

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 681.742:535.361:621.396

Ю.Д. Копытин, В.В. Носов, Л.К. Чистякова

ТЕХНОЛОГИИ ИНСПЕКТИРОВАНИЯ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ И ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ

Представлен краткий обзор полученных авторами новых результатов в области развития технологий мониторинга оптических аномалий приземной атмосферы, обусловленных микрогеохимическими условиями и индустриальными выбросами промышленных объектов.

Введение

В лаборатории нелинейно-оптической диагностики ИОА СО РАН разработаны оригинальные методики и макеты аппаратуры для целей дистанционного определения ингредиентов аэрозольно-газового выброса промышленного объекта, которые могут быть использованы применительно к различным задачам, в том числе контролю микроклиматических аномалий, обусловленных как естественным, так и антропогенным происхождением. Разработанные в рамках метода пассивной корреляционной спектроскопии образцы аппаратуры дистанционных индикаторов выбросов (ДИВ), а также соответствующие методики дистанционных атмосферных измерений и статистической фильтрации изображений газовых аномалий на фоне подстилающей поверхности представляют интерес вследствие своей оперативности, простоты исполнения и надежности. Когерентно-оптический метод восстановления функции распределения частиц по размерам из анализа спекл-структуры рассеянного излучения на срезе трубы промышленного объекта позволяет осуществлять дистанционный контроль загрязнений атмосферы в реальном масштабе времени. В приложении к проблеме контроля ядерной активности представляет интерес аппаратура дистанционной пассивной микроволновой радиометрии атомарного водорода в шлейфе атмосферного выброса радиохимических заводов. Для целей диагностики аэрозольных (гидрозольных) стратификаций методом многоуглового зондирования, а также регистрации слабых эмиссий использован растровый атмосферно-гидрооптический лидар. Методики одноволновых измерений регулярной и случайной оптической рефракции, а также многоцелевая интерактивная компьютерная система определения атмосферных поправок, разработанные на основе радиофизического подхода, представляют интерес при оценке эффективности работы лазерных оптико-электронных систем для различных оптико-микроклиматических состояний приземной атмосферы.

1. Техника пассивной корреляционной спектроскопии аэрозольно-газовых аномалий и факелов выбросов предприятий

Пассивная корреляционная спектроскопия, которая основана на использовании «газовых» фильтров, позволяющих селективно с высоким разрешением полосы молекулярного поглощения искомого газа на фоне «букета» перекрывающихся линий и полос других газов [1–3, 23], используется в основе предложенной авторами методики измерений, которая учитывает: метеорологическую дальность видимости в атмосфере, содержание аэрозольных частиц в шлейфе выброса, азимут визирования шлейфа по отношению к направлению на локальный источник излучения или распределенной подсветки дневного неба, а также определенную из оптических измерений скорость истечения аэрозольно-газового потока из устья трубы промышленного предприятия.

Статистический подход к обнаружению и оценке параметров газовой аномалии позволяет определять средние значения и дисперсию оптической толщи аномалии, радиус корреляции, пространственный частотный спектр и среднюю площадь участков, имеющих одинаковую оптическую толщину.

Дистанционный индикатор выбросов создан в двух модификациях, работающих в ближней УФ- (0,3–0,4 мкм) и ИК- (3–4,5 мкм) областях спектра соответственно. Дальность зондирования – до 5000 м; диапазон измерений объемных концентраций составляет $10^{-4}/D - 10^{-5}/D$, где D , м – диаметр факела. Первоочередные определяемые газы – NO_2 , NO , SO_2 , J_2 , H_2S , CH_4 . Управление процессом измерений, обработка и отображение на экране монитора осуществляются ПЭВМ в реальном масштабе времени. На первую из указанных модификаций – газоаналитический прибор «ДИВ-1» – имеется государственный сертификат ВНИИ им. Д.И.Менделеева (N 2421/902-92/2999). Получены экспериментальные данные о распространении аэрозольно-газовых выбросов для различных типов промышленных аномалий в приземной атмосфере.

Идея корреляционной спектроскопии с «газовым» корреляционным фильтром основана на включении в один из каналов прибора кюветы с тем же газом (или «букетом» газов), который подлежит определению в атмосфере (рис. 1,а). Коэффициент пропускания $\langle T_c \rangle$ кюветы в полосе пропускания Δ фильтра 3 имеет вид [4]: $\langle T_c \rangle = \int_{\Delta} u(\omega) T_c(\omega) d\omega \left[\int_{\Delta} u(\omega) d\omega \right]^{-1}$, где $u(\omega)$ – спектральная интенсивность излучения подсветки; $T_c(\omega)$ – функция спектральной прозрачности поглощающего газа. При отсутствии атмосферной аномалии пропускание корреляционного $\langle T_c \rangle$ (см. рис. 1,а, 6, 7, 9) и опорного $T_{\text{оп}}$ (5, 8) каналов калибруют, добиваясь равенства $T_{\text{оп}} = \langle T_c \rangle$.

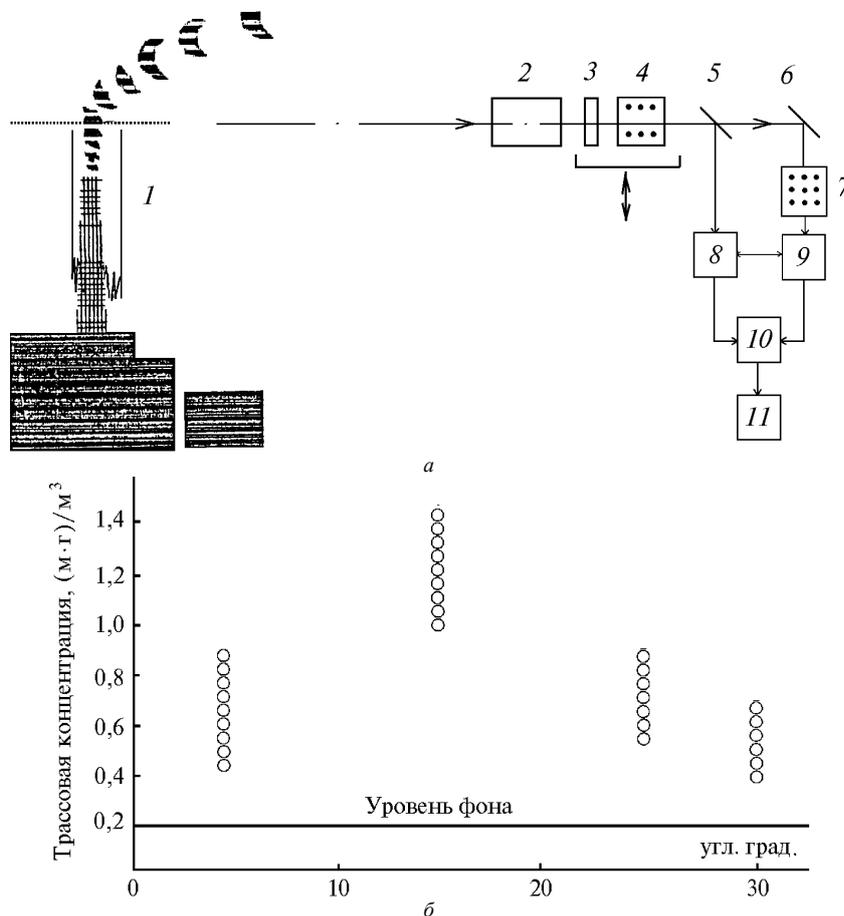


Рис. 1. Блок-схема и пример дистанционных азимутальных измерений NO_2 в факеле выброса технического углерода дистанционным индикатором выбросов. а: 1 – денситограмма оптической толщи поглощения NO_2 в области 0,3–0,4 мкм; 2 – кварцевый объектив; 3 – интерференционный фильтр; 4 – блок съемных калибровочных кювет; 5, 6 – полупрозрачные пластины; 7 – корреляционный газовый фильтр; 8, 9 – фотоприемники с усилителями; 10, 11 – электронные блоки обработки и отображения информации; б – пример дистанционных измерений (1 км) азимутальной зависимости трассовой концентрации NO_2 в факеле выброса в направлении, перпендикулярном скорости ветра

В присутствии внешнего спектрального пропускания – $T_g(\omega)$ корреляционный канал реагирует на суммарное пропускание вида $\langle T_c \cdot T_g \rangle$, а опорный канал на функцию $\langle T_g \rangle T_{\text{оп}}$.

Тогда разностный сигнал по двум каналам, нормированный на их сумму, определяется соотношением

$$A_g = \frac{\langle T_c \cdot T_g \rangle - \langle T_c \rangle \langle T_g \rangle}{\langle T_c \cdot T_g \rangle + \langle T_c \rangle \langle T_g \rangle} \quad (1)$$

В практически важном случае при одновременном выполнении условий $\langle T_g \rangle / \langle T_c \rangle \gg 1$ и $\langle T_g \rangle \rightarrow 1$ получаем $A_g \approx 1 - \langle T_g \rangle$.

В условиях реальной атмосферы в процессе измерений необходимо преодолевать трудности, связанные с разделением прямого проходящего излучения и бокового светорассеяния в аэрозольном факеле выброса, а также с проблемой учета метеорологических факторов [2]. Рис. 1 иллюстрирует блок-схему (а) и пример (б) дистанционных измерений содержания NO_2 вдоль факела выброса промобъекта.

Следует отметить, что разработанные методики и образцы аппаратуры пассивных корреляционных радиометров [1, 2, 4] для видимой и ИК-областей спектра принципиально позволяют по соотношениям концентраций ингредиентов в «букете» выбросов осуществлять мониторинг и идентификацию различных по экологической опасности производств, например радиохимического завода и тепловой электростанции.

2. Пассивная радиометрия атомарного водорода над ядерным объектом

В ИОА СО РАН совместно с Томским госуниверситетом и Сибирским физико-техническим институтом разработан и экспериментально апробирован макет аппаратуры экологического контроля выбросов перерабатывающих предприятий ядерного цикла на основе детектирования излучения атомарного водорода (длина волны 21,1 см), который образуется вследствие взаимодействия радиоактивных элементов с атмосферными газами. Идея метода изложена в [5], и его дальнейшее развитие представлено соответственно в [6, 7].

Наличие радиоактивных изотопов в выбросах в атмосферу является характерной особенностью предприятий по переработке ядерного топлива. Анализ, проведенный в [6, 8] по выбросам предприятий ядерного цикла, работающих по замкнутой схеме, показал, что изотоп $^{85}\text{Kг}$ является наиболее значительным из выбрасываемых радиоактивных элементов. В работе [6] проведены оценки концентрации выбросов $^{85}\text{Kг}$ и показано, что для радиохимического завода производительностью 1500 т в год, годовой выброс которого составляет $1,6 \cdot 10^7$ Ки, радиоактивность каждого кубического метра выброса равна $6 \cdot 10^8$ Бк.

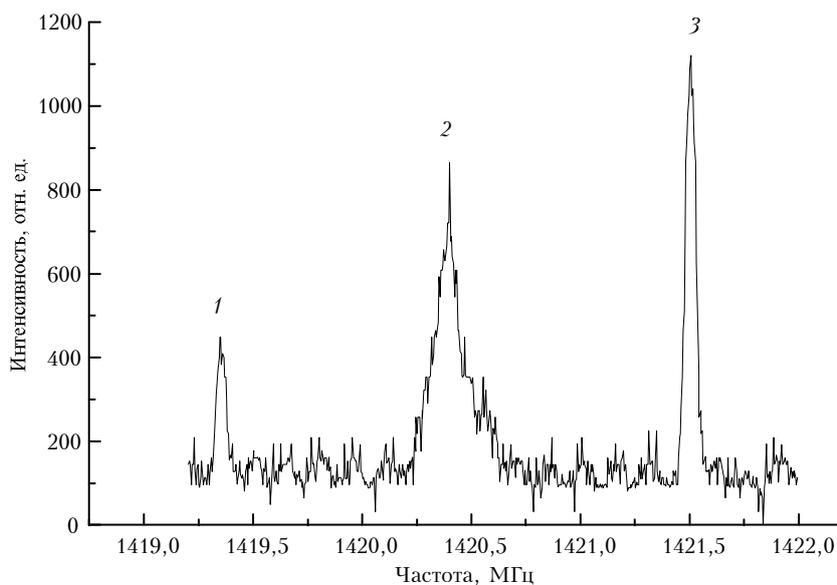


Рис. 2. Оциллограмма принимаемого сигнала: 1, 3 – частотные метки на частотах 1419,348 и 1421,505 МГц; 2 – сигнал от шлейфа

В процессе распространения шлейфа радиационному облучению будут подвергаться большие объемы атмосферного воздуха (до 10 км^3), занимаемые шлейфом и непосредственно прилегающие к нему. Проведенные в [6] оценки показывают, что концентрация атомарного водорода в области шлейфа выброса должна быть повышенной и может составлять $\sim 10^{-16}$ Вт. Мощность шумовых излучений на данной частоте с учетом атмосферного ослабления составляет 10^{-19} Вт. Использование высокочувствительных приемников позволяет уверенно регистрировать наличие атомарного водорода как индикатора радионуклидов в выбросах радиохимических заводов.

На рис. 2 представлен пример спектра, зарегистрированного в направлении, соответствующем максимуму излучения и совпадающему с направлением на радиохимический завод [7].

Результаты экспериментов показали принципиальную возможность метода регистрации излучения атомарного водорода в шлейфе атмосферных выбросов ядерно-перерабатывающих предприятий и хорошо укладываются в рамки модели, описанной в [6]. Таким образом, рассматриваемый макет аппаратуры представляется перспективным для практического применения при экологическом мониторинге деятельности ядерно-перерабатывающих предприятий, а высокая чувствительность метода дает возможность регистрировать объекты на больших расстояниях.

3. Когерентно-оптический метод измерения микроструктуры аэрозольных частиц в турбулентной атмосфере

Предложен и развит когерентный оптический метод измерения функции распределения аэрозольных частиц по размерам [9], который основан на статистической пространственной фильтрации флуктуаций оптического изображения частиц в приемной системе.

Источник подсвета частиц (когерентный или некогерентный) может располагаться как по одну, так и по другую сторону от потока, реализуя схемы подсвета «на отражение» или «на просвет». Возможен также вариант использования собственного свечения частиц, например при нагреве мощным лазерным излучением. Предполагается, что частицы взвешены в разреженных газовых (например, в атмосфере) или жидкостных потоках и в случае когерентного подсвета обладают в основном незеркальным отражением оптических волн. Размер частиц должен превышать максимальную длину волны излучения подсвета.

Изображение в приемнике расщепляется на ряд каналов, в каждом из которых осуществляется разночастотная фазовая модуляция излучения. Последнее достигается применением, например, дифракционных решеток с разными периодами [10]. Можно использовать и один канал, в котором излучение проходит через одну дифракционную решетку с переменным периодом. Для каждого периода решетки измеряется временная корреляционная функция флуктуаций оптического потока $P(\tau, \xi)$ (отраженного от частиц – для схемы «на отражение» или прошедшего через поток – для схемы «на просвет»), попадающего в приемный телескоп:

$$B_p(\tau, \xi_1, \xi_2) = \langle P(t_1, \xi_1) P(t_2, \xi_2) \rangle - \langle P(t_1, \xi_1) \rangle \langle P(t_2, \xi_2) \rangle,$$

где $\tau = t_2 - t_1$ – временной сдвиг между двумя моментами наблюдения t_1, t_2 ; ξ_1, ξ_2 – пространственные частоты дифракционных решеток, соответствующие периодам $d_1 = 2\pi/\xi_1, d_2 = 2\pi/\xi_2$. С применением пространственного коэффициента корреляции оптического потока $b_p(0, \xi, \xi) = B_p(0, \xi, \xi)/B_p(0, 0, 0)$ в [9] получены следующие выражения для восстановления функции распределения частиц по размерам $P_r(a)$, где a – радиус частиц:

$$S_4(X)/S_4(0) = \varphi(z \sqrt{2X}/F_0), \quad X = 2 \left[\frac{\pi F_0}{z d} \right]^2, \quad d = \frac{2\pi}{\xi}, \quad S_4(X) = \int_0^\infty P_r(a) a^4 \exp(-X a^2) da, \quad (2)$$

$$\varphi(\xi) = \begin{cases} 2(4b_p(0, \xi, \xi) - 1) \exp(2(a_0 \xi/2)^2), & \xi > 2/a_p, \\ 2b_p(0, \xi, \xi) - 1, & \xi < 2/a_p, \end{cases}$$

в которых z – длина оптической трассы; F_0 – расстояние от плоскости входной линзы приемного телескопа до квадратичного фотодетектора, имеющего радиус a_p ; a_0 – радиус изображения точечного источника в плоскости F_0 .

Как видно из (2), функции распределения по размерам восстанавливаются обратным преобразованием Лапласа от коэффициента корреляции принимаемого фотопотока (константа $S_4(0)$ находится из условия нормировки).

Для аэрозольных частиц индустриального происхождения (например, на срезах дымовых труб промышленных объектов) функция распределения по размерам достаточно хорошо описывается логнормальным распределением [11], поэтому все расчетные соотношения приведены к форме нахождения неизвестных параметров этого распределения (дисперсии и среднего значения) – по заданной выборке значений временной корреляционной функции пространственно-модулированного оптического потока, принимаемого фотоприемником. Численным анализом подтверждена устойчивость восстановления статистических характеристик размера аэрозольных частиц.

Показано, что методом [9] можно дополнительно дистанционно измерять скорость движения частиц в газовых потоках и, следовательно, скорость ветра в атмосфере.

4. Когерентная лазерная рефрактометрия атмосферных аномалий

Атмосферно-геохимические, микроклиматические и техногенные аномалии приземной атмосферы часто приводят к регулярным изменениям показателя преломления. В этой связи их инспектирование возможно по измерениям рефракционных искажений траектории распространения оптических волн в атмосфере.

Возникновение случайной и регулярной аномальной оптической рефракции может служить индикатором турбулентных течений в приземной атмосфере, возникающих, например, при разгерметизации нефтегазопроводов и тепловых сетей, пожарах, техногенных выбросах промышленных объектов.

При угловых измерениях турбулентного уширения углового спектра волны будет возникать поправка, обусловленная регулярной рефракцией. Существующая теория оптической регулярной рефракции использует приближение геометрической оптики [12, 13], которое накладывает ограничения на длину трассы распространения и требует предварительной информации о дисперсионных свойствах рефракционной среды, что эквивалентно необходимости применения оптического излучения с несколькими длинами волн. В рамках радиофизического подхода теоретически [14, 15], а затем экспериментально [15, 16] доказано, что дифракционные свойства принимаемого излучения могут оказать существенное влияние на измеряемый угол рефракции в фазочувствительной приемно-регистрирующей системе.

Авторами на основе радиофизического подхода к проблеме атмосферной оптической рефракции, использующего когерентные лазерные эффекты в плоской и сферических волнах, предложены и разработаны до уровня инженерных методик способы определения углов рефракции из одноволновых оптических измерений. Разработан прецизионный адаптивный лазерный измеритель регулярной и случайной оптической рефракции [10, 17–19].

Искажение траектории пучка удобно характеризовать следующими углами: угол полной геодезической рефракции σ , определяемый углом пересечения касательных к траектории пучка в точках излучения и приема; углы рефракции в точке излучения \mathbf{r}_{12} и приема \mathbf{r}_{21} , определяемые углами между прямой, соединяющей точки излучения и приема, и соответствующими касательными к криволинейной траектории, при этом $\sigma = \mathbf{r}_{12} + \mathbf{r}_{21}$. Определение угла σ практически осуществляется путем одновременного измерения зенитных углов Θ_{12} и Θ_{21} , тогда $\sigma = \pi - (\Theta_{12} + \Theta_{21})$.

В основе методики измерений углов регулярной рефракции \mathbf{r}_{12} , \mathbf{r}_{21} :

$$\mathbf{r}_{12} = \frac{z}{2} \int_0^1 (1 - \xi) [\nabla_{\mathbf{p}} v(\xi, \mathbf{p})]_{\mathbf{p}=0} d\xi; \quad \mathbf{r}_{21} = \frac{z}{2} \int_0^1 \xi [\nabla_{\mathbf{p}} v(\xi, \mathbf{p})]_{\mathbf{p}=0} d\xi,$$

где z – длина оптической трассы; $\mathbf{p} = (x, y)$ – вектор поперечных координат; $[\nabla_{\mathbf{p}} v(\xi, \mathbf{p})]_{\mathbf{p}=0}$ – поперечный градиент диэлектрической проницаемости, лежит соотношение [18]:

$$\alpha_i = \mathbf{r}_{21} - \frac{\mathbf{p}}{z} + R(z) \left(\mathbf{r}_{12} + \frac{\mathbf{p}}{z} + \alpha \right); \quad (3)$$

$$R(z) = \frac{1 - \frac{z}{F} + \frac{a_l^2}{a^2} \left[1 + \frac{z}{l} - \frac{z}{F_l} \right]}{\left[1 - \frac{z}{F} \right]^2 + \frac{z^2}{k^2 a^4} \left[1 + \frac{a^2}{\rho_k^2} \right] + \frac{a_l^2}{a^2}}.$$

Здесь α_l – угол рефракции в приемнике; α – угол наклона оси лазерного источника по отношению к оптической оси приемника; F , $k = 2\pi/\lambda$, a , ρ_k , \mathbf{p} – параметры лазерного источника соответственно: радиус кривизны фазового фронта на излучающей апертуре, волновое число, радиус излучающей апертуры, радиус когерентности, поперечный вектор расстояния до центра лазерного источника от оптической оси приемника; a_l , l , F_l – параметры приемника соответственно: радиус входной апертуры, расстояние от центра входной линзы до плоскости анализа изображения, фокусное расстояние.

Равенство (3) связывает измеренный в атмосфере после усреднения турбулентных флуктуаций угол рефракции в приемнике α_l , известный из калибровки источника и приемника угол α и три неизвестные векторные величины \mathbf{p} , \mathbf{r}_{12} , \mathbf{r}_{21} . Разбивая оптическую трассу на участки с однородной подстилающей поверхностью (над ровной поверхностью, например над морем, длина таких участков может достигать десятка километров), на которых поперечный градиент диэлектрической проницаемости можно считать постоянной величиной, значение угла \mathbf{r}_{12} на каждом участке можно выразить через \mathbf{r}_{21} .

Для отыскания неизвестных ρ и \mathbf{r}_{21} из (3) строится система двух векторных уравнений, отличающихся величиной параметра R . При этом существенно различные значения R получаются, когда одним лазерным пучком последовательно формируется плоская ($R = 1$) и сферическая ($R = 0$) волны.

Ниже дается краткая характеристика адаптивного лазерного устройства для экспресс-измерений регулярной и случайной оптической рефракции «ЛИРА» [17–19].

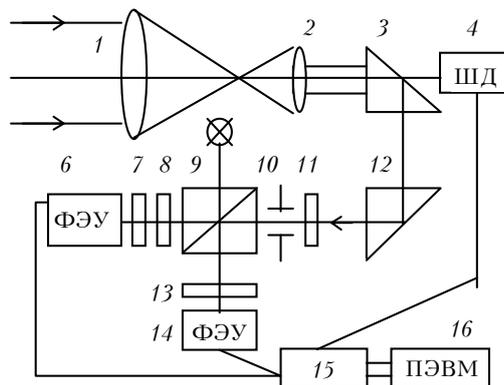


Рис. 3. Блок-схема адаптивного лазерного рефрактометра «ЛИРА». 1 – объектив; 2 – окуляр; 3 – призма сервопривода; 4 – шаговый двигатель сервопривода; 5 – юстировочная лампа; 6, 14 – фотоэлектронный умножитель; 7, 13 – светорассеиватель; 8 – оптический анализатор изображения; 9 – светорасщепитель; 10 – диафрагма угла зрения; 11 – светофильтр; 12 – призма; 15 – контроллер измерителя; 16 – диалого-вычислительный комплекс

Прибор (рис. 3) состоит из оптического тракта безаберрационного телескопа, блока фотометрической регистрации, прецизионного поворотного устройства, блока обработки и управления на базе вычислительного комплекса с микроЭВМ, выносного блока одномодового лазерного передатчика с теодолитом 2Т2.

Работа измерителя основана на мгновенном определении угла рефракции посредством измерения энергетического центра тяжести изображения удаленного источника (путем реализации измерителем математического выражения для энергетического центра тяжести). Измерения производятся с частотой до 1000 Гц. При этом угол зрения составляет 100 угл. с. Для расширения вертикального угла поля зрения до 2,0 угл. град. использован управляемый от ЭВМ сервопривод с шаговым двигателем. Сервопривод каждые 100 с корректирует положение изображения источника излучения на оптическую ось приемной оптической системы: на угол коррекции, равный среднему отклонению центра тяжести изображения за 100 с. Отображение информации осуществляется на экране монитора и ЦПУ.

Диапазон измерений средней угловой рефракции 0,2–200 угл. с. Погрешность измерений 0,2 угл. с. Диапазон измерений относительной дисперсии угловой рефракции 0,1 – 1,0 угл. с. Протяженность атмосферной трассы 0,5 – 30 км. Длина волны лазерного источника 0,63 мкм. В приборе могут применяться лазерные источники с другими длинами волн.

5. Растровый атмосферно-гидрооптический лидар

В работах [4, 20–23] реализована идея многоцелевого светосильного лидара для регистрации слабой эмиссии ночного неба и верхнего слоя океана на основе растрового дифракционного спектрометра. Для целей диагностики плоских рассеивающих слоев в надводной атмосфере и верхнем слое океана в лидаре использован метод многоуглового зондирования – без априорного задания лидарного отношения светорассеяния.

На рис. 4 представлена блок-схема лидара. Лидар установлен в передвижной кабине. В качестве источника мощного зондирующего излучения используется серийный импульсный лазер типа ЛТИ с модуляцией добротности резонатора и удвоением частоты излучения (блоки 3, 4). Длина волны на выходе системы 532 нм, длительность в импульсе 15 нс; частота повторения до 12,5 Гц; средняя мощность генерации до 1 Вт. Излучение лазера через коллиматор 2 и систему поворотных зеркал 1, 5, 6 направляется в атмосферу или на поверхность моря на дальность фокусируется приемным телескопом Кассегрена 7 с диаметром большого зеркала 500 мм на входную щель растрового двойного монохроматора 11 или блок фотоэлектронных умножителей ФЭУ 10. Регистрация спектра принимаемого излучения на выходе монохроматора осуществляется на ФЭУ 13.

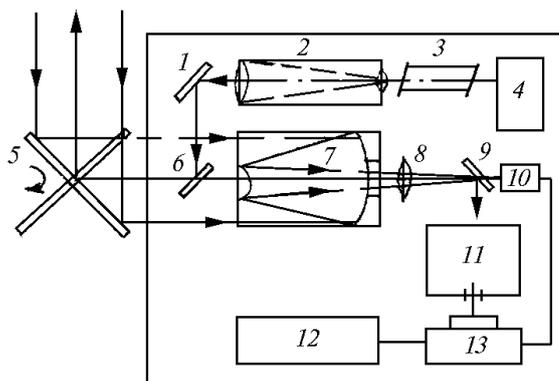


Рис. 4. Блок-схема растрового атмосферно-оптического лидара. 1, 2, 5, 6, 7, 8, 9 – элементы оптики; 3, 4 – лазерный источник; 10, 13 – блоки ФЭУ; 11 – растровый монохроматор; 12 – ПЭВМ

Для повышения светосилы (до 10 раз) в лидаре используется двойной растровый монохроматор [4]. Сущность растровой фильтрации заключается в том, что излучение одного и того же узкого спектрального интервала проводится через монохроматор по нескольким (N) различным, но близким оптическим путям и выводится затем на один приемник излучения. Для этого в серийном двойном монохроматоре со сложением дисперсии все три его одиночные щели заменяются на многощелевые растры, причем структура их такова, что аппаратная функция имеет вид и полуширину аппаратной функции однощелевого раstra, а светосила возрастает пропорционально количеству N щелей в растрах, которые содержали по 10 щелей.

Прием лидарных эхосигналов блоком 10 предусмотрен в токовом и счетно-фотонном режимах стробирования с тактовой частотой до 50 МГц.

Многоугловая методика лидарного зондирования [20] оптической толщины $\tau(h_k)$ плоских аэрозольных (гидрозольных) слоев на высоте (глубине) h_k основана на следующем соотношении, которое вытекает из лидарного уравнения:

$$d[\ln S(h_k, \psi)]/d\psi = -2 \tau(h_k),$$

где $\psi = \sec(\gamma)$, γ – зенитный угол зондирования аэрозольного слоя; $S(h_k, \psi) = u h_k^2 \psi^2 / C_0$, где u – амплитуда измеряемого локационного сигнала от слоя Δ ; $h_k = h_{k+1} - h_k$; C_0 – аппаратная константа лидара.

Известно, что задача дифференцирования случайной функции эмпирического лидарного сигнала в общем случае является некорректной и требует применения регуляризирующих алгоритмов. В методике использовался регуляризирующий алгоритм вида

$$\tau_a(h_k) = -0,5 d[\ln S^{(a)}(h_k, \psi)]/d\psi; \quad S^{(a)}(h_k, \psi) = S(h_k, \psi_a) + \int_{\psi_a}^{\psi} \mu(h_k, \psi') d\psi',$$

где $\mu(h_k, \psi) = d[\ln S^{(a)}(h_k, \psi)]/d\psi$ – регуляризованное значение логарифмической производной лидарного эхосигнала по ψ при выбранном подгоночном параметре «а».

При этом задача фильтрации регулярной составляющей дифференцируемого сигнала на фоне случайных помех сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма первого рода по методу сглаживающего функционала Тихонова [24].

На рис. 5 показаны примеры регистрации нормированных на величину квадрата дальности h^2 уровней лидарных сигналов из атмосферы и из приповерхностного слоя морской воды, соответственно, для различных углов между осью пучка и нормалью к поверхности воды для экспериментов в атмосфере, а также между нормалью и углом падения минус $\pi/2$ для экспериментов в морской воде.

Пики лидарного сигнала на рис. 5 (правые при $(\gamma - \pi/2) = 35$ и 45 угл. град.) идентифицированы как отражение от морского дна с глубиной $h = 25$ м. Обработка сигналов флуктуационной составляющей бликов морской поверхности позволяет определять спектры морского волнения в области частот энергонесущих и микрокапиллярных волн.

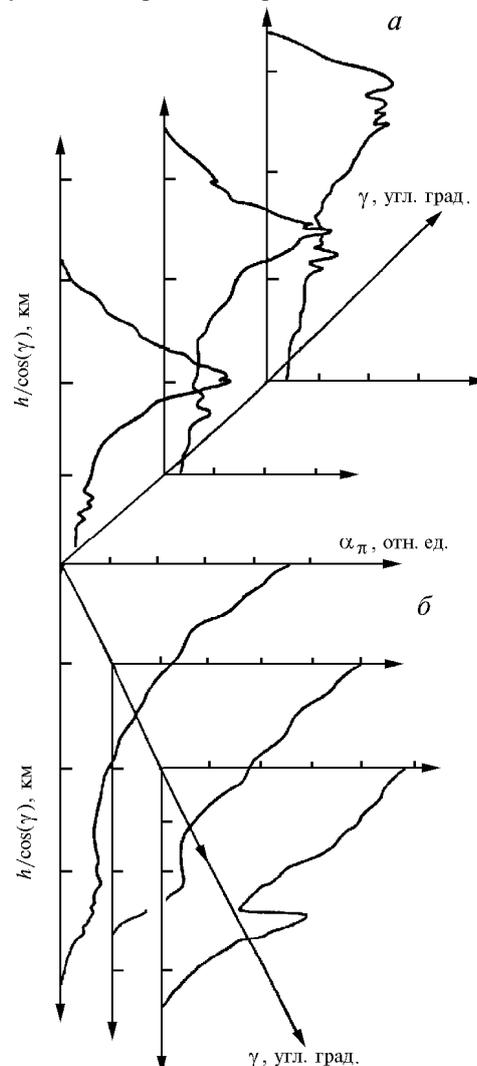


Рис. 5. Нормированные гистограммы лидарных эхосигналов при многоугловом зондировании атмосферы (а) и морской воды (б)

Результаты интерпретации лидарных сигналов по изложенной выше методике зондирования приведены на рис. 6. Максимум коэффициента рассеяния лазерного излучения в атмосфере на высоте $h = 400$ м обусловлен аэрозольным слоем.

Использование растрового монохроматора обеспечивает в пассивном режиме скоростную регистрацию спектров эмиссии ночной атмосферы (рис. 7). Уверенно регистрируются линии атомарных водорода и натрия с высот $h = 80 \div 100$ км. Возможности идентификации спектров флюоресценции и концентрации растворов морской соли с использованием в качестве репера линии рамановского рассеяния воды иллюстрируются рис. 8 [25].

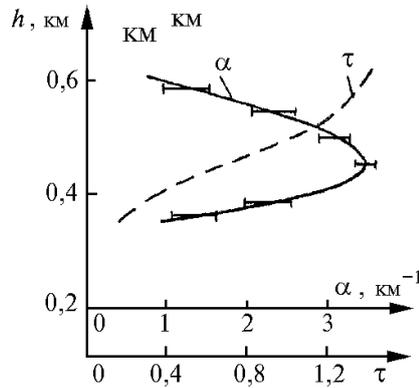


Рис. 6. Восстановление по результатам многоуглового зондирования профиля коэффициента ослабления (α) и оптической толщи (τ) аэрозольной стратификации

Разработанный лидар использовался в экспедиционных условиях для атмосферно-гидрооптических исследований в прибрежной зоне Черного моря (п. Качивели) совместно с Морским гидрофизическим институтом АН Украины [20]. В заключение отметим, что потенциал лидара позволяет использовать его в качестве станции подспутникового зондирования для географической калибровки результатов фотометрических измерений со спутников типа NOAA, «Метеор» и др., а также лидарных экспериментов с аэрокосмической платформы.

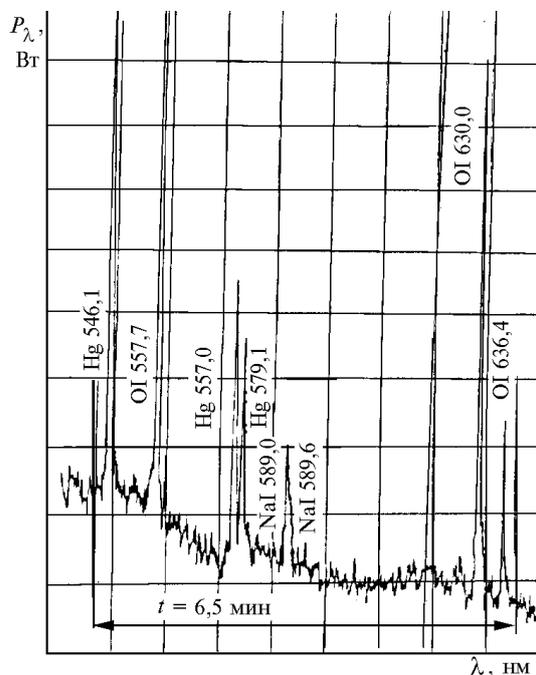


Рис. 7. Пример регистрации спектра эмиссии ночной атмосферы (осень, широта 54°) растровым монохроматором

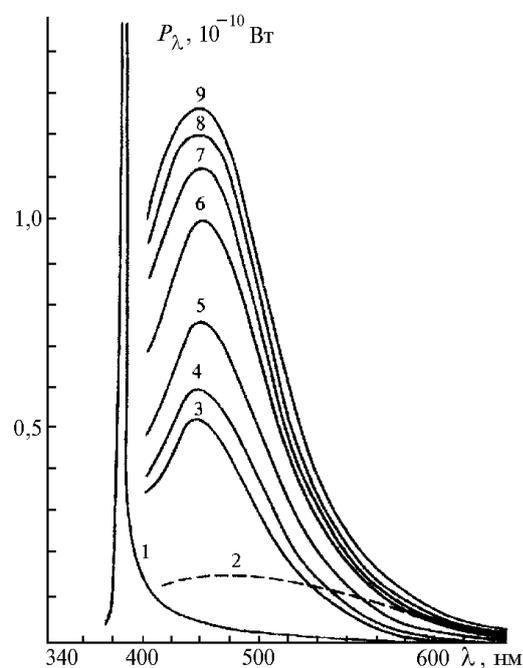


Рис. 8. Лидарные спектры флюоресценции морской воды (3–9) с относительной весовой концентрацией морской соли 1, 2, 5, 10, 15, 20, 25 %; 1 – опорный сигнал СКР и 2 – 20 % раствор химически чистой NaCl

6. Статистический подход к обнаружению и оценке атмосферных аномалий на фоне подстилающей поверхности

При аэрокосмическом зондировании газовых аномалий в приземной атмосфере путем сравнения спектральных прозрачностей $T(\omega)$ в полосе поглощения $\Delta\omega_g$ и вне полосы поглощения $\Delta\omega_0$ определяемого газа (или «букета» газов) возникает проблема обнаружения и оценки полей величины $A_g(\rho) = [T(\Delta\omega_g) - T(\Delta\omega_0)]/[T(\Delta\omega_0) + T(\Delta\omega_g)]$ на фоне подстилающей поверхности, обладающей случайной величиной альbedo – коэффициента вертикального диффузного отражения: $A_0 = A_0(\rho)$, $0 \leq A_0(\rho) \leq 1$, где $\rho = (x, y)$ – вектор поперечных к оптической трассе координат точки поверхности. Предполагая неселективность A_0 в спектральном интервале $|\Delta\omega_g - \Delta\omega_0|$, возможно независимое измерение величин $A_g(\rho)$ и $A_0(\rho)$ с использованием одних и тех же статистических методов пространственной фильтрации изображений. Для простоты величину $A_g(\rho)$ назовем эффективным спектральным альbedo газовой аномалии. Ниже кратко рассматривается изложенный авторами в [26] метод оценки статистических характеристик альbedo $A_0(\rho)$ подстилающей поверхности, пригодный и для описания эффективного спектрального альbedo турбулизованых аномалий $A_g(\rho)$.

Измерения пространственного частотного спектра альbedo дают информацию о частотном составе поперечных размеров участков подстилающей поверхности, имеющих одинаковую структуру. В частности, провал спектра в интервале пространственных частот ($\omega_1 = 2\pi/l_1$, $\omega_2 = 2\pi/l_2$), где l_1, l_2 – поперечные размеры участков, означает отсутствие в изучаемом районе участков с одинаковым альbedo, имеющих поперечные размеры l в диапазоне $l_2 < l < l_1$. Наоборот, спектр, сосредоточенный в интервале (ω_1, ω_2), означает наличие таких участков. Важное значение для практики имеют статистические характеристики площади (средняя площадь, дисперсия площади) участков подстилающей поверхности, имеющих одинаковую структуру (одинаковое альbedo).

Функция, задающая случайную площадь S всех участков поверхности, имеющих одинаковое альbedo, в изучаемом районе площади S_0 , в [26] представлена в виде

$$S = \int_{S_0} d^2\rho \Theta(A_0(\rho) - I_A), \quad \Theta(x) = \begin{cases} 1; & x > 0, \\ 0; & x \leq 0. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь I_A – уровень, который должно превысить альbedo поверхности $A_0(\rho)$, чтобы участки поверхности можно было считать одинаковыми. В общем случае за уровень I_A можно принять среднее альbedo фона, окружающего изучаемые участки поверхности. После вычислений для средней площади $\langle S \rangle$ всех участков поверхности, имеющих одинаковое альbedo, в [26] получено выражение

$$\langle S \rangle = \frac{S_0}{2} \left\{ 1 + \Phi \left[\frac{(\langle A_0 \rangle - I_A)^2}{2\sigma^2} \right] \operatorname{sgn}(\langle A_0 \rangle - I_A) \right\}; \quad (5)$$

$$\Phi(y) = 2\sqrt{y/\pi} {}_1F_1(1/2, 3/2, -y),$$

в котором σ^2 – дисперсия альbedo; ${}_1F_1(a, b; -y)$ – вырожденная гипергеометрическая функция. В силу свойств функции $\Theta(A_0(\rho) - I_A)$, в которой величину $A_0(\rho)$ требуется знать только вблизи уровня I_A , при выводе соотношения (4) использовалась аппроксимация плотности вероятности $A_0(\rho)$ нормальным законом, что также оправдано и для случайного поля газовых аномалий в условиях реальной турбулентной атмосферы.

Как следует из (5), при увеличении уровня I_A ($I_A \gg \langle A_0 \rangle$) средняя площадь одинаковых участков $\langle S \rangle$ уменьшается и стремится к нулю. Наоборот, при уменьшении уровня I_A ($I_A \ll \langle A_0 \rangle$) средняя площадь одинаковых участков увеличивается и приближается к значению

$$\langle S \rangle = \frac{S_0}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{\langle A_0 \rangle^2}{2\sigma^2} \right) \right], \quad (6)$$

зависящему от величины отношения $\langle A_0 \rangle / \sigma$.

Для малых значений указанного отношения ($\langle A_0 \rangle / \sigma \ll 1$) реализуется случай «сильной изрезанности» случайного поля альbedo, характеризующийся тем, что в изучаемом районе сред-

няя площадь участков с одинаковым альбедо приближается к средней площади фоновых участков, альбедо которых меньше уровня I_A . В этом случае из (6) следует $\langle S \rangle \rightarrow S_0/2$.

Для больших значений отношения $\langle A_0 \rangle / \sigma$ ($\langle A_0 \rangle / \sigma \gg 1$) случайная функция A_0 имеет небольшие отклонения от своего среднего значения $\langle A_0 \rangle$, и следовательно при $I_A \ll \langle A_0 \rangle$ имеет место в основном превышение случайного альбедо над уровнем I_A . Поэтому в соответствии с определением одинаковых участков (4) в основном всю поверхность изучаемого района можно считать имеющей одинаковое альбедо. Из (6) при этом получаем $\langle S \rangle \rightarrow S_0$.

В работе [26] предложены два варианта метода зондирования характеристик поля альбедо поверхности. Характеристики поля альбедо определяются с применением теории распространения оптических волн в случайно-неоднородных средах [27–31] – по флуктуациям оптического потока, отраженного от земной поверхности и принимаемого фотоприемником.

Первый вариант метода – двухпучковый, в нем используются два оптических источника (когерентных или некогерентных), создающих пучки подсвета поверхности, и два приемника отраженного излучения. Во втором варианте метода – однопучковом – используются один оптический источник (пучок) и один приемник. Источники и приемники устанавливаются на борту летательных аппаратов (искусственные спутники Земли, самолеты и др.). Использование спектрофотометров с высоким пространственным разрешением позволяет модифицировать второй вариант метода из активного в пассивный, с изучением статистики фотопотока рассеянного земной поверхностью природного излучения. Для повышения эффективности зондирования, с целью расширения изучаемого района, можно дополнительно применять системы оптического сканирования подстилающей поверхности.

Метод [26] позволяет измерять среднее значение и дисперсию альбедо, временные и пространственные корреляционные функции, радиус корреляции альбедо, пространственный частотный спектр альбедо, среднюю площадь всех участков поверхности, имеющих одинаковое альбедо.

7. Компьютерная интерактивная система оценки эффективности работы оптико-электронных систем для различных типов оптической погоды

Для широкого круга задач атмосферной оптики: лазерного зондирования, передачи изображений, дальнометрии, локации, навигации и других – необходима оперативная информация о влиянии оптических эффектов в реальной атмосфере на точностные и энергетические характеристики используемых оптико-электронных систем – для различных микроклиматических условий и атмосферно-геохимических аномалий.

Создана [32–33] компьютерная интерактивная система (далее – система), позволяющая прогнозировать и оперативно учитывать влияние всей совокупности линейных оптических эффектов в реальной атмосфере на характеристики оптического излучения оптико-электронных систем и устройств. Система представляет собой объединение взаимодействующих компьютерных программ. Программы построены на основе созданного Институтом оптики атмосферы СО РАН комплекса инженерных методик [34–36], переводящего результаты многолетних фундаментальных научных исследований по оптике атмосферы в инженерную практику.

Система использует базы атмосферно-оптических данных для различных регионов мира. В эти базы включены данные о зональных, сезонных и суточных изменениях высотных профилей распределения параметров поглощающих газов, аэрозолей, метеопараметров, характеристик турбулентных воздушных потоков, облаков. В основе созданного банка данных лежит комплексная оптическая модель атмосферы [35]. Кроме того, система эффективно использует поправки, появляющиеся вследствие неселективного влияния атмосферных аэрозолей и турбулентности.

К основным функциям системы относятся: 1) расчет поправок на дальность и угол регулярной рефракции; 2) расчет энергетических потерь за счет молекулярного и аэрозольного поглощения; 3) расчет импульсных характеристик и интенсивности обратного рассеяния для различных приемных апертур; 4) расчет естественных фоновых помех (дневное небо, тепловое излучение подстилающей поверхности и атмосферы); 5) расчет энергетических и точностных характеристик оптико-электронных систем, работающих в условиях атмосферной турбулентности.

Система позволяет производить оценки указанных параметров для атмосферно-оптических трасс различной геометрии, включая горизонтальные и наклонные (сверху вниз и снизу вверх) трассы; для оптического излучения видимого и ИК-диапазонов; для излучения с

различной степенью когерентности, включая лазерное излучение; для различных модификаций принимающих и излучающих оптико-электронных систем.

Система открыта, легко модифицируется и может быть использована для решения большого числа задач атмосферной оптики, включая прогнозирование оптических характеристик наземных и бортовых оптических систем, работающих в атмосфере.

На рис. 9, 10 приведены примеры использования компьютерной системы для расчета поправки на дальность и спектральной мощности безоблачного неба при работе на наклонных трассах [37].

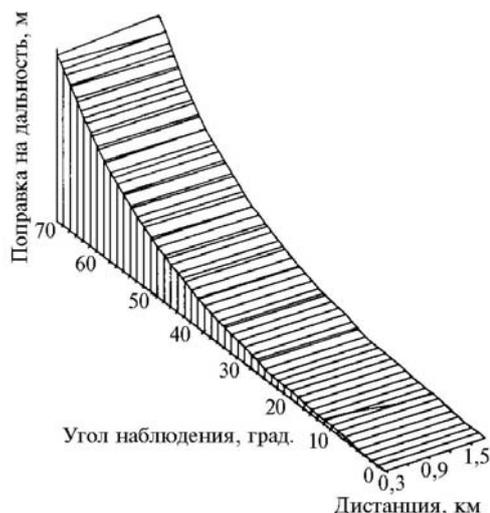


Рис. 9. Оценка поправки на дальность с углами наблюдения от 0 до 70° для расстояния до объекта 0,1 ÷ 2,5 км и синоптической ситуации: время суток – день, тип оптической погоды – чистая атмосфера, при местоположении локатора на Земле и дальности видимости 13 км

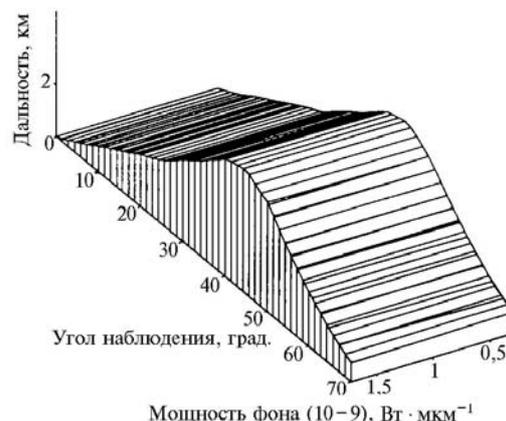


Рис. 10. Распределение спектральной мощности безоблачного неба в области 10,6 мкм для условий подстилающей поверхности типа трава, лес, азимута Солнца 180°, высоты Солнца 45° и синоптической ситуации, аналогичной рис. 9

1. Копытин Ю. Д., Коханов В. И., Шишигин С. А. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 5. С. 332–336; 1994. Т. 7. N 7. С. 991–993.
2. Баландин С. Ф., Копытин Ю. Д. // 1-й Республик. симпозиум «Оптика атмосферы и океана»: Тезисы докл. Томск: ИОА СО РАН, 1995. Ч. 2. С. 194–195; Регион. совещание «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докл. Томск: ИОА СО РАН, 1995. С. 785.
3. Кабашников В. П., Курсков А. А., Макаревич Н. С. // ЖПС. 1986. Т. 14. N 6. С. 965–970.
4. Афанасьев В. В., Зинкин И. А., Копытин Ю. Д., Шлишевский В. Б. // Оптический журнал. 1993. N 2. С. 80–81.
5. Протасевич Е. Т. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. N 5. С. 669–672.
6. Пенин С. Т., Чистякова Л. К. // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. N 1. С. 73–81.
7. Chistyakova L. K., Chistyakov V. Yu., Losev D. V., Penin S. T., Tarabrin Yu. K., Yakubov V. P. and Yur'ev I. A. // Microwave and Optical Technology Letters. 1997. N 11 (November).
8. Батаев Н. С., Дёмин В. Е. Ядерная промышленность. Люди и окружающая среда. М.: Энергоиздат, 1984. 150 с.
9. Носов В. В. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. N 1. С. 92–98.
10. Носов В. В. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 1. С. 122–125.
11. Зуев В. Е., Кабанов М. В. Оптика атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 254 с.
12. Колосов М. А., Шебельников А. В. Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса. М.: Сов. радио, 1978. 220 с.
13. Алексеев А. В., Кабанов М. В., Куштин Н. Ф. Оптическая рефракция в земной атмосфере. Новосибирск: Наука, 1982. 170 с.
14. Виноградов В. В., Костерин А. Г., Медовиков А. С., Саичев А. И. // Изв. вузов СССР. Радиотехника. 1985. Т. 28. N 10. С. 1227–1232.
15. Банах В. А., Меламуд А. Э., Миронов В. Л., Носов В. В., Чен Б. Н. // Оптика и спектроскопия. 1987. Т. 62. Вып. 5. С. 1136–1140.
16. Банах В. А., Ларичев А. Р., Сазанович В. М., Цвык Р. Ш., Чен Б. Н. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. N 3. С. 273–278.
17. Копытин Ю. Д., Носов В. В., Носов Е. В. // Изв. вузов. Физика. Деп. рукопись. Рег. N 3158–B96, 1996. 35 с.
18. Копытин Ю. Д., Носов В. В., Носов Е. В. // Изв. вузов. Физика. Деп. рукопись. Рег. N 3159–B96, 1996. 36 с.

19. Копытин Ю.Д., Носов В.В., Петров А.И. // Изв. вузов. Физика. Деп. рукопись. Рег. N 3432–B96, 1996. 9 с.
20. Копытин Ю.Д., Баландин С.Ф., Зинкин И.А., Иваненко Б.П., Шелевой К.Д. и др. // IV Всес. симпозиум по распространению лазерного излучения в атмосфере: Тезисы докл. Ч. II. Томск: ИОА СО АН СССР, 1989. С. 26–28.
21. Чайка Н.Ф., Шлишевский В.Б. // Межвуз. сб. научн. трудов «Дистанционные исследования окружающей среды оптическими и радиофизическими методами». Л.: ЛГУ, 1983. С. 95–105.
22. Зинкин И.А., Копытин Ю.Д. // Авторское свидетельство по заявке N–29/89. Приоритет 20.08.91 г.
23. Дуновский Ю.Д., Икконен В.Н., Копытин Ю.Д. // Авторское свидетельство N 1689809. Приоритет 08.07.1991; Авторское свидетельство N 1693300. Приоритет 10.11.1991.
24. Иваненко Б.П., Наац И.Э. // Известия АН СССР. Сер. ФАО. 1983. Т. 19. N 1. С. 1210–1215.
25. Булдаков М.А., Копытин Ю.Д., Лазарев С.В., Матросов И.И. // Зондирование физико-химических параметров атмосферы с использованием мощных лазеров. Томск: ИОА СО АН СССР, 1989. С. 211–219.
26. Nosov V.V. Optical remote sensing of statistical characteristics of underlying surfaces. The International Aerospace Sensing Conference. USA. Orlando. April, 1994. Proceeding of SPIE, 1994. P. 28–31.
27. Радиационные характеристики атмосферы и земной поверхности / Под ред. К.Я. Кондратьева. М.: Гидрометеоиздат, 1969. 564 с.
28. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. II. Случайные поля. М.: Наука, 1978. 464 с.
29. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
30. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере / А.С. Гурвич, А.И. Кон, В.Л. Миронов и др. М.: Наука, 1978. 277 с.
31. Турбулентность в свободной атмосфере / Н.К. Винниченко, Н.З. Пирус, С.М. Шметер и др. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 336 с.
32. Беляев Е.Б., Жидковский Г.Б., Исакова А.И., Копытин Ю.Д., Носов В.В. // Оптика атмосферы и океана. 1992. N 7. С. 772–778.
33. Беляев Е.Б., Исакова А.И., Копытин Ю.Д., Носов В.В. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. N 10. С. 1317–1324.
34. Беленький М.С., Задде Г.О., Комаров В.С. и др. Оптическая модель атмосферы / Под ред. В.Е. Зуева, В.В. Носова. Томск: Изд. ТФ СО АН СССР, 1987. 225 с.
35. Аксенов В.П., Алексеев А.В., Банах В.А. и др. Влияние атмосферы на распространение лазерного излучения / Под ред. В.Е. Зуева, В.В. Носова. Томск: Изд. ТФ СО АН СССР, 1987. 247 с.
36. Беляев Е.Б., Воробьев В.В., Землянов А.А. и др. Нелинейные оптические эффекты в атмосфере / Под ред. В.Е. Зуева, В.В. Носова. Томск: Изд. ТФ СО АН СССР, 1987. 224 с.
37. Kopytin Yu.D., Isakova A.I., Belyaev E.B., Nosov V.V. Performance Evaluation of Optical Systems in the Territories of World Spacedromes // The International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation. San Diego, California USA. 27 July-1 August 1997.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
21 января 1997 г.

Ju.D. Kopytin, V.V. Nosov, L.K. Chistyakova. Technology of Inspecting the Industrial and Geochemical Anomalies in the Ground Atmosphere.

A concise review of the results is presented obtained by the authors in the technology of monitoring of the free air optical anomalies in the ground atmosphere caused by geochemicals conditions and industrial ejections.