

Акустический метод зондирования пограничного слоя атмосферы. Современное состояние и перспективы развития

Лю Чан¹, Ибраимов И. К.², Панченко А. Ю.²

¹Хэйлунзянский Бауи аграрный университет

²Харьковский национальный университет радиоэлектроники

E-mail: oleksandr.panchenko@nure.ua

Развитие метода акустического зондирования имеет два направления: совершенствование теоретических описаний взаимодействия акустических волн с атмосферой и совершенствование техники зондирования. Поэтому оценка наиболее перспективных путей требует детального анализа современного состояния как теоретических основ, так и технических реализаций метода. В работе показано, что современные акустические локаторы выполнены на высоком техническом уровне и в настоящее время основная проблема метода состоит в отсутствии адекватной теории обработки полученной информации. Ее построение требует анализа ряда обратных задач рассеяния звука в неоднородной движущейся среде. В перспективе требуется уточнение теоретических основ рассеяния звука в неоднородной среде и динамики атмосферного пограничного слоя.

Ключевые слова: турбулентность; звук в неоднородной среде; направленность антенн; ветер; температура; влажность; сдвиги ветра

DOI: [10.20535/RADAR.2018.73.18-27](https://doi.org/10.20535/RADAR.2018.73.18-27)

Введение

Акустические методы зондирования атмосферы позволяют при небольших затратах в on-line режиме отслеживать метеорологическую ситуацию в нижнем слое тропосферы – атмосферном пограничном слое (АПС). Актуальность развития данных методов определяется, как необходимостью мониторинга окружающей среды в условиях возрастания техногенной нагрузки, так и высокой чувствительностью акустических волн к изменениям параметров воздуха.

История совершенствования акустических локаторов – содаров (SODAR – SOnic Detection And Ranging), как и история развития систем радиоакустического зондирования (Radio Acoustic Sounding System – RASS) насчитывает много десятилетий [1, 2]. Однако и в настоящее время их эффективность, по сравнению с лазерными, тепловыми и другими системами относительно невысока. Поэтому требуется всесторонний анализ объекта измерений, процесса извлечения информации, средств и методов зондирования.

Учитывая ограниченный объем, в данной статье будут показаны только основные моменты, касающиеся метода акустического зондирования (АЗ). Целью данной работы является оценка и выбор наиболее эффективных путей развития метода.

1 Общие вопросы акустического метода зондирования АПС

Математическое описание процесса распространения акустических волн (АВ) существенно сложнее, чем электромагнитных [3]. Это связано с тем, что АВ являются продольными и в подвижной среде (жидкости, газы) переносятся вместе со средой [4]. Соответствие описания АВ с электромагнитными достигается только в частном случае неподвижной среды, например в твердых телах [5, 6]. Но и в этом случае имеются существенные отличия в физике граничных условий, в процессах излучения и распространения [7–10]. Поэтому существенные отличия имеются и в математических моделях, причем эти отличия носят принципиальный характер [11–14]. Тем не менее, высокая чувствительность АВ к изменениям параметров среды, а также то, что акустические волны принципиально могут извлечь большее количество информации, является существенным преимуществом [1, 2, 15–18].

Аппаратурная реализация метода АЗ сравнительно простая [1]. Несложная конструкция акустического локатора дает возможность получения сигнала с высот до 1 км, то есть практически по всей высоте АПС. Как известно, в этом слое происходят важнейшие процессы, определяющие динамику

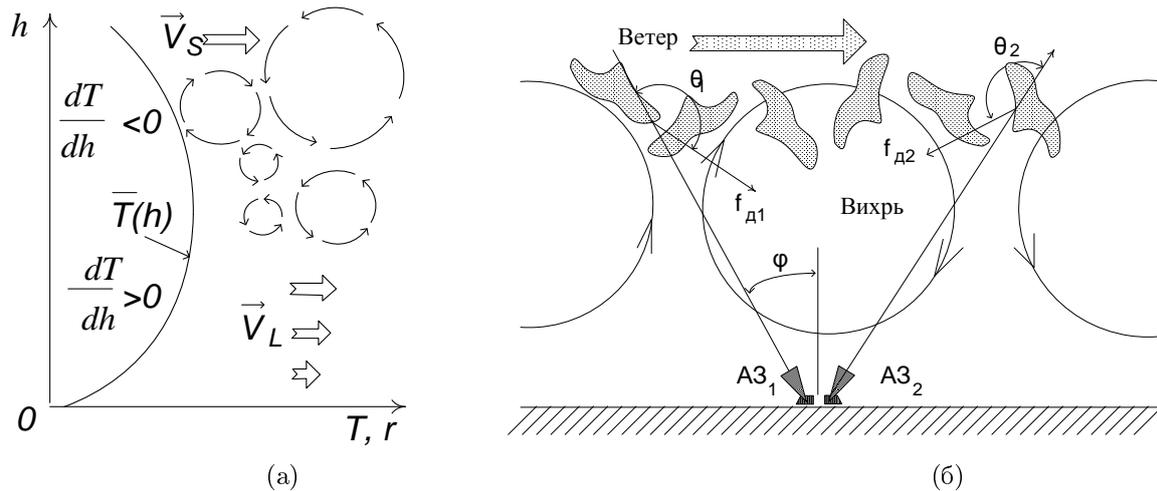


Рис. 1. Термодинамическая структура АПС: (а) – при дневной конвекции, (б) – при ночной инверсии

атмосферы в целом [19]. В АПС формируются потоки тепла и влаги [20], в нем заметно влияние силы Кориолиса и неровностей поверхности, в нем трение о земную поверхность приводит к турбулизации потока и так далее. Поэтому возможность дистанционного получения высотной информации в on-line режиме и доступность различных вариантов аппаратуры зондирования привлекают исследователей.

2 Основные типы течений в АПС

Динамика АПС подчиняется законам потоков сплошной среды, термодинамики газов, гравитации, молекулярной физики [21]. В сплошной среде потоки бывают ламинарные и турбулентные. Теория ламинарных потоков достаточно хорошо разработана [4]. Строгой теории турбулентных потоков, несмотря на значительные усилия и попытки привязки к конкретным условиям, в настоящее время не создано [22–25]. Общеизвестны только ее полуэмпирические описания, сделанные при значительных упрощениях: несжимаемости, изотропности, однородности, и т.д. [26–28]. Наиболее полно развито представление о турбулентности, возникшей в результате действия динамических факторов – трения о поверхность.

Описания термической турбулентности, которая играет не меньшую роль в АПС, менее развиты. По сути, они представлены как дополнения к динамическим моделям [29, 30].

Схематически оба вида турбулентности в АПС представлены на рис. 1а.

Прогрев поверхности является термическим источником турбулентности \vec{V}_T . Синоптическое перемещение воздушной массы \vec{V}_S – динамическим \vec{V}_D . В дневное время прогрев поверхности приводит к образованию конвективных вертикальных

токов [31]. При этом средняя температура $T(h)$ с ростом высоты снижается $\partial T/\partial h = -0,01$ град/м.

В ночное время при ясном небе происходит интенсивное радиационное выхолаживание поверхности, и воздух в нижних слоях охлаждается. Такое состояние называется температурной (ночной) инверсией. При этом сверху сохраняется режим турбулентного движения (рис. 1б) [31, 32]. В самом деле, даже при $\partial T/\partial h = 0$ и при обычных параметрах воздуха динамическая вязкость $\nu = 1,8 \cdot 10^{-4}$ Пуаз ($0,18 \cdot 10^{-4}$ Па*с), плотность воздуха $\rho = 1,3$ кг/м³, $Re_{кр} = 10^7$ – получаем, что в километровом слое турбулентный вихрь может образоваться уже при $\vec{V}_S = 1,5$ м/с.

Из этого следует, что устойчивые потоки могут возникнуть только в температурно-неоднородном АПС в условиях ночной инверсии [33, 34]. Причем локальные потоки \vec{V}_L не обязательно совпадают с синоптическими, а определяются орографией местности, свойствами подстилающей поверхности, влиянием мегаполисов, прочими факторами [31, 32, 35–37]. Но и в этом, сравнительно простом случае, отсутствует достаточно строгое математическое описание, а иногда и физическое представление о динамических процессах [4, 38–41].

Описания остальных весьма важных ситуаций, например, бризовой циркуляции, образования туманов или прохождения фронтов существенно сложнее, и в ряде случаев еще не создано, поэтому требуются эффективные средства мониторинга [42–45].

3 Физические и математические модели АЗ

Наиболее частые состояния АПС характеризуются неоднородностью среды и турбулентностью потока. Поэтому теория акустического зондирования (АЗ) основана на теории рассеяния звука в турбулентной среде и специфические задачи ориен-

тированы на эти случаи [47, 48]. Упрощенная схема многолучевого наклонного АЗ турбулентного АПС показана на рис. 2.

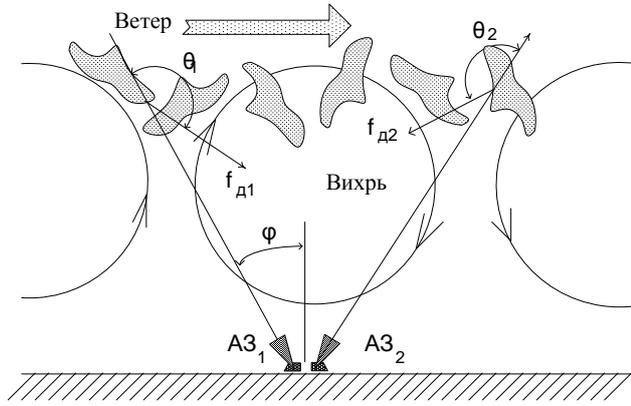


Рис. 2. АЗ турбулентного АПС

Согласно [48], интенсивность рассеянного сигнала определяется спектральными функциями температурных флуктуаций Φ_T и случайного поля скорости ветра E . Результирующее выражение для среднего эффективного объема рассеяния имеет вид:

$$\sigma(\theta) = \frac{\pi}{2} k^4 \cos^2 \theta \left[\frac{\Phi_T(2k \sin \frac{\theta}{2})}{T_0^2} + \frac{\cos^2 \frac{\theta}{2} E(2k \sin \frac{\theta}{2})}{\pi c_0^2 (2k \sin \frac{\theta}{2})^2} \right], \quad (1)$$

где c_0 – скорость звука; T_0 – температура К; θ – угол между падающей и отраженной волной; k – волновое число.

Согласно этому выражению, отражение назад от флуктуаций потока отсутствует. Отраженный сигнал формируется флуктуациями температуры. Это позволяет по доплеровскому сдвигу частоты принятого сигнала определить скорость движения среды в направлении луча. Трехлучевым наклонным зондированием определяются все компоненты средней скорости потока. Однако такое определение весьма грубое. Выражение (1) получено при значительных допущениях, в частности, несжимаемости среды, кроме того, рассматривают среднее значение доплеровского сдвига, поэтому не учитывают мгновенные фазовые соотношения отраженного поля в неоднородной случайной среде.

Значительно меньше исследовано АЗ в условиях температурных инверсий. Известна попытка использовать (1) в предположении существования мелкомасштабной турбулентности в инверсионных слоях.

При температурной инверсии АПС можно представить как плоскостойкую структуру (рис. 3) [49].

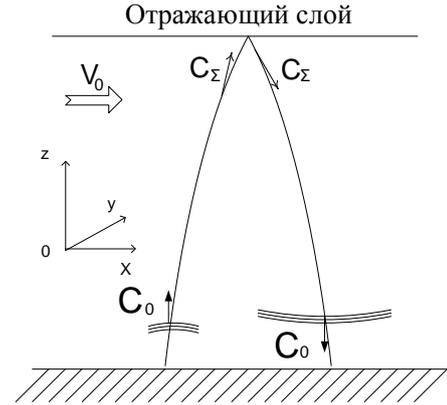


Рис. 3. АЗ в условиях температурной инверсии

Однако, даже при гипотетической зондирующей посылке с плоским фазовым фронтом и задании функций распределений скорости $c(r)$ и коэффициента отражения $K(r)$ в основе прямой задачи АЗ, определения параметров принятого сигнала $u(t)$, лежит решение нелинейного интегрального уравнения вида:

$$r(t) = \int_0^t c(r(t')) dt'$$

и далее

$$u(t) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} U[t - 2 \int_0^{r'} c(r'')^{-1} dr''] K(r') dr', \quad (2)$$

где $r_{\min} = \int_T^t c(r) dt'$, $r_{\max} = \int_0^t c(r) dt'$

$K(r)$ – коэффициент отражения; $U(t)$ – зондирующая посылка; T – длительность зондирующей посылки.

Здесь не рассматриваются коэффициенты связи электрических и акустических сигналов и считается, что между проходом зондирующей посылки и отраженных звуковых волн состояние трассы не меняется. При реальном расходящемся зондирующим пучке задача еще более усложняется, а принятый сигнал становится шумоподобным. На рис. 4 представлены осциллограммы принятых сигналов в условиях турбулентного АПС (рис. 4а) и в условиях ночной инверсии (рис. 4б).

Сигналы получены в процессе наблюдений, которые проводились в Проблемной лаборатории зондирования атмосферы Харьковского института радиотехники (ПНИЛ ЗА ХИРЭ) на полигоне Одесского гидрометеорологического института (ОГМИ) в период 1985-1992гг [50].

Значительные осцилляции как амплитуды, так и мгновенной частоты, изменение спектрального состава их пульсаций, явно выраженное отличие их спектров в настоящее время не имеют объяснений. В случае температурной инверсии, пульсации мгновенной частоты не могут соответствовать реальной скорости движения среды.

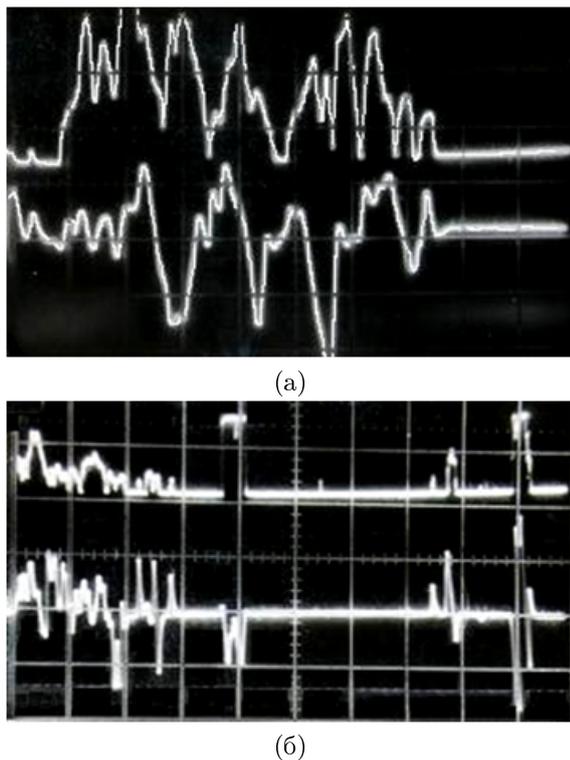


Рис. 4. Принятый сигнал АЗ. Верхний луч – амплитуда принятого сигнала, нижний – мгновенная частота

4 Типы и конструкции содаров

Уже в самом начале развития техники АЗ содары начали создавать по трехкомпонентной схеме, например, содары фирмы *Remtech INC*, Франция, относящиеся к середине 70-х годов.

Развитие электронной элементной базы, микроконтроллерной и компьютерной техники позволили поднять конструкции содаров на более высокий технический уровень. В них стали активно использовать фазированные антенные решетки электроакустических преобразователей (ФАРЭП), например, испанская фирма *InterMET* или американская *Scintec*.

Использование ФАРЭП позволило увеличить излучаемую мощность. При этом во многих конструкциях трехлучевых содаров традиционная схема построения с отдельными каналами сохранялась, например, немецкой фирмы *Metek*. Дальнейшее развитие конструкции содаров получили благодаря введению современных микроконтроллеров в систему управления ФАРЭП, в блоки формирования и приема сигнала. Это позволило с помощью одной ФАРЭП формировать необходимое количество лучей, оперативно управляя их параметрами. Это позволило создавать содары по схеме с одной управляемой ФАРЭП *Metek.Doppler-sodar-pcs-2000*

¹ *Remtech PA-0 SODAR acoustic wind profiler*

² *Time height plots measured by SODAR*

или содары фирм *Minisodar. Atmospheric Systems Corporation* (США) и *Atmospheric research Pty Ltd* (Австралия). В современных содарах на основе ФАРЭП реализуется защита от шумов¹.

Современные содары оснащаются системами автономного питания на основе солнечных элементов, системами связи и прочими вспомогательными устройствами.

5 Результаты содарных наблюдений

Наиболее ценным результатом содарных наблюдений можно считать визуализацию структуры АПС. Несмотря на ограниченный объем численных значений получаемых метеоданных, наглядное представление структуры АПС может во многом способствовать формированию адекватных моделей его динамики, привязанных к конкретной местности.

Потенциальная возможность высотных измерений без строительства дорогостоящих метеомачт привлекала исследователей проводить содарное зондирование в различных условиях. Создание мобильных систем, а дешевизна и простота их эксплуатации, автономность позволяет проводить длительные сеансы наблюдений. Результаты таких содарных наблюдений в достаточном количестве есть в открытом доступе. В качестве примера можно привести двухнедельные записи высотных профилей скорости и направления ветра². Такие данные используют при оценке ветроэнергетического потенциала.

В настоящее время сравнительно хорошо сформировано представление о динамике АПС в континентальных, равнинных областях.

Как правило, в период устойчивого антициклона в летний период в ночные часы образовывается устойчивый инверсионный слой с высоким градиентом температуры. Он обуславливает значительный уровень отражения. Его высота составляла от 100 до 200м. Прогрев поверхности в утренние часы приводит к подъему охлажденной воздушной массы и разрушению инверсии. Дневная конвекция продолжается до захода солнца. После чего начинает снова образовываться ночной инверсионный слой.

В переходные периоды и в периоды циклонов действует большее число метеофакторов. Еще большее их число действует на границе суша-море. На рис. 5а-г показаны результаты наблюдений, проведенные в ПНИЛ ЗА ХИРЭ на полигоне ОГМИ в рамках исследования условий распространения радиоволн в прибрежной зоне [50].

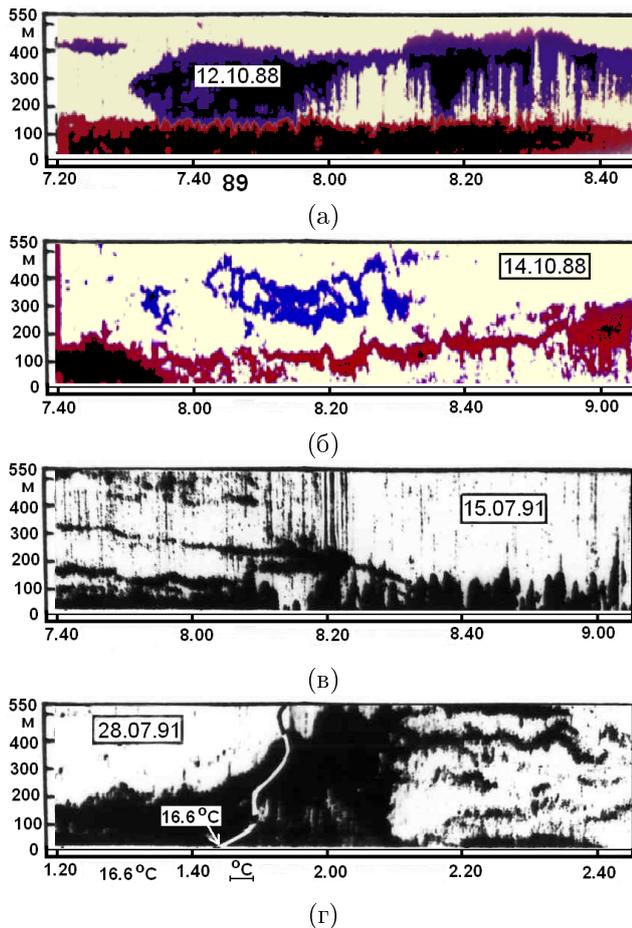


Рис. 5. Примеры результатов акустического зондирования

Адвективный туман над ночной инверсией (рис. 5а, 7-30 и далее) образовался в результате переноса относительно теплой и влажной воздушной массы со стороны моря на охладившуюся за ночь поверхность суши. Существование воды одновременно в капельной фазе и в виде пара, обусловило высокий уровень отражения звуковых волн.

Низкая облачность в осенний период (рис. 5б) также обусловлена влиянием разности температур и влажности воздушных масс, сформировавшихся над поверхностью моря и суши. Только в этом случае общий температурный фон был выше и условия для фазового перехода водяного пара возникли в приподнятых слоях АПС.

В период бризовой циркуляции два потока воздуха с различными параметрами движутся навстречу друг другу. Как правило, они разделены по высоте. На границах бризовых потоков динамические факторы приводят к образованию турбулентности, а температурные неоднородности приводят к формированию отражающих слоев. На рис. 5в видно разрушение нескольких бризовых струй, которые сформировались вследствие кривизны береговой линии уже при начавшемся прогреве поверхности суши в утренние часы.

Наиболее сложная ситуация возникает при прохождении синоптических фронтов. На рис. 5г пока-

зано прохождение теплого фронта. Оно привело к образованию сильной турбулентности по всей высоте АПС. Приземная температура повысилась на 3...4 ОС. В дальнейшем в пришедшей теплой массе развивалась бризовая циркуляция и формировалась приземная инверсия. В 01-50 с помощью системы радиоакустического зондирования (РАЗ-10-20 ХИ-РЭ [51]) проведено измерение температуры воздуха по всей высоте АПС. Высотный профиль температуры показан контрастной линией.

Выводы

Создание средств измерений базируется на глубоком развитии теории. Как правило, в любой конкретной области сначала решают прямые задачи – определение параметров отклика измерительной системы при заданном состоянии объекта. При прямых измерениях этого достаточно для определения обратной связи. Акустический метод относится к косвенным. Здесь необходимо обосновано и однозначно определять состояние объекта по полученной в результате измерений неяркой первичной информации. Причем, АЗ АПС является одним из наиболее сложных случаев косвенных измерений. В этом случае требуется строгое описание самого объекта, его взаимосвязей, а также метода, средства и процесса измерений. Анализ литературных источников показал, что основные проблемы метода состоят в несовершенстве процесса выделения информации из принятого сигнала.

На основании вышесказанного можно сформулировать наиболее актуальные задачи развития метода на современном этапе. Они относятся к обратным задачам фундаментальных проблем теории рассеяния звука в неоднородной движущейся среде. Поэтому в настоящее время для решения прикладных вопросов требуется ряд последовательных поступательных шагов в направлении адаптации уже имеющихся достижений к использованию в системах АЗ. Среди актуальных задач, которые могут получить развитие на современном этапе, можно выделить следующие.

1. Уточнение моделей отражения акустических волн в устойчивом АПС в период ночных инверсий температуры.

2. Анализ возможностей многолучевого АЗ при различных фазовых соотношениях в зондирующих сигналах.

3. Анализ перспектив использования модулируемых зондирующих сигналов.

Естественно, что кроме перечисленных, существуют и более сложные задачи. К ним относится, например, анализ отражения в сжимаемой среде, или оптимизация исходных соотношений [52]. В практическом плане перспективным является путь четкого обоснования упрощений в конкретных задачах [53].

Оценка эффективности направлений совершенствования аппаратуры зондирования должна проводиться по критериям увеличения количества независимой первичной информации.

Благодарности

Данная работа выполнена благодаря поддержке со стороны проектов XDB2014-18 и No. NDJY15Z13 Хэйлунцзянского Бауи аграрного университета (КНР).

Перечень ссылок

1. Красненко Н. П. Акустическое зондирование атмосферы / Н. П. Красненко // J. Phys. D: Appl. Phys. –2007. – No.40. – pp. 45–53.
2. Каллистратова М. А. Радиоакустическое зондирование атмосферы / М. А. Каллистратова, А. Кон. – М.: Наука, 1985. – 197 с.
3. Основы акустики : в 2 т. Т.1. Пер. с англ. / Скучик Е. – М.: Мир, 1976. - 519 с.
4. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1978. – 736 с.
5. Исакович М.А. Общая акустика / М. А. Исакович. – М.: Наука, 1973.– 496 с.
6. Amamou Manel L. A theoretical and numerical resolution of an acoustic multiple scattering problem in three-dimensional case / L. Amamou Manel // Acoustical Physics, 62, 3. – pp. 280-291.
7. Копьев В. Ф. Создание заглушенной установки для аэроакустических экспериментов и исследование ее акустических характеристик / В. Ф. Копьев, В. В. Пальчиковский, И. В. Беляев, Ю. В. Берсенева, С. Ю. Макашов, В. Храмцов, А. Корин, Е. В. Сорокин, О. Ю. Кустов // Акустический журнал. – 2017. – Т.63, 1. – с.114-126.
8. Shanin A.V. Diffraction by an impedance strip I. Reducing diffraction problem to Riemann-Hilbert problems / A. V. Shanin, A. I. Korolkov // Quart. Journ. of Mech. And Appl. Math. – 2015. – V.68. – pp.321-339.
9. Коробов А. И. Влияние давления на нелинейное отражение упругих волн от границы двух твердых тел / А. И. Коробов, Н. В. Ширгина, А. Кокшайский // Акустический журнал. – 2015. – т.61, 2, с. 182-190.
10. Денисов С. Л. Исследование эффективности экранирования шума с помощью метода последовательностей максимальной длины в приложении к задачам авиационной акустики / С. Л. Денисов, А. И. Корольков // Акустический журнал. – 2017. – Т.63, 4. – с. 419-435.
11. Chen Yong. Study of thermoviscous dissipation on axisymmetric wave propagating in a shear pipeline flow confined by rigid wall. Part I. Theoretical formulation / Chen Xiaoqian, Huang Yiyong, Bai Yuzhu, Hu Dengpeng, Fei Shaoming // Acoustical Physics. – 2016. – 62, 1. – pp. 27-37.
12. Liu X., Jiang H., Huang X., Chen S. Theoretical model of scattering from flow ducts with semi-infinite axial liner splines // J. Fluid Mech. – 2016. – V.786. – pp. 62-83.
13. Agaltsov F.D. On the reconstruction of parameters of a moving fluid from the Dirichlet-to-Neumann map // Eurasian J. Mathematical and Computer Applications. – 2016. – V.4, 1. – pp.4-11.
14. Krylov V. V. Acoustic black holes: recent developments in the theory and applications / V. V. Krylov V.V. // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 2014. – V.61. N 8. – pp.1296-1306.
15. Agaltsov A. D. Uniqueness and non-uniqueness in acoustic tomography of moving fluid / A. D. Agaltsov, R. G. Novikov // J. Inverse and Ill-Posed Problems. –2016. – Т. 24. – 3. – pp. 333-340.
16. Chen J. Simultaneously measuring thickness, density, velocity and attenuation of thin layers using $V(z,t)$ data from time-resolved acoustic microscopy / J. Chen, X. Bai, K. Yang, B.-F. Ju // Ultrasonics. – 2015. – V.56– pp.505.
17. Скворцов Б.В. Теоретические основы дистанционного акустического контроля уровня и плотности жидких контактирующих сред на границе раздела / Б. В. Скворцов, А. В. Солнцева, С. А. Борминский, Л. В. Родионов // Акустический журнал. – 2016. – 62, 6. – с. 731-737.
18. Зотов Д. И. Восстановление векторного поля течения функциональным алгоритмом Новикова-Агальцова и аддитивно-корреляционным способом / Д. И. Зотов, А. С. Шуруп, О. Д. Румянцева // Изв.РАН. Сер.Физическая. – 2017. – Т.81, 1. – С.111-116.
19. Лайхтман Д. Л. Физика пограничного слоя атмосферы / Д.Л. Лайхтман. – Л.: Гидрометеиздат. – 1970. – 342 с.
20. Драганов Б. Х. К вопросу о динамике приземной атмосферы / Б.Х. Драганов // Энергетика та автоматика. – 2015. – №3. –с.19–25.
21. Хргиан А. Х. Физика атмосферы / А. Х. Хргиан. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 647 с.
22. Фрик П. Г. Турбулентность: подходы и модели / П. Г. Фрик. – Ижевск: Изд. ИКИ, 2003. – 292 с.
23. Banerjee T. Revisiting the formulations for the longitudinal velocity variance in the unstable atmospheric surface layer / T. Banerjee, G. G. Katul, S. T. Salesky, M. Chamecki // Q J R Meteorol Soc. – 2014. – 141. – pp. 1699–1711.
24. Chamecki M. Scaling laws for the longitudinal structure function in the atmospheric surface layer / M. Chamecki, N. L. Dias, S.T. Salesky, Y. Pan // J Atmos Sci. – 2017. – 74 (4). – pp.1127–1147.
25. Crivellaro B. L. Spectral effects on scalar correlations and fluxes / B. L. Crivellaro, N. L. Dias, T. Chor // Am J Environ Eng. – 2013. – 3. – с.3–17.
26. Колмогоров А. Н. Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // УФН. — 1967. — Вып. 93. — pp. 476–481.
27. Монин А. С. Статистическая гидромеханика. Ч.1 / А. С. Монин, А. М. Яглом. – М.: Наука, 1965.- 640 с.
28. Турбулентность. Принципы и применения / Под ред. У. Фроста, Т. Моулдена. М.: Мир, 1980. – 536 с.
29. Ковальногов Н. Н. Прикладная механика жидкости и газов / Н. Н. Ковальногов. – Ульяновск, 2010.
30. Касилов В. Ф. Справочное пособие по гидрогазодинамике для теплоэнергетиков / В.Ф. Касилов. – 2001. – М.: Изд-во МЭИ. –272с

31. Воронцов П. А. Турбулентность и вертикальные токи в пограничном слое атмосферы / П. А. Воронцов. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 296 с.
32. Бызова Н. Л. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты распространения примеси / Под ред. Н. Л. Бызовой, Е. К. Гаргера, В. Н. Иванова. – Л.: Гидрометеиздат. – 1991. – 280 с.
33. Mahrt L. Stably stratified atmospheric boundary layers / L. Mahrt // *Annu Rev Fluid Mech.* – 2014. – 46. – pp.23–45.
34. Kang Y. Classes of structures in the stable atmospheric boundary layer / Y. Kang, D. Belušić, K. Smith-Miles // *Q J R Meteorol Soc.* – 2015. – 141. – pp. 2057–2069.
35. Acevedo O. C. The influence of submeso processes on stable boundary layer similarity relationships / O. C. Acevedo, F. D. Costa, P. E. S. Oliveira, F. S. Puhales, G. Degrazia, D. R. Roberti // *J Atmos Sci.* – 2014. – 71(1). – pp. 207–225
36. Cava D. A wavelet analysis of low-wind-speed submeso motions in a nocturnal boundary layer / D. Cava, L. Mortarini, U. Giostra, R. Richiardone, D. Anfossi // *Q J R Meteorol Soc.* – 2017. – Т. 143. – 703. – pp.661-669.
37. Vemado F. A Severe weather caused by heat island and sea breeze effects in the metropolitan area of São Paulo. Brazil / F. Vemado, F. Pereira // *Adv Meteorol.* – 2016. – 8364. – pp.134.
38. Sun J. Review of wave-turbulence interactions in the stable atmospheric boundary layer / J. Sun, C. J. Nappo, L. Mahrt, D. Belušić, B. Grisogono, D. R. Stauffer, M. Pulido, C. Staquet, Q. Jiang, A. Pouquet et al // *Rev Geophys.* – 2015. – 53(3). – pp. 956–993.
39. Suarez A. Wavelet-based methodology for the verification of stochastic submeso and meso-gamma fluctuations / A. Suarez, D. R. Stauffer, B. J. Gaudet // *Mon Weather Rev.* – 2015. – 143(10). – pp.4220–4235.
40. Sun J. Wind and temperature oscillations generated by wave-turbulence interactions in the stably stratified boundary layer / J. Sun, L. Mahrt, C. Nappo, D. H. Lenschow // *J Atmos Sci.* – 2015. – 72(4). – pp.1484–1503.
41. Vercauteren N. A clustering method to characterize intermittent bursts of turbulence and interaction with submesomotions in the stable boundary layer / N. Vercauteren, R. Klein // *J Atmos Sci.* – 2015. – 72(4). – pp.1504–1517.
42. Kehler S. High resolution deterministic prediction system (HRDPS) simulations of Manitoba lake-breezes / S. Kehler, J. Hanesiak, M. Curry, D. M. L. Sills, N. Taylor // *Atmos Ocean.* – 2016. – 54. – pp. 93–107.
43. Vercauteren N. Investigation of interactions between scales of motion in the stable boundary layer / N. Vercauteren, L. Mahrt, R. Klein // *Q J R Meteorol Soc.* – 2016. – Т. 142. – 699. – pp.2424-2433.
44. Wentworth G. R. Impact of lake-breezes on ozone and nitrogen oxides in the Greater Toronto Area / G. R. Wentworth, J.G. Murphy, D. M. L. Sills // *Atmos Environ.* – 2015. – 109. – pp.52–60.
45. Curry M. A radar-based investigation of lake-breezes in southern Manitoba, Canada / M. Curry, J. Hanesiak, D. M. L. Sills // *Atmos Ocean.* – 2015. – 53. – pp.237–250.
46. Ram K. Variability in aerosol optical properties over an urban site, Kanpur, in the Indo-Gangetic plain: a case study of haze and dust events / K. Ram, S. Singh, M. M. Sarin, A. K. Srivastava, S. N. Tripathi // *Atmos Res.* – 2016. – 174–175. – pp.52–61.
47. Осташев В.Е. Распространение и рассеяние звуковых волн в турбулентных средах (атмосфере и океане) / В.Е.Осташев // *Оптика атмосферы и океана.* – 1991. – Т. 4. № 9. – С. 931–937.
48. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере / В. И. Татарский. – М.: Наука, 1967. – 548 с.
49. Бреховских Л. М. Акустика слоистых сред / Л. М. Бреховских, О. А. Годин. – М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат.лит. – 1989. – 416 с.
50. Liu Chang. Radio acoustic sounding systems: part 1. The diffraction problem for a bistatic zone / Liu Chang, A. Yu. Panchenko, M. I. Slipchenko // *Telecommunication and Radio Engineering.* – 2013. – №72(14). – P. 1289–1296.
51. Ульянов Ю. Н. Двухчастотная радиоакустическая система / Ю. Н. Ульянов // *Труды VIII Всесоюз. симп. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы.* – Томск, 1984.- Ч.2.- С.196-199.
52. Panchenko A. Yu. Equation of state in the set of acoustics equations for a moving non-uniform medium / A. Yu. Panchenko // *Telecommunications and Radio Engineering.* Begell Hous, Inc., New York, NY, (USA). – 1998. – Vol.51, 4. – pp.22-25.
53. Блохинцев Д. И. Акустика неоднородной движущейся среды / Д. И. Блохинцев. – М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат.лит., 1981. – 206 с.
54. Metek [Электронный ресурс] - Режим доступа до ресурсу: <http://www.metek.de/product-variants/doppler-sodar.html>.

References

- [1] Krasnenko N.P. (1986) *Akusticheskoye zondirovaniye atmosfery* [Acoustic sounding of the atmosphere], Novosibirsk, Nauka, 166 p.
- [2] Kallistratova M.A. and Kon A.I. (1985) *Radioakusticheskoye zondirovaniye atmosfery* [Radioacoustic sounding of the atmosphere], Moscow, Nauka, 197 p.
- [3] Skudrzyk E. (1971) *The Foundations of Acoustics. Basic Mathematics and Basic Acoustics*, Springer-Verlag, DOI: 10.1007/978-3-7091-8255-0
- [4] Loytsyanskiy L.G. (1978) *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of liquid and gas], Moscow, Nauka, 736 p.
- [5] Isakovich M.A. (1973) *Obshchaya akustika* [General acoustics], Moscow, Nauka, 496 p.
- [6] Amamou M.L. (2016) A theoretical and numerical resolution of an acoustic multiple scattering problem in three-dimensional case. *Acoustical Physics*, Vol. 62, Iss. 3, pp. 280-291. DOI: 10.1134/s1063771016030015
- [7] Kopiev V.F., Palchikovskiy V.V., Belyaev I.V., Bersenev Y.V., Makashov S.Y., Khramtsov I.V., Korin I.A., Sorokin E.V. and Kustov O.Y. (2017) Construction of an anechoic chamber for aeroacoustic experiments and examination of its acoustic parameters. *Acoustical Physics*, Vol. 63, Iss. 1, pp. 113-124. DOI: 10.1134/s1063771017010043

- [8] Shanin A.V. and Korolkov A.I. (2015) Diffraction by an impedance strip I. Reducing diffraction problem to Riemann–Hilbert problems. *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, Vol. 68, Iss. 3, pp. 321-339. DOI: 10.1093/qjmath/hbv010
- [9] Korobov A.I., Shirgina N.V. and Kokshaiskii A.I. (2015) A pressure effect on the nonlinear reflection of elastic waves from the boundary of two solid media. *Acoustical Physics*, Vol. 61, Iss. 2, pp. 165-172. DOI: 10.1134/s1063771015020074
- [10] Denisov S.L. and Korolkov A.I. (2017) Investigation of noise-shielding efficiency with the method of sequences of maximum length in application to the problems of aviation acoustics. *Acoustical Physics*, Vol. 63, Iss. 4, pp. 462-477. DOI: 10.1134/s1063771017040017
- [11] Chen Y., Chen X., Huang Y., Bai Y., Hu D. and Fei S. (2016) Study of thermoviscous dissipation on axisymmetric wave propagating in a shear pipeline flow confined by rigid wall. Part I. theoretical formulation. *Acoustical Physics*, Vol. 62, Iss. 1, pp. 27-37. DOI: 10.1134/s1063771016010061
- [12] Liu X., Jiang H., Huang X. and Chen S. (2015) Theoretical model of scattering from flow ducts with semi-infinite axial liner splices. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 786, pp. 62-83. DOI: 10.1017/jfm.2015.633
- [13] Agaltsov A. (2016) On the reconstruction of parameters of a moving fluid from the Dirichlet-to-Neumann map. *Eurasian J. Mathematical and Computer Applications*, Vol. 4, No 1, pp. 4-11. arXiv:1512.06367
- [14] Krylov V.V. (2014) Acoustic black holes: recent developments in the theory and applications. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 61, Iss. 8, pp. 1296-1306. DOI: 10.1109/tuffc.2014.3036
- [15] Agaltsov A.D. and Novikov R.G. (2016) Uniqueness and non-uniqueness in acoustic tomography of moving fluid. *Journal of Inverse and Ill-posed Problems*, Vol. 24, Iss. 3. DOI: 10.1515/jiip-2015-0051
- [16] Chen J., Bai X., Yang K. and Ju B. (2015) Simultaneously measuring thickness, density, velocity and attenuation of thin layers using $V(z,t)$ data from time-resolved acoustic microscopy. *Ultrasonics*, Vol. 56, pp. 505-511. DOI: 10.1016/j.ultras.2014.09.019
- [17] Skvortsov B.V., Solntseva A.V., Borminskii S.A. and Rodionov L.V. (2016) Theoretics of remote acoustic monitoring of the level and density of fluid contacting media at the interface. *Acoustical Physics*, Vol. 62, Iss. 6, pp. 747-753. DOI: 10.1134/s1063771016060166
- [18] Zotov D.I., Shurup A.S. and Rumyantseva O.D. (2017) Vector field reconstruction of flows using the Novikov–Agaltsov functional algorithm and the additive correlation method. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, Vol. 81, Iss. 1, pp. 101-105. DOI: 10.3103/s1062873817010312
- [19] Laykhtman D.L. (1970) *Fizika pograničnogo sloya atmosfery* [Physics of the boundary layer of the atmosphere], Hydrometeoizdat, 342 p.
- [20] Draganov B. Kh. (2015) *K voprosu o dinamike prizemnoy atmosfery [To the question of the dynamics of the surface atmosphere]* // Enerhetika ta avtomatyka [Power engineering and automation], Vol.3, pp.19-25.
- [21] Khrgian A. Kh. (1969) *Fizika atmosfery* [Physics of the Atmosphere] Hydrometeoizdat, 647 p.
- [22] Friks P.G. (2003) *Turbulentnost': podkhody i modeli* [Turbulence: Approaches and Models], Izhevsk, IKI, 292 p.
- [23] Banerjee T., Katul G.G., Salesky S.T. and Chamecki M. (2014) Revisiting the formulations for the longitudinal velocity variance in the unstable atmospheric surface layer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 141, Iss. 690, pp. 1699-1711. DOI: 10.1002/qj.2472
- [24] Chamecki M., Dias N.L., Salesky S.T. and Pan Y. (2017) Scaling Laws for the Longitudinal Structure Function in the Atmospheric Surface Layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 74, Iss. 4, pp. 1127-1147. DOI: 10.1175/jas-d-16-0228.1
- [25] Crivellaro B.L., Dias N.L. and Chor T. (2013) Spectral Effects on Scalar Correlations and Fluxes. *American Journal of Environmental Engineering*, Vol. 3, Iss. 1, pp. 13-17. DOI: 10.5923/j.ajee.20130301.03
- [26] Kolmogorov A.N. (1968) Local structure of turbulence in an incompressible viscous fluid at very high Reynolds numbers. *Soviet Physics Uspekhi*, Vol. 10, Iss. 6, pp. 734-746. DOI: 10.1070/pu1968v010n06abeh003710
- [27] Monin A.S. and Yaglom A. M. (1965) *Statisticheskaya gidromekhanika. Chast' 1 Mekhanika turbulentnosti* [Statistical hydromechanics. Ch. 1 Mechanics of turbulence], Moscow, Nauka, 640 p.
- [28] Frost W. and Moulden T.H. eds. (1977) *Handbook of Turbulence. Volume 1 Fundamentals and Applications*, Plenum Press, 536 p. DOI: 10.1007/978-1-4684-2322-8
- [29] Koval'nogov N. N. (2010) *Prikladnaya mekhanika zhidkosti i gazov [Applied Mechanics of Fluids and Gases]*, Ulyanovsk, Ulyanovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet [Ulyanovsk State Technical University], 219 p.
- [30] Kasilov V.F. (2001) *Spravochnoye posobiye po gidrogazodinamike dlya teploenergetikov [Reference book on hydrogasdynamics for heat and power engineering]*, Izdvo Moskovskiy energeticheskiy institut [Moscow Institute of Energy Engineering], 272p.
- [31] Vorontsov P.A. (1966) *Turbulentnost' i vertikal'nyye toki v pograničnom sloye atmosfery* [Turbulence and vertical currents in the boundary layer of the atmosphere], Gidrometeoizdat, 296 p.
- [32] Byzova N.L. eds., Gargera E.K. and Ivanova V.N. (1991) *Eksperimental'nyye issledovaniya atmosferno diffuzii i raschetny rasprostraneniya primesi* [Experimental studies of atmospheric diffusion and calculation of impurity diffusion], Gidrometeoizdat, 280 p.
- [33] Mahrt L. (2014) Stably Stratified Atmospheric Boundary Layers. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 46, Iss. 1, pp. 23-45. DOI: 10.1146/annurev-fluid-010313-141354
- [34] Kang Y., Belušić D. and Smith-Miles K. (2015) Classes of structures in the stable atmospheric boundary layer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 141, Iss. 691, pp. 2057-2069. DOI: 10.1002/qj.2501
- [35] Acevedo O.C., Costa F.D., Oliveira P.E.S., Puhales F.S., Degrazia G.A. and Roberti D.R. (2014) The Influence of Submeso Processes on Stable Boundary Layer Similarity Relationships. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 71, Iss. 1, pp. 207-225. DOI: 10.1175/jas-d-13-0131.1
- [36] Cava D., Mortarini L., Giostra U., Richiardone R. and Anfossi D. (2016) A wavelet analysis of low-wind-speed submeso motions in a nocturnal boundary layer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 143, Iss. 703, pp. 661-669. DOI: 10.1002/qj.2954

- [37] Vemado F. and Pereira Filho A. (2016) Severe Weather Caused by Heat Island and Sea Breeze Effects in the Metropolitan Area of São Paulo, Brazil. *Advances in Meteorology*, Vol. 2016, , pp. 1-13. DOI: 10.1155/2016/8364134
- [38] Sun J., Nappo C.J., Mahrt L., Belušić D., Grisogono B., Stauffer D.R., Pulido M., Staquet C., Jiang Q., Pouquet A., Yagüe C., Galperin B., Smith R.B., Finnigan J.J., Mayor S.D., Svensson G., Grachev A.A. and Neff W.D. (2015) Review of wave-turbulence interactions in the stable atmospheric boundary layer. *Reviews of Geophysics*, Vol. 53, Iss. 3, pp. 956-993. DOI: 10.1002/2015rg000487
- [39] Suarez A., Stauffer D.R. and Gaudet B.J. (2015) Wavelet-Based Methodology for the Verification of Stochastic Submeso and Meso-Gamma Fluctuations. *Monthly Weather Review*, Vol. 143, Iss. 10, pp. 4220-4235. DOI: 10.1175/mwr-d-15-0075.1
- [40] Sun J., Mahrt L., Nappo C. and Lenschow D.H. (2015) Wind and Temperature Oscillations Generated by Wave-Turbulence Interactions in the Stably Stratified Boundary Layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 72, Iss. 4, pp. 1484-1503. DOI: 10.1175/jas-d-14-0129.1
- [41] Vercauteren N. and Klein R. (2015) A Clustering Method to Characterize Intermittent Bursts of Turbulence and Interaction with Submesoscale Motions in the Stable Boundary Layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 72, Iss. 4, pp. 1504-1517. DOI: 10.1175/jas-d-14-0115.1
- [42] Kehler S., Hanesiak J., Curry M., Sills D. and Taylor N. (2016) High Resolution Deterministic Prediction System (HRDPS) Simulations of Manitoba Lake Breezes. *Atmosphere-Ocean*, Vol. 54, Iss. 2, pp. 93-107. DOI: 10.1080/07055900.2015.1137857
- [43] Vercauteren N., Mahrt L., Klein R. (2016) Investigation of interactions between scales of motion in the stable boundary layer. *Q J R Meteorol Soc*, Vol. 142, pp. 2424-2433. DOI: 10.1002/qj.2835
- [44] Wentworth G., Murphy J. and Sills D. (2015) Impact of lake breezes on ozone and nitrogen oxides in the Greater Toronto Area. *Atmospheric Environment*, Vol. 109, pp. 52-60. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.03.002
- [45] Curry M., Hanesiak J. and Sills D. (2015) A Radar-Based Investigation of Lake Breezes in Southern Manitoba, Canada. *Atmosphere-Ocean*, Vol. 53, Iss. 2, pp. 237-250. DOI: 10.1080/07055900.2014.1001317
- [46] Ram K., Singh S., Sarin M., Srivastava A. and Tripathi S. (2016) Variability in aerosol optical properties over an urban site, Kanpur, in the Indo-Gangetic Plain: A case study of haze and dust events. *Atmospheric Research*, Vol. 174-175, pp. 52-61. DOI: 10.1016/j.atmosres.2016.01.014
- [47] Ostashev B.E. (1991) Rasprostraneniye i rasseyaniye zvukovykh voln v turbulentnykh sredakh (atmosfera i okeane) [Propagation and scattering of sound waves in turbulent media (atmosphere and ocean)]. *Optika atmosfery i okeana*, Vol. 4, No 09, pp. 931-937.
- [48] Tatarskiy V.I. (1967) *Rasprostraneniye voln v turbulentnoy atmosfere* [Propagation of waves in a turbulent atmosphere], Moscow, Nauka, 548 p.
- [49] Brekhovskikh L.M. and Godin O.A. (1989) *Akustika sloistykh sred* [Acoustics of layered media], Moscow, Nauka, 416 p.
- [50] Liu Chang, Panchenko A. Yu., Slipchenko M. I. (2013) Radio acoustic sounding systems: part 1. The diffraction problem for a bistatic zone. *Telecommunication and Radio Engineering*. *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol. 72, Iss. 14, pp. 1289-1296 . DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i14.30
- [51] Liu Chang, Panchenko A. Yu. and Slipchenko M. I. (2013) Radio acoustic sounding systems: part 1. The diffraction problem for a bistatic zone. *Telecommunication and Radio Engineering*, No 72(14), pp. 1289-1296. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i14.30
- [52] Panchenko A.Y. (1997) Equation of State in the Set of Acoustics Equations for a Moving Non-Uniform Medium. *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol. 51, Iss. 4, pp. 22-25. DOI: 10.1615/telecomradeng.v51.i4.20
- [53] Blokhintsev D. I. (1981) *Akustika neodnorodnoy dvizhushcheyasya sredy* [Acoustics of an inhomogeneous moving medium], Moscow, Nauka, 206 p.

Акустичний метод зондування пограничного шару атмосфери. Сучасний стан та перспективи розвитку

Лю Чан, Ібраїмов І. К., Панченко А. Ю.

Акустичні методи зондування атмосфери дозволяють при невеликих витратах в on-line режимі відслідковувати метеорологічну ситуацію в атмосферному граничному шарі. Актуальність розвитку даних методів визначається необхідністю моніторингу навколишнього середовища в умовах зростання техногенного навантаження. Акустичні хвилі значно чутливіші до змін параметрів повітря, ніж електромагнітні. Однак в даний час ефективність акустичних систем зондування, у порівнянні з лазерними, тепловими та іншими системами відносно невисока. Розвиток методу акустичного зондування має два напрямки: вдосконалення теоретичних описів взаємодії акустичних хвиль з атмосферою і вдосконалення техніки зондування. Тому оцінка найбільш перспективних шляхів вимагає детального аналізу сучасного стану, як теоретичних основ, так і технічних реалізацій методу. В роботі показано, що сучасні акустичні локатори виконані на високому технічному рівні і в даний час основна проблема методу полягає у відсутності адекватної теорії обробки отриманої інформації. У роботі сформульовані найбільш актуальні завдання розвитку методу на сучасному етапі. Вони відносяться до зворотних завдань фундаментальних проблем теорії розсіювання звуку в неоднорідному рухомому середовищі. Тому в даний час для вирішення прикладних питань потрібен ряд послідовних поступальних кроків у напрямку адаптації вже наявних досягнень до використання в системах акустичного зондування. Серед актуальних завдань, які можуть отримати розвиток на сучасному етапі, можна виділити найбільш важливі. Це уточнення моделей відбиття акустичних хвиль в стійкому атмосферному граничному шарі в період нічних інверсій температури. Проведено аналіз можливостей багатопроменевого зондування при різних фазових співвідношеннях в зондуючих сигналах та аналіз перспектив використання модульованих зондуючих сигналів. Природно, що крім перерахованих, існують і більш складні завдання. До них відноситься, наприклад, аналіз

відбиття у стискаємому середовищі, або оптимізація вихідних співвідношень. У практичному плані перспективним є чітке обґрунтування спрощень в конкретних випадках.

Ключові слова: турбулентність; звук в неоднорідному середовищі; спрямованість антен; вітер; температура; вологість; зрушення вітру

Acoustic method of atmosphere probing. Modern state and development prospects

Chang Liu, Ibraimov I. K., Panchenko A. Yu.

Acoustic methods of atmosphere sounding allow us to track the meteorological situation in the atmospheric boundary layer at low costs on-line. The urgency of the these methods development is determined by the need to monitor the environment in conditions of man-caused load increasing. Acoustic waves are much more sensitive to changes in air parameters than electromagnetic waves. However, at present, their effectiveness, compared with laser, thermal and other systems is relatively low. The development of the acoustic sounding method has two directions: the improvement of theoretical descriptions of the interaction of acoustic waves with the atmosphere and the improvement of sounding techniques. Therefore, the evaluation of the most promising paths requires a detailed

analysis of the current state, both theoretical foundations and technical implementations of the method. The paper shows that modern acoustic locators are performed at a high technical level and at present the main problem of the method is the lack of an adequate theory of processing the information obtained. The most urgent problems of the method development at the present stage are formulated in the work. They relate to the inverse problems of the fundamental problems of the theory of sound scattering in an inhomogeneous moving medium. Therefore, at present, a number of consecutive progressive steps are required to solve applied problems in the direction of adapting existing achievements to the use in sodar's systems. Among the urgent tasks that can be developed at the current stage, we can identify the most important. This is a refinement of models of acoustic waves reflection in a stable atmospheric boundary layer in the period of nighttime temperature inversions. Analysis of multi-path probing possibilities for various phase relationships in emitted signals is carried out. Analysis of the prospects for the use of modulated sounding signals is conducted. Naturally, in addition to the above, there are more complex tasks. These include, for example, the reflection analysis in a compressible medium or the optimization of the initial relationships. In practical terms, a clear justification for simplifications in specific tasks is promising.

Key words: turbulence; sound in an inhomogeneous medium; antenna directivity; wind; temperature; humidity; wind shear