

А.П. Иванов, А.И. Бриль, В.П. Кабашников, В.М. Попов, А.П. Чайковский

## Влияние неопределенности состояния атмосферы на точность измерения концентрации газов методом дифференциального поглощения в спектральных диапазонах 9–11 и 4,6–5,6 мкм

*Институт физики им. Б.И. Степанова НАНБ, г. Минск, Беларусь*

Поступила в редакцию 26.10.99 г.

Получено общее выражение для величины ошибки, возникающей при приближенном описании состояния атмосферы на основе статистической модели атмосферы и значений отдельных параметров атмосферы, измеренных во время лидарного зондирования. Показано, что измерение дополнительных параметров атмосферы может заметно снизить неопределенность концентрации исследуемого газа. Специальный компьютерный код разработан для поиска пар частот из числа линий, генерируемых CO<sub>2</sub>-лазером, соответствующих минимальным погрешностям при среднетрассовых горизонтальных измерениях с использованием топографической мишени. Проведенные расчеты показывают, что некоторые известные в литературе эксперименты по дистанционному измерению концентраций атмосферных газов с помощью CO<sub>2</sub>-лазеров проводились на частотах, для которых атмосферная погрешность не была минимальной.

### Введение

Для дистанционного измерения содержания газовых компонент в атмосфере методом дифференциального поглощения (МДП) в настоящее время все более широкое применение находят лидары на основе CO<sub>2</sub>-лазеров. Они работают в спектральном диапазоне 9–11 мкм и на удвоенных частотах в области 4,6–5,6 мкм. С помощью CO<sub>2</sub>-лидаров определялись концентрации NH<sub>3</sub>, O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, NO, CO и ряда других газов [1–9].

Точность измерения концентрации атмосферных газов существенно зависит от правильного выбора рабочих частот. В работах [10, 11] предложен общий алгоритм выбора оптимальных спектральных каналов для решения задач газоанализа и локации. Алгоритм основан на вычислении информационного расстояния в пространстве состояний газового объекта. Для его реализации требуется знание коэффициента поглощения исследуемого газа, спектра пропускания атмосферы и дисперсии шумовой составляющей возвращаемого сигнала. Шум возвращаемого сигнала может быть вызван нестабильностью частоты, модовой структуры, направления излучения лазера, шумами детектора и усилителя, спекловой структурой и бликами топографической мишени, сцинтилляциями при рассеянии на аэрозолях, турбулентными флуктуациями оптических характеристик атмосферы. Дисперсия указанного типа флуктуаций может быть значительно уменьшена усреднением сигнала по большому числу импульсов [5, 12].

Существует ряд других источников ошибок, влияющих на точность измерения концентрации атмосферных газов подобно шумам возвращаемого сигнала, вклад которых, однако, не может быть уменьшен усреднением по импульсам. К ним можно отнести неточное знание коэффициента поглощения исследуемого газа, спектральных зависимостей коэффициентов аэрозольного рассеяния и

отражения от мишени. Роль указанных факторов оценивалась в [13–15]. К этому же типу ошибок можно отнести поглощение мешающими газами, точное содержание в атмосфере которых неизвестно. Этот вопрос обсуждался в работах [5, 13, 16–18], где был сделан вывод, что практический предел точности измерения концентраций в диапазоне 9–11 мкм определяется вариациями пропускания атмосферы за время усреднения.

Влияние неопределенности параметров атмосферы на точность измерения концентраций газов в диапазоне 9–11 мкм исследовалось в работе [18], в которой показано, что неверный учет поглощения мешающими газами может приводить к погрешностям восстановления концентрации зондируемой компоненты в сотни и тысячи процентов. В связи с этим оптимизацию измерений рекомендуется проводить с учетом конкретных метеоусловий.

Природа обсуждаемой атмосферной погрешности состоит в следующем. При оценке концентрации по величине сигнала надо знать температуру, от которой зависит поглощение, и из общего поглощения вычлечь вклад мешающих компонент. Другими словами, надо либо проводить параллельные измерения параметров атмосферы, от которых может зависеть измеряемая концентрация, либо использовать какую-нибудь модель атмосферы, где содержатся типичные средние значения температуры и концентраций. В последнем случае вносится ошибка, величина которой связана с диапазоном возможных вариаций атмосферных параметров относительно их средних значений. Но даже в случае сопутствующих измерений естественная пространственно-временная изменчивость атмосферы ограничивает точность задания параметров атмосферной трассы в период зондирования. На практике отдельные измерения дополняются модельными данными. Например, в работе [19] при лидарном измерении влажности использовался вертикальный профиль температуры,

измеренный шаром-зондом, а давление атмосферы бралось из модели стандартной атмосферы.

В работе [18] фактически предполагалось, что ошибка измерения определяется полным содержанием мешающих компонент в атмосфере. Их концентрации при оценке ошибки заимствуются из соответствующей статистической модели атмосферы. Погрешность, рассчитываемая в настоящей работе, определяется точностью задания температуры и влажности, а также изменчивостью содержания мешающих компонент, которая в ряде случаев мала по сравнению с их среднестатистическими концентрациями. Рассматриваются различные условия проведения измерений (горизонтальные трассы, наклонные трассы, локационный метод, использование топографических мишеней). В некоторых случаях ошибка, связанная с неточным знанием параметров атмосферы, существенно ограничивает точность измерения. Однако если наряду с моделью атмосферы используются данные натурных измерений отдельных атмосферных параметров, от которых существенно зависит пропускание, то точность измерения концентрации значительно повышается.

Полученные соотношения позволяют находить оптимальные пары частот, для которых ошибка, связанная с неточным знанием состояния атмосферы, минимальна, а также количественно оценивать эффективность привлечения дополнительной информации, например приземных значений температуры и влажности.

## 1. Теория

Будем считать, что частоты on и off с соответственно сильным и слабым атмосферным поглощением достаточно близки, так что частотной зависимостью коэффициентов рассеяния и отражения можно пренебречь.

Если для получения обратного сигнала используется отражение от топографической мишени, то усредненная вдоль трассы зондирования концентрация может быть оценена с помощью соотношения

$$U_i = \frac{1}{2} \ln \frac{P'(R)}{P(R)} = \int_0^R k(x) dx, \quad (1)$$

где  $R$  – длина трассы;  $P$  и  $P'$  – возвращаемые мощности на линиях генерации on и off. Если спектральные ширины линий генерации много меньше типичных ширин спектральных линий поглощения исследуемого газа, то  $k$  есть разность объемных коэффициентов поглощения на частотах on и off. В противоположном случае, как показано в [20], величина  $k$  есть разность коэффициентов поглощения атмосферы, которые усреднены по спектральным профилям генераций отдельных линий с весом, зависящим от пропускания атмосферы на трассе зондирования. При работе лидара в локационном режиме с использованием атмосферного рассеяния локальная концентрация находится из равенства

$$U_r = \frac{1}{2} \ln \frac{P'(R) P(R + \Delta R)}{P(R) P'(R + \Delta R)} = k(R) \Delta R. \quad (2)$$

В обоих случаях определение концентрации сводится к анализу разности коэффициентов поглощения на частотах зондирования. Полагая в дальнейших расчетах, что линии генерации монохроматичны, представим разность коэффициентов поглощения в виде

$$k = \sum_{j=2}^M \sigma_j N_j + k_{\text{H}_2\text{O}}(N_1), \quad (3)$$

где  $M$  – число компонент, вносящих вклад в поглощение на частотах зондирования;  $\sigma_j$  – разность сечений поглощения на частотах on и off  $j$ -й компоненты газовой смеси; сечения зависят, в основном, от давления и температуры;  $N_j$  – концентрация  $j$ -й компоненты газовой смеси;  $N_1$  – концентрация водяного пара;  $k_{\text{H}_2\text{O}}$  – разность коэффициентов поглощения водяного пара, где, кроме линейчатого, учитывается континуальное поглощение. Будем считать, что для определения концентрации исследуемого газа используется некоторая модель атмосферы в сочетании с результатами измерений отдельных атмосферных параметров, например температуры и влажности на одной или нескольких высотах. Оценим ошибку, возникающую в этом случае. Для газов с линейной зависимостью коэффициента поглощения от концентрации из формул (1)–(3) легко получить выражение для локальной или средней по трассе концентрации. Приведем здесь выражение лишь для случая отражения от топографической мишени. Если неизмеряемые атмосферные параметры берутся из модели атмосферы, то усредненная вдоль трассы зондирования с весом, равным разности сечений, концентрация  $i$ -го газа ( $i \neq 1$ ) равна

$$N_i^* = \left\{ U_i(R) - \int_0^R \sum_{j=2}^M \sigma_j^*(x) N_j^*(x) + k_{\text{H}_2\text{O}}^*(x) dx \right\} \left[ \int_0^R \sigma_i^*(x) dx \right]^{-1}, \quad (4)$$

где звездочка в индексе означает, что соответствующая величина определяется с использованием средней температуры и средних концентраций, взятых из модели атмосферы. Штрих у знака суммы означает, что при суммировании не учитывается член с  $j = i$ .

Возможные вариации величины измеряемой концентрации, связанные с отклонением реальных параметров атмосферы от модельных, а также с флуктуациями сигнала, можно представить в виде

$$\Delta N_i = (\Delta U_i - \Delta S_a) / \int_0^R \sigma_i^*(x) dx. \quad (5)$$

Здесь  $\Delta U_i$  – флуктуация величины  $U_i$ , обусловленная флуктуациями мощностей принимаемых сигналов  $P$  и  $P'$ , а  $\Delta S_a$  – вариация разности оптических толщин трассы на частотах on и off:

$$\Delta S_a = \int_0^R \sum_{j=0}^M \sigma_j^*(x) \Delta N_j(x) dx, \quad (6)$$

где для краткости введены обозначения

$$\sigma_0 = \partial k / \partial T, \quad \sigma_1 = \partial k_{\text{H}_2\text{O}} / \partial N_1;$$

$$\Delta N_0 = \Delta T = T - \bar{T}, \quad \Delta N_j = N_j - \bar{N}_j. \quad (7)$$

Двойной чертой сверху обозначено усреднение по вариациям атмосферных параметров, допускаемым принятой

моделью атмосферы (фактически за многолетний период). В случае локационного режима зондирования локальная концентрация и ее флуктуации будут выражаться формулами, аналогичными (4)–(6) с заменой интегралов на произведения локальных значений подынтегральных функций на  $\Delta R$  и заменой  $U_i$  на  $U_r$ .

Учитывая, что шумы сигнала не коррелируют с вариациями температуры и концентраций атмосферы, используя (5), получаем

$$\langle N_i \rangle = N_i^* + \langle \Delta N_i \rangle, \quad \langle \Delta N_i \rangle = -\langle \Delta S_a \rangle / \int_0^R \sigma_i^*(x) dx, \quad (8)$$

$$D(\Delta N_i) = \langle \Delta N_i^2 \rangle - \langle \Delta N_i \rangle^2 = (\langle \Delta U_i^2 \rangle + D(\Delta S_a)) / \left( \int_0^R \sigma_i^*(x) dx \right)^2, \quad (9)$$

где  $D(q)$  – дисперсия случайной величины  $q$ .

При отсутствии информации о температуре и концентрациях поглощающих компонент атмосферы в момент измерения имеет место безусловное усреднение, при котором  $\langle \Delta S_a \rangle$  равно нулю, а  $D(\Delta S_a)$  определяется средними значениями и ковариационными функциями температуры и концентраций из статистической модели атмосферы. Однако для вычисления условных средних (при условии, что некоторые атмосферные параметры известны) требуется условная вероятность значений  $\Delta S_a$ , т. е. фактически совместная функция вероятности температуры и концентраций на различных высотах. Поскольку в настоящее время такая информация отсутствует, примем, что указанная функция плотности вероятности может быть аппроксимирована многомерной гауссовской функцией распределения со средними значениями и вторыми моментами, совпадающими с соответствующими величинами из статистической модели атмосферы. Тогда совместная функция распределения параметров атмосферы и вариации сигнала  $\Delta S_a$  также является многомерной гауссовской функцией распределения вследствие линейной зависимости  $\Delta S_a$  от вариаций температуры и концентраций.

Обозначим отклонения фиксируемых атмосферных параметров от их модельных средних через  $Z_\alpha$ , где  $\alpha = 1, 2, \dots, P$ , а  $P$  – число фиксируемых атмосферных параметров. Примером при  $P=3$  могут быть  $Z_1 = \Delta T(0)$ ,  $Z_2 = \Delta T(1)$ ,  $Z_3 = \Delta N_1(1)$  – отклонения температуры и концентрации водяного пара от их многолетних средних значений на высотах 0 и 1 км во время зондирования.

Проведем усреднение в (8), (9) сначала по вариациям атмосферных параметров при условии, что  $P$  параметров  $Z_\alpha$  принимают некоторые конкретные значения. Результат такого усреднения зависит от вторых моментов из статистической модели атмосферы и конкретных значений параметров  $Z_\alpha$ . После повторного усреднения по возможному разбросу результатов измерения величин  $Z_\alpha$  получаем

$$\langle \Delta S_a \rangle = \sum_{\alpha=1}^P y_\alpha \overline{Z_\alpha}, \quad (10)$$

$$D(\Delta S_a) = \langle \Delta S_a^2 \rangle - \langle \Delta S_a \rangle^2 = \overline{\Delta S_a^2} - \sum_{\alpha=1}^P y_\alpha B_\alpha + \sum_{\alpha, \beta=1}^P y_\alpha y_\beta \overline{\delta Z_\alpha \delta Z_\beta}, \quad (11)$$

где одной чертой обозначено среднее по ансамблю результатов измерения величин  $Z_\alpha$ ;

$$\delta Z_\alpha = Z_\alpha - \overline{Z_\alpha}; \quad (12)$$

$$\overline{\Delta S_a^2} = \int_0^R \int_0^R dx_1 dx_2 \sum_{j,k=0}^M \sigma_j(x_1) \sigma_k(x_2) \overline{\Delta N_j(x_1) \Delta N_k(x_2)}; \quad (13)$$

$$y_\alpha = \sum_{\beta=1}^P (K^{-1})_{\alpha\beta} B_\beta; \quad (14)$$

$$B_\alpha = \overline{\Delta S_a Z_\alpha} = \int_0^R \sum_{j=0}^M \sigma_j^*(x) \overline{\Delta N_j(x) Z_\alpha} dx; \quad (15)$$

$K^{-1}$  – матрица, обратная  $K$ :

$$K_{\alpha\beta} = \overline{Z_\alpha Z_\beta}. \quad (16)$$

Матрица  $K$  вычисляется по статистической модели атмосферы, а  $\Delta S_a^2$  и  $B_\alpha$  – с использованием спектроскопической базы данных и статистической модели атмосферы. По этим величинам находят значения  $y_\alpha$  и далее  $\langle \Delta S_a \rangle$  и  $D(\Delta S_a)$ . При  $P=0$  (безусловное усреднение) все суммы в (10), (11) полагаются равными нулю. Этот метод можно рассматривать как расширение метода учета дополнительной информации, использованного в [21, 22] при расчете пропускания атмосферы.

Выражения (10), (11) справедливы для трасс произвольного наклона, в том числе и для горизонтальных. Однако в случае однородных горизонтальных приземных трасс в набор атмосферных параметров, описывающих усредненное состояние атмосферы, целесообразно включить непосредственно измеряемые величины вместо соответствующих модельных средних. Приведем явный вид формул для среднего значения и дисперсии  $\Delta S_a$  для измерений на однородной горизонтальной приземной трассе с использованием топографической мишени. Предположим, что известны только температура  $T$  и относительная влажность атмосферы  $\phi$ , причем с некоторой погрешностью. Тогда, выражая вариацию концентрации исследуемого газа относительно нового усредненного состояния атмосферы и производя затем упомянутые выше усреднения, получим

$$\langle \Delta S_a \rangle = 0; \quad (17)$$

$$D(\Delta N_i) = \left( \langle \Delta U_i^2 \rangle + R^2 \left\{ \overline{\delta^2 T} \left[ \sigma_0 + \sigma_1 \frac{\overline{N_1} \left( \frac{T_e}{T} - 1 \right)}{T} \right] \right\}^2 + \overline{\delta^2 \phi} \sigma_1^2 \overline{N_1^2} \phi^{-2} + \sum_{j=2}^M \sigma_j^2 \overline{\Delta N_j^2} \right) / R^2 \sigma_i^2. \quad (18)$$

В формуле (18) разности сечений  $\sigma_j$  определены по новому набору параметров, описывающих усредненное состояние атмосферы;  $T_e$  – энергия испарения одной молекулы воды, выраженная в кельвинах,  $T_e \approx 5600$  К;  $\overline{N_1}$  – сред-

няя концентрация молекул воды, рассчитанная по средним значениям температуры  $\bar{T}$  и влажности воздуха  $\bar{\varphi}$ .

При прямом детектировании лидарного сигнала в инфракрасной области спектра ошибка, связанная с шумами регистрирующей аппаратуры, обусловлена темновым током фоторезистора и флуктуациями усиления. Учет этих факторов в соответствии с [23, 24], а также флуктуаций принимаемого сигнала, обусловленных спеклами и атмосферной турбулентностью, приводит к следующему уравнению:

$$\langle \delta^2 U_i \rangle = \left( \langle \delta^2 A \rangle + 4\gamma^2 + \frac{W^2}{P^2} + \frac{W^2}{P^2} \right) / N, \quad (19)$$

где  $\gamma$  – относительная среднеквадратическая флуктуация усиления, по порядку величины в типичных случаях равная 0,01;  $N$  – число усредняющих пар импульсов;  $W = NEP(2\Delta f)^{1/2}$ ,  $NEP$  – эквивалентная мощность шума,  $\Delta f$  – ширина полосы пропускания усилителя;  $\langle \delta^2 A \rangle$  – вклад в дисперсию сигнала, обусловленный спеклами и атмосферной турбулентностью.

## 2. Результаты расчетов

Для численной оценки погрешности, возникающей из-за неопределенности состояния атмосферы при измерениях концентрации газа вдоль неоднородных трасс, была разработана компьютерная программа, включающая атмосферный и оптический блоки. Атмосферный блок основан на статистической модели атмосферы [25] и данных [26], в которых приведены высотные распределения дисперсий и высотные ковариации температуры, влажности, озона и других газов, полученные в ходе многолетних наблюдений. Кроме того, использовались данные Минской обсерватории по ковариациям температуры и влажности атмосферы. Ковариации, по которым данные отсутствовали, полагались равными нулю. Согласно используемой модели атмосферы различные компоненты атмосферы за исключением температуры и влажности не коррелируют друг с другом. С помощью атмосферного блока рассчитываются средние значения параметров атмосферы на трассе зондирования и возможные диапазоны их изменения.

В оптическом блоке рассчитываются коэффициент поглощения и пропускание атмосферы по найденным в атмосферном блоке распределениям температуры, давления, концентраций. Исходной информацией для оптического блока служит банк спектроскопических данных HITRAN-96 [27], согласно которому 8 веществ:  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ ,  $N_2O$ ,  $CH_4$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $NH_3$  – дают вклад в поглощение в диапазоне длин волн 9–11 мкм, и 10 веществ, включая вышеперечисленные, а также  $NO$  и  $CO$ , дают вклад в поглощение в спектральном диапазоне 4,6–5,6 мкм. Кроме того, использовались данные по коэффициентам поглощения на лазерных частотах других газов [8]. Расчет коэффициентов поглощения газов, входящих в HITRAN-96, проводился с учетом всех линий, центры которых отстоят от рассматриваемой частоты менее чем на  $20 \text{ см}^{-1}$ . Контур спектральной линии полагается фойгтовым. Коэффициент поглощения водяного пара рассчитывался как сумма линейчатого и континуального поглощения.

Приведем несколько примеров расчетов по разработанной программе. Для оценки ожидаемой погрешности среднетрассовых измерений при зондировании атмосферы вдоль наклонных трасс надо использовать выражения (9), (11)–(16). В случае локационного режима работы лидара

интегралы в формулах (13), (15) должны быть заменены на произведения локальных значений подынтегральных функций в точке зондирования на масштаб пространственного разрешения прибора  $\Delta R$ . Поскольку нас интересует в первую очередь атмосферная составляющая ошибки, то будем полагать флуктуацию сигнала  $\langle \Delta U^2 \rangle$  в (9) равной нулю. На практике ее можно сделать достаточно малой усреднением по большому числу импульсов.

На рис. 1 приведены вертикальные профили безусловной и условной погрешностей измерения концентрации  $SO_2$  с поверхности Земли в локационном режиме на частотах  $\nu_{on}/\nu_{off} = 1077,023/1044,591 \text{ см}^{-1}$ . Для расчета безусловной погрешности все требуемые для оценки концентрации зондируемого вещества параметры атмосферы заимствуются из модели, а для расчета условной погрешности дополнительно используются данные измерений отдельных атмосферных параметров во время зондирования. Видно, что использование данных наземных измерений температуры и влажности позволяет весьма незначительно уменьшить атмосферную составляющую погрешности. Связано это с тем, что на используемых частотах основной вклад в погрешность вносит неопределенность не температуры и влажности, а содержания  $O_3$ . Поэтому для уменьшения погрешности целесообразно предварительно измерять профиль концентрации озона, который затем использовать для обработки сигнала при определении концентрации  $SO_2$ . Подобная процедура позволяет уменьшить атмосферную составляющую погрешности до значений 0,1 – 0,2 ppb на высотах, не превышающих вертикальный масштаб корреляции атмосферных параметров.

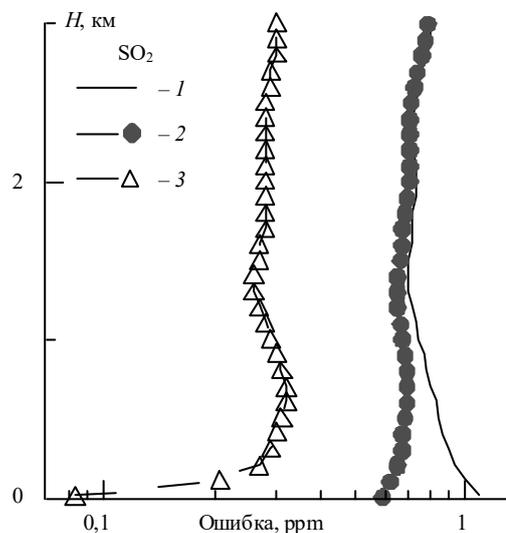


Рис. 1. Вертикальные распределения погрешности измерения  $SO_2$  в локационном режиме: 1 – безусловная погрешность; 2 – условная погрешность; использованы приземные измерения температуры и влажности; 3 – то же, что и 2, плюс использование измеренных с точностью 1 ppb профилей концентрации озона

На рис. 2 приведены результаты расчета погрешностей измерения концентрации паров бензола  $C_6H_6$ . Расчеты моделируют измерения с борта летательного аппарата в режиме регистрации отраженных от поверхности Земли лазерных импульсов. На рис. 2 даны зависимости от высоты полета  $H$  усредненной по слою атмосферы 0 –  $H$  км погрешности измерения концентрации паров бензола  $C_6H_6$  на частотах 1039,393(on) и 1078,516  $\text{см}^{-1}$ (off), рекомендован-

ных в работе [8]. Видно, что фиксация у поверхности Земли температуры, влажности и концентрации озона заметно снижает ожидаемую неопределенность концентрации бензола — в рассматриваемом случае до значений порядка 0,05 ПДК (ПДК для паров  $C_6H_6$  равна  $5 \text{ мг/м}^3$ , что для нормальных условий составляет примерно 2 ppm). Измерения с малых высот характеризуются большей интенсивностью, чем с больших, из-за имеющей место корреляции атмосферных параметров на различных высотах.

На основе описанного выше кода создана программа «Ортіра» для поиска оптимальных, т. е. соответствующих минимальным погрешностям, условий при среднетрассовых горизонтальных измерениях с использованием топографической мишени. Автоматизированный выбор оптимальных условий измерения на основе минимизации возможных погрешностей предлагается, например, в [18, 28]. Особо следует отметить описанный в [28] универсальный программный комплекс, позволяющий оптимизировать условия зондирования  $H_2O$  и  $O_3$  различными лазерами, работающими в УФ-, видимом и ИК-диапазонах. Программа «Ортіра» позволяет оптимизировать измерения концентраций атмосферных газов в спектральных диапазонах основных и удвоенных частот генерации  $CO_2$ -лазера. Входными данными программы являются частоты генерации и энергии генерируемых импульсов, а также средние концентрации всех атмосферных газов, включая уже измеренный исследуемый, давление, температура и относительная влажность и среднеквадратические величины их неопределенностей. Далее задаются максимальное частотное расстояние между линиями генерации, длина трассы, коэффициент отражения от мишени, апертура приемного телескопа, коэффициент пропускания оптического тракта

и квантовая эффективность системы, относительная ошибка усиления  $\gamma$ , эквивалентная мощность шума  $W$ . Ввод параметров осуществляется в режиме диалога.

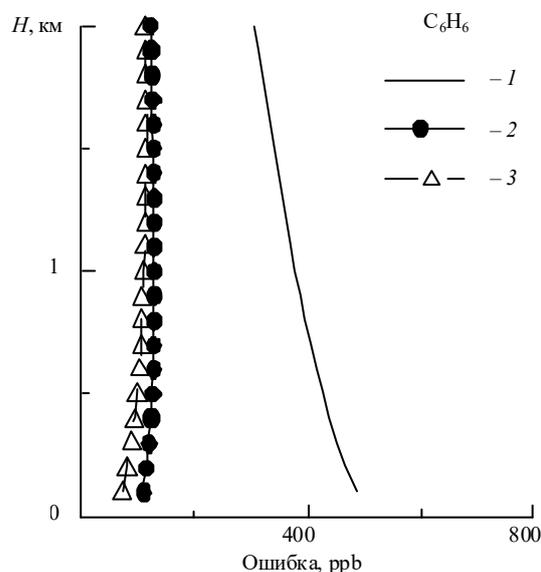


Рис. 2. Усредненные по толщине измеряемого слоя атмосферы погрешности определения концентрации бензола в режиме регистрации отраженных от поверхности Земли импульсов, посылаемых вертикально с высоты  $H$ : 1 — абсолютная погрешность; 2 и 3 — условные погрешности (2 — при  $H=0$  фиксируются температура и влажность; 3 — при  $H=0$  фиксируются температура, влажность и концентрация озона)

#### Погрешности определения концентраций, обусловленные неопределенностью состояния атмосферы

Газ	Источник	$\nu_{on}$	$\nu_{off}$	$\Delta\nu, \text{см}^{-1}$	$\Delta N, \text{ppb}$	Err, %	Причина ошибки
$NH_3$	[2]	9R(30)	9R(26)	2,34	$9,4 \cdot 10^{-2}$	0,28	$T, CO_2, H_2O$
	*	9R(30)	9R(26)	2,34(5)	$9,4 \cdot 10^{-2}$	0,28	$T, CO_2, H_2O$
CO	[2]	10P(32)	10P(30)	1,93	0,152	$9,4 \cdot 10^{-2}$	$CO_2, T, H_2O$
	[5]	2·9R(18)	2·9R(20)	2,58	4,0	5,2	$H_2O, T$
NO	*	2·9R(30)	2·9R(34)	4,46(5)	0,53	0,56	$N_2O, T$
	[5]	2·10P(24)	2·10P(14)	17,9	42,9	4,2	$H_2O, T$
	*	2·10P(24)	2·10P(26)	3,72(5)	48,6	5,0	$H_2O, T$
$SO_2$	[3]	9R(34)	9R(24)	5,78	924	0,76	$T, CO_2, H_2O$
	*	9R(26)	9R(22)	2,44(6)	201	0,24	$CO_2, T, NH_3$
$O_3$	[6]	9P(14)	9P(24)	9,03'	0,57	0,28	$NH_3, CO_2, T$
	*	9P(14)	9P(22)	7,17(10)	0,19	$8,8 \cdot 10^{-2}$	$H_2O, CO_2$
$H_2O$	[9]	10R(20)	10R(18)	1,31	$3,79 \cdot 10^5$	10,8	$T$
	*	10R(30)	10R(28)	1,18(5)	$1,76 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$T, CO_2$
	*	2·10P(22)	2·10P(20)	1,81(5)	590	0,50	$T, NO$

\* Наши результаты.

В таблице приведена рассчитанная по (18) погрешность  $\Delta N$  (ppb) среднетрассовой концентрации, возникающая вследствие неопределенности атмосферных параметров при измерениях вдоль горизонтальных трасс с использованием топографической мишени. Расчеты проводились как для частот, рекомендованных в литературе, так и для частот, найденных с помощью программы «Ортіра». При расчетах использовалась летняя среднеширотная модель атмосферы. Предполагалось, что в период измерений были известны средняя температура  $T=293 \text{ К}$  и средняя влаж-

ность 70%. Точность фиксации температуры задавалась равной 1 К, а влажности 1%.

В таблице  $\Delta\nu$  означает разность частот  $\nu_{on}$  и  $\nu_{off}$ ; в скобках приведена максимально допустимая разность  $\nu_{on} - \nu_{off}$ , использованная при поиске оптимальных пар; Err — ошибка отношения сигналов на частотах  $\nu_{on}$  и  $\nu_{off}$  при дальности до мишени 1 км. В последнем столбце указаны основные факторы, приводящие к погрешностям на указанной паре частот: газы, у которых спектр поглощения перекрывается с исследуемым, температура ( $T$ ).

Для молекул NH<sub>3</sub> и NO указанные в литературе и рассчитанные нами пары частот совпали. Для остальных газов найдены отличные от известных пары частот, на которых ошибка, обусловленная неопределенностью состояния атмосферы, меньше, чем на известных. Для молекулы NO предлагается пара линий с погрешностью, чуть большей по сравнению с погрешностью для известной в литературе пары. Но предлагаемые линии значительно ближе расположены друг к другу, что важно для устранения влияния спектральной зависимости коэффициентов отражения и рассеяния. Обращает на себя внимание значительное снижение атмосферной погрешности при измерениях содержания паров воды на удвоенных частотах генерации CO<sub>2</sub>-лазера по сравнению с измерениями в области 9–11 мкм. Результаты уточненного расчета оптимальных пар линий, учитывающего шум приемной аппаратуры и флуктуации возвращаемого сигнала, вызванные спеклами и атмосферной турбулентностью, будут опубликованы отдельно.

### Заключение

Одним из потенциальных источников ошибок, возникающих при дистанционном измерении концентраций атмосферных газов, является неточное знание состава и температуры атмосферы во время измерений. В настоящей работе получено общее выражение для величины ошибки, возникающей при приближенном описании состояния атмосферы на основе статистической модели атмосферы с привлечением реальных данных по отдельным параметрам атмосферы во время лидарных измерений. Для численной оценки погрешности была разработана компьютерная программа, включающая атмосферный и оптический блоки. Атмосферный блок основан на статистической модели атмосферы [25, 26], содержащей высотные распределения средних концентраций и температуры, их дисперсии и высотные ковариации. В оптическом блоке рассчитывается коэффициент поглощения и пропускания атмосферы по найденным в атмосферном блоке распределениям температуры, давления, концентраций. Исходной информацией для оптического блока служит банк спектроскопических данных HITRAN-96 [27]. Учитывается также континуальное поглощение водяным паром.

Проведенные расчеты показывают, что использование дополнительных к модели реальных значений параметров атмосферы, имеющих место на момент измерений, может заметно снизить неопределенность концентрации исследуемого газа. На основе описанного выше кода создана специальная программа для поиска пар частот из числа линий, генерируемых CO<sub>2</sub>-лазером, соответствующих минимальным погрешностям при средне-трассовых горизонтальных измерениях с использованием топографической мишени.

Настоящая работа выполнялась при частичной поддержке Международного научно-технического центра (проект В-085-97).

1. *Лазерный контроль атмосферы* / Под ред. Э.Д. Хинкли. М: Мир, 1979. 416 с.
2. Force A.P., Killinger D.K., DeFeo W.E. et al. // *Appl. Optics*. 1985. V. 24. N 17. P. 2837–2841.
3. Горобец В.А., Петухов В.О., Точицкий С.Я. и др. // *ЖПС*. 1998. Т. 64. № 4. С. 508–515.
4. Quagliano J.R., Stoutland P.O., Petrin R.R. et al. // *Appl. Optics*. 1997. V. 36. N 9. P. 1915–1927.
5. Killinger D.K. and Menyuk N. // *J. of Quant. Electron*. 1981. V. 17. N 9. P. 1917–1929.
6. Asai K., Itabe T., Igarashi T. // *Appl. Phys. Lett*. 1979. V. 35. N 1. P. 60–62.
7. Barbini R., Palucci A., Tochitsky S.Ya. Study of the CO<sub>2</sub> LIDAR/DIAL potential for atmospheric gases monitoring in the range 9,2–11,4 μm and 4,6–5,5 μm. Frascati, Roma, Italy. Servizio Edizioni Scientifiche – ENEA Centro Ricerche Frascat. RT/INN/96/19. P. 65–00044.
8. Mayer A., Comera J., Charpentier H., et al. // *Appl. Optics*. 1978. V. 17. N 3. P. 391–393.
9. Murrey E.R. // *Optic. Engineer*. 1977. V. 16. N 3. P. 284–290.
10. Мицель А.А. // *Оптика атмосферы и океана*. 1992. Т. 5. № 9. С. 978–985.
11. Катаев М.Ю., Мицель А.А. // *Оптика атмосферы и океана*. 1992. Т. 5. № 9. С. 986–994.
12. Vanderbeek R.G., Ben-David A., D'Amico F.M. et al. // *ILCR–19th Int. Laser Radar Conf. NASA/CP-1998-207671/PT1*. 1998. V. 1. P. 421–424.
13. Menyuk N. and Killinger D.K. // *Appl. Optics*. 1983. V. 22. N 17. P. 2690–2698.
14. Grant W.B. // *Appl. Opt*. 1982. V. 21. N 13. P. 2390–2394.
15. Petheram J.C. // *Appl. Opt*. 1981. V. 20. N 23. P. 3941–3948.
16. Menyuk N., Killinger D.K., Menyuk C.R. // *Appl. Optics*. 1982. V. 21. N 18. P. 3377–3383.
17. Killinger D.K. and Menyuk N. // *Appl. Phys. Letters*. 1981. V. 38. N 12. P. 968–970.
18. Арефьев В.Н., Бугрим Г.И., Вишератин К.Н. и др. // *Изв. РАН. ФАО*. 1992. Т. 28. № 4. С. 391–397.
19. Hardesty M.R. // *Appl. Optics*. 1984. V. 23. N 15. P. 2545–2553.
20. Zuev V.E., Makushkin Yu.S., Marichev V.N. et al. // *Appl. Optics*. 1983. V. 22. N 23. P. 3733–3741.
21. Зув В.Е., Макагон М.М., Макушкин Ю.С. и др. *Прикладная спектроскопия атмосферы*. Томск, 1986. 147 с.
22. Макушкин Ю.С., Мицель А.А., Фирсов К.М. // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО*. 1983. Т. 19. № 8. С. 824–830.
23. Byer R.L., Garbuny M. // *Appl. Optics*. 1973. V. 12. N 7. P. 1496–1505.
24. Rensburg E.E., Gordley L.L. // *Appl. Optics*. 1978. V. 17. N 4. P. 624–630.
25. Зув В.Е., Комаров В.С. *Статистические модели температурных и газовых компонент атмосферы*. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 264 с.
26. Комаров В.С., Ломакина Н.Е., Михайлов С.А. // *Метеорология и гидрология*. 1985. № 1. С. 56–61.
27. Rothman L.S., Rinsland C.P., Goldman A. et al. // *JQSRT*. 1998. V. 60. N 5. P. 665–710.
28. Firsov K.M., Kataev M.Yu., Mitsel A.A. et al. // *JQSRT*. 1999. V. 61. N 1. P. 25–37.

A.P. Ivanov, A.I. Bril, V.P. Kabashnikov, V.M. Popov, A.P. Chaikovskii. **Influence of the atmosphere state uncertainty on accuracy of gases concentration measurements by differential absorption method within spectral ranges 9–11 and 4.6–5.6 μm.**

A potential source of errors at remote measurements of concentration of atmospheric gases by CO<sub>2</sub>-lasers is the incomplete knowledge of atmospheric composition and temperature during measurements. This paper gives a general expression for errors owing to approximate description of the composition on the base of a statistical atmospheric model and separate parameters measured during laser sounding. Measurements of additional atmospheric parameters are shown to reduce considerably the uncertainty in the concentration of the gas studied. A special computer code is designed to search the pairs of frequencies with minimum error in mean-path horizontal measurements by using a topographic target. The performed calculations have shown that a number of the referenced experiments on remote measuring of atmospheric gas concentrations by CO<sub>2</sub>-lasers were conducted at frequencies that did not provide the minimum atmospheric errors.