

Развитие и применение акустических средств диагностики атмосферного пограничного слоя

С.Л. Одинцов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 24.05.2019 г.

В статье кратко изложены основные направления и результаты исследований атмосферного пограничного слоя с использованием методов и технических средств акустической диагностики, проводившихся в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН в последнее десятилетие.

Ключевые слова: акустическое зондирование, приземный слой, пограничный слой, содар, ультразвуковой анемометр-термометр; acoustic sounding, surface air layer, atmospheric boundary layer, sodar, ultrasonic anemometer-thermometer.

Введение

Разработка методов и технических средств акустической диагностики атмосферного пограничного слоя (АПС), а также изучение процессов и полей в АПС с использованием этих средств проводятся в Институте оптики атмосферы (ИОА) им. В.Е. Зуева СО РАН с начала 70-х гг. XX в. Для решения поставленных задач 20 января 1977 г. в Институте было создано отдельное структурное подразделение (сейчас это группа атмосферной акустики). За прошедшие десятилетия накоплен значительный опыт в разработке и использовании дистанционных (содары) и локальных (ультразвуковые анемометры-термометры) акустических средств исследования атмосферы. Представленный материал посвящен исследованиям, проведенным за последние 10 лет. Обзор работ за более ранние периоды можно найти в [1–3]. В настоящей статье реферативно представлены четыре ключевых направления и результаты работы группы атмосферной акустики ИОА СО РАН.

1. Дистанционная акустическая диагностика АПС

Основное внимание при совершенствовании средств дистанционной акустической диагностики АПС – метеорологических акустических локаторов (содаров) серии «Волна-4» – было уделено расширению их функциональных возможностей и улучшению эксплуатационных характеристик. Одной из главных задач стала разработка аппаратно-программного блока для «абсолютной» калибровки измерительных каналов содара, что позволило проводить

оперативную дистанционную диагностику высотного распределения абсолютных значений структурной характеристики пульсаций температуры воздуха C_T^2 в АПС. Достоверная оценка этой величины полезна при контроле термодинамических процессов в АПС и открывает возможности для расчета на ее основе других параметров, например структурной характеристики показателя преломления оптических волн в воздухе C_n^2 и турбулентных потоков тепла. К настоящему времени отработана и экспериментально опробована методика оперативной «абсолютной» калибровки содара, трехканальная версия которого с такой функцией получила наименование «Волна-4М-СТ». Отметим еще одну особенность этого содара: он работает с циклической сменой рабочих частот в измерительных каналах, что расширяет его возможности и повышает качество интерпретации полученных сигналов по сравнению с одночастотными содарами. Основные функции содара «Волна-4М-СТ» изложены в публикациях [4, 5] и защищены патентом на полезную модель [6].

Применение содаров для дистанционной диагностики АПС обеспечило возможность изучения корреляций скорости ветра на разных уровнях [7, 8], идентификацию внутренних гравитационных волн (волн плавучести) в АПС [9], исследования высотных закономерностей распределения C_T^2 [10], разработку и апробирование методики измерения профилей турбулентных потоков тепла в конвективном АПС [11]. Кроме того, результаты работы содара были использованы в ряде комплексных экспериментов, направленных в том числе на изучение переноса газовых и аэрозольных примесей в атмосфере [12–15].

За последние годы основной акцент в работе группы атмосферной акустики ИОА СО РАН был

* Сергей Леонидович Одинцов (odintsov@iao.ru).

сделан на решении комплексных задач, имеющих отношение к проблеме распространения оптического излучения в случайно-неоднородной стратифицированной атмосфере. Результаты работы по этой проблеме кратко изложены в разд. 3.

2. Наземная сеть ультразвуковых анемометров-термометров

Наряду с инструментом дистанционной акустической диагностики атмосферы – содаром – группа атмосферной акустики ИОА СО РАН активно использует для изучения приземного слоя атмосферы ультразвуковые анемометры-термометры (далее – ультразвуковые метеостанции – УЗМ) собственной разработки «Метео-2». Развернута сеть УЗМ в трех различных пунктах наблюдения: г. Томск (Академгородок), пригород Томска (Базовый экспериментальный комплекс ИОА СО РАН, далее – БЭК), сельская местность (территория обсерватории ИОА СО РАН «Фоновая» на берегу р. Обь). В пунктах БЭК и «Фоновая» УЗМ работают на двух уровнях – 5 и 10 м. В Академгородке УЗМ размещена на крыше лабораторного корпуса ИОА СО РАН рядом с содаром на высоте 17 м над уровнем подстилающей поверхности (5 м над уровнем крыши).

Основная задача работающей сети УЗМ – получение экспериментальных данных для изучения характеристик турбулентности в приземном слое, анализа их суточного и сезонного ходов, сопоставления с имеющимися моделями турбулентности и уточнения этих моделей применительно к конкретным условиям и пунктам наблюдений. Большой объем данных позволил провести детальный анализ и опубликовать полученные результаты по кинетической энергии турбулентности [16, 17], дисперсии [18] и анизотропии [19] компонентов вектора ветра, а также порывистости ветра в приземном слое [20]. Для исследования динамических процессов в атмосфере необходима достоверная оценка внешних масштабов температурной и ветровой турбулентности. Поэтому был проведен сопоставительный анализ методик вычисления этих параметров и выработаны определенные рекомендации [21], позволяющие проводить оценку масштабов по физически обоснованным критериям.

Значительное внимание при анализе характеристик турбулентности в приземном слое атмосферы было уделено структурным функциям температуры воздуха и компонентов вектора ветра. Важность исследований в этой области обусловлена широким использованием результатов параметризации (моделей) этих функций при решении задач распространения оптических и акустических волн в случайно-неоднородных средах. Детальный анализ экспериментальных данных показал [22–24], что далеко не всегда структурные функции, во-первых, могут быть получены, а во-вторых, подчиняются «классической» степенной модели зависимости от пространственного (или временного) сдвига. Более того, даже если реализуется степенная модель, то

ее параметры (показатель степени, область ее применимости) существенно влияют на итоговый результат в случае, когда модель используется для перехода к спектральному представлению, являющемуся основой для решения задач распространения оптического или акустического излучения в случайно-неоднородных средах [25, 26].

Еще одно применение результатов работы УЗМ – сопровождение экспериментов по распространению оптического излучения в приземном слое атмосферы. В этой области исследований проведен анализ структурной характеристики показателя преломления оптических волн C_n^2 , рассчитанной по результатам измерений температуры воздуха и атмосферного давления в различных пунктах наблюдений, на разных высотах, в разные сезоны года и разное время суток. Эти данные были сопоставлены с результатами оценок C_n^2 , полученными непосредственно оптическими инструментами [27, 28], и систематизированы [29, 30]. В итоге установлено, что имеет место систематическая недооценка значений «акустических» величин C_n^2 по сравнению с «оптическими» при высокой степени их корреляции. Причиной такого рассогласования может быть неспособность измерения УЗМ мелкомасштабных пульсаций температуры воздуха из-за эффекта их усреднения в конечной по размеру «рабочей» области УЗМ. Эти пульсации вносят заметный вклад в «оптические» оценки C_n^2 , особенно при небольших поперечных размерах лазерного пучка.

3. Температурно-ветровой комплекс

В январе 2015 г. в ИОА СО РАН был запущен в эксплуатацию метеорологический температурный профилимер МТР-5 (НПО «АТТЕХ», Россия). Он предназначен для измерения профилей температуры воздуха от уровня размещения до высоты 1 км с шагом по высоте 50 м и по времени – 5 мин. Совокупность таких приборов, как содар, приземные ультразвуковые метеостанции и температурный профилимер, позволяет проводить комплексные исследования АПС с удовлетворительным пространственно-временным разрешением. Одна из задач, решавшихся с помощью этого комплекса, заключалась в оценке возможных искажений лазерных пучков при их распространении в случайно-неоднородном, стратифицированном по температуре атмосферном пограничном слое.

Оценивалось два фактора: регулярная рефракция (отклонение от прямолинейного распространения) и радиус уширения лазерного пучка под влиянием турбулентности. Первый фактор рассчитывался на основе измеренных профилей температуры [31, 32], а второй – по профилям структурной характеристики показателя преломления C_n^2 , вычисленным с использованием результатов работы содара и УЗМ [33, 34].

Влияние регулярной рефракции на лазерный луч рассматривалось с точки зрения величины воз-

можно «промаха» при нацеливании луча от наземного источника на приемник, расположенный на некоторой высоте (до 1 км) под каким-либо зенитным углом (рассматривались зенитные углы от 0 до 85°). Расчеты, использовавшие реальные данные по профилям температуры воздуха, показали, что вероятное отклонение луча от положения приемника при длинных «настильных» трассах (больших зенитных углах) может составлять от десятков сантиметров до нескольких метров в зависимости от стратификации и увеличивается с уменьшением длины волны оптического излучения.

Возможное уширение лазерного пучка под воздействием «оптической» турбулентности рассчитывалось на основе оценок радиуса пространственной когерентности оптической волны, зависящего от структурной характеристики C_n^2 . Величина C_n^2 линейно связана со структурной характеристикой температурного поля C_T^2 , пространственно-временное распределение которой определяется по результатам акустического зондирования АПС. Наиболее подробно проанализирован радиус когерентности оптической волны, поскольку он важен не только для оценки возможного уширения лазерных пучков под воздействием турбулентности, но и для решения других задач оптики атмосферы.

Определенное внимание было уделено малоизученной области – комплексному (одновременному) воздействию рефракции и турбулентности на характеристики лазерных пучков при различных длинах волн оптического излучения, в различное время суток и время года. Установлено, в частности, что при мощных температурных инверсиях в АПС вместе со значительной регулярной рефракцией, приводящей к большим «промахам» лазерного пучка при нацеливании на приемник, одновременно может происходить его существенное уширение [35].

4. Распространение звука в атмосфере

Также в группе атмосферной акустики проводились экспериментальные исследования по распространению звука в приземном слое. Их цель заключалась в уточнении статистических характеристик амплитуды и фазы непрерывных и импульсных звуковых сигналов при распространении в движущейся случайно-неоднородной среде. Результаты таких исследований востребованы как при решении фундаментальных проблем атмосферной акустики, так и в прикладных задачах. Обработка экспериментальных данных показала [36, 37], что на коротких приземных трассах амплитуда непрерывных и импульсных звуковых сигналов чаще всего подчиняется обобщенному закону распределения экстремальных значений, а не нормальному распределению, как постулируется существующей теорией.

На основе экспериментальных данных проведен анализ среднеквадратических отклонений (СКО) «турбулентных» флуктуаций фазы звуковых сигналов и получена их эмпирическая (близкая к линей-

ной) связь с СКО пульсаций скорости ветра [38]. При этом распределение флуктуаций фазы, как правило, подчиняется нормальному закону [39]. Разность фаз при многоканальном приеме звуковых сигналов также подчиняется нормальному закону распределения, а СКО разности фаз связано с СКО пульсаций скорости ветра по закону, близкому к линейному [40]. Статистика фазы и разности фаз при многоканальном приеме, полученная в результате обработки экспериментальных данных, может служить в том числе для уточнения алгоритмов пеленга источников звука, разработанных в группе атмосферной акустики ИОА СО РАН и основанных на анализе обобщенных взаимно корреляционных функций [41, 42].

Особым блоком работ можно считать исследования по акустической эмиссии, возникающей в процессе распространения лазерного излучения. В работах [43–45] приводятся результаты анализа акустической эмиссии, возникающей при воздействии тераваттных фемтосекундных лазерных импульсов на отдельные капли воды, аэрозоль и «чистый» воздух. Показана эффективность использования результатов оптико-акустической диагностики для решения проблем распространения сверхкоротких лазерных импульсов в различных средах.

Заключение

Обобщая изложенный в статье материал, отметим, что основные направления работы в области атмосферной акустики в ИОА СО РАН в последнее десятилетие были связаны с активным применением методов и технических средств акустической диагностики для исследования процессов и полей метеорологических параметров в нижнем слое атмосферы. Результаты исследований позволили не только получить новые знания о структуре пограничного слоя атмосферы и процессах, протекающих в нем, но и сформулировать ряд перспективных задач в области атмосферной акустики, динамической метеорологии, распространения оптических волн в турбулентной атмосфере. Также проводилась работа по совершенствованию технических средств акустической диагностики, направленная в основном на улучшение их эксплуатационных характеристик и расширение функциональных возможностей.

Исследования по акустической диагностике пограничного слоя атмосферы и распространению звука поддерживались программами Президиума и специализированных отделений РАН.

Основные приборы акустической диагностики атмосферного пограничного слоя входят в состав центра коллективного пользования «Атмосфера» ИОА СО РАН.

1. Красненко Н.П. Развитие атмосферных акустических исследований в ИОА СО РАН // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10, № 4–5. С. 542–552.
2. Одинцов С.Л. Звук исследует атмосферу // Наука – производству. 2003. № 8. С. 55–59.

3. *Одинцов С.Л.* Исследования атмосферного пограничного слоя методами локальной и дистанционной акустической диагностики в ИОА СО РАН // *Оптика атмосф. и океана*. 2009. Т. 22, № 10. С. 981–987.
4. *Камардин А.П., Гладких В.А., Одинцов С.Л., Федоров В.А.* Метеорологический акустический доплеровский локатор (содар) «ВОЛНА-4М-СТ» // *Приборы*. 2017. № 4 (202). С. 37–44.
5. *Kamardin A.P., Odintsov S.L.* Method for automatic absolute calibration of sodar measurement channels // *Proc. SPIE*. 2015. V. 96805U. DOI: 10.1117/12.2205328.
6. *Метеорологический акустический доплеровский локатор*: Пат. 173822. Россия, МПК, G 01 S 15/88, G 01 W 1/00. Камардин А.П., Одинцов С.Л., Федоров В.А., Гладких В.А.; ИОА СО РАН. № 2026126319; Заявл. 29.06.2016; Оpubл. 13.09.2017. Бюл. № 26.
7. *Гладких В.А., Макиенко А.Э., Миллер Е.А., Одинцов С.Л.* Исследование параметров пограничного слоя атмосферы в городских условиях с помощью средств локальной и дистанционной диагностики. Часть 1: Межуровневые корреляции скорости ветра // *Оптика атмосф. и океана*. 2010. Т. 23, № 11. С. 978–986.
8. *Гладких В.А., Макиенко А.Э., Миллер Е.А., Одинцов С.Л.* Исследование параметров пограничного слоя атмосферы в городских условиях с помощью средств локальной и дистанционной диагностики. Часть 2: Температура воздуха и поток тепла // *Оптика атмосф. и океана*. 2010. Т. 23, № 11. С. 987–994.
9. *Камардин А.П., Одинцов С.Л., Скороходов А.В.* Идентификация внутренних гравитационных волн в атмосферном пограничном слое по данным содара // *Оптика атмосф. и океана*. Т. 27, № 9. 2014. С. 812–818.
10. *Камардин А.П., Одинцов С.Л.* Высотные профили структурной характеристики температуры воздуха в пограничном слое атмосферы по содарным измерениям // *Оптика атмосф. и океана*. 2016. Т. 29, № 8. С. 709–714; *Kamardin A.P., Odintsov S.L.* Height profiles of the structure characteristic of air temperature in the atmospheric boundary layer from sodar measurements // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 1. P. 33–38.
11. *Гладких В.А., Камардин А.П., Невзорова И.В., Одинцов С.Л.* К вопросу о возможности применения содаров для измерения вертикальных турбулентных потоков тепла в пограничном слое атмосферы // XXIII Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»: материалы симпозиума. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2017. С. D461–D464.
12. *Камардин А.П., Коханенко А.П., Невзорова И.В., Пеннер И.Э.* Совместные исследования структуры пограничного слоя атмосферы на основе лидарных и содарных измерений // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. Т. 24, № 6. С. 543–537.
13. *Matvienko G.G., Belan B.D., Panchenko M.V., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Turchinovich S.A., Turchinovich Y.S., Eremina T.A., Kozlov V.S., Terpugova S.A., Pol'kin V.V., Yausheva E.P., Chernov D.G., Odintsov S.L., Burlakov V.D., Arshinov M.Yu., Ivlev G.A., Savkin D.E., Fofonov A.V., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Belan D.B., Grishaev M.V., Belov V.V., Afonin S.V., Balin Yu.S., Kokhanenko G.P., Penner I.E., Samoiloval S.V., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Davydov D.K., Kozlov A.V., Pestunov D.A., Rasskazchikova T.M., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Belan S.B., Shmargunov V.P., Voronin B.A., Serdyukov V.I., Polovtseva E.R., Vasil'chenko S.S., Tikhomirova O.V., Ponomarev Yu.N., Romanovskii O.A., Sinitsa L.N., Marichev V.N., Makarova M.V., Safatov A.S., Kozlov A.S., Malysheva S.B., Maksimova T.A.* Instrumentation complex for comprehensive study of atmospheric parameters // *Int. J. Remote Sens.* 2014. V. 35, N 15. P. 5651–5676.
14. *Matvienko G.G., Belan B.D., Panchenko M.V., Romanovskii O.A., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Turchinovich S.A., Turchinovich Y.S., Eremina T.A., Kozlov V.S., Terpugova S.A., Pol'kin V.V., Yausheva E.P., Chernov D.G., Zhuravleva T.B., Bedareva T.V., Odintsov S.L., Burlakov V.D., Nevzorov A.V., Arshinov M.Yu., Ivlev G.A., Savkin D.E., Fofonov A.V., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Balin Yu.S., Kokhanenko G.P., Penner I.E., Samoiloval S.V., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Davydov D.K., Kozlov A.V., Pestunov D.A., Rasskazchikova T.M., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Belan S.B., Shmargunov V.P., Kozlov A.S., Malysheva S.B.* Complex experiment on studying the microphysical, chemical, and optical properties of aerosol particles and estimating the contribution of atmospheric aerosol to Earth radiation budget // *Atmos. Meas. Tech.* 2015. V. 8. P. 4507–4520.
15. *Kokhanenko G.P., Balin Yu.S., Nasonov S.V., Penner I.E., Samoiloval S.V., Smalikhov I.N., Falits A.V., Rasskazchikova T.M., Gladkikh V.A., Odintsov S.L., Kamardin A.P., Antokhin P.N., Arshinov M.Yu.* Integrated monitoring of the atmospheric boundary layer dynamics by remote sensing methods in June 2015 in Tomsk // *Proc. SPIE*. 2016. V. 100353Y. DOI: 10.1117/12.2249120.
16. *Мамышева А.А., Одинцов С.Л.* Экспериментальная оценка кинетической энергии турбулентности в приземном слое атмосферы над урбанизированной территорией // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. Т. 24, № 9. С. 817–827.
17. *Мамышева А.А., Одинцов С.Л.* Анализ зависимости нормированной кинетической энергии турбулентности от направления ветра и типа стратификации в приземном слое атмосферы над урбанизированной территорией // *Оптика атмосф. и океана*. 2012. Т. 25, № 4. С. 374–381.
18. *Мамышева А.А., Одинцов С.Л.* Нормированные дисперсии компонентов вектора ветра в приземном слое атмосферы над урбанизированной территорией // *Оптика атмосф. и океана*. 2012. Т. 25, № 7. С. 621–628.
19. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л., Федоров В.А.* Экспериментальные оценки компонентов тензора анизотропии турбулентности в приземном слое атмосферы // *Оптика атмосф. и океана*. 2014. Т. 27, № 8. С. 689–697; *Gladkikh V.A., Nevzorova I.V., Odintsov S.L., Fedorov V.A.* Experimental estimates of turbulence anisotropy tensor components in the surface air layer // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 1. P. 34–42.
20. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л.* Статистика коэффициента порывистости ветра в приземном слое атмосферы. Часть 1 // *Успехи современного естествознания*. 2018. № 11. С. 96–102.
21. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л.* Методические аспекты определения внешних масштабов турбулентности // *Успехи современного естествознания*. 2018. № 5. С. 64–70.
22. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л., Федоров В.А.* Структурные функции температуры воздуха над неоднородной подстилающей поверхностью. Часть I. Типичные формы структурных функций // *Оптика атмосф. и океана*. 2013. Т. 26, № 11. С. 948–954; *Gladkikh V.A., Nevzorova I.V., Odintsov S.L., Fedorov V.A.* Structure functions of air temperature over an inhomogeneous underlying surface. Part I. Typical forms of structure functions // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 2. P. 147–153.

23. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л., Федоров В.А.* Структурные функции температуры воздуха над неоднородной подстилающей поверхностью. Часть II. Статистика параметров структурных функций // *Оптика атмосфер. и океана.* 2013. Т. 26, № 11. С. 955–963; *Gladkikh V.A., Nevzorova I.V., Odintsov S.L., Fedorov V.A.* Structure functions of air temperature over an inhomogeneous underlying surface. Part II. Statistics of structure functions' parameters // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 2. P. 154–163.
24. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л., Федоров В.А.* Структурные функции компонент вектора ветра над неоднородной подстилающей поверхностью // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 10. С. 882–890; *Gladkikh V.A., Nevzorova I.V., Odintsov S.L., Fedorov V.A.* Structure functions of wind velocity components over an inhomogeneous underlying surface // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 3. P. 273–281.
25. *Федоров В.А.* Спектральные вклады участков степенной структурной функции случайных процессов со стационарными приращениями. Часть 1. Показатель степени меньше единицы // *Оптика атмосфер. и океана.* 2018. Т. 31, № 12. С. 955–961.
26. *Федоров В.А.* Спектральные вклады участков степенной структурной функции случайных процессов со стационарными приращениями. Часть 2. Показатель степени больше единицы // *Оптика атмосфер. и океана.* 2019. Т. 32, № 1. С. 5–10.
27. *Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Емалеев О.Н., Антошкин А.В., Коняев П.А., Гладких В.А., Мамышев В.П., Одинцов С.Л.* Одновременные измерения структурной характеристики показателя преломления атмосферы оптическим и акустическим методами // *Оптика атмосфер. и океана.* 2011. Т. 24, № 10. С. 852–857; *Lukin V.P., Botygina N.N., Emaleev O.N., Antoshkin L.V., Konyaev P.A., Gladkikh V.A., Mamyshev V.P., Odintsov S.L.* Simultaneous measurements of structure characteristics of atmospheric refraction by optical and acoustic methods // *Atmos. Ocean. Opt.* 2012. V. 25, N 1. P. 6–11.
28. *Лукин В.П., Ботыгина Н.Н., Гладких В.А., Емалеев О.Н., Коняев П.А., Одинцов С.Л., Торгаев А.В.* Сравнительные измерения уровня турбулентности атмосферы с помощью оптических и акустических измерителей // XX Междунар. симпоз. «Оптика атмосфер. и океана. Физика атмосферы»: материалы симпозиума. [Электронный ресурс] Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2014. С. В333–В337. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
29. *Гладких В.А., Мамышев В.П., Одинцов С.Л.* Экспериментальные оценки структурной характеристики показателя преломления оптических волн в приземном слое атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана.* 2015. Т. 28, № 4. С. 309–318; *Gladkikh V.A., Mamyshev V.P., Odintsov S.L.* Experimental estimates of the structure parameter of the refractive index for optical waves in the surface air layer // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 5. P. 426–435.
30. *Гладких В.А., Одинцов С.Л.* Зависимость структурной характеристики показателя преломления оптических волн от дисперсии температуры воздуха и вертикального турбулентного потока тепла в приземном слое атмосферы (эмпирические модели) // XXI Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»: материалы симпоз. [Электронный ресурс] Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2015. С. D400–D409. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
31. *Одинцов С.Л., Гладких В.А., Камардин А.П., Мамышев В.П., Невзорова И.В.* Оценки показателя преломления и регулярной рефракции оптических волн в пограничном слое атмосферы. Часть 1. Показатель преломления // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 10. С. 821–828; *Odintsov S.L., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Mamyshev V.P., Nevzorova I.V.* Estimates of the refractive index and regular refraction of optical waves in the atmospheric boundary layer: Part 1, Refractive Index // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 5. P. 437–444.
32. *Одинцов С.Л., Гладких В.А., Камардин А.П., Мамышев В.П., Невзорова И.В.* Оценки показателя преломления и регулярной рефракции оптических волн в пограничном слое атмосферы. Часть 2. Рефракция лазерного луча // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 10. С. 829–833; *Odintsov S.L., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Mamyshev V.P., Nevzorova I.V.* Estimates of the refractive index and regular refraction of optical waves in the atmospheric boundary layer: Part 2, Laser Beam Refraction // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 5. P. 445–450.
33. *Одинцов С.Л., Гладких В.А., Камардин А.П., Невзорова И.В.* Использование результатов акустической диагностики пограничного слоя атмосферы для оценки влияния турбулентности на характеристики лазерного пучка // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 12. С. 1008–1016; *Odintsov S.L., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Mamyshev V.P., Nevzorova I.V.* Results of acoustic diagnostics of atmospheric boundary layer in estimation of the turbulence effect on laser beam parameters // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 6. P. 553–563.
34. *Одинцов С.Л., Гладких В.А., Камардин А.П., Мамышев В.П., Невзорова И.В.* Оценки влияния турбулентности и регулярной рефракции на характеристики лазерного пучка в пограничном слое атмосферы. Часть 1. Радиус когерентности и турбулентное уширение лазерного пучка // *Оптика атмосфер. и океана.* 2018. Т. 31, № 9. С. 698–705; *Odintsov S.L., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Mamyshev V.P., Nevzorova I.V.* Estimation of the turbulence and regular refraction effects on laser beam parameters in the atmospheric boundary layer: Part 1, Coherence Length and Turbulent Broadening // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 1. P. 19–25.
35. *Одинцов С.Л., Гладких В.А., Камардин А.П., Мамышев В.П., Невзорова И.В.* Оценки влияния турбулентности и регулярной рефракции на характеристики лазерного пучка в пограничном слое атмосферы. Часть 2. Уширение лазерного пучка при сильной регулярной рефракции // *Оптика атмосфер. и океана.* 2018. Т. 31, № 10. С. 798–804; *Odintsov S.L., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Mamyshev V.P., Nevzorova I.V.* Estimation of the turbulence and regular refraction effect on laser beam parameters in the atmospheric boundary layer: Part 2, Laser Beam Broadening under Strong Regular Refraction // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 1. P. 26–32.
36. *Мамышев В.П., Одинцов С.Л., Астафуров В.Г., Пастухова С.П.* Статистика огибающих тональных звуковых сигналов в приземном слое атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 3. С. 266–269; *Mamyshev V.P., Odintsov S.L., Astafurov V.G., Pastukhova S.M.* Statistics of envelopes of tonal acoustic signals in the surface air layer. // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 3. P. 286–290.
37. *Мамышев В.П., Камардин А.П., Одинцов С.Л.* Флуктуации амплитуды импульсных остронаправленных звуковых сигналов при распространении в приземном слое атмосферы // XXIII Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы»: материалы симпоз. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2017. С. В274–В277.

38. *Мамышев В.П., Одинцов С.Л.* Дисперсия фазы узкополосных звуковых сигналов на приземных трассах // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 12. С. 1061–1067; *Mamyshev V.P., Odintsov S.L.* Phase variance of narrow-band acoustic signals on near-surface paths // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 3. P. 236–242.
39. *Мамышев В.П., Одинцов С.Л.* Распределение вероятностей фазы узкополосных звуковых сигналов // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: сб. докладов XXII Междунар. симпоз. [Электронный ресурс]. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2016. С. В312–В316. 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
40. *Mamyshev V.P., Odintsov S.L.* Coherence of sonic waves at short near-surface paths // Proc. SPIE. 2015. V. 9680 DOI: 10.1117/12.2205342.
41. *Федоров В.А.* Точностные характеристики определения временных задержек при квадратичной интерполяции максимумов обобщенных взаимно корреляционных функций. Часть 1. Систематические ошибки // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 7. С. 566–571.
42. *Федоров В.А.* Точностные характеристики определения временных задержек при квадратичной интерполяции максимумов обобщенных взаимно корреляционных функций. Часть 2. Случайные ошибки // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 8. С. 678–683.
43. *Бочкарев Н.Н.* Исследование акустической эмиссии сверхкоротких лазерных импульсов в воздухе и аэрозоле // Научный альманах. Физико-математические науки. 2015. № 8 (10). С. 1082–1090.
44. *Бочкарев Н.Н.* Оптико-акустическое исследование распространения фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе и аэрозоле // Научный вестник. 2015. № 1 (3). С. 74–83.
45. *Бочкарев Н.Н.* Акустическая эмиссия сверхкоротких лазерных импульсов в воздухе и аэрозоле // Изв. РАН. Сер. физическая. 2016. Т. 80, № 1. С. 50–54.

S.L. Odintsov. Development and application of acoustic facilities for diagnostics of the atmospheric boundary layer.

The paper briefly considers the main fields of research and results of investigation of the atmospheric boundary layer with methods and technical facilities of acoustic diagnostics in V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, for the last decade.