

Н.П. Красненко, А.А. Тихомиров

## Технические средства и технологии дистанционного зондирования атмосферы и подстилающей поверхности

*Институт оптического мониторинга СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 12.11.2001 г.

Обобщены результаты научных исследований и разработок, выполненных в ИОМ СО РАН за 30-летний период, по развитию технических средств и технологий лазерного и акустического зондирования окружающей среды, перспективных с точки зрения дистанционности и оперативности при определении профилей аэрозольных загрязнений и метеорологических величин, а также мониторинга пространственно-временных вариаций их полей. Представлены созданные в Институте наземные, самолетные и космические лидары для зондирования атмосферы и подстилающей поверхности и технологии их применения и проектирования. Рассмотрены направления проводимых в Институте работ по акустическому зондированию атмосферного пограничного слоя и достижения по созданию новых технических средств и технологий для этих целей. Представлены результаты применения созданных технических средств и технологий акустического зондирования для мониторинга атмосферного пограничного слоя и распространения звука в нем.

### Введение

Дистанционное зондирование атмосферы и подстилающей поверхности с использованием различных видов излучений как эффективный метод научных исследований всегда привлекало особое внимание ученых. Достаточно высокие сечения взаимодействия с исследуемыми компонентами (высокая чувствительность) и достигаемое пространственно-временное разрешение при значительной дальности зондирования обеспечивают этому методу высокую эффективность при исследованиях атмосферных свойств и явлений, а также процессов взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью, в особенности при лазерном (с помощью лидаров) и акустическом (с помощью сонаров) зондировании. Поэтому новые технические средства дистанционного зондирования окружающей среды и технологии их применения разрабатывались в ИОМ СО РАН с момента его основания.

Первый лидар с автоматизированной системой управления режимами измерений и обработки результатов, входящий в состав большого комплекса оперативного измерения параметров атмосферы, был разработан по техническому заданию Института оптики атмосферы и изготовлен в конце 1973 г. [1]. Итоги 25-летнего развития лидаростроения в Институте как составной части оптического приборостроения были представлены в [2]. Поэтапное создание лидарных систем развивалось в направлении от наземных стационарных и мобильных к самолетным, а затем к космическим лидарам [3–6]. Одновременно с созданием средств лазерного зондирования окружающей среды разрабатывались методы проектирования лидаров и их составных частей [7–15]. Некоторые результаты развития в Институте лидарных систем и

технологий лазерного зондирования представлены также в [16].

Технические средства акустического зондирования атмосферы начали разрабатываться в Институте с 1978 г., сначала в виде составных частей метеорологических акустических локаторов – систем обработки информации [17, 18], а после 1985 г. и полностью укомплектованных акустических локаторов и ультразвуковых метеорологических систем.

В статье обобщаются результаты основных работ, проводимых в Институте по развитию технических средств, методов и технологий лазерного и акустического зондирования окружающей среды, перспективных с точки зрения дистанционности и оперативности при определении профилей аэрозольных загрязнений и метеорологических величин, а также мониторинга пространственно-временных вариаций их полей.

### 1. Технологии и техника лазерного зондирования

Технический характер НИОКР, выполняемых в Институте с момента его образования, определил их основную направленность в области создания технических средств лазерного зондирования атмосферы, гидросферы и подстилающей поверхности. Наряду с проектированием, изготовлением и натурными сравнительными испытаниями лидаров, проводимыми для определения их потенциальных возможностей, выполнялось научно-техническое обеспечение создаваемых технических средств. Для этого разрабатывались основы расчета и оптимального проектирования лидарных систем и их составных частей, создавались

поверочные устройства для их метрологической аттестации, а также отрабатывались технологии дистанционного лазерного мониторинга исследуемых сред.

### **1.1. Технические средства лазерного зондирования**

*Наземные лидарные системы.* Кроме специальных мобильных лидаров, входящих в состав комплексов оперативного определения параметров атмосферы [1, 2, 6], в первое десятилетие в ИОМ СО РАН создавались аэрозольные лидары для научно-исследовательских целей, в частности для экологического мониторинга атмосферных загрязнений. К ним относятся лидары серии «ЛОЗА» [2, 3]. Одновременно при разработке лидаров развивались методы их оптимального проектирования [7]. Для отработки оптимальных технических решений по составным частям лидара был создан специальный лидарный стенд [10]. На большую часть схемных и конструкторских решений (по способам и устройствам) было получено более 20 авторских свидетельств СССР.

По своим параметрам и эксплуатационным характеристикам наши наземные мобильные лидары не уступали лучшим образцам, созданным в исследовательских центрах SRI (США), DFVLR (ФРГ), CNR-IROE (Италия) и в некоторых институтах Японии, а также лидарам, изготовленным малой серией в конце 70-х гг. фирмой Impuls Physics GmbH (ФРГ). Единственное отставание было по системам регистрации лидарных сигналов – АЦП и ЭВМ.

Было изготовлено пять приемопередающих устройств лидара «ЛОЗА-2» на основе объектива Кассегрена. В 1976 г. часть из них была поставлена в научно-исследовательские организации страны и за рубеж. Лидарный комплекс «ЛОЗА-3», впоследствии модернизированный и усовершенствованный в ИОА СО РАН, до настоящего времени обеспечивает проведение дистанционных измерений в атмосфере по различным научно-исследовательским программам.

В 80-х гг. специалисты Института принимали участие в проектировании и изготовлении приемопередающего устройства высотного лидара с диаметром зеркала 1,0 м и приемной системы Сибирской лидарной станций ИОА с диаметром приемного зеркала 2,2 м [2], а также в работах по созданию экспериментальных образцов лидаров, использующих другие эффекты рассеяния [19–21].

В начале 90-х гг. наиболее значительной работой было проектирование и изготовление приемной системы метеорологического лидара МЕЛ-01 на основе камеры Шмидта [12]. В ней для реализации корреляционной методики измерения скорости ветра по трем направлениям зондирования при общем угле поля зрения 6,5° был использован специальный пространственный фильтр [13]. Он обеспечивал прием обратнорассеянного излучения в узком мгновенном угле поля зрения, составляющем несколько угловых минут, в направлении лазерного луча, что повысило отношение сигнал-шум при работе в дневных условиях.

*Самолетные поляризационные лидары.* На основании опыта, полученного при создании и использовании самолетных лидаров в различных зарубежных научных центрах, последующие наши разработки были сконцентрированы на совершенствовании поляризационных лидарных систем, поскольку они являются более информативными при определении формы рассеивающих частиц и при исследовании эффектов кратного рассеяния. При проектировании учитывалась также возможность зондирования с помощью создаваемых лидаров различных объектов в атмосфере и гидросфере и с других мобильных платформ. Самолетные поляризационные лидары «Светозар-3», «Макрель-2», «Макрель-2М» [2, 4] позволяют исследовать атмосферу как таковую, а также промышленные загрязнения и подстилающую поверхность (верхний слой гидросферы и поверхность суши). Лидарный мониторинг различных объектов с помощью этих лидаров проводился не только с борта самолета, но и с морских судов, автомобильных прицепов, стационарных пунктов.

Многофункциональный лидар «Светозар-3» с тремя приемными каналами позволял при посылке только одного зондирующего импульса измерять одновременно все параметры Стокса в потоке обратнорассеянного излучения от быстроизменяющегося объекта (с учетом скорости движения платформы-носителя и временных вариаций объекта исследования) [14]. В передающем канале этого лидара была предусмотрена возможность установки различных состояний поляризации зондирующего излучения. Наиболее удачной разработкой можно считать лидар «Макрель-2», предназначенный для зондирования облачных полей, подстилающей поверхности и гидросферы с борта самолета. Наряду с измерениями состояния поляризации излучения, образованного за счет упругого обратного рассеяния лазерного луча на компонентах зондируемой среды, лидар обеспечивает регистрацию флуоресцентного излучения от органических загрязнений на подстилающей поверхности, а также биопродуктивных зон в море. Ввиду универсальности лидара была изготовлена малая серия в количестве 8 экземпляров. Один из них до настоящего времени эксплуатируется в составе самолета-лаборатории «Оптик-Э» [22], обеспечивая проведение национальных и международных экспедиций ИОА СО РАН.

*Космический лидар «БАЛКАН».* Опыт, накопленный при разработке мобильных наземных и самолетных лидаров, позволил в кооперации с ИОА и рядом отраслевых фирм Минобщемаши СССР разработать, изготовить и испытать к концу 1990 г. первый отечественный космический лидар «БАЛКАН» [5]. При этом сотрудниками Института была разработана конструкторская документация на лидар, изготовлен ряд его блоков и проведен весь цикл наземных отработочных испытаний лидара, включая предстартовые испытания в составе орбитального модуля на космодроме. После запуска на орбиту в 1995 г. лидар был введен в состав научной аппаратуры орбитальной станции «Мир» и в течение двух лет работал как

первый стационарный лидар космического базирования. С его помощью проводилась отработка технологий космического лазерного зондирования атмосферы и подстилающей поверхности Земли [23–25].

*Метрологическое обеспечение лидарных систем.* Лидары, как новый класс измерительных средств, имеют свои особенности. Погрешность лидарных измерений, кроме методических проблем, связанных со способами решения лидарного уравнения (см., например [26]), определяется также рядом технических факторов. Одним из них является инструментальная погрешность, основную часть которой составляет коэффициент передачи приемной системы от входной апертуры до регистрирующего АЦП [15]. Вопросы, связанные с юстировкой и калибровкой лидаров, были частично рассмотрены в [1, 3].

Лидарные системы, используемые для определения количественных значений оптико-метеорологических параметров атмосферы, должны подвергаться метрологической аттестации после изготовления и периодическим поверкам в процессе эксплуатации. Наиболее подходящим для этих целей является имитатор оптического сигнала, позволяющий моделировать различные временные зависимости излучаемой мощности [27]. Подавая оптический сигнал известной формы на вход приемной системы лидара, можно по ее отклику проводить калибровку всего приеморегистрирующего тракта и получать контролируемый конечный результат на выходе регистрирующего устройства или ЭВМ. Для многоканальных лидаров «Светозар-3», «Макрель-2» и лидара «БАЛКАН» были специально созданы комплекты контрольно-поверочной аппаратуры [28, 29].

## 1.2. Технологии лидарного зондирования

*Пространственно-временные масштабы измерений при сканировании.* При проведении лидарного мониторинга окружающей среды возникает проблема его оптимальной организации, которая должна учитывать как технические характеристики лидара (энергетический потенциал, пространственную разрешающую способность по углу и дальности, частоту повторения зондирующих импульсов, возможности сканирования направлением зондирования), так и размеры контролируемого пространства и возможные временные вариации исследуемых атмосферных полей. Дальность зондирования определяется энергетическим потенциалом лидара  $P = P_0 AKS$ , где  $P_0$  – мощность импульса лазерного передатчика;  $A$ ,  $K$  – площадь и коэффициент пропускания приемной системы;  $S$  – чувствительность фотодетектора. Для аэрозольных наземных лидаров со средним значением  $P$ , работающих по приземным трассам, дальность зондирования составляет несколько километров [7]. Пространственная разрешающая способность вдоль трассы распространения лазерного луча зависит от длительности лазерного импульса, режима работы и частотных характеристик фотодетектора и электронного

регистратора эхосигнала [26]. Другими параметрами лидара, также влияющими на его разрешающую способность, являются расходимость зондирующего излучения  $\theta_0$ , которая определяет угловое разрешение в рассеивающей среде, и частота посылок зондирующих импульсов  $f_n$ .

При определении загрязнений атмосферы с использованием наземного сканирующего лидара возможен ряд режимов работы (рис. 1). Если зондирование проводится в секторах по углу места от 0 до  $\varepsilon_m$

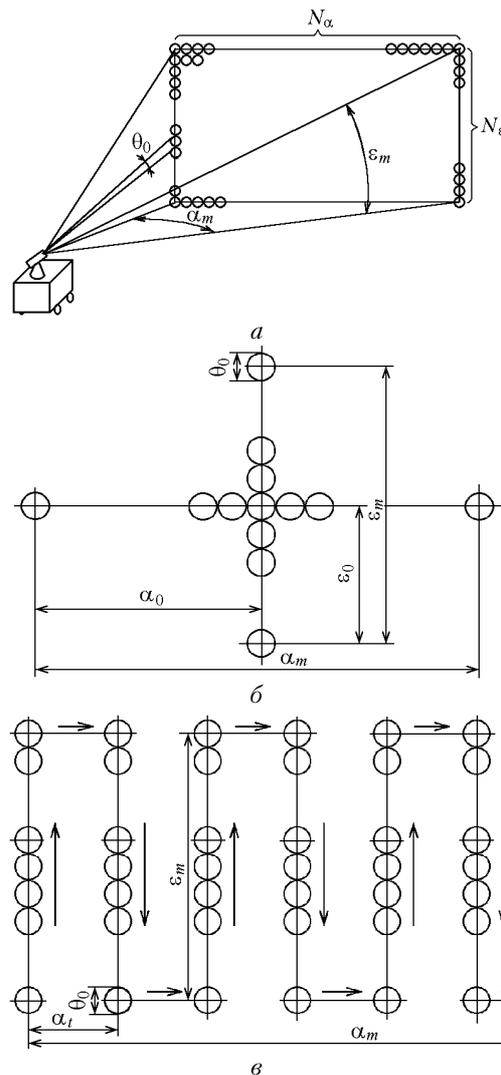


Рис. 1. Возможные режимы сканирования: *a* – общая картина в телесном угле  $\Omega_m = \varepsilon_m \alpha_m$ ; *б* – сканирование по двум главным углам; *в* – сканирование по форме меандра

и по азимуту от 0 до  $\alpha_m$  градусов с равномерными угловыми скоростями  $\omega_\varepsilon$  и  $\omega_\alpha$ , то периоды сканирования по этим углам равны  $t_\varepsilon = \varepsilon_m / \omega_\varepsilon$  и  $t_\alpha = \alpha_m / \omega_\alpha$  соответственно. Количество лазерных импульсов, укладываемых за один цикл сканирования, определяется по углу места:  $n_\varepsilon = f_n t_\varepsilon$  и по азимуту:  $n_\alpha = f_n t_\alpha$ . Для последовательного построчного азимутального сканирования во всем телесном угле  $\Omega_m = \varepsilon_m \alpha_m$  (рис. 1, *a*) требуется время  $t_{ск}$ , равное  $\alpha_m \varepsilon_m / \omega_\alpha \theta_0$ . Даже при

обычных параметрах  $\alpha_m = \pi$  рад,  $\epsilon_m = 1$  рад,  $\omega_\alpha = 0,2\pi$  рад/с,  $\theta_0 = 1,0$  мрад получаем  $t_{\text{ск}} = 5000$  с, т.е. почти 1,5 ч. При мониторинге быстромменяющихся атмосферных полей это не приемлемо. В данном случае острая направленность лазерного излучения и недостаточно высокая частота повторения лазерных импульсов не позволяют построить лидарные системы, аналогичные радарам кругового обзора.

На рис. 1,б,в показаны два других возможных режима сканирования. В первом варианте первоначально при определенном азимуте  $\alpha_0$  делают полный вертикальный разрез атмосферы, сканируя по углу места от  $0^\circ$  до  $\epsilon_m$ . Это позволяет определить высоту возможного инверсного слоя и задать для дальнейшего сканирования предельный угол места  $\epsilon_{\text{пр}} < \epsilon_m$ . Угловое пространственное разрешение при этом может находиться в интервале от  $\theta_0$  до  $n10\theta_0$ , поскольку зависит от  $f_{\text{и}}$  и  $\omega_\epsilon$ . При этом определяется угловая высота  $\epsilon_0$ , которой соответствует максимальная плотность загрязнений и на которой проводится дальнейшее зондирование при сканировании по азимуту.

Во втором варианте (рис. 1,в) развертка сканирования проводится по форме меандра с периодом  $\alpha_t$ , составляющим единицы градусов. Пространственное разрешение по углу  $\epsilon$  выбирается также от  $\theta_0$  до  $n10\theta_0$ . Таким же образом может быть осуществлена развертка сканирования по азимуту. Применение таких усеченных режимов сканирования позволяет в значительной степени повысить оперативность при обзоре пространства в телесном угле  $\Omega_m$ .

В [14] рассмотрены особенности организации поляризационного лидарного зондирования и оптимального построения лидарных систем с изменением состояния поляризации в передающем и приемном каналах с учетом временных изменений исследуемой среды.

**Авиационное зондирование со сканированием.** Сканирование направлением оптической оси лидара, установленного на подвижном носителе, позволяет дополнительно расширить пространственные масштабы лидарного мониторинга. Высота  $H$  и длительность полета  $T$  носителя, а также длина трассы  $L$  являются определяющими характеристиками. Характеристики  $H$  и  $T$  зависят от вида носителя: тип самолета, вертолет или дирижабль, а  $T$  и  $L$  взаимосвязаны через скорость полета  $V$ , при этом высота  $H$  может во время полета меняться в кратном интервале даже для одного типа носителя. Кроме того, вертолет или дирижабль могут обеспечить проведение детального мониторинга локального объекта в необходимых местах вдоль трассы полета за счет зависания над заданной точкой.

Отличительной особенностью авиационного и космического мониторинга от наземного является то, что лидар, установленный на подвижном носителе, перемещается совместно с ним в базовой системе координат  $O_g X_g Y_g Z_g$ , центр которой  $O_g$  обычно привязывается к какой-либо точке Земли. Положение оптической оси лидара (направление зондирования) задается в связанной системе координат носителя и затем с учетом параметров движения последнего определяется в базовой системе. Используя навигационное оборудование носителя, определяющее его пространственно-временное положение в геодезической

системе координат, можно осуществить привязку точек зондирования (траектории движения оптической оси лидара) к координатам на поверхности Земли. В [30] приведены соотношения, определяющие плотность распределения лазерных пятен, а также траекторию перемещения оптической оси лидара на подстилающей поверхности Земли или облаке. Так, при движении носителя параллельно оси  $O_g X_g$  при коническом сканировании траектория перемещения луча на плоскости  $X_g O_g Z_g$  описывается циклоидой

$$\begin{cases} X_g(t) = Vt \pm H \operatorname{tg} \delta_m \sin \omega_c t \\ Z_g(t) = H \operatorname{tg} \delta_m \cos \omega_c t \end{cases},$$

а при плоскостном сканировании – синусоидой

$$\begin{cases} X_g(t) = Vt + H \operatorname{tg}(\delta_m \cos \omega_c t) \cos \beta, \\ Z_g(t) = H \operatorname{tg}(\delta_m \cos \omega_c t) \sin \beta, \end{cases}$$

где  $\delta_m$  – максимальный угол отклонения оптической оси от надира;  $\omega_c$  – угловая скорость сканирования;  $t$  – текущее время;  $\beta$  – угол между осью  $O_g X_g$  и плоскостью сканирования, при этом ось  $O_g Y_g$  направлена перпендикулярно от поверхности. При увеличении частоты  $\omega_c$  и при неизменной частоте  $f_{\text{и}}$  плотность распределения лазерных пятен на поверхности уменьшается, т.е. пространственная разрешающая способность на поверхности ухудшается.

**Технологии космического лазерного зондирования.** При проведении экспериментов по зондированию Земли лидаром «БАЛКАН» были отработаны технологии космического лазерного зондирования Земли для ориентации осей связанной системы координат орбитальной станции (ОС) «Мир»  $O_6 X_6 Y_6 Z_6$  [23, 24] в базовых орбитальной  $O_0 X_0 Y_0 Z_0$  (рис. 2,а) и инерциальной (рис. 2,б) системах координат. В первой

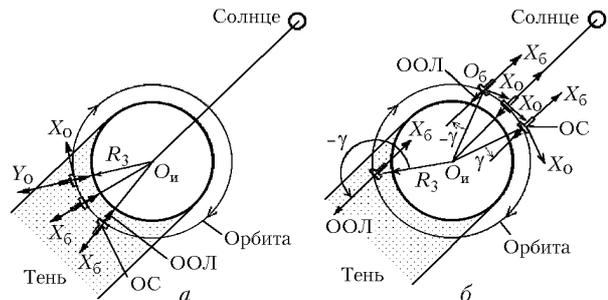


Рис. 2. Возможные режимы ориентации ОС и ООЛ в полете: а – в орбитальной системе координат; б – в инерциальной системе;  $O_{\text{и}}$  – центр Земли (инерциальной системы координат)

ориентации ОС оптическая ось лидара (ООЛ) направлялась в надира ( $\gamma \approx 0^\circ$ ), во второй – угол  $\gamma$  между ООЛ и надиром все время изменялся. Опыт эксплуатации лидара «БАЛКАН» показал, что в орбитальной системе координат траектория движения ООЛ по поверхности Земли даже при отсутствии сканирования в общем случае не совпадает с проекцией траектории орбиты. Это обусловлено погрешностями в истинной ориентации ООЛ относительно осей ОС, ошибками задания ориентации станции, флуктуацией ориентации осей ОС в полете [25].

### 1.3. Развитие методов оптимального проектирования лидарных систем

Используемая нами концепция методов оптимального проектирования лидаров и их составных частей [8, 9, 11–15] включает: обзор существующих технических решений, создание системы их классификации по обобщающим признакам, выбор количественных и качественных оценочных критериев, проведение с помощью этих критериев сравнительного анализа существующих технических решений, выбор среди них оптимальных по заданным критериям качества, а также предложение возможных новых технических решений.

Например, в [12] приведены критерии оценки эффективности лидарных приемных объективов различных типов и проведен их сравнительный анализ с помощью предложенной диаграммы энергетических и габаритных характеристик (рис. 3). В зависимости от решаемых лидаром задач диаграмма позволяет выбрать

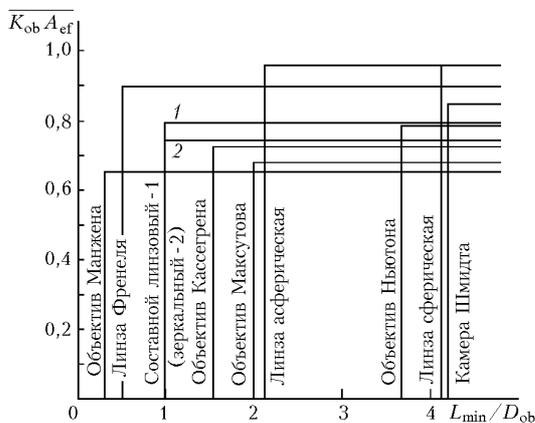


Рис. 3. Диаграмма энергетических и габаритных характеристик приемных объективов различных типов

объектив с оптимальным соотношением между его минимальной длиной  $L_{min}$ , которая пропорциональна фокусному расстоянию  $f_{ob}$ , диаметром  $D_{ob}$  и коэффи-

циентом относительной эффективности  $\bar{K}_{ob} \bar{A}_{ef}$  — произведением коэффициента пропускания объектива на его эффективную площадь. Левая граница диаграмм определяет минимально возможные относительные габаритные размеры, а верхняя — максимально достижимые при этом энергетические показатели каждого конкретного типа объектива.

Подобным образом проведены работы по оптимизации технических решений для других элементов приемной системы лидара: пространственных фильтров [13], поляризационных анализаторов [14], а также способов сжатия динамического диапазона лидарных сигналов [15].

В настоящее время в Институте в составе Геофизического стационара для проведения дистанционного мониторинга локальных источников загрязнений над г. Томском создается специальный лидарный пост [31], на котором будут отрабатывать технологии лидарного мониторинга аэрозольных загрязнений. Планируется также проведение работ по дальнейшей оптимизации составных частей лидарных систем.

## 2. Технологии и техника акустического зондирования атмосферы

Эффекты сильного взаимодействия звука с атмосферой определяют перспективность исследований структуры и динамики атмосферного пограничного слоя акустическими методами. Многолетние фундаментальные исследования в области атмосферной акустики [18, 32] привели к появлению атмосферных акустических технологий: созданию ряда образцов метеорологических акустических локаторов (сонаров), ультразвуковых метеорологических станций (комплексов), аппаратно-программных комплексов для учета влияния атмосферного канала распространения звука, прогнозирования дальности звукового вещания и мониторинга шумов, для определения параметров атмосферы и различных объектов. Основные направления применения таких технологий показаны на рис. 4 [33].

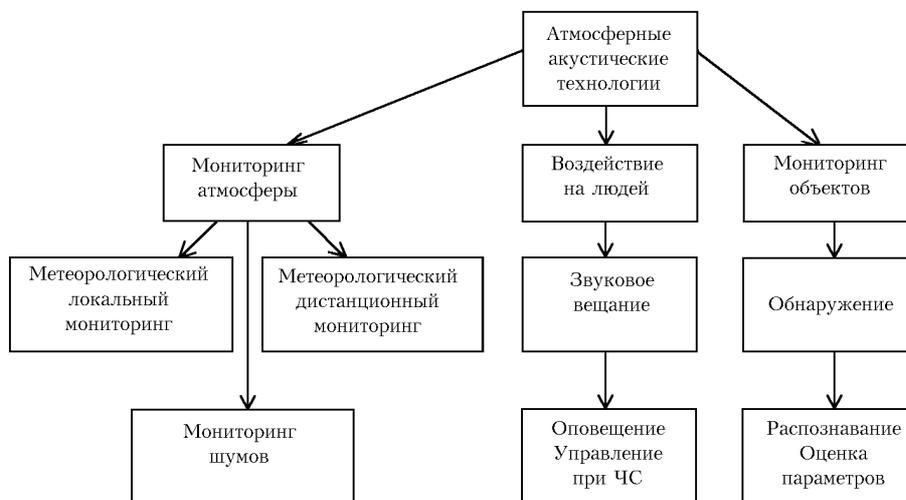


Рис. 4. Направления атмосферных акустических технологий

Для мониторинга атмосферы успешно используются акустические локаторы и ультразвуковые метеорологические станции. Акустические локаторы осуществляют дистанционный мониторинг в атмосферном пограничном слое (АПС), определяя температурную и ветровую стратификацию, класс устойчивости атмосферы, высоту слоя перемешивания, параметры турбулентности. Ультразвуковые метеостанции осуществляют локальный мониторинг, измеряя с высокой точностью в локальном объеме атмосферы температуру воздуха и скорость ветра, а также их пульсации, по которым определяется полный набор параметров турбулентности в приземном слое атмосферы. Все это вместе взятое позволяет в реальном времени контролировать метеорологическое состояние АПС, который существенным образом влияет на распространение волн различной природы и в котором аккумулируются все виды загрязнений, влияющие на людей: аэрозоль, газы, радиация, а также осуществлять прогнозирование развития метеорологической ситуации.

Актуальными с точки зрения воздействия на человека становятся и акустические шумы, играющие все возрастающую роль в современном мире. Проведение фундаментальных исследований по приземному распространению звука и создание аппаратно-программных комплексов, учитывающих и прогнозирующих влияние атмосферы на приземное распространение звука, позволило проводить мониторинг шумов (звука) для целей звукового вещания, градостроительства, определения санитарных зон, защиты людей и др. Особое значение в последнее время приобрели вопросы оповещения и управления массами людей при возникновении чрезвычайных ситуаций, при проведении аварийно-спасательных работ на зараженных территориях [34]. При пассивном приеме звуковых волн (пассивная акустическая локация) с учетом влияния атмосферного канала распространения решаются задачи обнаружения источника звука, распознавания, оценки его параметров и характеристик движения.

## 2.1. Техника дистанционного акустического зондирования атмосферы

Применение акустического излучения для дистанционного зондирования нижнего слоя атмосферы имеет ряд преимуществ по сравнению с радио- и оптическим излучением, в числе которых большая эффективность и возможность проведения непрерывного и длительного мониторинга атмосферы [18, 32].

За более чем 25-летний (с 1974 г.) период развития данного направления приобретен большой опыт в создании средств акустического зондирования атмосферы – акустических локаторов [17, 18, 32]. С участием сотрудников СКБ НП «Оптика» были созданы первые акустические локаторы «МАЛ-1» и «МАЛ-2» для измерения температурной стратификации и профиля скорости ветра в нижнем километровом слое атмосферы. С их помощью проводились научные экспедиционные исследования атмосферы. В частно-

сти, в 1987 г. в соответствии с программой работ Госкомгидромета СССР и Казахского республиканского управления по гидрометеорологии и контролю природной среды в аэропорту г. Алматы проводились измерения сдвига ветра и температурной стратификации атмосферы. В 1979, 1980 и 1987 гг. на полигонах в Ленинградской и Нижегородской областях проводились исследования по использованию акустических локаторов для целей прогнозирования распространения звуковых волн в атмосфере.

Перспективы развития данного направления в ИОМ СО РАН заключаются в создании сети станций акустического зондирования для мониторинга атмосферы. В связи с этим разрабатывается ряд модификаций акустических локаторов от малогабаритных переносных высокочастотных локаторов [35–40] до низкочастотных стационарных для различного диапазона высот возможного их применения. В первых локаторах МАЛ-1, МАЛ-2, «Звук-1» и «Звук-2» [17, 18, 32], имеющих значительные размеры, использовались несущие частоты от 1 до 1,7 кГц, которые обеспечивали дальность зондирования до высот 500–1000 м. В новых высокочастотных локаторах используются несущие частоты 2,2–7 кГц, что позволяет сделать их более компактными.

В настоящее время в ИОМ СО РАН создан и используется высокочастотный локатор (минисодар) «МС-1» [39], в котором применена малогабаритная зеркальная параболическая антенна с звукозащитной блендой в виде усеченного конуса. Минисодар предназначен для измерения стратификации атмосферы, высоты слоя перемешивания, высоты и мощности инверсий, профиля скорости ветра, структурных характеристик  $C_T^2$ ,  $C_V^2$ . Минисодары получили развитие в последние годы и заняли прочную нишу в исследованиях нижнего слоя атмосферы, обладая существенно меньшими габаритами, более высоким пространственно-временным разрешением и некоторыми другими дополнительными возможностями. Конечно, дальность зондирования при использовании более высоких частот уменьшается, однако повышение частоты излучения приводит к уменьшению габаритов антенной системы, а следовательно, и габаритных размеров самого содара.

Созданный минисодар «МС-1» может работать в моностатическом, бистатическом и тристатическом режимах на частотах от 3 до 7 кГц. Его внешний вид приведен на рис. 5, а основные параметры – ниже.

### Основные технические характеристики минисодара «МС-1»

Рабочая частота, Гц	4273
Диапазон зондирования, м	8 – 200
Интервал зондирования, с	1,8
Разрешение, м	8
Акустическое давление, дБ	130
Ширина диаграммы направленности	13
по уровню половинной мощности, град	
Габаритные размеры, мм	640×520×700
Питание, В	
сетевое	~220
автономное	12



Рис. 5. Акустический локаатор «МС-1»

В качестве акустических преобразователей используются рупорные головки мощностью до 180 Вт. Первые испытания минисодара [39] показали его нормальную, устойчивую работу как при импульсном, так и при непрерывном излучении, в режиме как моно-, так и бистатического зондирования.

Кроме того, в настоящее время проводятся испытания макета еще одного высокочастотного содара [37, 40], особенностью которого является то, что в его антеннах в качестве параболического рефлектора применено зеркало типа АДЭ (антенна двухзеркальная с малым эллиптическим зеркалом). Такие зеркала обеспечивают более узкую диаграмму направленности. Количество каналов локаатора от одного до пяти, рабочая частота от 2 до 5 кГц (основная частота 2,2 кГц). Ширина диаграммы направленности на частоте 2500 Гц – 14°. В качестве излучателей используются акустические головки мощностью до 300 Вт. Напряжение питания локаатора 12 В. Область применения и информационные возможности данного локаатора подобны локатору «МС-1».

Предварительные испытания показали возможность эффективного применения разработанных акустических локаторов для измерений турбулентности, профилей ветра, температурной стратификации и контроля нижнего слоя атмосферы, а также их конкурентоспособность с иностранными аналогами.

Третий разрабатываемый локаатор – стационарный, расположенный на геофизическом стационаре ИОМ, доплеровский трехкомпонентный (трехканальный) с пониженной частотой зондирования менее 1 кГц.

## **2.2. Технология мониторинга акустических шумов (распространения звука) в приземном слое атмосферы**

Приземное распространение звуковых волн (шумов) в атмосфере (над земной поверхностью) имеет свои особенности в отличие от распространения звука в свободном пространстве [18]. 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 харак-

теристики. Наиболее важными для практики задачами (см. рис. 4), вытекающими из проблемы приземного распространения звука, являются задачи прогнозирования распространения звука. Прежде всего это прогноз уровня сигнала или прогноз ослабления звука на определенной трассе распространения, на основе измеренных и прогнозируемых метеорологических параметров в приземном слое атмосферы.

Поскольку не существует единой теории приземного распространения звука, учитывающей совместное влияние перечисленных факторов, то основное внимание уделяется проведению натуральных экспериментальных исследований в контролируемых условиях распространения.

Созданный в настоящее время аппаратно-программный комплекс [41] позволяет осуществлять оперативный расчет и прогнозирование среднего поля звуковых давлений слышимого диапазона частот в приземном слое атмосферы на дальностях до 10 км с учетом метеорологических параметров атмосферы, характеристик трассы распространения и подстилающей поверхности. После завершения прогнозирования производятся расчет распределения звукового давления по площади в направлении звукового вещания и построение диаграмм зон слышимости источника, а также вычисление и построение зон рекомендуемого размещения звукового источника относительно пункта приема.

При мониторинге шумов аппаратно-программный комплекс также позволяет:

- оперативно оценивать слышимость источников шума;
- рассчитывать шумовое загрязнение атмосферы проектируемым образцом техники;
- рассчитывать санитарно-защитные зоны промышленных объектов по создаваемому шуму в атмосфере;
- производить построение карты распределения шума в населенных пунктах при ограниченном количестве его источников;
- определять амплитудно-частотную характеристику источника шума, учитывающую влияние атмосферного канала распространения шума.

Эксплуатация аппаратно-программного комплекса прогноза уровня акустических шумов требует наличия компьютера класса IBM, метеорологического комплекса на основе ультразвуковой метеостанции для проведения локального акустического мониторинга приземного слоя атмосферы и соответствующего программного обеспечения. Рабочая версия программного комплекса реализована в среде визуального программирования Delphi 3.0 для операционной системы MS Windows.

## **2.3. Технология акустического мониторинга пограничного слоя атмосферы**

Наблюдаемые глобальные изменения окружающей среды и климата обусловлены природными и антропогенными факторами, играющими разнообразную роль

в различных регионах планеты. Для их изучения необходимо проводить долговременные непрерывные исследования атмосферы (мониторинг атмосферы) с привлечением новых разработанных лазерных и акустических технических средств и технологий. При этом исследования пространственно-временной структуры и динамики метеорологических полей, а также аэрозольных и газовых компонентов воздуха на протяжении длительного периода занимают центральное место при изучении климатообразующих факторов.

Мониторинг пограничного слоя атмосферы наиболее актуален, так как этот слой характеризуется наибольшей изменчивостью. Даже на ограниченных участках земной поверхности для детального исследования атмосферы необходимо знание большого количества параметров, таких как температура, влажность, скорость и направление ветра, характеристик турбулентности, распределения облачных и аэрозольных полей, радиационного баланса и др. В Институте на территории Геофизического стационара проводятся такие исследования с использованием перечисленных выше измерителей нового типа [42–49]. Помимо стандартных метеорологических параметров, измеряемых типовой метеорологической станцией, а также ультразвуковым метеокомплексом, с 2000 г. определяются в режиме организованного мониторинга приземного слоя атмосферы такие параметры турбулентности, как полная энергия турбулентных движений, потоки импульса, тепла, масштабы ветра, температуры, параметры Монина–Обухова и другие, а также их статистические характеристики. В пограничном слое исследования проводятся с помощью акустического локатора. Оценивается поведение измеренных параметров в зависимости от общего состояния атмосферы.

Помимо непосредственно мониторинга атмосферы результатом проведенной работы стала прежде всего отработка алгоритмов обработки метеорологических параметров и методов вычисления турбулентных характеристик [48, 49]. Подтверждением этого являются хорошая корреляция между параметрами, измеренными ультразвуковым метеорологическим комплексом, а также приемлемое сходство классов устойчивости атмосферы, определенных по разным методикам.

Сделана попытка проведения измерений и анализа пространственно-временной структуры метеополей в нижней атмосфере на ограниченной территории [42, 43]. Проведены комплексные исследования структуры и динамики атмосферного пограничного слоя на ограниченной территории Академгородка в трех измерительных пунктах с использованием стандартных метеорологических средств измерения, акустического локатора и ультразвуковой метеорологической станции, измеряющей ряд метеорологических и турбулентных характеристик атмосферы, а также некоторых других средств. Контролировалась также синоптическая ситуация. Определялись классы устойчивости атмосферы и высота слоя перемешивания. Показано, что в условиях городской застройки (на окраине города) даже при относительно небольших рас-

стояниях между измерительными пунктами (до 700 м) наблюдаются существенные различия в значениях метеорологических параметров в приземном слое атмосферы, в том числе по стандартным метеорологическим измерениям. Использование акустического локатора и ультразвуковой метеорологической станции в данном случае позволяет фиксировать более тонкую пространственно-временную структуру метеорологических полей в атмосферном пограничном слое и ее динамику, дополняя стандартные метеорологические измерения.

В связи с проблемами загрязнения атмосферы промышленных центров акустические локаторы эффективны в системах контроля воздушного бассейна, поскольку дают оперативную информацию о метеорологическом состоянии пограничного слоя атмосферы и динамике его развития. Работы, проводимые в критических с экологической точки зрения регионах страны, позволили получить некоторый исходный материал для оценки экологического состояния городской атмосферы в этих районах. Часть работ проводилась с совместным использованием содара, аэрозольного и КР-лидаров, трассового и локальных газоанализаторов, наземных метеорологических станций, в том числе ультразвуковых. На рис. 6 показан

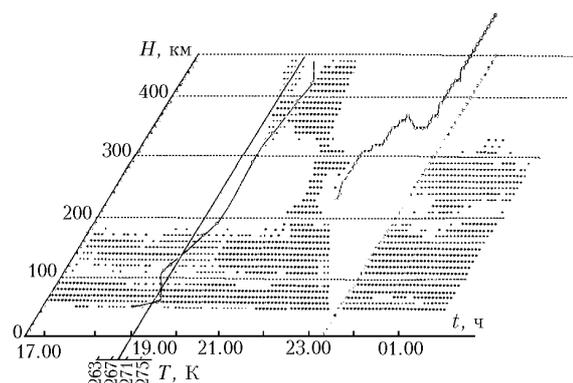


Рис. 6. Результаты лазерно-акустического зондирования АПС. Цифровая факсимильная запись сигнала акустического локатора и профили температуры (слева) и коэффициента обратного аэрозольного рассеяния

один из примеров [18] совместного лазерно-акустического вертикального зондирования атмосферы. На цифровую двухтональную запись сигнала акустического локатора (в изометрии для удобства наложения других сигналов) наложены профиль температуры, полученный КР-лидаром, и нормированный на максимум профиль коэффициента обратного аэрозольного рассеяния, зарегистрированный лидаром ЛОЗА-3. Почернение (звездочки) на факсимильной записи сигнала акустического локатора показывает на повышенную турбулентность в слое температурной инверсии. Белый фон (отсутствие сигнала в начале трассы) соответствует «мертвой зоне» локатора. На рис. 6 видны наличие приземной температурной инверсии (в начале двухслойной) до высоты 180–200 м и, кроме того, начиная с 19 ч довольно быстро опускающийся слой приподнятой инверсии температуры, который

после некоторых осцилляций по высоте к 21 ч почти вплотную сближается со слоем приземной температурной инверсии. Результаты эксперимента показывают хорошее совпадение данных лидаров и содара по исследованию вертикальной структуры АПС.

В результате долговременных исследований показано, что характеристики температурной стратификации в различных регионах отличаются друг от друга и существенно зависят от местных особенностей, что приводит к отличию метеорологических условий для накопления загрязняющих примесей. На рис. 7

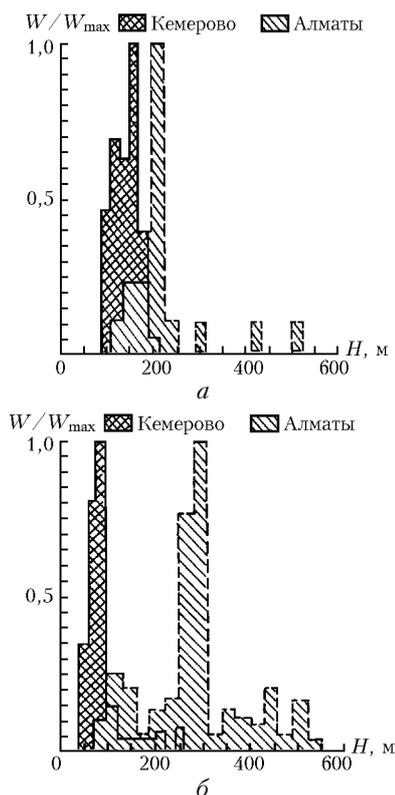


Рис. 7. Нормированные гистограммы распределений верхней границы приземной инверсии температуры (а) и нижней границы приподнятой инверсии (б) для гг. Кемерово и Алматы

показан один из таких примеров [18] по распределению высот температурных инверсий в гг. Кемерово и Алматы, на основе данных акустического зондирования. Термическая структура АПС, наблюдаемая в г. Кемерово, существенно отличается по характеру от наблюдаемой в г. Алматы, в частности нет многослойных приподнятых инверсий. Для приподнятых инверсий характерны более низкие границы, большая их нестабильность. Приземные же инверсии отличаются более частым появлением и весьма высокой стабильностью границ. Для г. Алматы характерна более сложная термическая структура АПС с многослойными приподнятыми температурными инверсиями, мало изменяющимися в течение суток. Очевидно, это объясняется особенностями орографии местности.

Исследования АПС с использованием лазерно-акустических средств дистанционного зондирования показали их эффективность для контроля загрязне-

ний воздушного бассейна города. Экспериментальные работы по одновременному зондированию пограничного слоя атмосферы при помощи акустических локаторов и аэрозольных лидаров 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) [46, 47]. Дальнейшие исследования направлены на выявление корреляции между параметрами стратификации атмосферы и концентрацией некоторых газов, в частности озона и углекислого газа.

## Заключение

Рассмотренные в статье технические средства, технологии и некоторые результаты лазерного и акустического зондирования окружающей среды подводят итоги 30-летнего развития работ по этому направлению. Созданные в ИОМ СО РАН технические средства, устройства и комплексы [2] расширили в значительной степени приборную базу ИОА СО РАН и способствовали развитию в нем фундаментальных научных исследований в области атмосферной оптики.

Следующие перед Институтом задачи напрямую связаны с мониторингом окружающей среды и в первую очередь с атмосферой и требуют создания новых методов, технических средств и технологий дистанционного зондирования и внедрения их в практику экспериментальных исследований.

Значительная роль отводится акустическим технологиям, которые позволяют осуществить заметный прорыв в мониторинге приземного и пограничного слоев атмосферы, а также в прогнозе распространения звука в атмосфере, обеспечивая комплексность проводимых исследований. Уровень и значимость научных исследований и технических разработок в этом направлении подтверждаются государственными заказами на проведение НИОКР.

Методы, техника и технологии одновременного лазерного и акустического зондирования земной атмосферы являются не только мощным инструментом для решения научных задач, но и важным разделом образовательного процесса. В рамках интеграции с томскими университетами в ИОМ СО РАН созданы филиалы кафедр и «Центр атмосферных технологий» для проведения научных исследований в области разработки и использования новых технологий мониторинга атмосферы и предоставления современных образовательных услуг.

1. *Абрамочкин А.И., Балин Ю.С., Ваулин П.П., Кутелев А.Ф., Самохвалов И.В., Тихомиров А.А.* Лазерный локатор для определения прозрачности атмосферы // Измерительные приборы для исследования параметров приземных слоев атмосферы. Томск: ИОА СО АН СССР, 1977. С. 5–16.

2. *Кабанов М.В., Тихомиров А.А.* Конструкторско-технологическое обеспечение фундаментальных исследований по атмосферной оптике: итоги деятельности КТИ «Оптика» за 25 лет // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10. № 4–5. С. 382–402.
3. *Балин Ю.С., Тихомиров А.А.* Аэрозольные мобильные лидары серии «ЛОЗА» // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений. Томск: Изд-во СО РАН, 1997. С. 16–34.
4. *Тихомиров А.А., Шаманаев В.С.* Самолетные поляризационные лидары // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений. Томск: Изд-во СО РАН, 1997. С. 58–78.
5. *Балин Ю.С., Знаменский И.В., Зуев В.Е., Мельников В.Е., Тихомиров А.А., Самойлова С.В.* Российский космический лидар «БАЛКАН-1» // Оптика атмосфер. и океана. 1995. Т. 8. № 9. С. 1332–1343.
6. *Солдаткин Н.П., Тихомиров А.А.* Приборное обеспечение климато-экологического мониторинга // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 1. С. 44–50.
7. *Абрамочкин А.И., Тихомиров А.А.* К расчету оптимальных параметров лазерного лоатора (лидара) для зондирования атмосферы // Проблемы дистанционного зондирования атмосферы. Томск: ИОА СО АН СССР, 1976. С. 21–32.
8. *Тихомиров А.А.* Полевые диафрагмы для сужения динамического диапазона лидарных сигналов // Измерение оптико-метеорологических параметров атмосферы с использованием лазерного излучения. Томск: ИОА СО АН СССР, 1980. С. 106–114.
9. *Абрамочкин А.И., Тихомиров А.А.* Методы сокращения динамического диапазона лидарных сигналов (обзор) // Аппаратура и методики дистанционного зондирования параметров атмосферы. Новосибирск: Наука, 1980. С. 19–29.
10. *Абрамочкин А.И., Нолле П.М., Тихомиров А.А.* Некоторые результаты использования регулируемого ФЭУ в приемнике лидара // Аппаратура и методики дистанционного зондирования параметров атмосферы. Новосибирск: Наука, 1980. С. 35–40.
11. *Тихомиров А.А.* Классификация и оценочные критерии аппаратных методов сжатия динамического диапазона лидарных сигналов // Прогноз и контроль оптико-метеорологического состояния атмосферы. Томск: ИОА СО АН СССР, 1982. С. 47–53.
12. *Абрамочкин А.И., Тихомиров А.А.* Оптимизация приемной системы лидара. К оценке эффективности приемных объективов различного типа // Оптика атмосфер. и океана. 1998. Т. 11. № 8. С. 899–908.
13. *Абрамочкин А.И., Тихомиров А.А.* Оптимизация приемной системы лидара. 2. Пространственные фильтры // Оптика атмосфер. и океана. 1999. Т. 12. № 4. С. 345–356.
14. *Абрамочкин А.И., Кауль Б.В., Тихомиров А.А.* Оптимизация приемной системы лидара. 3. Анализаторы состояния поляризации // Оптика атмосфер. и океана. 1999. Т. 12. № 7. С. 643–652.
15. *Тихомиров А.А.* Анализ методов и технических средств сжатия динамического диапазона лидарных сигналов // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13. № 2. С. 208–219.
16. *Безопасность России.* Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Экологическая диагностика: Энциклопедия / Под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2000. 496 с.
17. *Красненко Н.П.* Развитие атмосферных акустических исследований в ИОА СО РАН // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10. № 4–5. С. 542–552.
18. *Красненко Н.П.* Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. Томск, 2001. 278 с.
19. *Годлевский А.П., Иванов Ю.В., Копытин Ю.Д., Корольков В.А., Солдаткин Н.П.* Аэрозольный спектроскопический лидар на основе импульсного CO<sub>2</sub>-лазера: Тезисы докл. // VIII Всесоюзный симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Ч. 2. Томск: ТФ СО АН СССР, 1984. С. 360–363.
20. *Бураков С.Д., Годлевский А.П., Останин С.А.* Определение микрофизических параметров аэрозоля автодинным приемопередатчиком на основе твердотельного лазера // Оптика атмосфер. 1989. Т. 2. № 2. С. 206–210.
21. *Burakov S.D., Godlevskii A.P., Ostanin S.A., Soldatkin N.P.* Coherent laser radar for determination of profiles of remote objects: Abstracts of papers. P. II // 15<sup>th</sup> International Laser radar conference. Tomsk, 1990. P. 249–250.
22. *Панченко М.В., Белан Б.Д., Шаманаев В.С.* Роль самолета-лаборатории ИОА СО РАН в изучении окружающей среды оз. Байкал // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10. № 4–5. С. 463–472.
23. *Балин Ю.С., Тихомиров А.А., Самойлова С.В.* Предварительные результаты измерений параметров облаков и подстилающей поверхности лидаром «БАЛКАН» // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10. № 3. С. 333–352.
24. *Балин Ю.С., Тихомиров А.А.* Лазерное зондирование Земли из космоса. II. Методологические основы лидарных измерений с борта орбитальной станции // Космічна наука і технологія. 1997. Т. 3. № 1/2. С. 26–33.
25. *Тихомиров А.А.* Результаты дальнометрирования океанической поверхности космическим лидаром «БАЛКАН» // Космічна наука і технологія. 1999. Т. 5. № 2/3. С. 22–30.
26. *Межерис Р.* Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
27. *Береснев В.А., Гончаров А.Н., Номикос О.Н., Тихомиров А.А.* Программируемый генератор оптического сигнала // Приборы и техн. эксперим. 1985. № 5. С. 249.
28. *Шаманаев В.С., Абрамочкин А.И.* Самолетный поляризационный лазерный лоатор «Светозар-3». Устройство и применение. Препр. / ИОА СО АН СССР (Томск). 1984. № 15. 47 с.
29. *Балин Ю.С., Знаменский И.В., Мельников В.Е., Тихомиров А.А.* Комплекс наземной контрольно-поверочной аппаратуры для российского космического лидара «БАЛКАН-1» // Оптика атмосфер. и океана. 1996. Т. 9. № 3. С. 359–366.
30. *Тихомиров А.А., Береснев А.В., Абрамочкин А.И.* Сканер на основе вращающихся оптических клиньев и его возможности для самолетного лидара // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13. № 4. С. 407–414.
31. *Абрамочкин А.И., Азбукин А.А., Разенков И.А., Тихомиров А.А.* Лидар для дистанционного контроля аэрозольных загрязнений над г. Томском: Тезисы докл. // Междунар. симпоз. «Контроль и реабилитация окружающей среды». Томск: СО РАН, 1998. С. 46.
32. *Красненко Н.П.* Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1986. 167 с.
33. *Кабанов М.В., Красненко Н.П.* Атмосферные акустические технологии и их применение: Материалы научно-технического семинара // Научно-технические технологии двойного назначения и механизмы их реализации на предприятиях ВПК. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1999. С. 53–54.
34. *Красненко Н.П.* Атмосферные акустические технологии для аварийно-спасательных работ: Материалы Всероссийской науч.-техн. конф. // Проблемы прогнозирова-

- ния, предотвращения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. Уфа, 2000. С. 219–220.
35. *Красненко Н.П.* Акустическое дистанционное зондирование тропосферы // Докл. Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Томск: ТУСУР, 2000. Т. 5. С. 35–37.
  36. *Иванов В. Ю., Красненко Н.П.* Исследование высокочастотных акустических зеркально-параболических антенн // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т.13. № 11. С. 1044–1048.
  37. *Мананко Е.Е., Гареев П.В.* Антенные системы высокочастотных акустических локаторов: Тезисы докл. // Радиотехнические устройства, информационные технологии и системы управления. Томск, май, 2001. Томск: ТУСУР, 2001. С. 10–12.
  38. *Root A.G., Perkalskis B.Sh., Larin V.L., Mikhaylichenko Y.P., Sotiriadi G.N.* Acoustic antennas for atmospheric studies: Proc. // 10<sup>th</sup> Int. symp. on acoustic remote sensing of the atmosphere and oceans and associated techniques. ISARS2000. The University of Auckland. New Zealand, November, 2000. New Zealand: The University of Auckland, 2000. P. 362–364.
  39. *Ivanov V.Yu., Krasnenko N.P., Stafeev P.G.* Minisodar for atmospheric investigations // Proc. SPIE. 2000. V. 4341. P. 339–342.
  40. *Иванов В.Ю., Красненко Н.П., Мананко Е.Е.* Высокочастотные акустические локаторы для исследования приземного слоя атмосферы // Сб. трудов XI сессии Российского акустического общества. Т. 1. М.: ГЕОС, 2001. С. 266–268.
  41. *Иванова А.Ю., Красненко Н.П., Стафеев П.Г.* Аппаратно-программный комплекс для прогноза уровня акустических шумов // Сб. трудов XI сессии Российского акустического общества. Т. 4. М.: НИИСФ РААСН, 2001. С. 175–178.
  42. *Krasnenko N.P., Stafeev P.G.* Study of variability of meteorological state of the lower atmosphere // Proc. SPIE. 1999. V. 3983. P. 505–514.
  43. *Krasnenko N.P., Stafeev P.G.* Integrated study of the spatiotemporal variability of the lower atmosphere: Proc. // 10<sup>th</sup> International Symp. on Acoustic Remote Sensing of the Atmosphere and Oceans and Associated Techniques. ISARS2000. The University of Auckland, New Zealand, November, 2000. New Zealand: The University of Auckland, 2000. P. 150–154.
  44. *Krasnenko N.P., Stafeev P.G.* Ultrasonic measurement of meteorological and atmospheric turbulence parameters: Proc. // 10<sup>th</sup> International Symp. on Acoustic Remote Sensing of the Atmosphere and Oceans and Associated Techniques. ISARS2000. The University of Auckland, New Zealand, November, 2000. New Zealand: The University of Auckland, 2000. P. 342–344.
  45. *Krasnenko N.P.* Study of the Structure and Dynamics of the Meteorological State of the Atmospheric Boundary Layer: Extended Abstracts // Fifth International Symposium on Tropospheric Profiling: Needs and Technology. Adelaide, Australia, November, 2000. Adelaide, Australia: University of Adelaide. 2000. P. 335–337.
  46. *Красненко Н.П.* О взаимосвязи характеристик стратификации АПС с распределением аэрозоля: Тезисы докл. // Международная конф. «Физика атмосферного аэрозоля». Москва, апрель, 1999. М.: «Диалог МГУ», 1999. С. 185–186.
  47. *Krasnenko N.P.* Correlation of aerosol and gas concentration with characteristics of atmospheric stratification based on lidar-acoustic sensing results: Extended Abstracts // Fifth International Symposium on Tropospheric Profiling: Needs and Technology. Adelaide, Australia, November, 2000. Adelaide, Australia: University of Adelaide. 2000. P. 225–227.
  48. *Бухлова Г.В., Красненко Н.П., Стафеев П.Г.* Мониторинг турбулентности приземного слоя атмосферы // Сб. трудов XI сессии Российского акустического общества. Т. 1. М.: ГЕОС, 2001. С. 268–271.
  49. *Buhlova G.V., Krasnenko N.P., Stafeev P.G.* Monitoring of turbulence in the near-ground layer of the atmosphere // Proc. SPIE. 2001. V. 4678. P. 300–307.

*N.P. Krasnenko and A.A. Tikhomirov. Instrumentation and technologies for remote sensing of the atmosphere and underlying surface.*

The paper sums up the results of investigations and basic works carried out at the Institute of Optical Monitoring, SB RAS, over the 30-year period. These investigations were aimed at development of instruments and technologies for laser and acoustic sensing of the environment that might have promises from the viewpoint of remoteness and efficiency when determining profiles of both aerosol pollution and meteorological quantities, as well as monitoring spatiotemporal variations of their fields. The ground-based, airborne, and space lidars created at the Institute and intended for sensing the atmosphere and underlying surface are described. The design and application technologies are described as well. The investigation in acoustic sensing of the atmospheric boundary layer and achievements in creation of new instruments and sensing techniques are presented. The results of application of these instruments and acoustic sensing techniques to monitoring the atmospheric boundary layer and sound propagation inside this layer are presented.