

Н.П. Красненко

РАЗВИТИЕ АТМОСФЕРНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ИОА СО РАН

Изложена история развития атмосферных акустических исследований в Институте оптики атмосферы СО РАН и основные результаты исследований по проблемам акустического зондирования атмосферы, по ультразвуковым метеорологическим системам, по распространению звуковых волн в атмосфере и акустической диагностике распространения мощного лазерного излучения.

1. Введение

Атмосферные акустические исследования в целом имеют довольно большую историю, поскольку звук (звуковое общение) и атмосфера непосредственно сопровождают человека с момента его появления на свет. Проблематика таких исследований также достаточно широка и многогранна.

Зарождению такого научного направления в 1974 г. в Институте оптики атмосферы СО АН СССР, занимавшемся исследованиями по атмосферо-оптической проблематике, мы обязаны его бессменному директору – академику Владимиру Евсеевичу Зуеву, в то время доктору физико-математических наук. По возвращении из Австралии, где ему был продемонстрирован созданный в НИИ вооружения первый метеорологический акустический локатор, В.Е. Зуев инициировал начало развития подобных исследований у себя в институте. Тематика таких исследований не являлась для института, как казалось бы на первый взгляд, инородной, поскольку здесь уже развивались научные направления дистанционного оптического зондирования атмосферы и распространения оптических волн в атмосфере как случайно-неоднородной среде и в рамках существовавшего в институте комплексного подхода к проблеме новое научное направление дополняло сложившиеся.

Экспериментальная научная группа формировалась под руководством к.ф.-м.н. В.Я. Съедина в составе лаборатории оптического зондирования атмосферы, а теоретическая – под руководством автора в составе лаборатории теории дистанционного зондирования атмосферы. С февраля 1977 г. они слились в группу (на правах лаборатории) акустического зондирования атмосферы под руководством В.Я. Съедина. А с мая 1986 г. группа преобразовалась в лабораторию атмосферной акустики. С июля 1979 г. по настоящее время руководителем группы и затем лабораторией является автор. Основные научные направления, развиваемые в лаборатории, отобразены на рис. 1.

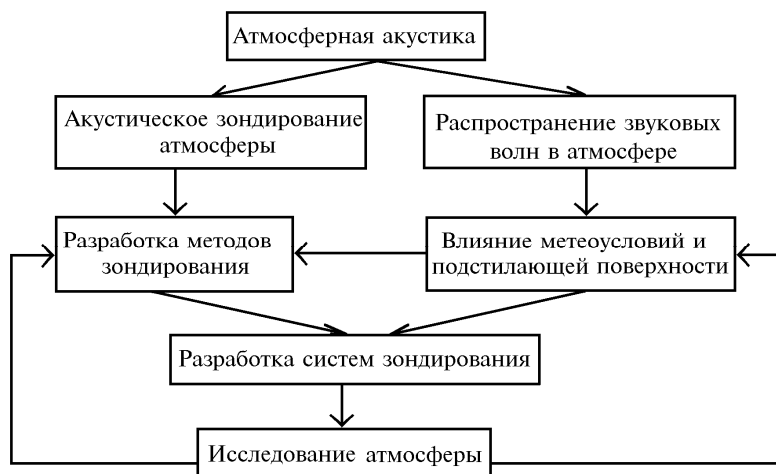


Рис. 1. Научные направления по атмосферной акустике
Красненко Н.П.

2. Акустическое зондирование атмосферы

Сущность метода акустического зондирования заключается в следующем. В атмосферу направленно излучается звуковой сигнал, который, распространяясь, взаимодействует с ней. Рассеянное неоднородностями или проходящее (прямое) излучение принимается приемной антенной, и по его параметрам судят о характеристиках атмосферы. Описание данной проблемы и основные результаты ее развития до 1986 г. отображены в монографии автора [1].

Работа, начатая в ИОА СО АН СССР с 1974 г. по проблеме акустического зондирования атмосферы, привела к созданию в 1977 г. моностатического (одноканального) акустического локатора с регистрацией сигнала на аппарат факсимильной записи. Дальнейшие его доработки привели к созданию локатора для измерения профиля радиальной составляющей скорости ветра на базе мини-ЭВМ М-6000 в 1978 г., на базе управляющей ЭВМ 15 ВСМ-5 в 1979 г. и локатора «МАЛ-1» на базе управляющей ЭВМ «Электроника-60» в 1980 г. В 1982 г. был создан трехканальный метеорологический акустический локатор (доплеровский) «МАЛ-2» для измерения температурной стратификации и профиля вектора скорости ветра в нижнем километровом слое атмосферы. За разработку и создание локатора «МАЛ-2» группа его разработчиков: В.И. Галкин, Б.Н. Молчанов, В.А. Федоров, М.Г. Фурсов под руководством автора – получили поощрительную премию на конкурсе прикладных работ Сибирского отделения АН СССР за 1985 г.

Все вышеуказанные метеорологические акустические локаторы использовались для исследования атмосферных процессов лишь их непосредственными разработчиками. Внедрение локатора в метеорологическую сеть страны сдерживалось, в ряду многих причин, и тем обстоятельством, что использование данных, получаемых с помощью акустических локаторов, требовало определенного опыта в их применении, а приобретение такого опыта практиками-метеорологами сдерживалось как отсутствием достаточного количества локаторов, так и неприемлемой для практического применения сложностью и ненадежностью имеющихся.

На основе полученного опыта эксплуатации первых акустических локаторов нами в 1989 г. была разработана концепция проектирования коммерческого варианта акустического метеолокатора нового поколения [2]. К этому времени появились персональные компьютеры IBM PC, которые в силу своих высоких эксплуатационно-технических характеристик существенно помогали решать поставленную задачу в качестве управляющей и обрабатывающей (сервисной) ЭВМ. Надо отметить, что в обществе в силу индустриального развития возникла насущная потребность контроля за качеством жизни, в т.ч. за качеством атмосферного воздуха. Даже при соблюдении промышленными предприятиями норм предельно допустимых выбросов повышение концентрации вредных примесей в нижних слоях атмосферы может быть обусловлено неблагоприятной метеорологической обстановкой, когда отсутствуют значительные вертикальные движения и перемешивания воздуха. Поэтому для оценки устойчивости атмосферы, т.е. оценки способности атмосферы рассеивать загрязняющие примеси, необходима оперативная информация о вертикальной температурно-ветровой стратификации атмосферы, которую дают акустические локаторы.

Акустический локатор «Звук-1», созданный в 1990 г., предназначен для контроля температурной стратификации пограничного слоя атмосферы, определяет тип стратификации (класс устойчивости атмосферы), высоту слоя перемешивания, высоты и мощность температурных инверсий, структурную характеристику поля температуры.

Локатор отличается компактностью, высокой степенью автоматизации, не требует вмешательства оператора в процесс работы. Высокий уровень защиты от шумов позволяет локатору работать в сложной шумовой обстановке. Антенна оборудована устройством автоматического подогрева и работает без обслуживания в зимних условиях. Регистрация отраженного сигнала, его обработка и управление работой локатора осуществляются с помощью персональной ЭВМ.

Локатор не требует специальной квалификации для обслуживания и предназначен для использования в рутинном режиме метеорологами, синоптиками, специалистами по экологии и оптике атмосферы, в гидрометеослужбе, службах контроля воздушного бассейна и др. Один экземпляр локатора передан в 1990 г. в Кемеровский областной центр по гидрометеорологии для контроля состояния атмосферы, второй в 1996 г. – в Российский федеральный ядерный центр (г. Снежинск Челябинской обл.) для решения аналогичных задач.

На базе локатора «Звук-1» в 1996 г. создан новый трехканальный доплеровский метеорологический локатор «Звук-2» [3] для измерения температурной стратификации, профиля вектора скорости ветра и структурной постоянной флуктуаций температуры.

Данный локатор, по сравнению с предыдущими разработками, содержит минимум аналоговой аппаратуры, которая обеспечивает излучение, прием и предварительную фильтрацию акустических сигналов. Его функционирование, в том числе и формирование излучаемого импульса, осуществляется под управлением персонального компьютера PC/AT 486 DX4. Другая особенность локатора заключается в переводе принимаемого высокочастотного сигнала в эквивалентное низкочастотное комплексное представление. Далее в каждом стробе дальности определяется отношение сигнал-шум и при превышении установленного порога рассчитывается мгновенная радиальная скорость ветра в стробируемом объеме. После завершения заданного цикла измерений полученный массив значений скорости ветра подвергается дальнейшей статистической обработке для определения устойчивого среднего профиля. Используемые алгоритмы позволяют проводить измерения высотных профилей скорости ветра и амплитуд эхосигналов в реальном масштабе времени без применения других специализированных вычислительных устройств. В 1996 г. локатор «Звук-2» провел сезонный непрерывный цикл зондирования атмосферы по программе ARM (атмосферные радиационные измерения) и сравнительные испытания с ветровым лидаром.

Разработка систем зондирования требовала теоретического изучения вопросов зондирования: закономерностей взаимодействия акустического излучения с атмосферой, теоретических расчетов параметров систем зондирования и оптимального выбора их параметров, точностных характеристик, разработки новых методов зондирования. Частично эти результаты отражены в [1].

В 1984 г. на конкурсе молодых ученых СО АН СССР сотрудники лаборатории С.Л. Одинцов, В.А. Федоров, М.Г. Фурсов за работу «Разработка методов и средств дистанционного зондирования атмосферы» были награждены поощрительными дипломами, а в 1987 г. С.Л. Одинцов по результатам теоретических исследований защитил кандидатскую диссертацию.

Основное внимание в теоретических исследованиях последних лет [4–8] уделялось изучению влияния рефракции звука на работу акустических локаторов, поиску новых информационных возможностей акустического зондирования, где помимо традиционных параметров сигнала-амплитуды и доплеровской частоты исследовались время и угол прихода сигнала и др. Рассмотрение обычно проводилось в линейном приближении геометрической акустики неоднородной движущейся среды. Проведен [4] анализ влияния стратификации ветра в атмосфере на точность его измерений доплеровским содаром. Получена [7] система уравнений и аналитические решения, которые позволяют анализировать и численно оценивать влияние рефракции на параметры геометрии акустического зондирования атмосферы.

Кроме того, исследовались системы со сканированием диаграмм направленности антенн [8]. Показано, что при бистатистическом зондировании быстрое сканирование в процессе излучения или приема сигналов приводит к заметному изменению формы и пиковой мощности импульсных рассеянных сигналов, что возможно использовать для целенаправленного управления длительностью и амплитудой рассеянного сигнала при постоянных характеристиках излучаемого импульса.

Результаты экспериментальных исследований последних лет с помощью акустических локаторов приведены в [9–18].

В 1987 г. в соответствии с программой работ Госкомгидромета СССР по «Разработке измерителя сдвига ветра на аэродроме» мы совместно с Казахским республиканским управлением по гидрометеорологии и контролю природной среды и КазНИИ Госкомгидромета провели испытания локатора «МАЛ-2» в аэропорту г. Алма-Ата.

Проведенные испытания показали, что в таком категоризованном аэропорту, как Алма-Ата, локатор «МАЛ-2» может устойчиво работать в моностатическом режиме вблизи взлетно-посадочной полосы, пользуясь для измерений метеопараметров промежутками времени между взлетами и посадками самолетов.

В связи с возникшей большой проблемой загрязнения атмосферы промышленных центров акустические локаторы могут оказать большую помощь в системах контроля воздушного бассейна, оперативно давая информацию о метеорологическом состоянии пограничного слоя атмосферы.

Работы, проводимые ИОА СО РАН в течение последних лет в критических с экологической точки зрения районах, позволили получить некоторый исходный материал для оценки экологического состояния городской атмосферы в этих районах. Часть работ проводилась с

совместным использованием содара и аэрозольного лидара, трассового лазерного и локальных газоанализаторов, наземных метеорологических станций.

Для определения характерных высот границ температурных инверсий, что важно для оценки климатических предпосылок загрязнения атмосферы, была проведена статистическая обработка результатов акустического зондирования по некоторым регионам бывшего СССР, где мы участвовали в научных экспедициях. К исследуемым регионам относятся города Томск, Кемерово, Алма-Ата, Ленинградская, Нижегородская и Семипалатинская области.

Полученная статистика температурной стратификации в разных регионах различна и зависит от местных особенностей (орографии местности) [12], которые создают неодинаковые условия для накопления загрязняющих примесей.

В частности, для г. Кемерово общий анализ состояний устойчивости атмосферы позволяет сделать вывод о высоком проценте существования температурных инверсий, о малых значениях высот их границ при относительно стабильном пространственном расположении. Все это наряду с низкими высотами труб (50–120 м) во многом объясняет неблагоприятную экологическую обстановку в промышленных районах города, когда дымовые шлейфы сдерживаются температурными инверсиями, тем самым способствуя повышению концентрации загрязнителей в приземных слоях атмосферы. Это подтверждается и результатом лазерного зондирования аэрозольных полей промышленного происхождения. Использование лазерно-акустических средств дистанционного зондирования атмосферы является весьма эффективным для контроля загрязнений воздушного бассейна города.

При этом лазерный локатор контролирует непосредственно распределение аэрозольных примесей в атмосфере на больших пространственных площадях, а акустический локатор, контролируя состояние атмосферы, позволяет оперативно в реальном времени следить за ее устойчивостью, определять границы температурных инверсий и этим облегчить прогноз неблагоприятных метеорологических условий, способствующих загрязнению воздуха.

Экспериментальные работы по одновременному зондированию пограничного слоя атмосферы при помощи акустических локаторов «МАЛ-1», «МАЛ-2» и аэрозольных лидаров «ЛОЗА-3», «ЛОЗА-4» показали, что основным препятствием вертикальному распространению аэрозолей в атмосфере является наличие задерживающих слоев в виде температурных инверсий, где происходит накопление аэрозолей, причем высота верхней границы аэрозольного облака практически совпадает с высотой задерживающего слоя (коэффициент корреляции 0,9 и более). Дальнейшие исследования позволили выявить определенную корреляцию между параметрами стратификации атмосферы и концентрацией некоторых газов, в частности озона и углекислого газа [15–18].

Локатор «Звук-1» участвовал также в исследованиях морской атмосферы во время плавания в Атлантике на борту научно-исследовательского судна «Мстислав Келдыш» (рейс 35, январь–апрель 1995 г.) [19].

3. Ультразвуковые системы

Принцип работы ультразвуковых метеорологических систем основан на зависимости скорости звука в воздухе от его абсолютной температуры и скорости ветра [1]. Значения скорости звука получаются путем измерения времени прохождения ультразвукового сигнала от его излучателя до приемника, разнесенных между собой на заданное расстояние. Решая возникающую систему уравнений относительно требуемого числа метеопараметров путем выбора соответствующего числа измерительных баз, получаем искомые значения метеопараметров (температуры и компонент скорости ветра).

Первые в институте разработки акустических (ультразвуковых) метеостанций проводились под руководством В.П. Лукина [20, 21]. Акустическая часть метеосистемы измеряла две ортогональные компоненты скорости ветра (средние значения и дисперсии).

Дальнейшее совершенствование систем проводили В.И. Галкин [22] и Г.Я. Патрушев, А.П. Ростов [23, 24].

Лучшим результатом этих работ явилось создание акустической метеостанции [24] для измерения метеопараметров (давления, влажности, трех компонент скорости ветра, температуры) и турбулентных характеристик атмосферы. Она позволяет измерять скорость трения, турбулентный поток тепла, масштаб Монина–Обухова, структурные постоянные температуры C_t^2 и скорости ветра C_v^2 .

Отсутствие движущихся частей, относительно малая постоянная времени, селективная чувствительность к требуемой компоненте скорости, возможность измерения флуктуаций температуры делают этот прибор удобным и надежным для проведения исследований по распространению оптических и звуковых волн в атмосфере.

С 1993 г. в КТИ «Оптика» по заказу и под руководством автора проводится опытно-конструкторская разработка метеорологического комплекса на основе ультразвуковой метеостанции (БМК-01). Метеостанция БМК-01 позволяет получать как средние значения всех измеряемых метеопараметров (температуры, трех компонент скорости ветра, влажности и давления) с заданным временным усреднением, так и мгновенные значения температуры и компонент ветра с дальнейшим оцениванием характеристик атмосферной турбулентности.

В 1995 г. создан макет БМК-01 [25]. Отличительной особенностью данной метеостанции являются ее высокие эксплуатационные характеристики. В частности, она может выполнять измерения при температурах окружающего воздуха от -50 до $+50$ °С и ветрах до 30 м/с, работает в условиях выпадения осадков (дождя, снега и т.п.). С помощью созданной программы «Статистика МЕТЕО» производится расчет средних значений и полного набора статистических характеристик температуры и трех компонент скорости ветра, стандартных параметров атмосферной турбулентности для приземного слоя (всего 67 характеристик), прогнозирования в рамках теории подобия Монино–Обухова и графическое отображение профилей ряда метеорологических и турбулентных характеристик приземного слоя атмосферы [26].

4. Распространение звуковых волн в атмосфере

Данная проблема начала развиваться в институте с 1979 г., исходя из потребности решения задач по оборонной тематике. Основное внимание здесь уделялось исследованиям приземного распространения звука [1, 27–48], т.е. распространения над земной поверхностью, что имеет свои особенности в отличие от распространения звука в свободном пространстве. Наряду с многочисленными метеопараметрами (температура, давление, влажность, скорость и направление ветра, турбулентность атмосферы) на приземное распространение звука оказывают влияние и геометрические факторы, например взаимное расположение источника, приемника и подстилающей поверхности, а также их характеристики.

Наиболее важными для практики задачами, вытекающими из проблемы приземного распространения звука, являются задачи прогнозирования распространения звука. Прежде всего это прогноз ослабления звука, прогноз дисперсии, корреляционных функций, спектров флуктуаций уровня звука и др. в месте приема. Борьба с шумовым загрязнением атмосферы, разработка акустически помехозащищенных конструкций, звуковещание, активное и пассивное акустическое зондирование – вот далеко не полный перечень областей науки и техники, где используются результаты прогнозирования распространения звука.

Поскольку не существовало единой теории приземного распространения звука, учитывающей совместное влияние перечисленных выше факторов, основное внимание уделялось натурным экспериментальным исследованиям в контролируемых условиях. По результатам этих первых работ Н.Н. Бочкарев в 1986 г. защитил кандидатскую диссертацию, а за цикл работ по приземному распространению звука на конкурсе прикладных работ СО АН СССР за 1989 г. группа сотрудников: Н.Н. Бочкарев, А.Г. Роот, М.Г. Фурсов под руководством автора – удостоились диплома второй степени.

На основе проведенных исследований основным достижением здесь является создание модели атмосферного канала распространения звука и программного комплекса «Акустика открытых пространств» [31, 32], предназначенных для оперативного расчета среднего поля звуковых давлений слышимого диапазона частот в приземной атмосфере с учетом характеристик источников шумов, подстилающей поверхности и метеорологических условий на дальностях до 10 км.

Программный комплекс предлагается использовать в системе оперативного прогноза распространения звука в приземной атмосфере, включающей в качестве технических средств компьютер IBM PC и устройство для измерения метеорологических параметров. На рис. 2 приведена структурная схема алгоритма этого комплекса. Исходными данными для решения задач прогноза здесь служат четыре группы входных параметров: метеорологических, подстилающей поверхности, источника шума и трассы его распространения. Комплекс прошел тестирование и натурные испытания. Средняя ошибка прогноза составляла 2–3 дБ.

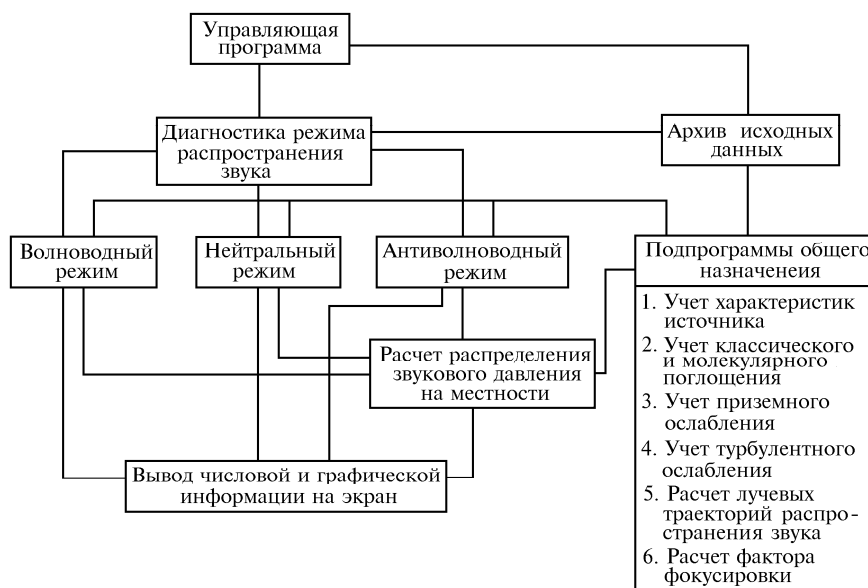


Рис. 2. Структурная схема программного комплекса «Акустика открытых пространств»

В приближении акустики неоднородной движущейся среды рассматривался эффект Доплера [34, 35]. Показано, что существует поперечный эффект Доплера, который влияет на работу акустических систем зондирования [4, 6, 7]. Получено также [36, 37] точное выражение для радиуса кривизны звукового луча в двумерном пространстве.

Для выполнения экспериментальных исследований проводились работы по созданию плазменного излучателя звука [38] и мощной антенной решетки [39, 40], с помощью которой изучались распространение звука на длинных трассах и нелинейные эффекты [41, 42].

На основе разработанной модели и программного комплекса предложен новый метод определения структурной постоянной флуктуаций акустического показателя преломления C_n^2 в пограничном слое атмосферы, основанный на измерениях звукового давления в зоне рефракционной тени [43].

Дальнейшее развитие модели и программного комплекса подразумевает их доработку на основе начатых исследований по флуктуациям звука [44–48].

5. Акустическая диагностика распространения МЛИ

Интенсивно проводимые исследования по транспортировке энергии мощного лазерного излучения (МЛИ) на большие расстояния потребовали разработки принципиально новых методов диагностики (зондирования) распространения МЛИ в атмосфере. Методы, традиционно используемые для этой цели, не были способны удовлетворить требованиям исследований при работе источника МЛИ на атмосферных трассах значительной протяженности. Обнаруженное свойство высокоэнергетического лазерного излучения генерировать в своем пучке акустические сигналы можно было использовать для разработки метода акустической диагностики распространения МЛИ в атмосфере. В результате наших исследований, начатых в 1980 г., было показано [49–52], что возникающие звуковые волны обладают достаточной амплитудой и их можно измерять акустическими приемниками. На основе тщательных экспериментальных исследований были разработаны методы акустической диагностики геометрических и энергетических характеристик МЛИ, канала его распространения и параметров атмосферы [50–54]. Основной вклад в эти исследования был внесен Л.Г. Шаманаевой и Н.Н. Бочкаревым, а результаты исследований вошли в их кандидатские диссертации, защищенные соответственно в 1984 и 1986 гг. А Н.Н. Бочкарев за цикл исследований по данной теме в составе авторского коллектива был удостоен звания лауреата премии Ленинского комсомола в 1987 г.

1. Красненко Н. П. Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1986. 167 с.

2. Гладких В. А., Карпов В. И., Красненко Н. П. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. №7. С. 751–756.

3. Гладких В.А., Карпов В.И., Красненко Н.П., Федоров В.А. // III Межреспубликанский симпозиум «Оптика атмосферы и океана»: Тезисы докл. Томск: Изд. ИОА СО РАН, 1996. С. 143.
4. Богушевич А.Я., Красненко Н.П. // Изв. АН СССР. 1987. Т. 23. №7. С. 716–723.
5. Богушевич А.Я., Красненко Н.П. Фазовые методы акустического зондирования атмосферы. М., 1988. Деп. в ВИНТИ № 8546-B88. 37 с.
6. Богушевич А.Я., Красненко Н.П. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. №4. С. 396–402.
7. Богушевич А.Я., Красненко Н.П. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. №9. С. 1258–1274.
8. Богушевич А.Я., Красненко Н.П. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. №1. С. 86–96.
9. Красненко Н.П., Фурсов М.Г. // Оптико-метеорологические исследования земной атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. С. 244–252.
10. Аршинов Ю.Ф., Белан Б.Д., Бобровников С.М., Красненко Н.П. и др. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. №9. С. 963–968.
11. Красненко Н.П., Кузнецова И.В., Разенков И.А., Фурсов М.Г. // Результаты комплексных экспериментов «Вертикаль-86» и «Вертикаль-87». Томск: ТНЦ СО АН СССР, 1989. С. 70–76.
12. Красненко Н.П., Фурсов М.Г. // Исследования пограничного слоя атмосферы над сушей и океаном акустическими методами. М., 1990. Ч. 1. С. 30–33. (Препринт / ИФА АН СССР, № 7).
13. Балин Ю.С., Вильде Т.В., Зуев В.Е., Красненко Н.П. и др. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. №7. С. 729–737.
14. Климова Е.В., Красненко Н.П., Фурсов М.Г. // Исследование загрязнения атмосферы Алматы. Ч. 1. Эксперимент АНЗАГ-87. Алма-Ата: Гылым, 1990. С. 49–57.
15. Красненко Н.П., Фурсов М.Г. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. №6. С. 652–654.
16. Зуев В.В., Красненко Н.П., Пельмский О.А., Фурсов М.Г. // XI симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы: Труды. Томск: ИОА СО РАН, 1993. С. 43–46.
17. Belan B.D., Zuev V.V., Zuev V.E., Krasnenko N.P. // EUROTRAC Annual report 1992. ISS. Garmisch-Partenkirchen, 1993. Part 9. P. 188–195.
18. Красненко Н.П., Фурсов М.Г. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. №11. С. 1611–1613.
19. Красненко Н.П., Молчанов Б.Н. // III Межреспубликанский симп. «Оптика атмосферы и океана»: Тезисы докл. Томск: ИОА СО РАН. 1996. С. 154.
20. Антошкин Л.В., Емалеев О.Н., Лукин В.П. и др. // Приборы и техника эксперимента. 1986. №3. С. 240–241.
21. Антошкин Л.В., Лукин В.П. // III Болгаро-советский семинар «Лазерные и радиометоды контроля окружающей среды»: Труды. София, 1990. С. 383–388.
22. Галкин В.И., Ушаков В.Г. // I Межреспубликанский симп. «Оптика атмосферы и океана»: Тезисы докл. Ч. 2. Томск: ТНЦ СО РАН, 1994. С. 86–187.
23. Монастырный Е.А., Патрушев Г.Я., Ростов А.П. // Приборы и техника эксперимента. 1988. №4. С. 196–199.
24. Иванов А.П., Патрушев Г.Я., Ростов А.П. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. №11–12. С. 1636–1638.
25. Богушевич А.Я., Красненко Н.П. // III Межреспубликанский симп. «Оптика атмосферы и океана»: Тезисы докл. Томск: ИОА СО РАН, 1996. С. 167.
26. Богушевич А.Я., Красненко Н.П. // III Межреспубликанский симп. «Оптика атмосферы и океана»: Тезисы докл. Томск: ИОА СО РАН. 1996. С. 143.
27. Шаманаева Л.Г. // J. Acoust. Soc. America. 1983. V. 73. №3. P. 780–784.
28. Бочкарев Н.Н., Красненко Н.П., Муравский В.П. // Акустический журнал. 1984. Т. 30. Вып. 2. С. 171–176.
29. Бочкарев Н.Н., Красненко Н.П. Особенности приземного распространения звуковых волн. Деп. в ВИНТИ, 1986. per. №501-B86. 82 с.
30. Байкалова Р.А., Красненко Н.П., Шаманаева Л.Г. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. №7. С. 782–784.
31. Krasnenko N.P., Bogushevich A.Ya. // 1993 International Congress on Noise Control Engineering «Internoise 93». (Proceedings). Belgium: Leuven, 1993. V. 3. P. 1751–1754.
32. Абрамов Н.Г., Богушевич А.Я., Карпов В.И., Красненко Н.П., Фомичев А.А. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. №3. С. 403–413.
33. Красненко Н.П., Шаманаева Л.Г. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. №10. С. 1517–1526.
34. Богушевич А.Я., Красненко Н.П. // Акустический журнал. 1988. Т. 34. Вып. 4. С. 598–402.
35. Богушевич А.Я. // Акустический журнал. 1994. Т. 40. №6. С. 899–902.
36. Абрамов Н.Г. // I Межреспубликанский симпозиум «Оптика атмосферы и океана»: Тезисы докл. Томск: ИОА СО РАН, 1994. Ч. 1. С. 156–159.
37. Абрамов Н.Г. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. №7. С. 935–941.
38. Бочкарев Н.Н., Красненко Н.П., Нетреба П.И., Тоболкин А.С. Распространение звуковых и оптических волн в атмосфере. Томск: ТФ СО АН СССР, 1988. С. 93–96.
39. Бочкарев Н.Н., Клочков В.А., Красненко Н.П., Фомичев А.А. Распространение звуковых волн в атмосфере. Томск: ТФ СО АН СССР, 1988. С. 101–104.
40. Бочкарев Н.Н. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. №8. С. 1137–1140.
41. Бочкарев Н.Н., Коняев П.А. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. №6. С. 668–670.
42. Бочкарев Н.Н. // Акустический журнал. 1996. Т. 42. №5. С. 706–707.
43. Богушевич А.Я., Красненко Н.П. // Акустический журнал. 1996. Т. 42. №3. С. 339–346.
44. Бочкарев Н.Н., Красненко Н.П. // III Всес. симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере: Материалы. Томск: ИОА СО АН СССР, 1986. Ч. 2. С. 304–308.
45. Абрамов Н.Г. // Распространение звуковых и оптических волн в атмосфере. Томск: ТФ СО АН СССР, 1988. С. 97–100.

46. Бочкарев Н.Н., Красненко Н.П. // Второй межотраслевой акустический семинар. «Модели, алгоритмы, принятие решений»: Тезисы докл. М., 1988. С. 22.
47. Бочкарев Н.Н., Красненко Н.П., Патрушев Г.Я., Ростов А.П. //XI Всесоюзный симп. по распространению лазерного изл. в атмосфере и водных средах: Тезисы докл. Томск: ТИЦ СО РАН, 1991. С. 20.
48. Патрушев Г.Я., Ростов А.П. //Акустический журнал. 1996. Т. 42. №1. С. 88–90.
49. Беляев Е.Б., Годлевский А.П., Копытин Ю.Д., Красненко Н.П., Муравский В.Л., Шаманаева Л.Г. //II Всес. совещание по атмосферной оптике: Тезисы докл. Томск: ИОА СО АН СССР, 1980. Ч. 3. С. 156–159.
50. Бочкарев Н.Н., Красненко Н.П., Сорокин Ю.М. //Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. №6. С. 563–578.
51. Shamaeva L. G. //8th Intern. Symp. on Acoustic Remote Sensing and Associated Techniques of the Atmosphere and Oceans. (Proceedings). Moscow, Russia, 1996. P. 135–140.
52. Копытин Ю.Д., Протасевич Е.Т., Чистякова Л.К., Шишковский В.И. Воздействие лазерного и ВЧ-излучений на воздушную среду. Новосибирск: Наука, 1992. 190 с.
53. Копытин Ю.Д., Красненко Н.П., Шаманаева Л.Г. // VII Всес. симп. по лазерн. и акуст. зонд. атм.: Тезисы докл. Томск: ИОА СО АН СССР, 1982. Часть 2. С. 126–130.
54. Шаманаева Л.Г. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. №1. С. 105–112.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
21 января 1997 г.

N.P. Krasnenko. Development of Atmospheric Acoustic Investigation at the IOA SB RAS.

A history of acoustic investigations of the atmosphere at the Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences is described. The principal results are presented on the problems devoted to acoustic sounding of the atmosphere, ultrasonic meteorological systems, propagation of acoustic waves in the atmosphere, and acoustic diagnostics of high-power laser radiation propagation.