

Исследования атмосферного пограничного слоя методами локальной и дистанционной акустической диагностики в ИОА СО РАН

С.Л. Одинцов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 25.02.2009 г.

Представлен реферативный обзор основных направлений и результатов исследований по распространению звука в атмосфере и работ по созданию методов и технических средств акустической диагностики атмосферного пограничного слоя за последние 10 лет в Институте оптики атмосферы СО РАН.

Ключевые слова: акустическая диагностика атмосферы, атмосферный пограничный слой, ветер, лазерная генерация звука, содар, температура, турбулентность, ультразвуковая метеорологическая станция; acoustic diagnostic of the atmosphere, atmospheric boundary layer, wind, laser generation of sound, sodar, temperature, turbulence, ultrasound meteorological station.

Введение

Исследования по распространению звука в атмосфере и работа по созданию средств акустической диагностики атмосферного пограничного слоя (АПС) ведутся в ИОА СО РАН с начала 70-х гг. XX в. Отдельное структурное подразделение Института (сейчас это группа атмосферной акустики), нацеленное на решение данных задач, было создано 20 января 1977 г. За прошедшие годы нарабатан технический и методический потенциал, обеспечивающий функции контроля ряда метеорологических параметров в АПС и сопровождение экспериментов по распространению оптического излучения в атмосфере. Изложенный в статье материал охватывает результаты работы ИОА СО РАН по методам и средствам акустической диагностики АПС за последние 10 лет. Обзор исследований за более ранние периоды можно найти в [1, 2]. Статья содержит три раздела, где в реферативном виде представлены основные направления и результаты работы группы атмосферной акустики: совершенствование технических средств акустической диагностики АПС, разработка методов восстановления различных характеристик АПС на основе результатов акустической диагностики, изучение процессов распространения звука в атмосфере при его излучении различными источниками.

1. Методы и технические средства акустической диагностики АПС

В течение последних 10 лет велись интенсивные работы по проектированию, изготовлению и опытной эксплуатации нового поколения содаров

ИОА СО РАН серии «Волна». Их принципиальное отличие от предыдущих версий заключается в переходе на новые аппаратные и программные средства, обеспечивающие значительное расширение потенциальных возможностей как по управлению работой содара, так и по эксплуатационным характеристикам. В частности, увеличен энергетический потенциал за счет применения «кассет» из четырех фазированных источников (и приемников) звука. Кардинально изменен приемный блок, обеспечивающий одновременную работу всех каналов зондирования в многочастотном режиме при увеличении скорости получения данных о структуре атмосферы по сравнению с предыдущими версиями содаров в 3 раза.

Принципиальные изменения произошли и в программном обеспечении. Содары серии «Волна» работают в операционной среде Windows и предоставляют доступ к текущей информации как непосредственно с управляющего компьютера, так и в сетевом режиме. Существенно изменен блок цифровой обработки сигналов, предназначенный для оперативного анализа структуры АПС. Для изучения турбулентной составляющей температурного поля разработана, реализована и проходит апробацию методика абсолютной калибровки содара в режиме реального времени. В итоге содары серии «Волна» обеспечивают возможность непрерывного контроля АПС в диапазоне высот 50–1200 м с шагом по времени 2–20 с и по высоте 5–25 м. Некоторые результаты работы по совершенствованию аппаратно-программных средств дистанционной акустической диагностики атмосферы опубликованы в [3–6].

Определенные успехи достигнуты в ИОА СО РАН при разработке методик акустической диагностики гидрометеоров (жидких и твердых фракций). В частности, предложены и опробованы алгоритмы восстановления распределения размеров

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

дождевых капель по результатам акустического зондирования [7].

Эффективным инструментом для изучения приземного слоя атмосферы являются ультразвуковые метеостанции (УЗМ). В ИОА СО РАН разработана и активно эксплуатируется УЗМ «Метео-2» [8, 9]. С ее помощью в течение нескольких лет в мониторинговом режиме проводятся измерения основных метеорологических параметров. В комплексе с содарами серии «Волна» УЗМ «Метео-2» обеспечивает перекрытие диапазона высот, необходимого для контроля средних значений метеорологических параметров и их турбулентных составляющих. УЗМ «Метео-2» имеет сертификат РФ об утверждении типа средств измерений и обеспечивает измерение температуры окружающего воздуха в диапазоне от -40 до $+50$ °С, скорости ветра в диапазоне до 50 м/с, атмосферного давления в диапазоне 80 – $106,7$ кПа, относительной влажности до 98% . Скорость получения данных – до 10 Гц.

2. Методы, алгоритмы и анализ результатов измерений параметров АПС

Разработанные методы анализа результатов акустической диагностики АПС, а также накопленные экспериментальные данные позволили провести исследования некоторых закономерностей высотно-временных распределений контролируемых параметров при различных состояниях атмосферы в разные сезоны года. Основное внимание уделялось особенностям изменений средних и турбулентных характеристик скорости ветра на суточных интервалах времени, а также закономерностям суточного изменения высоты слоя интенсивного турбулентного теплообмена.

Поскольку основным направлением работы группы атмосферной акустики ИОА СО РАН является разработка методов и технических средств акустической диагностики атмосферы, то детальное изучение пространственно-временной структуры и взаимосвязей контролируемых параметров не вошло в основной круг задач. В этой связи при исследованиях АПС основными целями были проверка достоверности получаемой средствами акустической диагностики информации, а также отработка технологий оценок важных для задач физики и оптики атмосферы величин. По этой причине некоторые результаты по исследованию структуры АПС носят фрагментарный характер и лишь демонстрируют возможности измерения того или иного параметра атмосферы.

Скорость ветра в атмосферном пограничном слое

Используемые в настоящее время в ИОА СО РАН содарные методы исследования АПС ориентированы на изучение таких процессов, у которых характерные масштабы изменений «медленнее» $0,05$ – $0,01$ Гц. С учетом данного факта разработаны методики, обеспечивающие получение высотных

профилей не только компонентов вектора ветра и их статистики, но и компонентов тензора напряжений Рейнольдса, энергии турбулентных пульсаций скорости ветра, переноса турбулентной энергии по потоку и по вертикали. При этом обеспечена возможность цифровой фильтрации обрабатываемых реализаций, позволяющей детально анализировать процессы различного пространственно-временного масштаба. Методические аспекты обработки данных акустического зондирования скорости ветра опубликованы в [10–16].

Наряду с наблюдениями за высотно-временными профилями средней скорости ветра и его направления были исследованы некоторые специфические процессы в АПС, приводящие к модуляции ветрового потока. В частности, проведен подробный анализ изменений скорости ветра в диапазоне периодов, относящихся к мезометеорологическому минимуму в известном спектре Ван-дер-Ховена. Установлено, что в контролировавшемся интервале высот (выше 100 м) имеются регулярные колебания скорости, периоды которых связаны с типом стратификации. Отчетливо выделяются диапазоны 20 – 40 , 80 – 120 и 140 – 180 мин, в которые чаще всего попадают основные колебания скорости ветра, т.е. регулярные колебания с максимальным значением амплитуды (от $0,4$ до $1,4$ м/с). При этом диапазон периодов 20 – 40 мин явно связан с типом стратификации в пункте наблюдения, поскольку «насыщается» гармониками только при конвективных условиях. Отмечено, что одна и та же мода колебаний на разных высотах может иметь фазовый сдвиг, т.е. изменения скорости ветра данного периода на одной высоте могут не совпадать по времени с таким же колебанием на другой высоте. Результаты проведенных исследований опубликованы в [17].

Важное значение для решения фундаментальных и прикладных задач физики атмосферы представляет оценка корреляции скорости ветра (как на фиксированной высоте, так и между разными высотами). Использование результатов акустического зондирования АПС позволило провести исследование корреляций в различных диапазонах спектров скорости ветра. Изучались корреляции модуля горизонтальной скорости ветра, ее продольной и поперечной составляющих, вертикального ветра, радиальных (вдоль «лучей» зондирования) компонентов ветра. Как и следовало ожидать, межуровневые связи показывают высокие значения корреляции (как положительной, так и отрицательной) для крупномасштабных движений, а также при более «быстрых» вариациях скорости ветра, не принадлежащих турбулентной области спектра. Результаты проведенных исследований опубликованы в [18–20].

Проведены исследования характеристик скорости ветра при прохождении над точкой наблюдения внутренних гравитационных волн (ВГВ). Определялись вариации вертикальной составляющей, модуля и направления горизонтальной скорости ветра. Использовался экспериментальный материал, полученный при работе содара как в г. Томске, так и на побережье оз. Байкал (п. Большие Коты). Факт присутствия ВГВ в АПС определялся по ха-

ракетному поведению слоев с повышенным уровнем турбулентных температурных пульсаций, регистрируемых содаром. Периоды ВГВ составляли, как правило, 2–20 мин, но в прибрежной зоне иногда увеличивались до 60–80 мин. Установлено, что влияние ВГВ на поле скорости ветра часто происходит таким образом, что в приземном слое не наблюдаются изменения характеристик вектора ветра под воздействием ВГВ, в то время как на высотах более 50–70 м вариации ветра четко выражены. Результаты исследований ВГВ опубликованы в [21, 22].

Определенную пользу при решении задач физики атмосферы приносят оценки структурных функций $D_V(\Delta t)$ скорости ветра в АПС. Применение цифровой полосовой фильтрации при исследованиях этих функций позволило исключить влияние крупномасштабных движений, затрудняющих анализ уровней их насыщения (эти уровни равны удвоенной дисперсии исследуемого параметра), а также уменьшить влияние случайных ошибок измерений. В результате обработки экспериментальных данных было установлено, что после применения полосовой фильтрации уровень насыщения $D_V(\Delta t)$, наступающий при больших значениях сдвига времени Δt (десять минут), на разных высотах связан с текущей стратификацией АПС: при температурных инверсиях дисперсия горизонтальной скорости ветра выше, чем при других условиях. Контроль стратификации проводился с помощью метеорологического температурного профилера МТП-5. Результаты исследований структурных функций $D_V(\Delta t)$ опубликованы в [16].

Исследования моментов компонентов скорости ветра на основе результатов дистанционного акустического зондирования АПС были проведены в рамках проверки алгоритмов и программ для их вычисления. К сожалению, у нас не было возможности провести сопоставительные испытания с другими дистанционными (или локальными) средствами диагностики, обеспечивающими измерения турбулентных характеристик выше приземного слоя. По этой причине рассчитанные высотные профили коэффициентов эксцесса, асимметрии, сдвиговых напряжений Рейнольдса, энергии турбулентных пульсаций скорости, перенос импульса по потоку и по вертикали сопоставлялись только с опубликованными в литературе экспериментальными данными. Установлено, что имеется удовлетворительное согласование как по величинам, так и по закономерностям высотно-временного распределения рассчитанных моментов. Некоторые результаты этих исследований опубликованы в [23], а также в серии докладов на российских и международных конференциях.

Структура слоя интенсивного турбулентного теплообмена в АПС

Разработанные в ИОА СО РАН методы анализа амплитуды сигналов содара позволяют изучать тонкую структуру области интенсивного турбулент-

ного теплообмена в АПС [24–26]. Основное внимание уделялось оценкам высоты H_m , до которой распространяется эта область (высота слоя перемешивания), а также анализу интенсивности турбулентных температурных пульсаций на основе структурной постоянной температуры C_T^2 . По результатам трех лет наблюдений в пригороде Томска (2006–2008 гг.) проведена систематизация H_m .

Оценены средние за месяц (\bar{H}_m) и усредненные за месяц суточные ходы (\bar{H}_{md}) высоты слоя перемешивания для разных сезонов года и разных лет наблюдений. Следует подчеркнуть, что полученные значения \bar{H}_m и \bar{H}_{md} характерны для конкретного района наблюдений. Его изменение может привести к существенному изменению статистики H_m . Тем не менее при интерпретации поведения радиационно-значимых параметров именно в данном районе наблюдений оценки высоты слоя перемешивания, как одной из характеристик теплового баланса системы «земля–атмосфера», могут оказаться полезными. Некоторые результаты исследований H_m будут опубликованы в [27].

Наряду с изучением высоты слоя перемешивания проводился анализ его «внутренней» структуры на основе величины C_T^2 , связанной с дисперсией температуры и представляющей самостоятельный интерес при решении задач физики атмосферы, а также как параметр, формирующий флуктуации показателя преломления оптических волн в атмосфере. Однако эти работы носили, в целом, фрагментарный характер, поскольку для корректного определения абсолютных значений C_T^2 необходима абсолютная калибровка энергетических характеристик содара, проведение которой обязательно после любых изменений амплитудно-частотных характеристик зондирующей системы. А такие изменения происходили (и происходят) довольно часто, поскольку модернизация содаров ИОА СО РАН проводится практически постоянно. В настоящее время проходят испытания дополнительные аппаратно-программные блоки содара «Волна-4М», которые позволят осуществлять непрерывную абсолютную калибровку его энергетических характеристик непосредственно во время работы. Для случаев, когда калибровочные коэффициенты были известны, проведены расчеты высотных профилей и построены контурные карты распределений C_T^2 , согласующиеся как по абсолютным значениям, так и по высотно-временной структуре с результатами измерений этого параметра другими средствами (по литературным данным). Некоторые результаты работы по данному направлению исследований опубликованы в [4, 25, 28]. Примеры восстановления C_T^2 для двух различных районов наблюдений приведены в работе [29].

Полезным оказалось одновременное использование содара и метеорологического температурного профилера МТП-5, работавшего в г. Томске с июля по декабрь 2004 г. Совместная работа этих

приборов позволила проверить ряд содарных методик, связанных с определением высоты слоя перемешивания и некоторых характеристик температурных инверсий в нижнем слое атмосферы. В частности, обработка полученных данных показала, что за весь период наблюдений в контролируемом диапазоне высот (до 600 м) температурная инверсия присутствовала примерно в 52% времени. Некоторые выводы по результатам анализа совместной работы содара «Волна-3» и МТП-5 опубликованы в [30].

Исследование характеристик приземного слоя атмосферы

Поскольку содары ИОА СО РАН способны осуществлять контроль состояния атмосферы только начиная с высоты 50–70 м, то для «замыкания» высотных профилей метеорологических параметров на нижнем уровне используется УЗМ «Метео-2». Помимо этого, УЗМ «Метео-2» применялась для детального исследования статистических характеристик турбулентности приземного слоя. Некоторые методики и примеры расчетов приведены в [31–33].

В частности, по результатам измерений на полигоне ИОА СО РАН (на высоте 3,2 м) подробно исследованы спектры $\bar{G}_X(f)$ температуры и скорости ветра, а также внешний масштаб турбулентности L_{0X} . Анализ спектров позволил сделать вывод, что в тех диапазонах частот, где спектр мог быть представлен в виде $\bar{G}_X(f) = \text{const} \cdot f^{-\beta_X}$, лишь изредка показатель степени частоты был равен классическому значению «5/3» ($\approx 1,67$). Оказалось, что ветровая турбулентность имеет постоянное значение β_V в диапазоне частот 0,05–0,6 Гц и которое в большинстве случаев сосредоточено в интервале 1,5–1,6. Для температурной турбулентности диапазон постоянства показателя степени β_T несколько меньше (0,08–0,6 Гц), а его значения лежат в интервале 1,3–1,5. С использованием представления внешнего масштаба турбулентности в виде равенства $L_{0X} = (2\sigma_X^2 / C_X^2)^{1/\alpha_X}$ и расчетов на основании данных УЗМ «Метео-2» значений параметров, входящих в его правую часть, получены многосуточные развертки значений L_{0T} и L_{0V} , которые оказались в целом сопоставимы с приводимыми в литературе результатами. Естественно, что сделанные выводы о статистических характеристиках турбулентности приземного слоя атмосферы справедливы только для конкретного места проведения измерений. Результаты этих исследований опубликованы в [33].

Использование УЗМ «Метео-2» позволяет оценивать один из важнейших компонентов теплового баланса приземного слоя атмосферы – турбулентный поток тепла. При этом сделать это можно одновременно по трем ортогональным координатам. Вертикальный турбулентный поток тепла $Q = \bar{\rho} c_p \langle w'T' \rangle$ (или его параметризации) входит во все основные уравнения, определяющие эволюцию температурного

поля в приземном слое атмосферы. УЗМ «Метео-2» полностью обеспечивает его расчет, поскольку дает не только пульсационные составляющие вертикального ветра w' и температуры T' , но позволяет по измерениям средних значений температуры \bar{T} и атмосферного давления \bar{P} рассчитать плотность воздуха $\bar{\rho}$. Результаты этих исследований опубликованы в [32].

Подводя итог, следует отметить, что созданные в ИОА СО РАН методы и технические средства акустической диагностики атмосферы используются в том числе для комплексных исследований приземного и пограничного слоев атмосферы. Можно указать работы, выполнявшиеся с применением содара «Волна-4», УЗМ «Метео-2» и ряда других приборов, направленные на изучение процессов газообмена в приземном слое городского района [34], на описание атмосферных условий при формировании аэроэлектрических полей [35] и оптической толщи атмосферы [36, 37].

3. Исследование распространения звукового излучения в атмосфере

Дальнейшее развитие методов акустической диагностики АПС требует поиска новых закономерностей и уточнения существующих теоретических моделей взаимодействия звуковых волн с атмосферой как случайной стратифицированной, движущейся средой. При проведении исследований по распространению звука ставилась цель не только решения отдельных фундаментальных проблем переноса звукового излучения, но и последующего использования полученных знаний в задачах разработки новых методов и технических средств оптической и акустической диагностики атмосферы.

Одним из существенных результатов исследований является уточнение формулы для оценки доплеровского сдвига частоты звуковых волн при их распространении в трехмерно-неоднородной атмосфере. В частности, теоретически показано [38], что при движущемся источнике и (или) приемнике звука на величину доплеровского сдвига могут оказывать влияние не только продольные (как это обычно полагается), но и поперечные к направлению распространения волны компоненты движения атмосферы.

Проведена экспериментальная проверка теоретических моделей когерентности звуковых волн в турбулентной атмосфере на коротких трассах. Установлено [39], что эти модели адекватны только при относительно слабых уровнях турбулентности (в основном, ветровой турбулентности). При превышении турбулентностью некоторого порога интенсивности экспериментальные оценки когерентности звуковых волн заметно отличаются от оценок, полученных на основе существующих теоретических моделей. На основе анализа экспериментальных результатов выдвинута гипотеза [40], что на уровень когерентности звуковых волн влияют не только турбулентные пульсации, но и некоторые упорядоченные структуры в поле скорости ветра,

имеющие линейные масштабы, сопоставимые с внешним масштабом турбулентности.

Установлено, что при слабых и средних ветрах регулярные изменения разностей фаз ΔS звуковых волн в разнесенных точках приема сопровождаются гармоническими модуляциями компонентов вектора ветра, которые происходят быстрее, чем регулярные вариации ΔS . Фактически это означает, что изменение ΔS с периодом T секунд связано с упорядоченной структурой в поле ветра, имеющей период T/N секунд. По предварительным данным для слабых и средних ветров значение N составляет от 2 до 5. Подобная структура звукового поля в приземном слое трехмерно-неоднородной атмосферы в современной теории распространения звука пока не описана.

Для условий распространения звука вблизи подстилающей поверхности получены соотношения, позволяющие рассчитывать суммарную амплитуду прямого и отраженного от поверхности звукового сигнала с учетом амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и диаграмм направленности (ДН) источника и приемника излучения. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных результатов для случая коротких трасс и штилевых условий. Установлено хорошее согласие в области звуковых частот ниже 7 кГц. Учет реальных АЧХ и ДН позволил объяснить наблюдавшийся в экспериментах эффект «меандра» амплитуды интерферирующих звуковых сигналов при построении ее зависимости от частоты [41]. В то же время при наличии ветра наблюдалось заметное расхождение между экспериментальными данными и теорией интерференции звука в приземном слое. Одной из возможных причин этого расхождения являются более сложные процессы взаимодействия звука со случайно-неоднородной движущейся атмосферой, чем это предполагается существующей теорией, и что проявляется при измерениях когерентности звуковых волн, как это отмечалось выше.

Широкий круг исследований был проведен в рамках проблемы генерации и переноса звуковых волн при взаимодействии лазерного излучения с атмосферой Земли. При анализе характеристик звукового сигнала, генерируемого пробоем на твердой аэрозольной частице под воздействием лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм, получена [42, 43] линейная зависимость амплитуды и длительности акустического сигнала от размера частиц (7–630 мкм). В соответствии с общепринятым представлением [45] о развитии очага пробоя на твердой аэрозольной частице в миллисекундном диапазоне длительностей импульсов лазерного излучения показано, что характеристики акустического сигнала существенно зависят от материала частиц (графит, KCl, Na₂CO₃, K₂SO₄, CaCO₃, FeSO₄, KNO₃, BaCl₂, SiC, SiO₂).

Индикатором эффективности образования длинной лазерной искры служат акустические импульсы, генерируемые отдельными плазменными очагами, возникающими на твердых частицах аэрозоля. Длинная лазерная искра характеризуется несколькими существенно различными простран-

ственными масштабами, что позволяет выделить связанные с ними низкочастотные компоненты акустических волн [44, 45].

Обнаружена устойчивая продольная изменчивость распределения акустических давлений, формируемых длинной лазерной искрой при распространении мощного лазерного излучения в условиях атмосферной туманной дымки [46]. Продольные флуктуации звуковых давлений с пространственным масштабом ~30 м показывают наличие флуктуаций плотности лазерной энергии вдоль пучка, возникших в процессе взаимодействия аэрозоля и лазерного излучения. Изменения плотности среды носят характер распространяющихся по сечению пучка акустических волн сжатия и разрежения, образующихся в области перепада интенсивности лазерного излучения.

Акустическая диагностика филамента, возникающего в пучке фемтосекундного лазерного излучения на различных расстояниях от фокусирующего зеркала, показала [47], что при острой фокусировке наблюдается существенное «угасание» филамента за геометрическим фокусом, т.е. филамент как акустический источник теряет энергию на несколько порядков. Оптико-акустическими исследованиями установлено [48], что при жесткой фокусировке с увеличением мощности лазерного импульса P_L начало филамента F_N приближается по линейному закону к фокусирующему зеркалу, $F_N \sim 1/P_L$.

Экспериментально исследован нелинейный оптико-акустический эффект, возникающий при распространении интенсивного фемтосекундного лазерного излучения [49]. Полученная при измерениях в атмосферном воздухе зависимость генерируемого акустического давления от лазерной энергии $P(E_L) \sim E_L^{2.756}$ кардинально отличается от аналогичной зависимости $P(E_L) \sim E_L$ при распространении лазерного излучения микро- и наносекундной длительности и иллюстрирует нетривиальные изменения поглотительной способности воздуха. Предложена модель нелинейного поглощения фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе, связанная с возбуждением вращательного движения молекул азота и кислорода при наведении в них дипольного момента под действием высокоинтенсивного излучения.

В исследованиях спектральных и энергетических характеристик двухфотонно возбужденной флуоресценции красителя родамина 6Ж в жидкокапельной форме при облучении лазерными импульсами фемтосекундной длительности обнаружено [50], что при повышении концентрации люминесцирующих молекул до 10^{-2} моль/л величина регистрируемого акустического давления значительно уменьшается (приблизительно на порядок). В интервале энергий возбуждающего излучения 2–4 мДж роста акустического сигнала не наблюдается. Обнаруженный эффект — следствие конкуренции процесса многофотонного поглощения в красителе и процесса флуоресценции возбужденных молекул красителя.

Заключение

Разработанные в ИОА СО РАН методы и технические средства акустической диагностики нижнего слоя атмосферы активно используются как для проведения научных исследований, так и в службах контроля состояния пограничного слоя атмосферы. К настоящему времени осуществлены поставки 25 экземпляров УЗМ «Метео-2» в различные организации на территории России. С июня 2006 г. в мониторинговом режиме в одном из районов г. Москвы работает температурно-ветровой измерительный комплекс, приобретенный ФГУ «Мосэкомониторинг», в составе метеорологического температурного профилера МТП-5, содара «Волна-4» и двухуровневой версии УЗМ «Метео-2». В Геофизической обсерватории «Борок» (филиал ИФЗ РАН им. О.Ю. Шмидта) в мониторинговом режиме работают содар «Волна-3» (с 2008 г.) и УЗМ «Метео-2» (с 2005 г.).

Помимо средств дистанционной диагностики атмосферы, в ИОА СО РАН разработана и внедрена ультразвуковая технология измерения расхода воздуха в трубопроводах, устройство пассивного пеленга трасс воздушных судов вблизи аэропортов и другие приборы и методы контроля, основанные на анализе акустических сигналов различной природы.

Фундаментальные исследования по распространению звука и акустической диагностике атмосферы поддерживались программами Президиума и специализированных отделений РАН, грантами РФФИ.

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. *Гладких В.А., Макиенко А.Э., Федоров В.А.* Акустический доплеровский локатор «Волна-3» // *Оптика атмосф. и океана.* 1999. Т. 12. № 5. С. 437–444.
4. *Гладких В.А., Одинцов С.Л.* Калибровка содара «Волна-3» // *Оптика атмосф. и океана.* 2001. Т. 14. № 12. С. 1145–1149.
5. *Гладких В.А.* Защита антенн акустического локатора от внешнего шума // *Сб. трудов XIX сессии Российского акустического общества.* М.: ГЕОС, 2007. Т. 2. С. 178–180.
6. *Макиенко А.Э., Белан Д.Б.* Интеграция различных типов измерительных устройств в единый комплекс на базе содара // *Сб. трудов XIX сессии Российского акустического общества.* М.: ГЕОС, 2007. Т. 2. С. 161–164.
7. *Shatanaev S.V.* Acoustic Sounding of Raindrop Size Distribution // *J. of Atmospheric and Oceanic Technology.* 2003. V. 20. N 1. P. 152–158.
8. *Богушевич А.Я.* Ультразвуковые методы оценивания метеорологических и турбулентных параметров атмосферы // *Оптика атмосф. и океана.* 1999. Т. 12. № 2. С. 107–174.
9. *Гладких В.А., Макиенко А.Э.* Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс «Метео-2» // *Сб. трудов XVI сессии Российского акустического общества.* М.: ГЕОС, 2005. Т. 2. С. 93–96.
10. *Федоров В.А.* Измерение содаром «Волна-3» параметров радиальных компонент вектора скорости ветра // *Оптика атмосф. и океана.* 2003. Т. 16. № 2. С. 151–155.
11. *Федоров В.А.* К измерению содаром параметров продольных и поперечных компонент горизонтальной скорости ветра // *Оптика атмосф. и океана.* 2003. Т. 16. № 10. С. 913–920.
12. *Федоров В.А.* К измерению содаром параметров динамической турбулентности // *Оптика атмосф. и океана.* 2003. Т. 16. № 12. С. 1120–1125.
13. *Федоров В.А.* К измерению содаром параметров модуля и направления горизонтальной скорости ветра // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18. № 1–2. С. 91–99.
14. *Федоров В.А.* Альтернативный метод вычисления круговых параметров вектора горизонтальной скорости ветра при содарных измерениях // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18. № 10. С. 923–928.
15. *Богушевич А.Я., Шаманаева Л.Г.* Структурные функции поля скорости ветра в атмосфере по данным акустического зондирования // *Оптика атмосф. и океана.* 2001. Т. 12. № 1. С. 54–57.
16. *Макиенко А.Э., Гладких В.А., Горчаков Г.И., Одинцов С.Л., Федоров В.А.* Исследование структурных функций скорости ветра в городских условиях по результатам акустической диагностики пограничного слоя атмосферы // *Сб. трудов XX сессии Российского акустического общества.* М.: ГЕОС, 2008. Т. 2. С. 151–154.
17. *Одинцов С.Л., Федоров В.А.* Исследование вариаций скорости ветра мезометеорологического масштаба по содарным наблюдениям // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20. № 11. С. 986–993.
18. *Невзорова И.В., Одинцов С.Л.* Корреляция компонент скорости ветра в пограничном слое атмосферы // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18. № 1–2. С. 124–129.
19. *Лавриченко А.В., Ильин С.Н., Гладких В.А., Комаров В.С., Креминский А.В., Невзорова И.В., Попов Ю.Б., Попова А.И., Федоров В.А.* Исследование временной корреляции ортогональных составляющих скорости ветра в пограничном слое атмосферы по данным акустического зондирования // *Оптика атмосф. и океана.* 2006. Т. 19. № 1. С. 49–58.
20. *Комаров В.С., Ильин С.Н., Креминский А.В., Кадыров Е.Н., Лавриченко А.В., Ломакина Н.Я., Одинцов С.Л., Попов Ю.Б., Попова А.И., Федоров В.А.* Об опыте применения динамико-стохастического метода прогноза в задаче предсказания параметров состояния пограничного слоя атмосферы по данным радиометрических и содарных измерений // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18. № 5–6. С. 482–484.
21. *Одинцов С.Л.* Особенности движений нижнего слоя атмосферы при прохождении внутренних гравитационных волн // *Оптика атмосф. и океана.* 2002. Т. 15. № 12. С. 1131–1136.
22. *Гладких В.А., Невзорова И.В., Одинцов С.Л., Федоров В.А.* Анализ структуры поля ветра в нижнем слое атмосферы на побережье оз. Байкал // *Оптика атмосф. и океана.* 2002. Т. 15. № 10. С. 902–908.
23. *Gladkikh V.A., Makienko A.E., Odintsov S.L., Fedorov V.A.* Preliminary analysis of altitude profiles of standard deviations, skewness and kurtosis for different wind velocity components measured by VOLNA-3 sodar // *Proc. 10th Int. Symp. Acoust. Rem. Sens. Auckland, New Zeland, 27 November–1 December 2000.* P. 358–361.
24. *Шлычков В.А., Одинцов С.Л.* Оценка параметров конвективного пограничного слоя атмосферы с помощью вихреразрешающей модели и акустического зондирования // *Оптика атмосф. и океана.* 2002. Т. 15. № 2. С. 185–189.

25. Gladkikh V.A., Nevzorova I.V., Odintsov S.L. VOLNA-3 sodar measurements of structure characteristic of atmospheric boundary layer // Proc. SPIE. 2000. V. 4341. P. 343–350.
26. Невзорова И.В., Одинцов С.Л. Анализ распределений амплитуды акустических эхосигналов // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 4. С. 393–398.
27. Гладких В.А., Камардин А.П., Невзорова И.В. Определение высоты внутреннего слоя перемешивания по измерениям содаров серии «Волна» // Оптика атмосф. и океана. 2009. (В печати).
28. Gladkikh V.A., Nevzorova I.V., Odintsov S.L. Sodar observations of temperature pulsations in the winter season // Proc. 10th Int. Symp. Acoust. Rem. Sens. Auckland, New Zeland, 27 November–1 December 2000. P. 366–370.
29. Лукин В.П., Ильясов С.П., Носов В.В., Одинцов С.Л., Тиллаев Ю.А. Изучение астроклимата региона юга Сибири и Средней Азии // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22. № 10. С. 973–980.
30. Камардин А.П., Одинцов С.Л. Анализ результатов совместной работы акустического доплеровского локалатора (содара) и температурного профилемера // Сб. трудов XVI сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2005. Т. 2. С. 124–127.
31. Богущевич А.Я. Программное обеспечение ультразвуковых метеостанций для целей исследования атмосферной турбулентности // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 2. С. 175–180.
32. Макиенко А.Э., Гладких В.А., Одинцов С.Л. Исследование турбулентных потоков тепла с помощью ультразвуковой метеостанции // Сб. трудов XVIII сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2006. Т. 2. С. 172–176.
33. Гладких В.А., Одинцов С.Л. Анализ структурных функций температуры и скорости ветра в приземном слое атмосферы // Сб. трудов XVIII сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2006. Т. 2. С. 139–143.
34. Горчаков Г.И., Гладких В.А., Глядко П.С., Макиенко А.Э., Одинцов С.Л., Озерецкий Р.С. Применение средств акустической диагностики нижнего слоя атмосферы для решения задач газообмена в городских условиях // Сб. трудов XIX сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2007. Т. 2. С. 168–172.
35. Пхалазов Ю.А., Итполитов И.И., Назорский П.М., Одинцов С.Л., Панченко М.В., Смирнов С.В., Ужегов В.Н. Связь аномальных атмосферных условий с изменчивостью электрического поля // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22. № 1. С. 25–30.
36. Pkhalagov Yu.A., Uzhegov V.N., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Odintsov S.L. Peculiarities of the diurnal dynamics of the aerosol optical thickness of the atmosphere in IR wavelengths range and its physical interpretation // Proc. SPIE. 2005. V. 6160. Part I. P. 385–389.
37. Пхалазов Ю.А., Ужегов В.Н., Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Одинцов С.Л. Особенности дневной динамики аэрозольной оптической толщи атмосферы в инфракрасном диапазоне длин волн // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22. № 9. С. 838–843.
38. Богущевич А.Я. К анализу акустического эффекта Доплера в трехмерно-неоднородной движущейся среде // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 4. С. 314–321.
39. Мамышев В.П., Одинцов С.Л. Экспериментальное исследование когерентности звуковых волн на приземных трассах // Сб. трудов XVI сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2005. Т. 1. С. 189–192.
40. Мамышев В.П., Одинцов С.Л. Влияние неоднородностей поля ветра на фазовые характеристики звуковых волн на приземных трассах // Сб. трудов XX сессии Российского акустического общества. М.: ГЕОС, 2008. Т. 1. С. 240–243.
41. Мамышев В.П., Одинцов С.Л. Оценка влияния направленности излучения на интерференцию звуковых волн на коротких приземных трассах // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20. № 8. С. 754–756.
42. Шаманаев С.В. Экспериментальные исследования характеристик звукового сигнала, генерируемого при лазерном пробое на твердой аэрозольной частице // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11. № 12. С. 1352–1355.
43. Шаманаев С.В. Оптико-акустические эффекты при лазерном пробое на частицах твердого монодисперсного аэрозоля // Изв. вузов. Физ. 2001. № 12. С. 8–13.
44. Шаманаев С.В., Шаманаева Л.Г. Анализ спектров акустических сигналов, генерируемых при распространении мощного импульсного лазерного излучения в атмосфере. I. Спектры локальных плазменных очагов // Изв. вузов. Физ. 2005. № 11. С. 72–78.
45. Бочкарев Н.Н. Прикладная атмосферная оптоакустика мощных лазерных пучков. Томск: Изд-во ТГАСУ, 2008. 318 с.
46. Бочкарев Н.Н., Кабанов А.М., Погодаев В.А. Пространственная самокоррекция пятнистой структуры излучения мощных импульсных лазеров при оптическом пробое на атмосферных трассах // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 9. С. 809–815.
47. Бочкарев Н.Н., Землянов А.А., Землянов Ал.А., Кабанов А.М., Карташов Д.В., Курсанов А.В., Матвиенко Г.Г., Степанов А.Н. Экспериментальное исследование взаимодействия фемтосекундных лазерных импульсов с аэрозолем // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 12. С. 971–975.
48. Бочкарев Н.Н., Кабанов А.М., Степанов А.Н. Пространственная локализация области филаментации вдоль трассы распространения сфокусированного фемтосекундного лазерного излучения в воздухе // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20. № 10. С. 863–867.
49. Bockharev N.N., Kartashov D.V., Kiselev A.M., Kirsanov A.V., Ponomarev Yu.N., Stepanov A.N., Tikhomirov V.A. Nonlinear absorption of intense femtosecond laser radiation in air // Opt. Express. 2006. V. 14. N 17. P. 7552–7558.
50. Бочкарев Н.Н., Донченко В.А., Землянов А.А., Землянов Ал.А., Кабанов А.М., Карташев Д.В., Кубиткин П.П., Матвиенко Г.Г., Степанов А.Н. Флуоресценция красителя в жидкокапельной форме при возбуждении фемтосекундными лазерными импульсами // Изв. вузов. Физ. 2005. № 4. С. 15–20.

S.L. Odintsov. The study of the atmospheric boundary layers by methods of local and remote acoustic diagnostics at the IAO SB RAS.

We present a brief overview of the main research directions and results of studies of sound propagation in the atmosphere and efforts toward creating the methods and technical means of acoustic diagnostics of the atmospheric boundary layer over last 10 years at the Institute of Atmospheric Optics SB RAS.