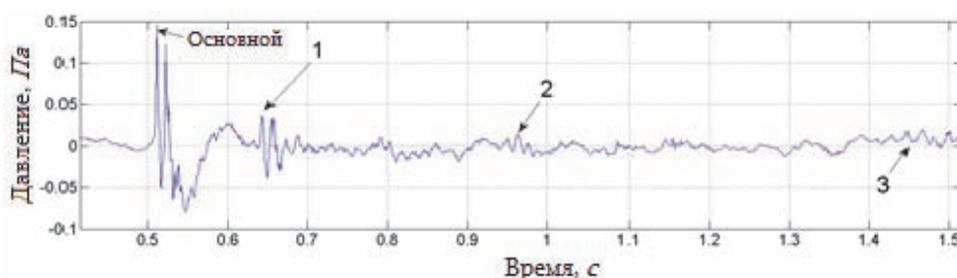
$$\tau = \tau_m e^{-1} [1 + (e - 1)(1 + 2Z_0 \ln(r_0/r)^{1/2})].$$

С ростом r импульс сигнала (площадь его положительной фазы) сохраняется: $p\tau r = const$. При амплитуде $P_m = 300$ Па амплитуда давления на высоте 2000 м (принятая высота для облака) составит $p = 2,6$ Па, нелинейное ослабление невелико и слабо меняет длительность τ . Тем не менее, этот эффект проявлялся в эксперименте вблизи генератора до расстояний порядка $z = 70$ м и приводил к смещению спектра в низкочастотную область. Выше 70 м ослабление амплитуды происходило примерно как $1/r$, что и следует из приведенных теоретических оценок.

Благодаря когерентному анализу удалось по пяти следующим друг за другом сигналам выделить как основной приход сигнала в приземном волноводе, формирующемся в ночное время, так и приходы на хвосте сигнала. Волноводные приходы сигналов, зарегистрированных на расстояниях $r = 2250$ и 2750 м от генератора, показаны на рис. 3. Здесь отмечены как основные приходы сигналов, так и приходы 1, 2 и 3, обнаруженные на “хвосте” сигнала.



а)



б)

Рис. 3. Волноводные приходы сигналов, зарегистрированных на расстояниях $r = 2250$ (а) и 2750 м (б) от установки

Приходы на хвосте сигнала вызваны отражениями сигнала от тонких атмосферных слоев (толщина в несколько десятков метров) с большими вертикальными градиентами эффективной скорости звука, расположенными на разных высотах. По временным задержкам между волноводным сигналом и отражениями от слоев были определены высоты расположения этих слоев для первой (241 м, 436 м, 604 м) и второй (253 м, 471 м, 694 м) треугольных приемных антенн. Различие высот отражения для разных расстояний от генератора может быть связано с тем, что тонкие слои, формирующиеся в устойчиво стратифицированном АПС, испытывают во времени и в пространстве волнообразные вертикальные смещения с амплитудами в несколько десятков метров, что часто видно на эхограммах доплеровского содара [13]. С ростом высоты амплитуды смещений растут обратно пропорционально квадратному корню из плотности атмосферы. Эти смещения могут быть вызваны, в частности, внутренними волнами или волнами Кельвина-Гельмгольца [13].

Исходя из полученных результатов, можно предполагать, что принятые в двух точках приходы сигналов имеют общие неоднородные слои отражения, средние высоты которых лежат в интервалах 241...253 м, 436...471 м и 604...694 м. Эти слои существенно анизотропны, так как их горизонтальная

протяженность (не менее 500 м) значительно превышает их вертикальные масштабы (десятки метров).

Используя полученную в [14, 15] аналитическую связь между формой отраженного сигнала от каждого слоя и вертикальным профилем флуктуаций эффективной скорости звука внутри слоя, были восстановлены профили флуктуаций $C_{эфф}(z)$ (скорость звука+проекция скорости ветра на направление источник-приемник) слоистых неоднородностей в АПС. В качестве примера на рис. 4 показан профиль в трех слоях, соответствующих приходам 1, 2 и 3, на расстоянии $r = 2250$ м.

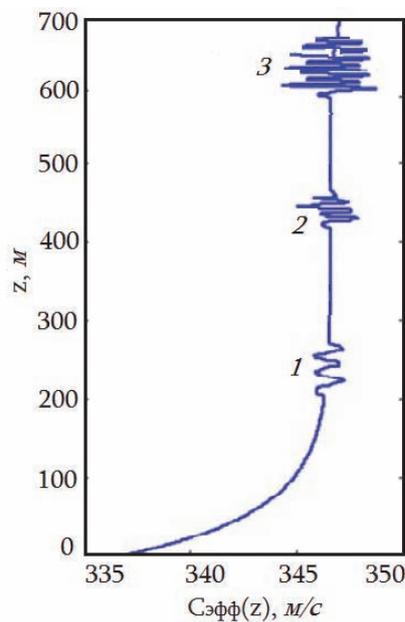


Рис. 4. Восстановленный профиль флуктуаций слоистых неоднородностей в АПС

Анализ восстановленных профилей указывает на наличие в устойчивой нижней тропосфере тонких слоев (15...80 м) с чередующимися по знаку вертикальными градиентами скорости звука, достигающими по абсолютной величине значений $0,1...0,2$ c^{-1} . Так как основной вклад в $C_{эфф}(z)$ вносят вариации проекции скорости ветра на направление источник-приемник, то указанные выше градиенты скорости ветра при типичной для АПС частоте Брента-Вяйсяля $N = 0,015...0,02$ rad/c могут привести к сдвиговой неустойчивости воздушного потока и генерации мелкомасштабной турбулентности в тонких слоях устойчиво стратифицированного АПС, что также часто обнаруживается на записях эхо-сигнала содара [13, 16].

Заклучение. Применение акустического генератора противогодовой установки “Зенит” для зондирования АПС позволило получить оперативные данные о характеристиках тонкой структуры атмосферных слоев с градиентами эффективной скорости ветра порядка $0,1 \dots 0,2 \text{ c}^{-1}$, расположенными в устойчиво стратифицированном АПС в интервале высот от 240 до 700 м. Кроме этого, волноводные приходы были впервые получены сразу в двух точках, что позволило оценить анизотропию отражающих слоев.

Исследование выполнено при финансовой поддержке КН МОН РА и РФФИ (РФ) в рамках совместного научного проекта 18RF-01- RFBR18-55-05002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Emeis S.** Measurement Methods in Atmospheric Sciences. In-situ and Remote. - Borntraeger: Science Publishers, 2010. – 272 p.
2. **Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A.** Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies. - N.Y.: Springer, 2010. – 735 p.
3. **Այվազյան Գ.Ե., Վարդանյան Ա.Ա.** Մթնոլորտի վրա ակուստիկական ալիքներով և էլեկտրական լիցքերով ներգործությունը / ՀԱՊՀ. – Եր.: Ճարտարագետ, 2018.- 212 էջ:
4. **Sun J., Mahrt L., Nappo C., Lenschow D.H.** Wind and Temperature Oscillations Generated by Wave–turbulence Interactions in the Stably Stratified Boundary Layer // J. Atmos. Sci. - 2015. - V. 72. - P. 1484–1503.
5. Studying Characteristics of a Fine Layered Structure of the Lower Troposphere on the Basis of Acoustic Pulse Sounding / **I.P. Chunchuzov, V.G. Perepelkin, G.Y. Ayvazyan, et al** // Atmospheric and Oceanic Physics. – 2017. – V. 53, № 3. – P. 279–293.
6. Дистанционное акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя / **Г.Е. Айвазян, Р.Н. Барсегян, А.А. Варданян и др.** // Вестник ИАА. - 2018.- Т.15, № 1.- С. 160-164.
7. **Vardanyan A.A., Galechyan G.A., Perepelkin V.G., Chunchuzov I.P.** The Shock Wave Generated by Nail Suppression System // Technical Physics. The Russian J. of Appl. Physics. – 2011.- V. 81, № 8. – P. 144-147.
8. **Айвазян Г.Е., Варданян А.А.** Генерация и распространение акустических волн в атмосфере // Вестник НПУА. – 2017.- Ч. 1.- С. 337-342.
9. **Վարդանյան Ա.Հ., Այվազյան Գ.Ե., Բարսեղյան Ռ.Ն., Վարդանյան Ա.Ա.** Մթնոլորտի խորագնման ակուստիկական գեներատորի մշակումը // Հայաստանի ճարտարագիտական ակադեմիայի Լրագրեր. – 2018.- Հ.15, №2. – էջ 287-290:
10. **Перепелкин В.Г., Куличков С.Н., Чунчuzов И.П.** Изучение оптимальных условий регистрации информативного сигнала при исследовании пограничного слоя атмосферы акустическим методом частичных отражений // Изв. РАН. Физика Атмосферы и Океана.- 2013. - Т. 49, № 2.- С. 180-195.
11. **Перепелкин В.Г., Куличков С.Н., Чунчuzов И.П., Кузнецов Р.Д.** Об опыте применения дистанционного акустического метода частичных отражений для исследования нижней тропосферы // Изв. РАН. Физика Атмосферы и Океана.- 2011.- Т. 47, № 1.- С. 1-15.

12. Руденко О.В., Солуян С.И. Теоретические основы нелинейной акустики.- М.: Наука, 1975.- 287 с.
13. Zaitseva D., Kallistratova M., Lyulyukin V., Kouznetsov R. The Effect of Internal Gravity Waves on Fluctuations in Meteorological Parameters of the Atmospheric Boundary Layer // Atmospheric and Oceanic Physics. – 2018. – V. 54, № 2. – P. 173-181.
14. Chunchuzov I., Kulichkov S., Perepelkin V., Popov O. Study of the Wind Velocity-layered Structure in the Stratosphere, Mesosphere and Lower Thermosphere by Using Infrasonic Probing of the Atmosphere // J. Geophysical Research: Atmospheres . - 2015.- V. 120.- P. 8829-8840.
15. Восстановление тонкой слоистой структуры стратосферы и нижней термосферы с помощью инфразвукового зондирования / И.П. Чунчужов, С.Н. Куличков, В.Г. Перепелкин и др. // Изв. РАН. Физическая.- 2015. - Т. 79, № 10.- С. 1381–1385.
16. Содарное зондирование атмосферного пограничного слоя: Обзор работ ИФА им. А.М. Обухова / И.П. Чунчужов, М.А. Каллистратова, В.Г. Перепелкин и др. // Изв. РАН. Физика Атмосферы и Океана.- 2018.- Т. 54, № 3.- С. 283-300.

Национальный политехнический университет Армении, Инновационный центр “Барва”, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. Материал поступил в редакцию 14.12.2018.

Ա.Հ. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ, Գ.Ե. ԱՅՎԱԶՅԱՆ, Ա.Ա. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ, Ի.Պ. ՉՈՒՆՉՈՒԶՈՎ,
Վ.Գ. ՊԵՐԵՊԵԼԿԻՆ

ՀԱԿԱՎԱՐԿՏԱՅԻՆ ԱԿՈՒՍՏԻԿԱԿԱՆ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐՈՎ ՄԹՆՈՒՈՐՏԱՅԻՆ
ՄԱՀՄԱՆԱՅԻՆ ՇԵՐՏԻ ԽՈՐԱԶՆՆՈՒՄԸ

Ներկայացվել են հակակարկտային սարքավորման ակուստիկական գեներատորի միջոցով 240...700 մ բարձրության վրա մթնոլորտային սահմանային շերտի (ՄՄՇ) խորագննման արդյունքները: Ցույց է տրվել ՄՄՇ-ի բարակ շերտային կառուցվածքի տարածական և ժամանակային փոփոխականությունը:

Առանցքային բառեր. ակուստիկական խորագննում, ակուստիկական գեներատոր, հակակարկտային սարքավորում, մթնոլորտային սահմանային շերտ:

A.H. VARDANYAN, G.YE. AYVAZYAN, A.A. VARDANYAN, I.P. CHUNCHUZOV,
V.G. PEREPELKIN

SOUNDING OF ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER USING AN ACOUSTIC
GENERATOR OF A HAIL SUPPRESSION SYSTEM

The results of sounding of the atmospheric boundary layer (ABL) at a height of 240...700 m through an acoustic generator of a hail suppression system are presented. The spatial-temporal variability of the thin-layered structure of the ABL is shown.

Keywords: acoustic sounding, acoustic generator, hail-suppression system, atmospheric boundary layer.