

**В.В. Зуев, М.Ю. Катаев, М.М. Макогон, А.А. Мицель**

## **ЛИДАРНЫЙ МЕТОД ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ (ДП) СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Обобщаются результаты исследований ДП метода дистанционного зондирования атмосферных и загрязняющих газов, выполненных различными научными коллективами. Приводятся сведения о созданных за последние двадцать лет лидарных системах.

### **1. Введение**

Особое место в исследовании газового состава атмосферы занимают лазерные методы. Высокое пространственное и временное разрешение, оперативность и большие пространственные масштабы получения информации выгодно отличают эти методы от других при исследовании параметров атмосферы. Перспективность лазерных методов связана с тем, что при распространении лазерного излучения в атмосфере наблюдается целая гамма явлений взаимодействия электромагнитного излучения со средой. К ним относится поглощение и рассеяние атомами и молекулами атмосферных и примесных газов; рассеяние и поглощение аэрозольными частицами; резонансное и комбинационное рассеяние излучения молекулами атмосферных и примесных газов; флуоресценция; искажение оптических сигналов турбулентностью атмосферы. Каждое из этих явлений приводит к характерным изменениям энергетических, спектральных, временных и поляризационных характеристик лазерного излучения. Регистрируя эти изменения и расшифровывая их определенным образом, можно получить информацию практически о любых параметрах атмосферы [1–7].

За прошедшие три десятилетия с момента появления первой публикации по использованию лазера на рубине для исследования рассеивающих свойств атмосферы (1963 г.) [8] были получены многочисленные результаты, которые показали, что целый ряд традиционных задач метеорологии ( в том числе определение основных метеопараметров, таких как температура, влажность, давление и плотность воздуха) может быть решена с помощью лазерных методов [1–7,9].

Для дистанционного измерения концентраций газов, температуры давления используются спектроскопические эффекты: резонансное поглощение, комбинационное рассеяние и флуоресценция. Наибольшим сечением взаимодействия из указанных эффектов в видимой и ИК-области спектра обладает резонансное поглощение, что и обуславливает высокую чувствительность лазерного метода, использующего это явление. Этот метод является предметом исследования данной статьи.

Впервые его реализовал Счетланд [10]. Он заключается в том, что информация о распределенных концентрациях исследуемого газа атмосферы извлекается из сравнения регистрируемых лидарных сигналов на двух длинах волн в достаточно узком спектральном диапазоне. Одна длина волны попадает в линию (полосу) поглощения исследуемого газа, а вторая вне ее. Счетланд назвал этот метод «дифференциальное поглощение рассеянной энергии» (DASE). Применяются также термины «лидар дифференциального поглощения» (DIAL) [11], «дифференциальное поглощение и рассеяние» (DAS) [12], или просто «метод дифференциального поглощения» [13].

Первые измерения с использованием лидарного метода дифференциального поглощения проводились Счетландом, применившим температурную перестройку длины волны излучения рубинового лазера на линии поглощения водяного пара [10]. Потолок зондирования достигал 4,3 км. Дальнейшее развитие метода МДП позволило провести измерения профилей концентрации газов  $H_2O$ ,  $NO_2$ ,  $NO$ ,  $SO_2$ ,  $O_3$  [7].

В области теоретических исследований МДП основное внимание уделяется точностным характеристикам лазерных систем [7,12–15,19] и анализу погрешностей определения профилей концентрации исследуемых газов из лидарных данных [16–21], а также разработке эффективных алгоритмов обработки лидарных сигналов [9,15,22,23].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований МДП представлены в обзорных работах Костко [24], Кильдала и Байера [25,26], Дера [27], Гранта [28], а также в ряде монографий [4–7].

В данной статье приводится анализ современного состояния исследований лидарного метода дифференциального поглощения, используемого для зондирования атмосферных и примесных газов. Приводятся сведения о существующих лидарных системах, созданных различными научными коллективами.

## 2. Метод дифференциального поглощения

Лидарный метод дифференциального поглощения позволяет получать информацию о пространственном распределении исследуемого газа вдоль трассы зондирования. Отражателем служит атмосферный аэрозоль и молекулярные газы. Математический формализм определения концентрации газа из лидарных сигналов основан на использовании уравнения лазерной локации, которое в приближении однократного рассеяния имеет вид

$$U(v_i, R) = \frac{1}{R^2} S_a(v_i) S_0(v_i, R) \int g(v_i - v) T^2(v_i, v) dv, \quad (1)$$

где  $U(v_i, R)$  – эхосигнал с дальности  $R$  на частоте  $v_i$ ;  $g(v_i - v)$  – спектральное распределение энергии лазерного излучения в импульсе;  $S_0(v_i, R)$  – оптическая функция уравнения лазерной локации, определяемая рассеивающими свойствами среды;  $S_a(v_i)$  – аппаратная константа, имеющая вид:

- для токового режима регистрации

$$S_a(v_i) = P_0(v_i) A F q_t q_r (1 - q_l) \frac{c\tau}{2} \eta; \quad (2)$$

– для счетно-фотонного режима регистрации

$$S(v_i) = \frac{E_0(v_i)}{h c v_i} A F q_t q_r (1 - q_l) \frac{c(\tau_d + \tau)}{2} \eta. \quad (3)$$

Здесь  $P_0(v_i)$  – мощность лазерного передатчика;  $A$  – площадь приемного телескопа;  $q_t, q_r$  – пропускание передающей и приемной оптики;  $F$  – геометрический фактор (в дальнейшем полагаем его равным единице);  $q_l$  – потери излучения за счет неучтенных факторов (например, неполное использование площади приемного телескопа, ослабление сигнала за счет введения оптических элементов с целью выравнивания динамического диапазона сигналов на длинах волн  $\lambda_{on}$  и  $\lambda_{of}$  и др.);  $\tau$  – длительность импульса;  $\tau_d$  – длительность строба;  $E_0(v_i)$  – энергия излучения импульса;  $h c v_i$  – энергия фотона;  $\eta$  – квантовая эффективность ФЭУ.

$$T^2(v, R) = \exp \left( -2 \int_0^R K(v, z) \rho(z) dz \right),$$

$\rho(z)$  – искомая концентрация газа;  $K(v, z)$  – монохроматический коэффициент поглощения искомого газа.

Размерность эхосигнала определяется режимом работы приемной системы лидара. При зондировании не слишком удаленных объемов регистрацию сигналов проводят обычно в токовом режиме; для этого режима работы  $U(v_i, R)$  выражают через мгновенную мощность сигнала на выходе детектора. Слабые сигналы, пришедшие с удаленных объемов среды, регистрируют в режиме счета фотонов, тогда  $U(v_i, R)$  определяет число одноэлектронных импульсов на выходе регистрирующей системы.

Величина  $c(\tau_d + \tau) / 2 \approx c \tau_d / 2 = \Delta R$  задает пространственное разрешение ( $2 \Delta R$  – длина строба) регистрируемого сигнала в режиме счета фотонов. Для токового режима предельное значение пространственного разрешения определяется длиной импульса  $c \tau / 2$ .

Посылая в атмосферу импульсы излучения на двух длинах волн, одна из которых приходится на линию поглощения ( $\lambda_{on}$ ), а другая – вне линии ( $\lambda_{of}$ ) и регистрируя эхосигналы  $U(\lambda_{on}, R)$  и  $U(\lambda_{of}, R)$  концентрацию газа определяют из выражения:

$$\rho(z) = \frac{1}{2 \tilde{K}_e(\bar{R}) \Delta R} \ln \left[ \frac{U(\lambda_{of}, R + \Delta R) U(\lambda_{on}, R)}{U(\lambda_{on}, R + \Delta R) U(\lambda_{of}, R)} \right], \quad (4)$$

где  $\tilde{K}_e(\bar{R}) = \tilde{K}_{on}(\bar{R}) - \tilde{K}_{of}(\bar{R})$  – дифференциальный эффективный коэффициент поглощения, усредненный по спектру излучения и по пространственной переменной в слое  $\Delta K$ .

Если сигналы  $U(\lambda_{on}, R)$  и  $U(\lambda_{of}, R)$  рассматривались как непрерывные функции дальности  $R$ , то вместо выражения (4) мы можем записать:

$$\rho(K) = \frac{1}{2 \bar{K}_e(R)} \frac{d}{dR} \ln \left( \frac{U_{of}(R)}{U_{on}(R)} \right) = \frac{\alpha_{exp}(R)}{2 \bar{K}_e(R)}; \quad (5)$$

$$\tilde{K}_e(R) = \tilde{K}_{on}(R) - \tilde{K}_{of}(R); \quad (6)$$

$$\tilde{K}_i(R) = \frac{\int g(v - v_i) K(v, R) T^2(v, R) dv}{\Gamma g(v - v_i) T^2(v, R) dv}, \quad i = on, of. \quad (7)$$

В УФ-области спектра коэффициенты поглощения имеют слабо выраженную структуру (озон,  $SO_2$ ,  $NO_2$  и др.) и в пределах ширины лазерного импульса они практически не изменяются. Поэтому эффективный коэффициент поглощения  $\tilde{K}_e \rightarrow \bar{K}_e = \bar{K}_{on} - \bar{K}_{of}$ , т.е. равен самому дифференциальному коэффициенту поглощения.

### 3. Погрешность определения концентрации газа из лидарных данных

Классическая формула относительной погрешности  $\delta \rho$  зондирования газа МДП имеет вид

$$\delta \rho = \frac{1}{2 \tilde{K}_e \rho \Delta R} \left\{ \frac{2}{n} (\gamma_{on}^2 + \gamma_{of}^2) + \gamma_s^2 \right\}^{1/2}, \quad (8)$$

где  $n$  – число импульсов излучения;  $\gamma_{on}$ ,  $\gamma_{of}$  – случайные погрешности регистрации сигналов  $U_{on}$  и  $U_{of}$ , определяемые дробовым шумом сигнала, фоновых засветок и темнового тока, равные:

– для режима счета фотонов

$$\gamma_i^2 = \frac{N_i + N_b + N_d}{N_i^2}, \quad i = on, of; \quad (9)$$

– для токового режима

$$\gamma_i^2 = \frac{2B[(P_i + P_b) h c v_i + \eta^2 NE P^2]}{P_i^2}, \quad (10)$$

где  $N_b$ ,  $N_b$ ,  $N_d$  – число фотоэлектронов эхосигнала на длине волны  $\lambda_i$ , фонового излучения и темнового тока;  $P_i$ ,  $P_b$  – мощность эхосигнала на длине волны  $\lambda_i$  и фоновой засветки;  $NEP$  – эквивалентная мощность шума;  $2B$  – ширина электрической полосы детектора.

Сигналы фонового излучения и темнового тока равны:

$$N_b = N^* \frac{1}{h\nu} A q_r \Delta\lambda \Omega \eta \tau_d ; \quad (11)$$

$$N_D = \left( \frac{NEP}{h\nu} \eta \right)^2 \tau_d , \quad (12)$$

где  $\Delta\lambda$  – спектральная ширина кривой пропускания светофильтра;  $\Omega$  – телесный угол поля зрения приемной системы.

В формуле (7)  $\gamma_s$  определяет систематическую погрешность, которая не связана с шумами детектора. Выражение для  $\gamma_s$ , имеет следующий вид [21]:

$$\begin{aligned} \gamma_s^2 = & 2(\delta_{\beta_a}^2 + \delta_{\beta_m}^2) \left[ \frac{\beta_{of}^a \beta_{on}^m - \beta_{on}^a \beta_{of}^m}{\beta_{on} \beta_{of}} \right] + (2 \Delta R)^2 [(\alpha_{on}^a - \alpha_{of}^a)^2 \delta_{\alpha_a}^2 + (\alpha_{on}^m - \alpha_{of}^m) \delta_{\alpha_m}^2] + (2 \Delta R)^2 \sum_{j=1}^M [\tilde{K}_j^2 \sigma_{rj}^2 + \sigma_{Kj}^2 \rho_j^2] + \\ & + (2 \tilde{K}_e \rho \Delta R)^2 \delta_K^2, \end{aligned} \quad (13)$$

где  $\beta_{on,of} = \beta_{on,of}^a + \beta_{on,of}^m$ .

Первые два слагаемых связаны с изменением рассеивающих свойств среды при перестройке длины волны. Учет этих слагаемых необходим при зондировании озона в УФ-области спектра [21]. Третье слагаемое необходимо учитывать при наличии мешающих газов. Здесь  $\delta_{\beta_a}$ ,  $\delta_{\beta_m}$  – относительные погрешности определения коэффициентов обратного рассеяния частицами аэрозоля и молекулами воздуха;  $\delta_{\alpha_a}$ ,  $\delta_{\alpha_m}$  – относительные погрешности коэффициентов аэрозольного ослабления и молекулярного рассеяния;  $\sigma_{\rho_j}$ ,  $\sigma_{K_j}$  – погрешность задания концентрации  $j$ -го мешающего газа и коэффициента поглощения;  $K_j$  – дифференциальный коэффициент поглощения  $j$ -го мешающего газа. При использовании изолированных линий поглощения первые три слагаемых могут быть опущены.

Рассмотрим четвертое слагаемое. Сюда входит  $\delta_K$  – относительная погрешность определения коэффициента дифференциального поглощения. Перечислим основные источники этой погрешности:

*а) Немонохроматичность лазерного излучения.* Часто в формулу (5) вместо  $K_e$  подставляют монохроматический дифференциальный коэффициент поглощения  $K_e$ . Как мы указывали выше, это справедливо только для УФ-области спектра. Из (6) мы видим, что  $\tilde{K}_e$  зависит от формы и ширины линии лазерного излучения  $g(\nu_i - \nu)$ . Чем шире спектр излучения, тем больше отклонение  $\tilde{K}_e$  от  $K_e$ . При этом появляется зависимость  $\tilde{K}_e$  от искомой концентрации газа  $\rho(R)$  (через квадрат пропускания  $T^2(\nu, R)$ ). Подробно этот вопрос исследовался в работе [20]. Здесь отметим лишь, что ошибка определения концентрации газа из лидарных данных может достигать 40% и более при ширине спектра излучения, равной полуширине линии поглощения.

*б) Нестабильность частоты излучения.* Коэффициент поглощения  $K_{on}$  является априори заданным для частоты  $\nu_{on}$  (полагаем для простоты  $K_{on} \gg K_{of}$ ). Незнание частоты излучения или ее случайные изменения приводят к погрешности определения  $K_{on}$ . К счастью, немонхроматичность и нестабильность лазерного излучения являются взаимокompенсирующими факторами (т.е. чем шире спектр излучения, тем меньше влияние на величину коэффициента поглощения оказывает нестабильность). Тем не менее нестабильность частоты излучения может приводить к погрешности в определении концентрации газа  $\approx 30\%$  [15,16] при зондировании наземным лидаром и до 40% при зондировании спутниковым лидаром.

*в) Спектральное загрязнение лазерного импульса.* Сужение лазерной линии излучения в перестраиваемых лазерах, особенно в лазерах на красителях, на практике вынуждает использовать многокаскадные схемы генератор – усилитель для достижения необходимых мощностей зондирующего излучения. В этом случае широкополосное излучение спонтанной эмиссии, усиливаясь, приобретает черты, сходные с лазерным излучением (УСЭ). Если лидарный сигнал и отраженный атмосферный сигнал от УСЭ спектрально разделить не удается, то возникает ошибка при интерпретации лидарных данных, которая может быть выражена через погрешность коэффициента поглощения  $\delta_K$ :

$$\delta_K = \frac{1 - \varepsilon}{1 - \varepsilon + e \exp \left\{ -2 \int \tilde{K}_e(z) \rho(z) dz \right\}}, \quad (14)$$

где  $\tilde{K}_e(z)$  – эффективный дифференциальный коэффициент поглощения;  $\varepsilon$  – степень «спектральной частоты» сигнала. Подробно этот вопрос исследовался в [19]. При  $\varepsilon = 0,95$  величина  $\delta_k$  превышает 20% на первых километрах трассы зондирования. Выполненные нами расчеты показали, что ошибка зондирования влажности пограничного слоя спутниковым лидаром может достигать 100% при  $\varepsilon = 0,99$ .

Перечисленные погрешности непосредственно связаны с параметрами лидарной системы и их можно отнести к аппаратным погрешностям. К аппаратным погрешностям следует отнести и нелинейные искажения лидарных сигналов фоторегистрирующей аппаратурой, о которых пойдет речь в следующем параграфе. Здесь же отметим два вида погрешности, источником которых является сама атмосфера.

з) *Погрешность, обусловленная сдвигом центра линии поглощения давлением воздуха.* Влияние этого явления наиболее существенно для вертикальных трасс. Выполненные измерения в [29] контура линии  $H_2O$  694,38 нм с помощью двух АО-спектрометров при давлении исследуемой смеси влажного воздуха 1013 мбар и 6,67 мбар позволили определить сдвиг линии, который составил  $0,017 \text{ см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$ . Влияние сдвига линии на точность определения концентрации водяного пара из лидарных данных иллюстрируется рис. 1, из которого видно, что ошибка может достигать 26% на высоте 15 км при зондировании наземным лидаром (кривая 1). Однако влияние этого эффекта можно свести к минимуму, если  $\lambda_{on}$  выбрать не в центре линии поглощения, а сместить на величину  $\delta_{cd} = 0,017 \text{ см}^{-1}$  (см. кривую 2).

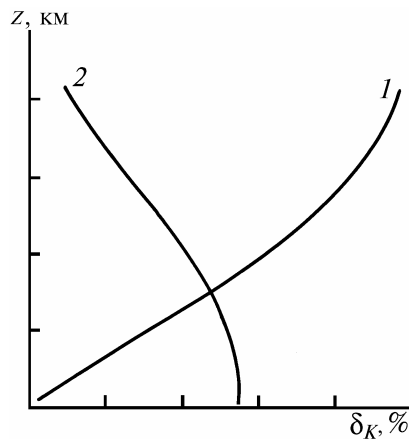


Рис. 1. Ошибка определения коэффициента поглощения, возникающая вследствие неучета сдвига линии поглощения давлением воздуха при резонансной настройке линии лазерного излучения с линией поглощения при  $P = 1 \text{ атм}$  (1) и  $P = 0,01 \text{ атм}$  (2)

д) *Погрешность, вызванная доплеровским уширением линии рэлеевского обратного рассеяния.* Искажение спектра лазерного импульса вследствие доплеровского уширения линии рэлеевского обратного рассеяния приводит к изменению величины эффективного дифференциального поглощения, что, в свою очередь, приводит к погрешности определения концентрации газа. Влияние этого эффекта рассматривается в целом ряде статей [19, 30–36]. Выполненные нами исследования показали, что проявление этого эффекта различно для двух типов трасс «сверху-вниз» и «снизу-вверх». Наибольшие искажения результатов интерпретации лидарных данных возникают при зондировании наземным лидаром влажности на высотах больше 10 км. Ошибка может достигать 100% и более, вплоть до появления отрицательных значений влажности, не имеющих физического смысла, что ставит под сомнение применимость дифференциальной методики зондирования влажности стратосферы наземным лидаром. При зондировании самолетным лидаром погрешность за счет эффекта доплеровского уширения линии рэлеевского обратного рассеяния не превосходит 16%.

#### 4. Нелинейные искажения лидарных сигналов и способы их коррекции

Исследованию нелинейных искажений лидарных сигналов при регистрации и способам их коррекции посвящено незначительное число работ. В основном они относятся к лидарам, содержащим фотоприемники на основе ФЭУ. Все нелинейные искажения выходного сигнала связаны с внутренними и внешними факторами, а также с воздействием регистрируемого сигнала на параметры ФЭУ и фоторегистратора в целом. К внутренним факторам можно отнести медленные и быстрые изменения фотоэмиссионных свойств диодов, их неоднородность, инерционность и т.д. Внешними возмущающими факторами являются температура окружающей среды, уровень возмущающего, в том числе и оптического, фонового излучения, других излучений и т.д.

Рассмотрим здесь три искажающих фактора. Первый из них связан с конечностью разрядности счетчика одноэлектронных импульсов (ОИ), вследствие чего происходит недосчитывание импульсов (просчеты импульсов) [37].

Второй фактор связан с появлением паразитных импульсов последействия. Влияние последействия ФЭУ обычно проявляется на «хвосте» лидарного сигнала из удаленных участков трассы зондирования в виде накапливаемого превышения фиксируемого выходного сигнала над истинным лидарным сигналом. Паразитные импульсы последействия ФЭУ обычно возникают с задержкой 100 нс после начала засветки фотокатода ФЭУ. В случае, когда счетный ФЭУ можно рассматривать как линейную систему с постоянными параметрами, зарегистрированный лидарный сигнал  $U(t)$ , искаженный последствием ФЭУ, можно представить в виде свертки неискаженного сигнала  $\bar{U}(t)$ , поступающего на фотокатод ФЭУ, с импульсно-переходной характеристикой ФЭУ  $H(t)$  [38]:

$$U(t) = \int_0^{\infty} \bar{U}(\tau) H(t - \tau) d\tau,$$

где  $\tau$  – переменная интегрированная по времени, связанная с пространственной переменной  $z$  для лидарных сигналов соотношением  $\tau = 2(R - R_0)/c$ . Импульсно-переходная характеристика может быть измерена по отклику ФЭУ на засветку короткого импульса наносекундной длительности. В [38] в качестве такого импульса использовалось излучение медного лазера длительностью 10 нс. Регистрация фотоэлектронных импульсов счетного ФЭУ-104 осуществлялась с помощью стробируемого счетчика фотонов со скоростью счета 100 МГц и шириной временного строба 100 нс.

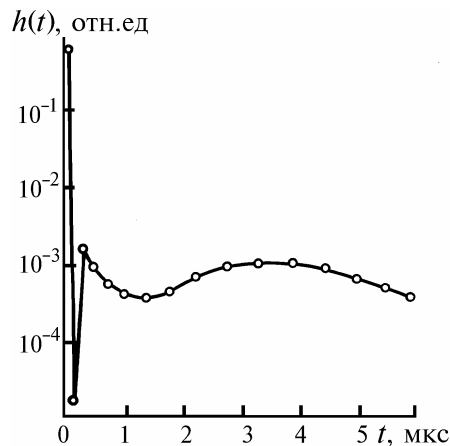


Рис. 2. Импульсно-переходная характеристика счетного ФЭУ

Измеренная в [38] функция  $H(t)$ , нормированная на величину зарегистрированного суммарного сигнала лазерной засветки в первом стробе, представлена на рис. 2, из которого видно, что амплитуда ложных сигналов составляет в максимуме  $10^{-3}$  от уровня сигнала засветки и медленно убывает со временем. Как правило, последствие ФЭУ спадает на порядок за 100 мкс. Медленный спад последствия ФЭУ, вообще говоря, накладывает ограничения на

частоту посылок зондирующих импульсов. В [39] показано, что при вертикальном зондировании с Земли влияние последствия ФЭУ на искажение лидарных сигналов для высот более 12 км становится существенным при частоте следования лазерных импульсов не менее 3 кГц.

Для уменьшения влияния разного рода нелинейных искажений лидарных сигналов при регистрации в современных схемах приемной системы лидара используются сразу несколько ФЭУ, настроенных на регистрацию части лидарного сигнала в ограниченном динамическом диапазоне из разных участков трасс зондирования. Полностью лидарный сигнал сшивается уже при обработке.

В тех случаях, когда появление нелинейных искажений лидарных сигналов при регистрации предотвратить не удастся, нужно производить корректировку выходных сигналов лидарных систем. Наиболее простой способ корректировки заключается в тщательном контроле значения коэффициента усиления ФЭУ, например с помощью источника спорных световых импульсов [40] и последующей корректировке сигналов при обработке. Поскольку сигналы большинства лидарных систем имеют малую длительность и содержат информативные быстроосциллирующие компоненты, этот способ корректировки используется редко. Более ценным с практической точки зрения является способ предварительного определения передаточной функции фотоприемника в целом с помощью смоделированных оптических сигналов и дальнейшей коррекции регистрируемых сигналов с помощью ЭВМ. В этом случае коррекция сигналов проводится по следующей формуле [38]:

$$\tilde{U}(r) = \frac{U(r) - \sum_{m=1}^{r-1} H(r-m) U(m)}{H(0)}, \quad (15)$$

где  $U(r)$  – зарегистрированный сигнал в  $r$ -м строке;  $\tilde{U}(r)$  – скорректированный сигнал в  $r$ -м строке.

Третий искажающий фактор возникает из-за инерционности ФЭУ. Искажение эхосигнала при этом происходит в сторону их уменьшения вследствие «слипания» ОИ. Алгоритм корректировки сигналов для этого вида искажений рассмотрен в [41]. Фактор «слипания» учитывается формулой асимптотически несмещенной оценки для среднего числа зарегистрированных фотонов  $\bar{U}$ :

$$\bar{U} = \tilde{U} \exp(-\tilde{U} x); \quad \bar{U} = U / n, \quad (16)$$

где  $x = \tau_{on} / \tau_d$ ;  $\tau_{on}$  – ширина ОИ на уровне порога дискриминации;  $\tau_d$  – длительность строка;  $n$  – число лазерных импульсов;  $\tilde{U}$  – среднее число поступивших на вход ФЭУ импульсов;  $\bar{U}$  – число зарегистрированных ОИ. Для решения нелинейного уравнения (16) можно воспользоваться итерационной схемой:

$$\tilde{U}^{i+1} = \frac{\bar{U} \exp(x \tilde{U}^i) - x (\tilde{U}^i)^2}{1 - x \tilde{U}^i}. \quad (17)$$

## 5. Методы сжатия динамического диапазона лидарных сигналов

Во многих практических случаях диапазон изменения максимальных интенсивностей и динамический перепад значений лидарного эхосигнала в импульсе составляют  $10^5 \dots 10^{12}$  раз за время  $10^{-5}$  с [42]. Для сокращения динамического диапазона регистрируемого лидарного эхосигнала используются четыре метода, представленные и расклассифицированные в табл. 1 [43]:

- домножение принятого сигнала на квадрат времени (расстояния);
- логарифмическое преобразование;
- ступенчатое преобразование;
- стробирование принятого сигнала.

Таблица 1

Вид регулирования	Методы сокращения динамического диапазона		
	активные		пассивные
	фотоэлектрические (ФЭУ)	электронные усилители	
Функциональное	С временной регулировкой по закону $t^2$ Логарифмический С адаптивной временной регулировкой	С временной регулировкой усиления по закону $t^2$ Логарифмический С адаптивной регулировкой усиления	Компенсирующие полевые диафрагмы Компенсирующие пленки и клинья
Ступенчатое	Со ступенчатой регулировкой С переключением Съем сигнала с диодных нагрузочных сопротивлений	Со ступенчатой регулировкой усиления С переключением	Многобазовая приемная система Несколько зондирующих пучков Сменные нейтральные светофильтры Сменные полевые диафрагмы
Стробирование	Стробируемый фотодетектор	Стробируемый	Механический затвор Электрооптический затвор

Логарифмирование и домножение принятого сигнала являются функциональными методами. Кроме того, метод домножения на квадрат расстояния является нелинейным во времени, но линейным по амплитуде принятого лидарного эхосигнала, а метод логарифмирования – нелинейным по амплитуде преобразования. Для реализации методов сжатия лидарного сигнала используются оптические, фотоэлектрические и электронные способы.

Оптические способы реализуются за счет использования специальных виньетирующих диафрагм, согласующих светофильтров или геометрического фактора лидара [44, 45].

Применение виньетирующих диафрагм может привести к искажению распределения лидарного эхосигнала, вызванному атмосферной турбулентностью. Согласующие фильтры обычно понижают энергетический потенциал лидара и соответственно дальность зондирования. Конструкции с использованием геометрического фактора лидара усложняют лидары, и при этом не всегда достигается нужный эффект.

Электронные способы реализуются с применением специализированных усилительных схем, в частности логарифмических усилителей и быстродействующих электронных ключей [42, 46]. К недостаткам этих способов следует отнести то, что фотоприемники лидаров остаются незащищенными от воздействия больших насыщающих сигналов.

В настоящее время широкое применение для уменьшения динамического диапазона регулируемых лидарных эхосигналов получили фото-электронные способы. Входной динамический диапазон ФЭУ с логарифмическим режимом работы достигает  $10^7$  при динамическом диапазоне выходного не более 1,5 порядка [47]. Однако логарифмическое преобразование в ФЭУ, основанное на эффектах, проявляющихся в диодной системе при возникновении пространственного заряда между последним диодом и анодом, зависит не только от интенсивности входного сигнала, но и от его формы. Это является источником значительных ошибок фотодетектирования лидарных эхосигналов сложной формы.

Снятие выходного сигнала ФЭУ с разных диодов позволяет сократить динамический диапазон регистрируемых лидарных эхосигналов на 5 порядков [48]. Однако подобная схема непригодна для обработки быстропеременных лидарных эхосигналов. Она не позволяет учитывать перегрузки сильным сигналом на последних диодах. Проявляющиеся при этом отрицательные явления типа утомления диодов, возникновение пространственных зарядов, перераспределение потенциала диодов требуют более  $10^{-3}$  с [49] для восстановления состояния максимального усиления сигнала.

Минимальные потери информации при сокращении динамического диапазона регистрируемого сигнала обеспечивают ФЭУ с временной амплитудной регулировкой усиления (ВАРУ). Управлять усилением ФЭУ можно напряжением питания [50], электрическим полем по модулирующим электродам [51], по аноду и диодам [52], внешним электромагнитным полем [53]. Анализ существующих схем ВАРУ рассмотрен в [54].

## 6. Лидары для зондирования атмосферных и загрязняющих газов

В этом разделе приводятся основные сведения по лидарам дифференциального поглощения, созданным за последние 15 лет в различных научных центрах. Вся информация о характеристиках лидаров сведена в табл. 2–7. В табл. 2–5 представлены лидары для зондирования



влажности, озона и загрязняющих газов соответственно; в табл. 6 дана информация о самолетных лидарах и в табл. 7 – о мобильных лидарах.

В таблицах выделены блоки: а) показатель измерений; б) излучатель; в) приемник. Каждый блок содержит етальную информацию. В колонке N 6 указан номер типа лазера, а данные об используемых лазерах приведены в табл. 8. В колонках N 11, 12 указаны номера оптической схемы лидара (см. рис. 3) и типа телескопа. Телескопы пронумерованы в следующем порядке: 1 – Кассегрена; 2 – Ньютона; 3 – Даля–Киркхама; 4 – Ньютона с параболическим зеркалом; 5 – Конде–Ньютона. В последних колонках табл. 2–7 указаны год выхода из печати, страна и номер литературной ссылки.

Временные гистограммы вышедших публикаций по годам и странам приведены на рис. 4–5. Видно, что ведущими странами в области зондирования  $H_2O$  являются США, Франция, ФРГ и Россия; озона – Япония, США, ФРГ, Франция и Россия; загрязняющих газов – Швеция, ФРГ, США и Япония. Безусловным лидером в части самолетных лидаров являются США.

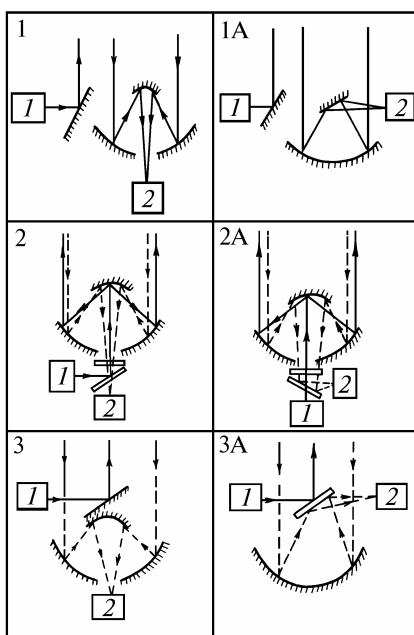


Рис. 3. Варианты оптических схем приема-передачи излучения в лидарах: 1 – излучатель; 2 – приемник

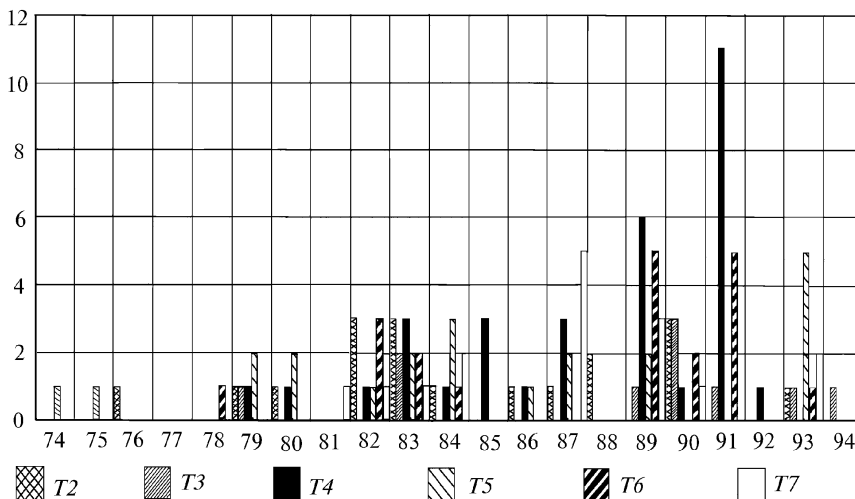


Рис. 4. Гистограммы опубликованных работ (представленных в статье) по годам

Таблица 2

Наземные лидары для зондирования H<sub>2</sub>O

№ п/п	Показатель измерений				Излучатель				Число импульсов повторения, время накопления	Схема приема	Приемник				Год	Страна	№ литературы	Примечания
	Диапазон высоты, км	Разрешение, км	Чувствительность, погрешность	Рабочее время суток (д-день, н-ночь)	Тип лазера	Рабочие длины волн, нм (*), частоты, см <sup>-1</sup>	Частота повторения, Гц	Энергия в импульсе, мДж			Тип телескопа	Диаметр телескопа, см	Поле зрения, мрад	Ширина фильтра, нм				
1	1,2	0,18			5а	970 – 976	0,2	1000		3		30	18		1976	Англия	73	Горизонтальная трасса
2	< 3	0,3			7б	694,3 * 724,348* 724,372*	1	250		1		0,18 м <sup>2</sup>	4	20	1979	США	74	
3	0 – 3	0,05 – 1,5		д/н	7а	~ 694*	0,2	1000		1	1	0,15 м <sup>2</sup>			1980	Россия	3	
4	1	0,25			6а	5789,61 5788,5	20	60		3а		45	0,56		1982	США	75	
5	0 – 7	0,03 – 0,03	10 – 15 %		1б	724,3* 723,2*	10	70	3 · 10 <sup>4</sup>			60			1982	Франция	76	
6	3	0,015	15 %			~ 724*						38			1982	Франция	77	
7	3				1б	~ 720*	10	80				3б		2,4	1983	Франция	78	
8	9	0,1 – 0,3			1б	~ 724*	10	70		1		60	3	24	1983	Франция	79	
9	1,5	0,1			5а	10R(18) 10R(20)	0,07	4000		3		30	1		1983	Франция	80	
10	0 – 11	0,06 – 0,3	1 – 100 %	д/н	7а	694,383* 694,3*	0,125	1000	50	1		50	2	1	1984	Россия	81	
11	15	2	50 %	д/н	1е	~ 590*	2000	0,5	8 · 10 <sup>5</sup>	1		100			1986	Россия	153	
12	7	0,075	0,7 %		5а	10303,5* 10260,4* 10494,5*	30	10 – 60	5 · 10 <sup>3</sup>						1988	США	82	Гетеродинный прием
13	16	0,2			8	~ 730*	10	50 – 100				30			1989	Франция	95	Измерены P,T
14	20	2 – 3			5а		н	1 – 3,5				20			1989	Индия	95	Гетеродинный прием
15	2				5а	10247* 10260*		1000							1990	Италия	83	Горизонтальная трасса
16								12	35		1 2	50 28		0,6 8	1990	ФРГ	84	
17					9	~ 2089	2	10		3а		30			1990	США	85	
18		0,075 – 1			1д	~ 720*	20	30				30	1,5	0,6	1993	ФРГ	86	Мобильный

Таблица 3

## Наземные лидары для зондирования вертикального распределения озона (лидары для зондирования тропосферы и нижней стратосферы)

№ п/п	Показатель измерений				Тип лазера	Излучатель			Число импульсов повторения, время накопления	Схема приема	Приемник			Год	Страна	№ литературы	Примечания	
	Диапазон высоты, км	Разрешение, км	Чувствительность, погрешность	Рабочее время суток (д-день, н-ночь)		Рабочие длины волн, нм (*), частоты, см <sup>-1</sup>	Частота повторения, Гц	Энергия в импульсе, мДж			Тип телескопа	Диаметр телескопа, см	Поле зрения, мрад					Ширина фильтра, нм
1	0,5 – 2	0,3			5а	9Р(14) 9Р(24)	1	5500		1	30	4,5		1979	Япония	55		
2	2 – 12	0,15	10 – 20 %		2б,3а	209,4 * 308 *	2,5	2 – 4	4000 8000	1	50	4,8	2,9	1983	Япония	56		
3	0 – 2,5	0,05		д	2в	277 * 317 *	80	30		1	25	3	20	1983	Япония	57		
4	тропо- сфера				9б	288,9 * 294,2 *		> 50		1	1	40		1990	США Израиль	58		
5	0 – 3				2в	248 – 313 *	80	~ 300			13			1990	ФРГ	59		
6	0 – 15	0,15 – 1		д/н	9б	266 – 313 *	80	60 – 250			3	60	2	3,2–6,5	1989	Нидерланды	60	
7	0,2 – 3	0,003 – 0,6		д/н	2д	248 – 313 *	10	30			40	0,8	4	1993	ФРГ	61	Мобильный	
8	0,2 – 12	0,05 – 1		д/н	2д	248 – 313 *	80	60 – 250		2	50	1–10	12	1981	Франция	159		
9	4 – 16	0,2 – 1		д/н	13	280 * 295 *	20	50		1	61	1,8		1991	США	62		
10	0 – 4	0,1		д/н	9б	266 * 289 *	10	4 – 50		4	20	1		1990	США	63		
11	0 – 12	0,3	10 – 20 %	д/н	14	271 * 289 *	7000	0,5	15 мин	3а	30	2	1,5	1994	Россия	158	Стационарный	

Таблица 4

## Наземные лидары для зондирования вертикального распределения озона (лидары для зондирования стратосферы)

№ п/п	Показатель измерений				Излучатель				Число импульсов повторения, время накопления	Схема приема	Приемник				Год	Страна	№ литературы	Примечания
	Диапазон высоты, км	Разрешение, км	Чувствительность, погрешность	Рабочее время суток (д-день, н-ночь)	Тип лазера	Рабочие длины волн, нм (*), частоты, см <sup>-1</sup>	Частота повторения, Гц	Энергия в импульсе, мДж			Тип телескопа	Диаметр телескопа, см	Поле зрения, мрад	Ширина фильтра, нм				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	< 25	0,5	5 – 20 %		3а	307,9 * 308,2 *	1/15	50	15 – 45 мин	1		50	10	20	1979	Япония	64	
2	10 – 30	0,75	20 – 50 %		3а	307,9 * 308,2 *	2	50		1		50	5	20	1980	Япония	65	
3	5 – 30	0,45–1,2	5 – 20 %		1з	285 – 310 *	10	40	3 · 10 <sup>4</sup>	1		36	1	3, 70	1982	Франция	66	
4	20 – 50	0,1	5 – 10 мкг/м <sup>3</sup>		2в		50					60			1983	ФРГ	68	Контейнер на вертолете
5	10 – 25	0,1 – 1			1з	290 – 315 *	0,1	20 – 50				0,19 м <sup>2</sup>	3 – 7		1983	Россия	69,70,71	
6	< 25	5 – 20 %				296 – 301 *	10	40	15 – 45 мин	1		80	1	70	1983	Франция	72	
7	5 – 50		1 %		3в	308 353 *	100	150	1,5 · 10 <sup>6</sup>			60			1984	ФРГ	89	Контейнер на вертолете
8	0 – 40	0,45 – 1			1з	280 – 310 *	10	20				80	2	3, 70	1985	Франция	90	
9	2 – 50	1 – 3	5 %			280 – 355 *	10, 20	40 – 250	3 · 10 <sup>5</sup>	1з		80			1985	Франция	67	
10	3 – 25	1 – 1,5				290 – 313 *		20 – 200	1 · 10 <sup>4</sup>	2в					1985	Япония	91	
11	15 – 50	1 – 7				308 – 355 *	80, 20	130		3ж		80			1986	Япония	92	
12	0 – 30	1	3 – 5 * 10 <sup>11</sup> см <sup>-3</sup>			277 – 360 *	80	> 30	1 · 10 <sup>4</sup>	2в		50			1987	Япония	93	
13	0 – 20 15 – 50	1 – 2 1 – 5				289,294 308,353 *	150 20	650 50	1,5 · 10 <sup>5</sup> 1 · 10 <sup>7</sup>			90 40			1987	США	94	
14	0 – 30	0,15 – 0,8	5 %	д		277 – 360 *	80	30	30 мин	2д		50	2	2	1987	Япония	95	
15	1,5 – 50	0,15				277 – 351 *	250	75 – 400		3в		200			1989	Япония	95	
16	5 – 70	0,5 – 3				289 – 532 *	10 – 60	15 – 150		3н		80			1989	Италия	95	
17	40	2 – 3					непр	1 – 3,5 Вт		5а		20			1989	Индия	95	Гетеродинальный детектор
18	10 – 25			3		308 – 532 *	1 – 2	10		3е	2	100		3,6	1990	Россия	96	
19	10 – 40	1 – 3				308 – 532 *	20, 80	100, 150		3з		80	1 – 2	0,9–1,8	1990	Япония	97	
20	12 – 40	1 – 3	10 – 15 %			308 – 532 *	20, 80	100, 130	10 <sup>3</sup> – 10 <sup>4</sup>	3з	1	80	1 – 2	0,9–1,9	1991	Япония	98	Мобильный, температура
21	15 – 45	0,2		н		308 – 353 *	300	100		3в	2	100	0,3–1	3,5	1993	Канада	99	
22	10 – 40	0,03		н/с		308 – 353 *	300	230		3в	2	100	0,2–1	2	1993	Канада	100	

Продолжение табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
23	15 – 50	0,3 – 5		н		308 – 355 *	200	100–500		3в	3	100	0,4	< 2	1993	США	101	
24	10 – 50	0,5 – 5		н		308 – 353 *	20	300		3в		60	0,4	5	1993	ФРГ	102	
25	15 – 50	0,5 – 8		н		308 – 355 *	50	120, 300		3ж	1	80	1,3	20	1993	Франция	103	
26	3 – 30	0,015		н		289 – 294 *	10	50			1	40	1 – 5	< 1	1993	США	104	
27	5 – 35	0,03 – 0,3		д/н		300 – 350 *	10	100–1000		10	1	60	0,15–1,5	0,2	1993	ФРГ	105	
28	2 – 40	0,15		д/н		299 – 355 *	10, 80	110–150		3п	1	80	1		1993	Италия	106	Монохроматор
29	15 – 45	0,3 – 5		н		308 – 353 *	250	400		3д	2	81	0,5	2	1993	Нидерланды	107	
30	15 – 40	1 – 5		н		308 – 355 *	20, 80	110, 130		3ж	1	80	1 – 2	1 – 2	1993	Япония	108	
31	10 – 50	0,1 – 1		н		308 – 353 *	50 – 80	20, 40		3в		220	0,3–1	1 – 2	1993	Россия	154	
32	0 – 35					339 – 351 *	10			2г		200				Япония	95	
33	20 – 45	0,5 – 2				308 – 355 *	10, 50	100, 200		3ж		0,5 м <sup>2</sup>			1989	Франция	95	
34	20 – 42					308 – 355 *		2,20 Вт		3ж	3	75			1989	США	95	
35						308 – 355 *	300	10 – 125		3в	2	100	0,8	3,5	1989	Канада	95	
36	10 – 50	0,1	10 – 20 %	н	3в	308 – 353 *	60	60	15 – 20 мин	3е	2	100	2	3	1992	Россия	157	Стационарный

Таблица 5

Лидары для контроля загрязнений

№ п/п	Показатель измерений					Излучатель				Число импульсов повторения, время накопления	Приемник					Год	Страна	№ литературы	Примечания
	Газ	Диапазон высоты, км	Разрешение, км	Чувствительность, погрешность	Рабочее время суток (д–день, н–ночь)	Тип лазера	Рабочие длины волн, нм (*), частоты, см <sup>-1</sup>	Частота повторения, Гц	Энергия в импульсе, мДж		Схема приема	Тип телескопа	Диаметр телескопа, см	Поле зрения, мрад	Ширина фильтра, нм				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	NO <sub>2</sub>	1	0,1	0,05		1а	448,8 * 448,1 446,5 441,8		4 – 8	1		20				1974	США	109	
2	SO <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1	0,07	0,06 0,12 ppm* км		1ж	292,3 * 293,3 294,0	0,017	0,3	8		7				1975	США	110	
3	SO <sub>2</sub> NO <sub>2</sub>	5	0,5	20ppb 10 мг/м <sup>3</sup>		1ж	298,0 * 299,0 458,2 456,8	10 – 25	0,4 0,5		3а	2	25	2	5 – 10	1979	Швеция	111	

Продолжение табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
4	SO <sub>2</sub>					1з	300,01* 299,5		0,1		1	2	26	0,017	10	1979	США	112	
5	CO	2,5				5в	2154–2086	300	1		3	1	30	1,1		1980	США	113	
6	H <sub>2</sub> O CH <sub>4</sub>	2		0,25Торр 10ppb		5а	10246,6* 10260,4 10532,1 10571,0	70	1,3				60			1980	США	114	
7	Hg	1		4 нг/м <sup>3</sup>		1н	253,65* 253,68	10	0,7			2	25		20	1982	Швеция	160	
8	SO <sub>2</sub> NO <sub>2</sub>			30 мг/м <sup>3</sup>		1э 1в	299,3* 300,05 448,1 446,5				3	2	30			1983	Швеция	115	
9	SO <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3 2,5	0,4 0,15–0,5	20 %		1з	300,01 299,65 284,5 289,5*	10	12 10	2000 10 <sup>4</sup>			60 36			1984	Франция	116	
10	H <sub>2</sub> O O <sub>3</sub>	9 30	0,1–0,3 0,45–1,2			1б 1э	724–855* 310	10	70–40	50 мин			60 36	3 1	24 3–70	1983	Франция	79	
11	HCl	2	0,1	300ppb		1з	3636,3 3698,3	1	10	100			50			1984	ФРГ	117	Установлен на корабле
12	O <sub>2</sub>	1,6	0,008	0,3 %		1з	760,2* 759,3	10	100	100			45			1989	США	118	
13	NO <sub>2</sub>	3	0,05–0,2			1в	447,9* 446,5	10	20					50		1986	Япония	92	Измеряется давление
14	H <sub>2</sub> O	0,5	0,0075			6б	9347* 10600							30		1987	Россия	155	
15	H <sub>2</sub> O CH <sub>4</sub> HCl	3	0,2			12	~ 1751,5 ~ 1750, ~ 1750,	3	10	25				30		1987	США	119	
16	NO NO <sub>2</sub>					1л 1д	226,8* 224,5 448,1 453,6	80	5 3			2		40		1989	ФРГ	133	
17	NO <sub>2</sub>	6	0,1–1		д/н	1э	~ 450*	10	5			1	28	2	10	1993	Нидерланды	120	
18	H <sub>2</sub> O O <sub>3</sub>	3 5	0,015		д/н	5а	9200–10800*	1	4000			2	38	1		1993	Италия		

Продолжение табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
19	H <sub>2</sub> O O <sub>3</sub>	10 30	0,015		н	8 2а	700 – 800 * 248	20	200			5	50	1 – 4	2	1993	Япония	121	
20	H <sub>2</sub> O CO <sub>2</sub>	1 – 6	0,3			9 9а	2000 1000	5	150			2	40	1 – 4		1993	США	122	
21	NO NO <sub>2</sub> SO <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10	0,0015– 0,2		д/н	1л	220 – 350 *	80	2 – 5			1	60	0,15–1,5		1993	ФРГ	123	
22	NO NO <sub>2</sub> N <sub>2</sub> O SO <sub>2</sub> CH <sub>4</sub> C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	10	0,2 – 0,5		д/н	10б	220 – 2200 *	10	100–1000			1	30	0,5–2		1984	Франция	151	

Таблица 6

Самолетные лидары различного назначения

№ п/п	Показатель измерений					Излучатель				Число импульсов повторения, время накопления	Схема приема	Приемник				Год	Страна	№ литературы	Примечания
	Газ	Диапазон высоты, км	Разрешение, км	Чувствительность, погрешность	Рабочее время суток (д–день, н–ночь)	Тип лазера	Рабочие длины волн, нм (*), частоты, см <sup>-1</sup>	Частота повторения, Гц	Энергия в импульсе, мДж			Тип телескопа	Диаметр телескопа, см	Поле зрения, мрад	Ширина фильтра, нм				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	O <sub>3</sub>	вниз с 23 и 36 2,5	0,15	20 – 50 %		1м	282 * 355 *	10	1 – 3			1	30			1983	США	138	Установлен на воздушном шаре
2	O <sub>3</sub>	вниз до 3,2	0,21	5ppb 10 %		1з	285,9 * 299,4 *	1 – 10	30	100		1	35	< 2	0,3	1993	США	139	
3	O <sub>3</sub>	вниз до 1,7	0,15	20ppb 20 – 40 %	д	5а	9р(14), 9р(24)	0,25	300	200		2	30			1989	Япония	140	
4	O <sub>3</sub>	1 – 6 18 – 26	0,35 0,5	10 – 40ppb	н	1з	286 – 311 *	10			3		40			1991	США	141	
5	O <sub>3</sub>	1 – 3 вниз	0,007 – 0,1		д/н	2д	248 – 313 *	30 – 50	300				35	1	20	1991	США	142	

Продолжение табл. 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
6	O <sub>3</sub>	0 – 15	0,15		д/н	9б	266 – 290 *	10	30			1	40	1 – 6	2	1989	Канада	134	
7	O <sub>3</sub>	1 – 10 вниз вверх	0,2		д/н	1з	286 – 300 *	10	30				35	< 1,25		1989	США	144	
8	O <sub>3</sub>	5	0,21	5ppb		1з	~ 300 *	10	40 – 80				35			1982	США	145	
	H <sub>2</sub> O	1,5		10 <sup>-3</sup>		1б	~ 700	10	50										
9	O <sub>3</sub>	3,6	0,3		д/н	2д	277 – 360 *	20	30 – 60				50	0,5–1	7 – 15	1991	США	146	
	SO <sub>2</sub>																		
10	H <sub>2</sub> O	4	0,05	0,002		1б	723,2 *	10	50	200			35			1982	США	147	
11	SF <sub>6</sub>					5а	10,510	непр	3 Вт		2		7,5			1978	ФРГ	148	
							9,460												
12	H <sub>2</sub> O	7	0,1 – 0,2		д/н	1б	~ 724 *	1 – 10	30 – 40			1	35	1,3	0,6	1989	ФРГ	149	
13	O <sub>3</sub>	3	0,1			2д	277 – 360 *	20	30 – 60				50			1989	США	95	
	SO <sub>2</sub>																		
	NO <sub>2</sub>																		
14	O <sub>3</sub>	1,6	20ppb			1з	292 – 298 *	5	10				45			1984	США	150	Измеряется температура и давление
	H <sub>2</sub> O		10 %			1б	~ 724 *		60										
			10 %			8	~ 940 *		50 – 100										
15	H <sub>2</sub> O	0,2 – 10			д/н	8	726,5 *		150		1	3	38			1990	США	33	
							732 *												
16	H <sub>2</sub> O	1 – 7 вниз	0,2			8	~ 727 *	10	30 – 100				35	< 1,25	0,5	1990	США	152	
17	H <sub>2</sub> O	0,8 – 2	0,15			1б	~ 720 *	10	30				40			1983	ФРГ	163	

Таблица 7

Мобильные лидары для контроля загрязнений

№ п/п	Показатель измерений					Излучатель				Число импульсов повторения, время накопления	Схема приема	Приемник				Год	Страна	№ литературы	Примечания
	Газ	Диапазон высоты, км	Разрешение, км	Чувствительность, погрешность	Рабочее время суток (д-день, н-ночь)	Тип лазера	Рабочие длины волн, нм (*), частоты, см <sup>-1</sup>	Частота повторения, Гц	Энергия в импульсе, мДж			Тип телескопа	Диаметр телескопа, см	Поле зрения, мрад	Ширина фильтра, нм				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	SO <sub>2</sub>	3	0,1	30ppb			299,22 *						50			1981	США	124	
							300,0												
2	SO <sub>2</sub>	3	0,015–0,2	25ppb		1з	300,05 *	10	10	1 – 1000			50			1982	США	125	
							299,38												

Лидарный метод дифференциального поглощения



Продолжение табл. 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
3	SO <sub>2</sub>	2,5	0,01	1ppm		1з	300,2 * 299,5	10	10	1000			45			1983	Россия	126	
4	SO <sub>2</sub>	3	0,015– 0,2	50ppb		1з	~ 300 *	10	30	300			56			1984	Италия	127	
5	SO <sub>2</sub> NO <sub>2</sub>	3	0,3	15ppb 10ppb		1ж 1а	296,17 * 297,35 448,1 449,8	0,5	10 – 60 100–300	120			60			1984	ФРГ	128	
6	H <sub>2</sub> O	6	0,1 – 0,3	3 – 10 %		5а	10246,6 * 10260,4 10303,5 9305,4 9282,4	15 – 20	40 – 50	600			22			1987	США	129	Гетеродин- ный детектор
7	SO <sub>2</sub> NO <sub>2</sub>	1,5 3	0,1 0,03	15 25 мкг/м <sup>3</sup>		1з 1в	300,05 * 299,3 448,1 446,5	10 10	2	1000			30			1987	Россия	155	
8	SO <sub>2</sub> NO <sub>2</sub>	3 6	0,015 0,015	25 15 мкг/м <sup>3</sup>		1з	300,03 * 299,33 ~ 450	5	5	400	3а		40	2		1987	Швеция	130	
9	NO <sub>2</sub>	3	0,1 – 0,3	3ppb		1в	448,1 * 446,6	10	20	6000			50			1987	Япония	156	
10	Cl <sub>2</sub>	1	0,25	170 мкг/м <sup>3</sup>		1з	308 * 298	10	2	140			30			1987	Швеция	131	
11	NO	1	0,35	3 мкг/м <sup>3</sup>		9в	226,812 * 226,824	5	3 – 5				40			1989	ФРГ	132	
12	NO <sub>2</sub> NO	1		1 0,1ppm*m		1д 1л	448,1 * 453,6 226,8 224,05	80	30 5			2	40			1989	ФРГ	133	
13	H <sub>8</sub>	1		2нг/м <sup>3</sup>		1л	253,652 * 253,66	5	5			2	40			1989	Швеция	134	
14	NO <sub>2</sub>	2	0,1			1з	448,1 * 449,9	10	5	1000 4000						1990	Нидер- ланды	135	
15	NO NO <sub>2</sub> SO <sub>2</sub>	10	0,01 – 1		д/н	1дл	225 – 440 *	100	4 – 50			1	60	3	0,2–5	1993	Швей- цария	136	
16	O <sub>3</sub> NO NO <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SO <sub>2</sub> C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	3	0,012			1з 9а	УФ – ИК	10	0,01 – 1			3	50	1		1993	Англия	137	

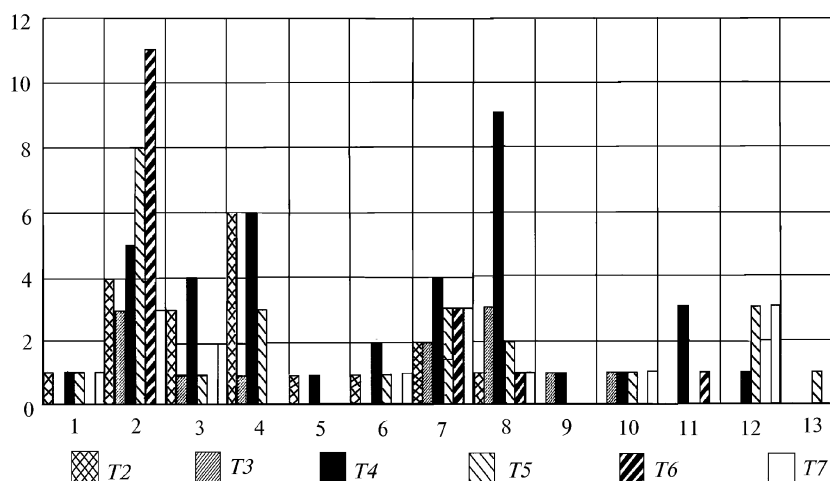


Рис. 5. Гистограммы опубликованных работ (представленных в статье) по странам. T2÷T7 – номера таблиц; 1 – Англия, 2 – США, 3 – Россия, 4 – Франция, 5 – Индия, 6 – Италия, 7 ФРГ, 8 – Япония, 9 – Израиль, 10 – Нидерланды, 11 – Канада, 12 – Швейцария, 13 – Швейцария

Таблица 8

#### Типы лазерных источников

##### 1. Лазер на красителе с накачкой:

- 1а – ламповой,
- 1б – второй гармоникой Nd:YAG,
- 1в – третьей гармоникой Nd:YAG,
- 1г – азотным лазером,
- 1д – ХеСl,
- 1е – медным лазером,
- 1ж – вторая гармоника лазера на красителе с ламповой накачкой,
- 1з – второй гармоникой Nd:YAG,
- 1и – третьей гармоникой Nd:YAG,
- 1к – азотным лазером,
- 1л – ХеСl,
- 1м – антистокс в H<sub>2</sub> от второй гармоники красителя, накачиваемого второй гармоникой Nd:YAG.

##### 2. Лазер КгF:

- 2а – лазер КгF,
- 2б – с ВКР-ячейкой на CH<sub>4</sub>,
- 2в – с ВКР-ячейкой на H<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>,
- 2г – с ВКР-ячейкой на H<sub>2</sub> и D<sub>2</sub>,
- 2д – с ВКР-ячейкой на H<sub>2</sub>, D<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>.

##### 3. Лазер ХеСl:

- 3а – лазер ХеСl,
- 3б – с ВКР-ячейкой на CH<sub>4</sub>,
- 3в – с ВКР-ячейкой на H<sub>2</sub>,
- 3г – с ВКР-ячейкой на D<sub>2</sub>,
- 3д – с ВКР-ячейкой на H<sub>2</sub> и D<sub>2</sub>,
- 3е ХеСl с излучением второй гармоники Nd:YAG,
- 3ж – ХеСl – » третьей гармоники Nd:YAG,
- 3з – ХеСl – излучением второй и третьей гармоники Nd:YAG,
- 3и – ХеСl с ВКР-ячейкой с излучением второй гармоники Nd:YAG,

##### 4. Лазер ХеF.

##### 5. CO<sub>2</sub>-лазер:

- 5а – импульсный ТЕА CO<sub>2</sub>-лазер,
- 5б – вторая гармоника.

##### 6. Параметрический генератор света с накачкой:

- 6а – первой гармоникой Nd:YAG,
- 6б – второй гармоникой Nd:YAG,

##### 7. Рубиновый лазер:

- 7а – рубиновый лазер,
- 7б – рубиновый лазер совместно с излучением лазера на красителе, накачиваемого рубиновым лазером.

##### 8. Лазер на александрите.

##### 9. Nd:YAG лазер:

- 9а – Nd:YAG лазер,

9б – четвертая гармоника с ВКР-ячейкой на  $H_2$  и  $D_2$ ,  
9в – излучение Nd:YAG, смешанное со второй гармоникой лазера на красителе, накачиваемого второй гармоникой Nd:YAG.

**10. Лазер на сапфире с титаном:**

10а – лазер на сапфире с титаном и его вторая и третья гармоники.

10б – лазер на сапфире с титаном со смешиванием с его второй и третьей гармониками.

**11. Ho:YSGG-лазер и Nd:YAG.**

**12. Co:MgF<sub>2</sub>-лазер**, накачиваемый излучением Nd:YAG.

**13. DF-лазер.**

**14. Cu-лазер.**

1. Захаров В. М., Костко О. К. Лазеры и метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 175 с.
2. Зуев В. Е. Лазер-метеоролог. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 96 с.
3. Захаров В. М., Костко О. К. Метеорологическая лазерная локация. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 203 с.
4. Лазерный контроль атмосферы / Под ред. Хинкли Э. Д. М.: Мир, 1979. 416 с.
5. Применение лазеров для определения состава атмосферы / Под ред. В. М. Захарова. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 218 с.
6. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
7. Зуев В. Е., Зуев В. В. Дистанционное оптическое зондирование атмосферы. С.-Пб.: Гидрометеиздат, 1992. 232 с.
8. Fiocco G., Smullin L. D. // Nature. 1963. V. 199.
9. Зуев В. Е., Наац И. Э. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1982. 241 с.
10. Schotland R. M. // Proc. 3th symp. on remote sensing of environment. Univ. Michig. Ann. Arbor., Michigan, 1964. P. 215–224.
11. Wright M. L., Proctor E. K., Gasiorek L. S. et al. // Final Report SKI Project 1966, contract NASA-11657, Hampton, Virginia: NASA Langley Research center, 1975.
12. Measures R. M., Pilon G. A. // Opto-Electron. 1972. V. 4. P. 141–153.
13. Byer R. L., Gurbunov M. // Appl. Opt. 1973. V. 12. N 8. P. 1496–1505.
14. Schotland R. M. // J. Appl. Meteorol. 1974. V. 13. P. 71–77.
15. Zuev V. E., Makushkin Yu. S., Marichev V. N. et al. // Appl. Opt. 1983. V. 22. N 23. P. 3733–3741.
16. Войцеховская О. К., Макушкин Ю. С., Мицель А. А. и др. // Изв. вузов. Физика, 1977. Т. 1. С. 62–70.
17. Маричев В. Н., Мицель А. А. // Изв. вузов. Физика. 1985. Т. 3. С. 47–51.
18. Маричев В. Н., Мицель А. А., Ипполитов И. И. // Спектроскопические методы зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1985. С. 4–57.
19. Ismail S., Browell E. V. // Appl. Opt. 1989. V. 28. N 17. P. 3603–3615.
20. Мицель А. А. Численное моделирование задач лазерного зондирования атмосферы методом дифференциального поглощения // Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 1982.
21. Зуев В. В., Мицель А. А., Пташник И. В. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 10. С. 1041–1049.
22. Воскобойников Ю. Е., Мицель А. А. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1981. Е17. Т. 2. С. 175–181.
23. Воскобойников Ю. Е., Катаев М. Ю., Мицель А. А. // Оптика атмосферы. 1991. Е4. Т. 2. С. 177–184.
24. Костко О. К. // Квантовая электроника. 1975. Т. 2. N 10. С. 2133–2166.
25. Kildal H., Byer R. L. // Proc. IEEE. 1971. V. 59. N12. P. 5–30.
26. Byer R. L. // Opt. and Quant. Electron. 1975. N 7. P. 147–177.
27. Derr V. E., Little C. G. // Appl. Opt. 1970. V. 9. N 9. P. 1976–1992.
28. Grant W. B. // Optical Engin. 1991. V. 30. N 1. P. 40–48.
29. Zuev V. V., Ponomarev Yu. N., Solodov A. M. et al. // Opt. Lett. 1985. V. 10. N 7. P. 318–320.
30. Korb C. L. and Weng C. Y. // Proc. eleventh ILRC, Madison. Wisc. American Meteorological Society. 1982. V. 78.
31. Ismail S., Browell E. V., Megie G. et al. // Conference Digest, Twelvth ILRC. Aixen-Provence, France. 1984. P. 431.
32. Ansmann A. // Appl. Opt. 1985. V. 24. N 21. P. 3476–3480.
33. Ismail S. and Browell E. V. // Abstracts. 13th ILRC, Toronto, Canada. 1986.
34. Lading L., Jensen A. S., Rasmussen E. et al. // Proc. conf. Ground Based Remote Sensing Techniques for the Troposphere, Hamburg, 1986. P. 31–44.
35. Bosenberg J., Ansmann A., and Linne H. // Ibid. P. 81–90.
36. Theopold F. A. and Bosenberg J. // 15th ILRC. Tomsk, 1990. P. 173–176.
37. Надеев А. И., Шелевой К. Д. // Тез. докл. 8 Всес. симп. по лазерн. и акуст. зондир. атмосферы. Томск, 1984. Ч. 2. С. 310–313.
38. Arshinov Yu. F., Bobrovnikov S. M., Zuev V. E., et al. // Proc. 12th ILRC, Aixen-Provence, France, 1984. P. 135–137.
39. Ельников А. В., Маричев В. Н., Царегородцев С. И. и др. // Труды 10 Всес. симп. по лазерн. и акуст. зондир. атмосферы. Томск, 1989. Ч. 2. С. 266–270.
40. Андреев Ю. М., Гавриловский Р. И., Зуев В. В. // Авт. свидетельство N 1595182 от 22.05.90.
41. Астафуров В. Г., Мицель А. А. // Автотметрия. 1984. N 1. С. 92–97.
42. Якимович О. Э. // Тез. докл. 13 Всес. научно-техн. конф. по высокоскор. фотогр., фотонике и метрологии быстропротек. процессов. М.: ВНИИОФИ, 1987. С. 86.
43. Тихомиров А. А. // Труды 7 Всес. Симп. по лазерн. и акуст. зондир. атмосферы. Томск, 1982. С. 173–176.
44. Метлицкий Б. И., Чаянова Э. А. // Труды ЦАО. М.: Гидрометеиздат, 1977. С. 81–89.

45. Тихомиров А. А. // Труды 6 Всес. симп. по лазерн. и акуст. зондир. атмосферы. Томск, 1980. С. 53–57.
46. Волков В. М., Дмитриев А. В., Иванько А. А., Функциональные усилители с большим динамическим диапазоном. М.: Сов.Радио, 1976. 157 с.
47. Бачериков В. В., Качайн В. Э., Макаров Ю. А. // ПТЭ. 1974. Т. 6. С. 166–168.
48. Ильин В. И., Ильин Г. И., Польский Ю. Е. // Труды 5 Всес. симп. по лазерн. и акуст. зондир. атмосферы. Томск, 1978. С. 92–95.
49. Берковский А. Г., Гаванин В. А., Зайдель И. Н. Вакуумные фотоприемные приборы. М.: Энергия, 1976. 187 с.
50. Клейнерман Л. М., Кигель Н. В., Гибайдулин Н. С. // Опт. механ. пром-ть, 1971. Т. 1. С. 63–64.
51. Барисас Л., Лейтер М. // ПНИ. 1980. Т. 1. С. 81.
52. Попов Ю. В., Уженков Б. И. // Опт. механ. пром-ть. 1976. Т. 2. С. 65–71.
53. Попов Ю. В., Уженков Б. И. // ПТЭ. 1972. Т. 2. С. 158.
54. Иванов В. И., Малевич И. А., Чайковский А. П. Многофункциональные лидарные системы. Минск: Изд-во Университетское, 1986. 166 с.
55. Asai K., Itabe T., Igarashi T. // Appl. Phys. Lett. 1979. V. 35. N 1. P. 60–62.
56. Uchino O., Tokunaga M., Maeda M. et al. // Opt. Lett. 1983. V. 8. N 7. P. 347–349.
57. Maeda M., Shibata T., Kyusshu U. // Proc. CLEO. 1988. P. 56–57.
58. Haner D. A., Kleiman M., McDermid I. S. // Proc. 15th ILRC. Russia. Tomsk, 1990. P. I. P. 195–198.
59. Carnuth W., Kempfer U., Lotz R. // Proc. 15th ILRC. Russia. Tomsk, 1990. P. I. P. 202–205.
60. Apituley A. // Report TESLAS. 1989.
61. Senff Ch., Bosenberg J., Peters G. // J. Atm. Oc. Techn., 1993.
62. Proffitt M. H., Longford O. // SPIE. 1991. N 1491. P. 2–6.
63. Zhao Y., Post M. J., Hardesty R. M. // Appl. Opt. 1990. V. 29. P. 4111–4119.
64. Uchino O., Maeda M., Hikono M. // IEEE Quant. Electr. 1979. V. QE15. N 10. P. 1094–1107.
65. Uchino O., Maeda M., Shibata T., et al. // Appl. Opt. 1980. V. 19. N. 24. P. 4175–4181.
66. Flamant P. H., Pelon J., Lefrere J., et al. // AIAA. 1982. N 88 – 0010.
67. Megie G., Pelon J., Lefrere J. et al. // Proc. Optical and Laser Remote Sensing Ed. Killinger D.K., 1983. P. 223–228.
68. Werner J., Rothe K. W., Wather H. // Appl. Phys. B. 1983. V. 32. P. 113–118.
69. Гусаров В. П., Прохоров А. П., Смирнов Н. Д. и др. // 6 Всес. симп. по лазерн. и акуст. зондир. атмосферы. 1980. Ч. 2. С. 6–8.
70. Гусаров В. П., Костко О. К., Прохоров А. П., Смирнов Н. Д. // 6 Всес. симп. по лазерн. и акуст. зондир. атмосферы. 1980. Ч. 1. С. 222–224.
71. Назаров И. М., Николаев А. Н., Фридман Ш. Д. Основы дистанционных методов мониторинга загрязнения природной среды. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 280 с.
72. Pelon J., Megie G. // Planet. Sci. 1983. V. 31. N 7. P. 717–721.
73. Murray E. R., Hake R. D., Jr. J. van de Laan, et al. // Appl. Phys. Lett. 1976. V. 28. N 9. P. 542–543.
74. Brownell E. V., Wilkerson T. D., McClirath T. J. // Appl. Opt. 1979. V. 18. N 20. P. 3474–3483.
75. Brassington D. J. // Appl. Opt. 1982. V. 21. N 24. P. 4411–4416.
76. Cahen C., Magie G., Flamant P. // Appl. Meteor. 1982. V. 21. P. 1506–1515.
77. Cahen C., Lesne J. L., Michelin J. M., et al. // NASA conf. Publ. 1982. N 2228. P. 37–40.
78. Menzies R. T., Megie G. // Proc. Optical and Laser Remote Sensing / Ed. D.K. Killinger. 1983. P. 170–175.
79. Megie G., Pelon J., Cahen C., et al. // Proc. Optical. and Laser Remote Sensing / Ed. D.K. Killinger. 1983. P. 123–128.
80. Baker P. W. // Appl. Opt. 1983. V. 22. N 15. P. 2257–2264.
81. Zuev V. V., Zuev V. E. // Proc. 12th ILRC, France, 1984. P. 165–166.
82. Grant W. B., Brothers A. M., Bogan J. R. // Appl. Opt. 1983. V. 22. P. 2690.
83. Зуев В. В., Романовский О. А. // ЖПС. 1986. Т. 34. С. 519–523.
84. Barbini R., Colao F., Polucci A. et al. // Proc. 15th ILRC. Russia, Tomsk, 1990. P. 156–159.
85. Bosenberg J., Senff C., Thro P. - Y. // Proc. 15th ILRC, Russia, Tomsk, 1990. P. II. P. 170–172.
86. Killinger D. K., Cha S. D., Chan K., et al. // Proc. 15th ILRC, Russia, Tomsk, 1990. P. II. P. 372–374.
87. Theopold F. A., Bosenberg J. // J. Atm. Oc. Technol., 1993.
88. Itabe T., Ishizu M., Aruge T. et al. // CLEO. 1987. P. 128–129.
89. Спектроскопические методы зондирования атмосферы // Под ред. И. В. Самохвалова. Новосибирск: Наука, 1985. 144 с.
90. Werner J., Rothe W., Walther H. // Conf. on Lasers and Electr. 1984. Dig. Techn. Pap. P. 74–75.
91. Megie G., Ancellent G., Pelon J. // Appl. Opt. 1985. V. 24. N 21. P. 3454–3463.
92. Сибата Т., Сэки К., Хаяма Т. и др. // Фэдза Кэйко. 1985. Т. 13. С. 276–289.
93. First Intern. Lidar Research Directory // Compiled by M.P. McCormic, NASA. 1986.
94. Shibata T., Fukuda T., Narikiyo T., et al. // Appl. Opt. 1987. V. 26. N 13. P. 2604–2608.
95. McDermid I. S. // Serv. In Geophys. 1987. V. 9. P. 107–122.
96. Second Intern. Lidar Research Directory // Compiled by M.P. McCormic, NASA, 1989.
97. El'nikov A. V., Marichev V. N., Zuev V. V. // Proc. 15th ILRC. Russia. Tomsk, 1990. P. I. P. 214–217.
98. Uchino O. // Proc. 15th ILRC. Russia. Tomsk, 1990. P. II. P. 252–255.
99. Uchino O., Tabata I. // Appl. Opt., 1991. V. 30. N 15. P. 2005–2012.
100. Carswell A. I., Pal S. R., Steinbrecht W. // Can. J. Phys. 1991. V. 69. P. 1076–1086.
101. Ulitsky A., Wang T. Y., et al. // Proc. 16th ILRC. NASA Conf. Publ. 1992. N 3158. P. 43–49.
102. Haner D. A., McDermid I. S., // IEEE Quant. Electr. QE-26. 1990. P. 1292–1298.
103. Claude H., Wandersee W. // Proc. 15th ILRC. Russia. Tomsk, 1990. P. I. P. 206–209.
104. Godin S., Megie G., Pelon J. // GRL. 1989. V. 16. N 6. P. 162–168.
105. McDermid I. S., Godin S. M., Barnes R. A., et al. // JGR. 1990. V. 95. P. 10037–10042.

106. Beniston-Rebertz M.H., Kolsh H., Rairoux P. et al. // JGR. 1990. V. 95. D7. P. 9879–9884.
107. Stefannutti L., Morandi M., Guasta D. // JGR. 1991. V. 96. N 12. P. 975.
108. Swart D.P., Spakman J. // RIVM Report N. 850024001, 1992.
109. Uohino O., Fujimoto T. // J. Geomagn. Geoelectr., 1992. V. 44. P. 19–25.
110. Ельников А.В., Зуев В.В., Маричев В.Н. и др. // Оптика атмосферы и океана. Т. 5. N 6. С. 576–587.
111. Grant W.B., Hake R.D., Liston E.M., et al. // Appl. Phys. Lett. 1974. V. 24. N 11. P. 550.
112. Grant W.B., Hake R.D. // Appl. Phys. 1975. V. 46. N 7. P. 3019–3023.
113. Fredriksson K., Galle B., Nystrom K., et al. // Appl. Opt. 1979. V. 18. N 17. P. 2998–3003.
114. Adrain R.S., Brassington D.J., Sutton S. et al. // Optical and Quant. Electr. 1979. N 11. P. 253–264.
115. Menyuk N., Killinger D.K., DeFeo W.E. // Appl. Opt. 1982. V. 21. N 12. P. 2275–2286.
116. Rothe K.W. // The Radio and Electr. Engineer. 1980. V. 50. P. 567–574.
117. Fredriksson K., Svanberg S. // Optical and Remote Sensing / Ed. E.K. Killinger. 1983. P. 148–155.
118. Capitini R., Ancelent G., Megie G., et al. // 12th ILRC. France, 1984. P. 269–273.
119. Heinridi H.J., Weitkamp C., Banmgard R., et al. // Proc. IGARSS. 1984. P. 679–684.
120. Schwemmer G.K., Korb C.L., Dombrowski M., et al. // Proc. IGARSS, 1984. P. 512–516.
121. Кубышкин А.П., Кузнецов В.И., Мигулин А.В. и др. // Изв. АН СССР. Сер. Физич. 1987. Т. 51. С. 219–223.
122. Menyuk N., Killinger D.K. // Appl. Opt. 1987. V. 26. N 15. P. 3061–3065.
123. Swart D.P.J., Bergwerf J.B. // Proc. 15th ILRC. Russia. Tomsk, 1990. P. II. P. 80–83.
124. Shibata T., Maeda M., et al. // J. Geomagn. Geoelectr. 1989. V. 41. P. 303–316.
125. Cha S., Chan K.P., Killinger D.K. // Appl. Opt. 1991. V. 30. P. 3938.
126. Kolsh H., Rairoux P., Wolf J.P., et al. // Appl. Opt., 1989. V. 28. P. 2052–2056.
127. Hawley J.G. // Laser Focus. 1981. March. P. 60.
128. Hawley J.G., Uthe E.E. // Proc. Conf. Remote Sensing and the Atmosph. 1984. Dec. P. 193–201.
129. Вайнер Ю.Г., Малявин И.П., Титов В.Д. // XIX съезд по спектроскопии. Томск, 1983. Ч. 6. С. 129–131.
130. Marzorati A., Cario W., Zanzotter E. // 12th ILRC. France, 1984. P. 259–262.
131. Lahman W., Staehr W., Weitkamp C., et al. // Proc. IGARSS, 1984. P. 685–688.
132. Grant W.B., Margolis J.S., Brothers A.M., et al. // Appl. Opt. 1987. V. 26. N 15. P. 3033–3042.
133. Edner H., Fredriksson K., Sunesson A., et al. // Appl. Opt. 1987. V. 26. N 16. P. 4330–4338.
134. Сугимото Н., Мацун М., Сасано Я. // Кокурицу Кочай Кэико Хококу. 1987. N 107. С. 31–48.
135. Edner H., Fredriksson K., Sunesson A., et al. // Appl. Opt. 1987. V. 26. P. 3183–3185.
136. Edner H., Sunesson A., Svanberg S. // Appl. Opt. 1988. V. 27. N 9. P. 704–706.
137. Kolsh H.J., Rairoux P., Wolf J.P., et al. // Appl. Opt. 1989. V. 28. N 11. P. 2052–2056.
138. Edner H., Rairoux P., Wolf J.P., et al. // Appl. Opt. 1989. V. 28. P. 921–930.
139. Sunesson J.A., Swart D.P.J. // Proc. 15th ILRC. Russia. Tomsk, 1990. P. 270–272.
140. Clerioeff A., Calpini B. et al. // Proc. Int. Symp. on Envir. Sensing. Berlin. Germany, 1992. P. 343–344.
141. Milton M.J.T., Woods P.T., et al. // Appl. Phys. 1992. B55. P. 41–45.
142. Heps W.S., McGee T.J. // Proc. Optical. and Laser Remote Sensing / Ed. D.K. Killinger, 1983. P. 167–169.
143. Browell E.V., Carter A.F., Shipley S.T., et al. // Appl. Opt. 1983. V. 22. N 4. P. 522–534.
144. Itabe T., Asai K., Ishizu M., et al. // Appl. Opt. 1989. V. 28. N 5. P. 931–934.
145. Browell E.V. // Optics & Photonics News, 1991. N 10. P. 8–11.
146. Nilsen N.B., Uthe E., Livingston J.M. // Proc. Int. Conf. LASERS, 1991. P. 215–214.
147. Hoff R.M., Miokle R.E., Froude F.A. // ASAE transact. 1989. V. 32. P. 1523–1528.
148. Browell E.V. // Proc. IEEE. 1989. V. 77. P. 419–432.
149. Browell E.V., Shipley S.T., Carter A.F., et al. // Proc. NASA. Conf. Publ. 1982. N 2288. P. 6099.
150. Diebel D., Bristow M., Zimmerman R. // Appl. Opt. 1991. V 30. P. 626.
151. Carter A.F., Browell E.V., Butler C.F. // Proc. NASA Conf. Publ. 1982. N 2288. P. 34–36.
152. Wiesemann W., Beck R., Englisch W., et al. // Appl. Opt. 1978. V. 15. P. 257–260.
153. Ehret G., Renger W., Schmitz-Pfieber A. // Proc. NCAR. NOAA. AMS. Boulder, USA, 1988. P. 193–195.
154. Killinger D.K., Menyuk N. // IEEE Quant. Electr. 1981. V. QE-17. N 9. P. 1917–1929.
155. Megie G., Flamant P., Bourdef M., et al. // Proc. ESA Workshop on Space Laser Appl. and Techn. 1984. SP-202. P. 189–195.
156. Vaughan W.R., Browell E.V., Hall W.M. // Proc. 15th ILRC. Russia. Tomsk, P. II. 1990. P. 409–412.
157. Ельников А.В., Зуев В.В., Катаев М.Ю. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 6. С. 576–587.
158. Zuev V.V., Bondarenko S.L., Burlakov V.D., et al. // Proc. 17th ILRC. 1994. Sendai. Japan. P. 229–230.
159. Cahen C., Megie G. // JQSRT. 1981. V. 25. P. 151.
160. Fredriksson K., Hertz H. // NASA Conf. Public. 1982. N 2288. P. 47.
161. Werner J., Rothe K.W., Walther H. // Appl. Phys. 1983. V. 32. P. 113–118.

Институт оптики атмосферы СО РАН,  
Томск

Поступила в редакцию  
13 февраля 1995 г.

V.V. Zuev, M.Yu. Kataev, M.M. Makogon, A.A. Mitsel. **Lidar Method of Differential Absorption. Current Status of Research.**

The investigation results on the differential absorption method application to remote sounding of atmospheric and polluting gases obtained by various researching collectives are summarized in the paper. The information on the lidar systems for the past two decades is presented.