

Г.Н. Глазов, В.М. Дубягин

ЛИДАРНОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ АТМОСФЕРНО-ОПТИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

В ряде приложений лидарных данных необходимо не только измерять атмосферные параметры, но и обнаруживать атмосферно-оптические «события». Дается простая классификация и приводятся примеры таких «событий». Описывается математическая формализация задачи лидарного обнаружения как оптимального испытания статистических гипотез с целью синтеза оптимальных алгоритмов обработки лидарных сигналов в реальных условиях зондирования. Излагается три варианта реализации этой программы в задаче контроля за загрязнением атмосферы: обнаружение временных экстремумов температуры по вращательному СКР N_2 и O_2 ; обнаружение аэрозольных слоев по упругому рассеянию; обнаружение аномальной концентрации газа по колебательному СКР газа. Приводятся потенциальные характеристики конкретных обнаружителей опасных концентраций CO вблизи автомобильных трасс.

Введение. В ряде приложений лидарных данных необходимо не только измерять атмосферные параметры, но и обнаруживать атмосферно-оптические «события». Последние могут быть названы структурными, если объект обнаружения — пространственный, временной или другой функционал поля атмосферного параметра, и неструктурными, если объект обнаружения — само значение поля; локальными — если «события» относятся к одному пространственно-временному объему, и составными — если к нескольким объемам. Примеры атмосферных параметров: температура, плотность, давление воздуха, концентрация аэрозолей, отдельных газов, скорость ветра, аэрозольные коэффициенты рассеяния и др. Примеры «событий»: необычное значение атмосферного параметра, его пространственной или временной производной, превышение им некоторого значения или попадание в некоторый интервал значений, слой или антислой параметра, инверсия профиля, аномальная вариабельность, принадлежность к определенной или нестандартной генеральной совокупности и т.д., комбинации перечисленных и более сложные состояния полей. Типичные приложения лидарной функции обнаружения — контроль газовых и аэрозольных загрязнений. Создание лидарных обнаружителей предполагает синтез оптимальных алгоритмов обработки лидарных сигналов методами оптимального испытания гипотез и исследование эффективности обнаружения «событий» в реальных условиях зондирования.

Постановка задачи.

В общем случае полный набор попарно несовместных «событий» связан с q объектами обнаружения, m рассеивающими объемами, M временными интервалами, нумеруемыми соответственно индексами r , l , μ , и образуется системой равенств и неравенств в пространствах $\Omega^{(a)}$, $\Omega^{(w)}$, значений информационных $\Theta = \{\theta_{r\mu}\} (\gamma = 1, V_r^{(a)})$ и мешающих $\Psi = \{\psi_{r\mu}\} (\tau = 0, V_r^{(w)})$ факторов, задаваемых функционалами от информационных $\{F_{pr}\} (p = 1, V_r^{(F)})$ и мешающих $\{I_{sr}\} (s = 0, V_r^{(I)})$ атмосферных параметров. Например, в задаче контроля смогов над промышленными районами «события» могут соответствовать наличию или отсутствию пространственных инверсий и временных экстремумов температуры и плотности атмосферы ($q = 4$) на m различных высотах и в M различных интервалах суток. Здесь каждый из q объектов может характеризоваться определенными функционалами от температуры и плотности. Гипотезы H_κ ($\kappa = 0, L-1$) о выполнении «событий» могут быть простыми (если они точечные в $\Omega^{(a)}$ и мешающие факторы отсутствуют) или сложными (в остальных случаях). Решения принимаются на основе выборки, полученной Q -канальной приемной системой (со спектральным, угловым, поляризационным или временным разнесением) в сеансе из N актов зондирования. В токовом режиме выборка \mathbf{J} составлена отсчетами $J_{v\xi\omega}$ тока, в счетнофотонном — \mathbf{n} — числами отсчетов $n_{v\xi\omega}$ в строках ($v = 1, N$, $\xi = 1, Q$, $\omega = 1, \chi$, χ — число отсчетов тока или стробов).

Математически задача обнаружения состоит в следующем. Пусть имеются набор гипотез H_κ , матрица потерь $\mathbf{\Pi} = \{\Pi_{\kappa j}\}$, матрицы информационных: $\mathbf{F} = \{F_{prv\omega}\}$ и мешающих $\mathbf{I} = \{I_{srv\omega}\}$ параметров, априорные распределения гипотез $P(H_\kappa)$ и выборок $P(\mathbf{J} | \mathbf{F}, \mathbf{I}, H_\kappa)$ (или $P(\mathbf{n} | \mathbf{F}, \mathbf{I}, H_\kappa)$). Требуется найти наилучшее в смысле принятого критерия качества $f(\mathbf{\Pi})$ решающее правило $\delta(H_\kappa | \mathbf{J})$ (или $\delta(H_\kappa | \mathbf{n})$), т.е. алгоритм выбора гипотезы при данном наблюдении \mathbf{J} (или \mathbf{n}), и рассчитать значения f в реальных условиях зондирования.

Разнообразие атмосферных параметров, приложений лидарных данных, используемых механизмов взаимодействия излучения с атмосферой и, следовательно, методов зондирования и классов «со-

бытий» порождает множество вариантов постановок задач обнаружения. В качестве примеров приведем 3 варианта применительно к счетно-фотонному режиму регистрации.

1. Обнаружение временных экстремумов температуры в заданных объемах рассеяния по вращательному СКР N_2 и O_2 . Кроме суточного хода температуры на заданной высоте возможны вариации, обусловленные конкретными особенностями формирования температурного поля нижней тропосферы в данном районе и в данный период времени. Как и температурные инверсии [1], периоды аномальной временной монотонности температуры тесно связаны с аэрозольными и газовыми загрязнениями в пограничном слое атмосферы. Для выделения этих периодов достаточно обнаруживать локальные временные экстремумы температуры на заданных высотах.

Разобьем время T сеанса зондирования на M интервалов $\{\Delta t_\mu\}$ $\mu = \overline{1, M}$, длиной ΔT каждый. За ΔT осуществляется N актов зондирования, нумеруемых индексом ν . На каждом из интервалов Δt_μ испытываются гипотезы: $H_{1\mu}$ — о наличии локального временного минимума, $H_{2\mu}$ — о наличии локального временного максимума, $H_{0\mu}$ — об их отсутствии („событие” составное, структурное, временное). Имеем: объект обнаружения — экстремум температуры ($q = 1$), F — температура воздуха ($V^{(F)} = 1$), $m = 1$, $M \geq 3$, $V^{(I)} = 3$, $I = \{I_1, I_2, I_3\}$, I_1 — плотность воздуха в рассеивающем объеме, I_2 — пропускание атмосферы до него и обратно, I_3 — уровень помех. Для удобства и простоты взят случай $\chi = 1$.

Обозначим через $F_{\nu\mu}$ температуру воздуха в рассеивающем объеме во время ν -го акта интервала Δt_μ . Информационный фактор можно представить в виде $\Theta = \{\theta_\mu^{(1)}\}$, либо в виде $\Theta = \{\theta_\mu^{(1)}, \theta_\mu^{(2)}\}$, где

$$\theta_\mu^{(1)} = \frac{1}{N} \sum_{\nu=1}^N \frac{dF_{\nu\mu}}{dt}, \quad \theta_\mu^{(2)} = \frac{1}{N} \sum_{\nu=1}^N \frac{d^2 F_{\nu\mu}}{dt^2}.$$

В первом случае решающее правило имеет вид

$$\begin{aligned} \text{„}H_{0\mu}\text{”}, & \text{ если } \begin{cases} -\kappa_1 \leq \theta_{\mu-1}^{(1)} \leq \kappa_1, \theta_{\mu+1}^{(1)} - \text{любое,} \\ -\kappa_1 \leq \theta_{\mu+1}^{(1)} \leq \kappa_1, \theta_{\mu-1}^{(1)} - \text{любое;} \end{cases} \\ \text{„}H_{1\mu}\text{”}, & \text{ если } \theta_{\mu-1}^{(1)} < -\kappa_1, \theta_{\mu+1}^{(1)} > \kappa_1; \\ \text{„}H_{2\mu}\text{”}, & \text{ если } \theta_{\mu-1}^{(1)} > \kappa_1, \theta_{\mu+1}^{(1)} < -\kappa_1; \end{aligned}$$

во втором случае —

$$\begin{aligned} \text{„}H_{0\mu}\text{”}, & \text{ если } \begin{cases} \kappa_1 \leq \theta_\mu^{(1)} \leq -\kappa_1, \theta_\mu^{(2)} - \text{любое,} \\ -\kappa_2 \leq \theta_\mu^{(2)} \leq \kappa_2, \theta_\mu^{(1)} - \text{любое;} \end{cases} \\ \text{„}H_{1\mu}\text{”}, & \text{ если } -\kappa_1 < \theta_\mu^{(1)} < \kappa_1, \theta_\mu^{(2)} > \kappa_2; \\ \text{„}H_{2\mu}\text{”}, & \text{ если } -\kappa_1 < \theta_\mu^{(1)} < \kappa_1, \theta_\mu^{(2)} < -\kappa_2; \end{aligned}$$

где κ_1, κ_2 — некоторые постоянные.

Пусть приемник имеет Q каналов со спектральным разнесением, настроенных на различные участки чисто вращательного спектра СКР N_2 и O_2 . Обозначим: $\Omega_\xi^{(n)}$ ($\xi = \overline{1, Q}$) — пространство выборок $\mathbf{n}_\xi = \{n_\nu\}$ и ξ -м канале; $\Omega^{(n)} = \Omega_1^{(n)} \times \dots \times \Omega_Q^{(n)}$; \mathbf{H}_κ — классификационное состояние рассеивающего объема на составном интервале T ($\kappa = \overline{0, E}$, $E = 3^M - 1$); Ω_κ — соответствующая \mathbf{H}_κ критериальная область пространства $\Omega^{(n)}$.

Рассмотрим возможности задания априорной информации. Имеем $I = \{I_1, I_2, I_3\}$, $I_i = \{I_{\nu\mu}\}_i$, $i = 1, 2, 3$; $\mathbf{F} = \{F_{\nu\mu}\}$. Условное распределение $\mathbf{P}(\mathbf{n} | \mathbf{F}, I, \mathbf{H}_\kappa)$ — многомерное пуассоновское, поскольку в силу малости сечений СКР параметры вырождения фотоэлектронных потоков в каналах малы [2] и, следовательно, маргинальные распределения — пуассоновские, с параметрами, связанными с I, \mathbf{F} соответствующими лидарными уравнениями [3]. Плотности вероятности $\mathbf{P}(\mathbf{F} | \mathbf{H}_\kappa)$ и $\mathbf{P}(I)$ могут быть заданы из стандартных модельных представлений [4], например, как многомерные гауссовские. Априорные вероятности состояний $\mathbf{P}(\mathbf{H}_\kappa)$ могут быть известны из предыдущих измерений. Если из разумных соображений задать и матрицу потерь $\mathbf{\Pi}$, то будем иметь, полный набор априорных сведений, что позволяет использовать наиболее глубокий байесовский критерий качества [5]. Тогда конкретизированное решающее правило δ сводится к оптимальному разбиению $\Omega^{(n)}$ на систему $\{\Omega_\kappa\}$ областей, удовлетворяющую системе E^2 неравенств

$$\sum_{i=0}^E (\Pi_{ij} - \Pi_{ix}) P(\mathbf{H}_i) W_i / P(\mathbf{H}_0) W_0 \geq 0, \quad \alpha = \overline{1, E}, \quad j = \overline{0, E}, \quad j \neq \alpha \quad (1)$$

и равенству

$$\Omega_0 = \Omega^{(n)} - \sum_{\alpha=1}^E \Omega_{\alpha}, \quad (2)$$

где

$$W_i = \int_{\Omega^{(I)}} \int_{\Omega^{(F)}} P(\mathbf{n} | \mathbf{F}, \mathbf{I}, \mathbf{H}_i) P(\mathbf{F} | \mathbf{H}_i) P(\mathbf{I}) d\mathbf{F} d\mathbf{I};$$

$\Omega^{(I)}$ — область значений \mathbf{I} , на которой определена $P(\mathbf{I})$; $\Omega_i^{(F)}$ — соответствующая \mathbf{H}_i критериальная область пространства значений \mathbf{F} , определяемая через приведенные выше условия, наложенные на Θ , путем их конечно-разностного представления.

2. Обнаружение аэрозольных слоев по упругому рассеянию. Ряд приложений нуждается не в полном описании пространственно-временного распределения концентрации аэрозоля, а лишь в обнаружении зон повышенной концентрации — горизонтальных слоев, как правило [6], связанных с температурными инверсиями.

Пусть за сеанс \mathbf{T} зондирования, соответствующий N актам, в каждом подынтервале $\Delta z_l (l = \overline{1, m})$ высотного интервала \mathbf{L} обнаруживается наличие слоя повышенной (H_{1l}), пониженной (H_{2l}) концентрации аэрозоля, или отсутствие (H_{0l}) слоя („событие” составное, структурное, пространственное). Имеем: $q = 1$, F — концентрация аэрозоля в определенном интервале спектра размеров ($V^{(F)} = 1$), $M = 1$, $m \geq 3$, $\chi = m$, $N \geq 1$, $V^{(I)} = 2$, $\mathbf{I} = \{I_1, I_2\}$, I_1 — калибровочный атмосферно-аппаратурный коэффициент лидарного уравнения, I_2 — уровень помех.

Обозначим через величину $F_{\nu l}$ в l -м подынтервале и ν -м акте зондирования ($\nu = \overline{1, N}$). Информационный фактор можно представить в виде

$$\theta_{l,a} = 1 - \frac{\sum_{\nu=1}^N F_{\nu, l+a}}{\sum_{\nu=1}^N F_{\nu, l}},$$

где $a = -1, +1$. Решающее правило имеет вид

$$\left. \begin{array}{l} \text{„}H_{0l}\text{”, если } \left\{ \begin{array}{l} -\kappa \leq \theta_{l,-1} \leq \kappa, \theta_{l,+1} \text{ — любое;} \\ -\kappa \leq \theta_{l,+1} \leq \kappa, \theta_{l,-1} \text{ — любое;} \end{array} \right\} \\ \text{„}H_{1l}\text{”, если } \theta_{l,-1} > \kappa, \theta_{l,+1} > \kappa; \\ \text{„}H_{2l}\text{”, если } \theta_{l,-1} < -\kappa, \theta_{l,+1} < -\kappa; \end{array} \right\} \quad (3)$$

где κ — постоянная.

Используем три разнесенных по времени приемных канала ($Q = 3$). Первый (информационный) канал соответствует приему эхо-сигналов с высот \mathbf{L} , второй (калибровочный) — с высоты калибровки [7], третий (помеховый) — приему в паузах между эхо-сигналами. Этого достаточно для оценивания «мешающих» параметров I_1, I_2 .

Маргинальные составляющие многомерного условного распределения $P(\mathbf{n} | \mathbf{F}, \mathbf{I}, \mathbf{H}_{\kappa})$, соответствующие первому и второму каналам, — пуассоновские или отрицательно-биномиальные распределения в зависимости от соотношения между средними числами отсчетов и числом пространственно-временных фазовых ячеек [2], а соответствующие третьему каналу, — пуассоновские распределения. Плотности вероятности $P(\mathbf{F} | \mathbf{H}_{\kappa})$ могут быть заданы из модельных представлений, вероятности $P(\mathbf{H}_{\kappa})$ ($\kappa = \overline{0, E}, E = 3^m - 1$) — из предыдущих измерений. Оценку $\hat{\mathbf{I}}$ для $\mathbf{I} = \{I_1, I_2\}$ ($I_i = \{I_{\nu i}\}$) построим методом максимума правдоподобия. Если из разумных соображений задать и матрицу потерь $\mathbf{\Pi}$, то опять имеем полный набор априорных сведений и можем использовать байесовский критерий качества. Тогда конкретизированное решающее правило δ задается разбиением пространства $\Omega^{(n)}$ составной выборки $\mathbf{n} = \{n_{\nu \xi i}\}$ ($\nu = \overline{1, N}, \xi = \overline{1, 3}, i = \overline{1, m}$) на систему $\{\Omega_{\kappa}\}$ областей, удовлетворяющую системе E^2 неравенств вида (1) и равенству вида (2), где

$$W_i = \int_{\Omega_i^{(F)}} P(\mathbf{n} | \mathbf{F}, \hat{I}, \mathbf{H}_i) P(\mathbf{F} | \mathbf{H}_i) d\mathbf{F},$$

$\Omega_i^{(F)}$ — соответствующая \mathbf{H}_i критериальная область пространства значений \mathbf{F} , определяемая неравенствами (3).

3. Обнаружение аномальной концентрации газа по его колебательному СКР. Пусть концентрация газа в зондируемом объеме постоянна в сеансе \mathbf{T} зондирования и равна или стандартному значению $F_{ст}$, или типичному нестандартному $F_{нест}$, реализующемуся в результате загрязнения атмосферы каким-либо объектом. Имеем $m = 1, M = 1, \chi = 1, N \geq 1, q = 1, V^{(F)} = 1, V^{(I)} = 2, I = \{I_1, I_2\}$, I_1 — аппаратурно-атмосферный коэффициент в лидарном уравнении, I_2 — уровень помех. Приемник имеет два частотно-разнесенных канала (один настроен на Q -линию СКР газа, другой — на Q -линию азота), в каждом из которых прием ведется в стробе, соответствующем дальности до рассеивающего объема, и в стробе, расположенном в паузе между эхо-сигналами ($Q = 4$). Этого достаточно [8] для оценки I_1, I_2 в каждом акте зондирования.

Т а б л и ц а

Параметр	СКР-лидар		
	„З”	„И”	„З ₁ ”
Длина волны, нм	248,5	308	248,5
Средняя мощность, Вт	10	10	5
Площадь приемной апертуры, м ²	0,185	0,75	0,07
Произведение пропускания оптики, фильтров, квантовой эффективности ФЭУ	0,05	0,1	0,05

По выборке $\mathbf{n} = \{n_{\xi v}\}$ ($\xi = \overline{1, Q}, v = \overline{1, N}$) нужно решить, какая из двух гипотез — $H_0: F = F_{ст}$ или $H_1: F = F_{нест}$ — верна (событие неструктурное, локальное). Маргинальные условные распределения \mathbf{n} — пуассоновские по тем же причинам, что в варианте 1. Будем считать, что априорные вероятности $P(H_0), P(H_1)$ неизвестны. В этих условиях неполной априорной определенности применим адаптивный неймано-пирсоновский критерий [5], согласно которому оптимальное решающее правило: выполняется “ H_0 ”, если $n \leq c_n$ и “ H_1 ”, если $n > c_n$. Здесь решающая статистика n и порог c_n при использовании асимптотической гауссовости n , имеют вид

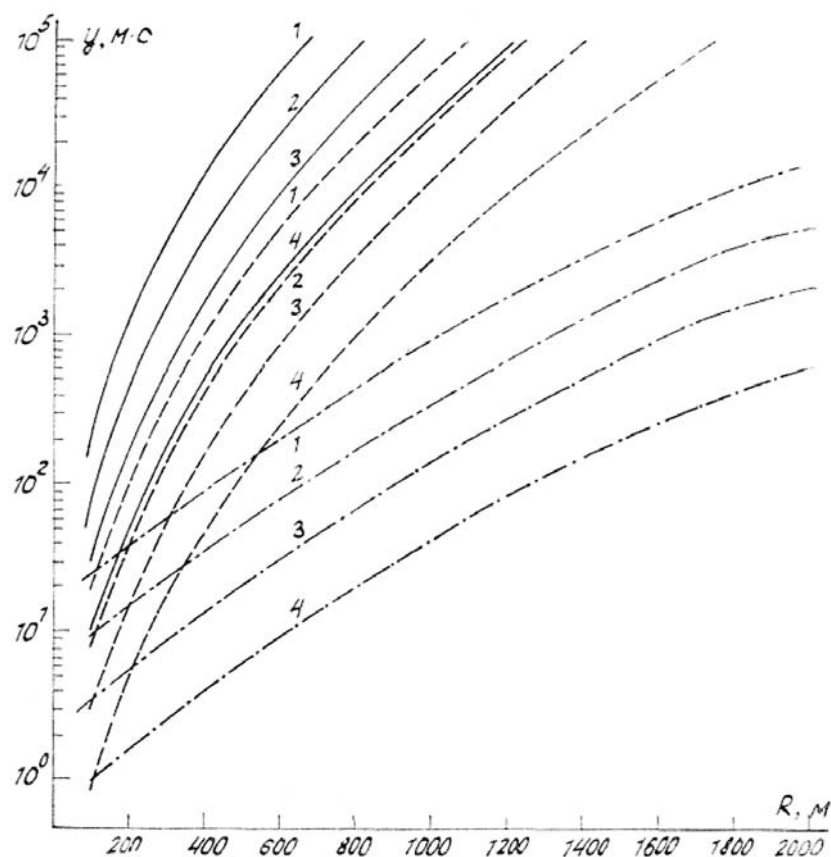
$$n = \sum_{v=1}^N n_{1v} \in \Omega^{(n)}, c_n = \Phi^{-1}(1 - \alpha) \sqrt{\hat{n}_0 + \hat{n}_0},$$

где $\hat{n}_0 = N(\hat{I}_1 F_{ст} + \hat{I}_2)$; \hat{I}_1 и \hat{I}_2 — оценки максимума правдоподобия для I_1 и I_2 [8], α — задаваемая вероятность „ложной тревоги”, Φ^{-1} — обратная функция интеграла вероятности. При этом эффективность характеризуется вероятностью обнаружения загрязнения $P_{обн} = 1 - \Phi[(c_n - \hat{n}_1)(\hat{n}_1)^{-1/2}]$,

где

$$\hat{n}_1 = N(\hat{I}_1 F_{нест} + \hat{I}_2).$$

Проиллюстрируем потенциальные возможности трех СКР-лидаров [2] на эксимерных лазерах (таблица) — стационарного «И», мобильного «З», компактного и мобильного «З₁» — для контроля загрязнения атмосферы вблизи автомобильных трасс окисью углерода СО. Возьмем в качестве $F_{ст}$ среднесуточную ПДК для СО в населенных пунктах ($1 \text{ мг/м}^3; 2,15 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}; 0,844 \text{ млн}^{-1}$), $\alpha = 10^{-3}, P_{обн} = 0,99$, и воспользуемся моделью атмосферы [9] при МДВ = 13 км. На рисунке приведена величина $y_{min} = Lt$, обратная величине максимального пространственно-временного разрешения (L — длина строба, t — время сеанса зондирования), в зависимости от дальности зондирования R для случая пренебрежимо малых фоновых помех. Как видим, удовлетворительное обнаружение опасных (10 млн^{-1}) для человека концентраций СО возможно, например, с дальности в $R = 500 \text{ м}$ с $L = 40 \text{ м}$ лидарами «И», «З», «З₁» за $t = 1, 4, 25, 265 \text{ с}$ соответственно. С уменьшением R выигрыш в y_{min} у стационарного лидара «И» перед мобильным лидаром «З» уменьшается и, например, при $F_{нест} = 10 \text{ млн}^{-1}$ на дальности $R < 113 \text{ м}$ лидар «З» имеет лучшие потенциальные возможности, чем лидар «И», обеспечивая $y_{min} < 10 \text{ м} \cdot \text{с}$.



Зависимость y_{\min} от R , при обнаружении лидарами «И» (— · — · —), «З» (— — —), «З₁» (—) аномальной концентрации CO с $F_{\text{нест}} = 5$ (кривые 1), 10 (кривые 2), 20 (кривые 3), 50 млн⁻¹ (кривые 4)

Заключение. Таким образом, дана простая классификация атмосферно-оптических «событий» и описана математическая формализация задачи лидарного обнаружения как оптимального испытания статистических гипотез с целью синтеза оптимальных алгоритмов обработки лидарных сигналов в реальных условиях зондирования. Постановка задачи конкретизирована в трех вариантах из области контроля за загрязнением атмосферы.

1. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. Новосибирск: Наука. 1986. 190 с.
2. Глазов Г.Н. Статистические вопросы лидарного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука. 1987. 312 с.
3. Аршинов Ю.Ф., Бобровников С.М., Зуев В.Е., Митев В.М. Спектроскопические методы зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука. 1985. С. 95–107.
4. Кавкьянов С.И., Креков Г.М. //Тезисы докл. II Совещания по атмосферной оптике. Томск. 1980. Ч. 2. С. 24–27.
5. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 2. М.: Сов. радио. 1968. 504 с.
6. Mc Elroy J.L., Smith T.B. //Atmospheric Environment. 1986. V. 20. № 8. P. 1555.
7. Маричев В.Н., Ельников А.В. //Труды IX Всес. симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск. 1987. Ч. 1. С. 154–160.
8. Дубягин В.М. Оптико-метеорологические исследования земной атмосферы. Новосибирск: Наука. 1987. С. 145–150.
9. Elterman L. Vertical-Absorption Model With Eight Surface Meteorological Ranges 2 to 13 Kilometers. Report AFCRL-70-0200//Environm. Res. Papers. — 1970. — № 318. — 59 p.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
23 мая 1988 г.

G. N. Glazov, V. M. Dubyagin. Lidar Detection of Atmospheric-Optical Events.

A simple classification and examples of atmospheric-optical events are given. The problem of lidar detection of the events is formalized mathematically as an optimum test of statistical hypotheses. Lidar signal processing algorithms are synthesized within the framework of monitoring atmospheric pollutions. Three versions of such a procedure are discussed: detection of temporal temperature extrema using rotational spontaneous Raman scattering of N₂ and O₂; identification of aerosol layers using elastic scattering; indication of an anomalous gas concentration using vibrational spontaneous Raman scattering for the gas of interest. Potential characteristics of lidar sensors intended for indicating unsafe CO concentrations in the air near busy highways are considered.