

**В.А. Городничев, В.И. Козинцев**

### **МОНИТОРИНГ ЗАГРЯЗНЕНИЙ АТМОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ЛИДАРА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА**

На основе плавно перестраиваемого в спектральном диапазоне  $8 \div 13$  мкм параметрического генератора света (ПГС) на кристалле селенида кадмия (CdSe) разработан экспериментальный макет лидара дифференциального поглощения (ДП), с помощью которого были проведены измерения спектров пропускания и показателей поглощения аммиака ( $\text{NH}_3$ ), гидразина (Г), несимметричного диметилгидразина (НДМГ) и тетраметилтетрацена (Т) на лазерных линиях в областях информативных участков из диапазона  $8 \div 13$  мкм.

Проведены измерения концентраций газов в кювете, размещенной на трассе зондирования длиной 80 м. Получено хорошее согласование найденных с помощью лидара и стандартными химическими методами значений концентраций  $\text{NH}_3$ , Г, НДМГ и Т в кювете.

В статье приводится описание результатов натурных испытаний разработанного авторами лидара ДП на основе плавно перестраиваемого в спектральном диапазоне  $8 \div 13$  мкм параметрического генератора света (ПГС) на кристалле селенида кадмия (CdSe) [1]. Оптическая схема лидара приведена на рис. 1.

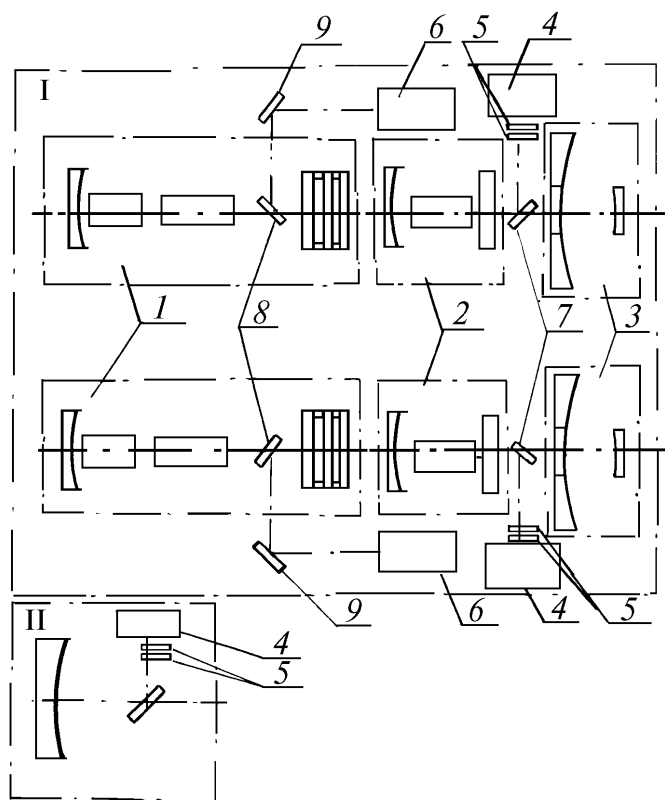


Рис. 1. Оптическая схема лидара: I—передатчик; II—приемная система. 1—лазер на  $\text{YAG:Er}^{3+}$ ; 2—ПГС на CdSe; 3—корректирующая телескопическая система; 4—фотоприемник; 5—светофильтры; 6—лазер ЛГН-105; 7—полированные светоделительные пластинки из  $\text{BaF}_2$  (ZnSe); 8—полированные пластинки из кварца КИ; 9—100%-е отражающие алюминиевые зеркала

Передатчик лидара включает два перестраиваемых ПГС. На выходе каждого из каналов лазерного передатчика используется корректирующая телескопическая система, изготовленная по схеме Грегори [2], состоящая из двух сферических отражающих зеркал с алюминиевым покрытием. С помощью таких оптических систем расходимость лазерного излучения каждого из каналов была уменьшена с 3 до 0,3 мрад.

Для выделения из спектра зондирующего излучения только коротковолновой или длинноволновой ветви параметрической генерации в опорных каналах передатчика и перед фотоприемником в приемной системе могут устанавливаться полосовые фильтры.

Блок регистрации и обработки информации является устройством преобразования по заданному алгоритму электрических сигналов, поступающих с приемного устройства, и выдачи данных на систему отображения.

Передатчик и приемная оптическая система лидара смонтированы на едином поворотном устройстве, позволяющем быстро и точно изменять направление зондирования в пределах  $\pm 180^\circ$  по азимуту и  $\pm 45^\circ$  по углу места.

С помощью лидара были проведены измерения спектров пропускания и показателей поглощения аммиака ( $\text{NH}_3$ ), гидразина (Г), несимметричного диметилгидразина (НДМГ) и тетраметилтетразена (Т) на лазерных линиях лидара в областях информативных участков, содержащих линии и полосы поглощения данных газов, из диапазона  $8 \div 13$  мкм. Блок-схема экспериментальной установки изображена на рис. 2.

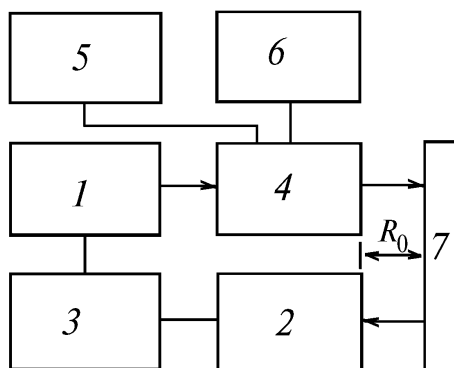


Рис. 2. Блок-схема установки для спектральных измерений: 1—передатчик лидара; 2—приемная система; 3—блок регистрации и обработки информации; 4—кювета; 5—установка для создания заданных концентраций газов; 6—установка для определения концентраций газовых компонентов в кювете; 7—экран;  $R_0$ —расстояние от кюветы до экрана

Для измерений использовалась кювета. С помощью динамической установки в кювете создавался поток газа определенной концентрации. Концентрация вещества создавалась следующим образом: азот со скоростью  $1 \div 2$  л/мин в течение 30 мин пропускаться через дроссель, в котором в зависимости от требуемой концентрации находился либо чистый компонент, либо раствор компонента в инертном растворителе, либо натекагель с компонентом. Концентрация газа в кювете определялась до и после эксперимента фотоэлектроколориметрическим методом. После получения результатов анализа до начала эксперимента газ с известной концентрацией пропускаться через кювету в течение определенного промежутка времени, достаточного для десятикратного обмена газа, находящегося в кювете.

Спектральные измерения проводились при давлении 1 атм для того, чтобы смоделировать столкновительное уширение контура линий поглощения газовых компонентов в атмосферных условиях. В качестве буферного газа вместо воздуха применялся азот чистотой 99,99%, что позволило устранить разложение компонентов под воздействием кислорода. Были измерены спектры пропускания Г, НДМГ, Т и  $\text{NH}_3$  в информативных спектральных участках из диапазона  $8 \div 13$  мкм. На рис 3, 4 приведены измеренные спектры пропускания исследуемых газов и для сравнения показано их пропускание по данным [3].

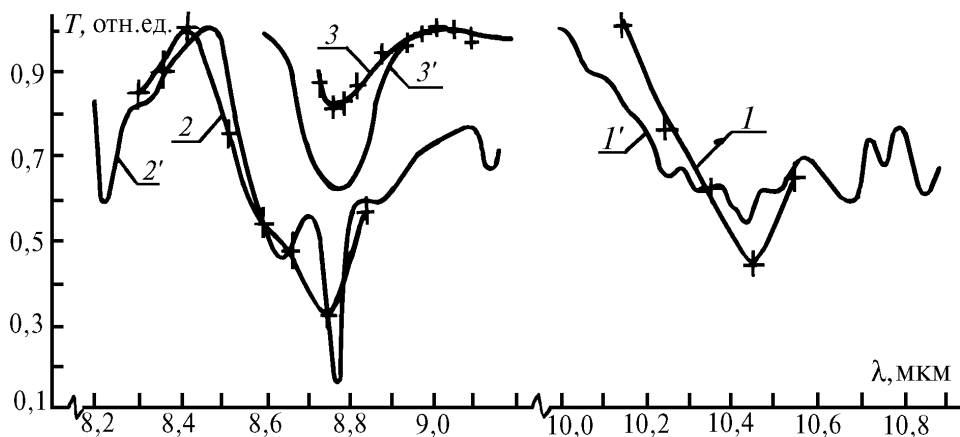


Рис. 3. Спектры пропускания Г (1, 1'), НДМГ (2, 2'), Т (3, 3') на лазерных линиях лидара и снятые с помощью спектрофотометра <Perkin Elmer Model 21> [3]

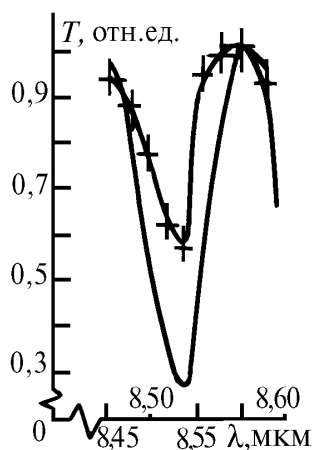


Рис. 4. Спектр пропускания NH<sub>3</sub> на лазерных линиях лидара (+) и снятые с помощью спектрофотометра <Perkin Elmer Model 21> [3] (нижняя сплошная кривая)

На длинах волн, соответствующих минимальному и максимальному пропусканию, рассчитывались показатели поглощения по формуле

$$\alpha(\lambda) = \left| \ln \left( \frac{P_{\lambda} P'_{0\lambda}}{P_{0\lambda} P'_{\lambda}} \right) \right| / \Pi L, \quad (1)$$

где  $P_{0\lambda}$ ,  $P_{\lambda}$  – мощности лазерного излучения на входе и выходе кюветы, заполненной смесью исследуемого газа с азотом;  $P'_{0\lambda}$ ,  $P'_{\lambda}$  – мощность лазерного излучения на входе и выходе кюветы, заполненной азотом (без газа);  $\Pi$  – парциальное давление исследуемого газа;  $L$  – длина кюветы;  $\lambda$  – дли на волны лазерного излучения.

Результаты расчетов показателей поглощения приведены в табл. 1.

С целью нахождения погрешности определения показателей поглощения  $\alpha$ , возникающей из-за температурной и угловой зависимости частоты генерации ПГС на CdSe при многократных измерениях и изменении температуры окружающей среды, было проведено измерение пропускания исследовавшихся газов на одной из двух выбранных ранее длинах волн и рассчитано соответствующее значение в пяти сериях, состоящих из ~50 измерений каждая. Изменение температуры воздуха во время эксперимента составило ~5 °С. Полученные результаты отражены в табл. 2.

Таблица 1

Показатели поглощения Г, НДМГ, Т, NH<sub>3</sub> на длинах волн зондирования

| Газ             | $\lambda_1, \lambda_2$ , мкм | $\alpha \pm \delta\alpha$ (атм·м) <sup>-1</sup> |
|-----------------|------------------------------|---|
| Г               | 10,15                        | 178±35  |
|                 | 10,45                        | 684±140   |
| НДМГ            | 8,42                         | 67±13   |
|                 | 8,75                         | 549±110   |
| Т               | 8,76                         | 758±150   |
|                 | 9,01                         | 144±30  |
| NH <sub>3</sub> | 8,54                         | 156±30  |
|                 | 8,60                         | 30±7  |

Примечание:  $\delta$  – погрешность.

Таблица 2

## Показатели поглощения газовых компонентов

| Газ             | $\lambda$ , мкм | $\alpha$ , (атм·м) <sup>-1</sup> | $\bar{\alpha}$ , (атм·м) <sup>-1</sup> | $ \alpha - \bar{\alpha}  / \bar{\alpha} \cdot 100$ , % | $ \delta\alpha / \bar{\alpha}  \cdot 100$ , % |
|-----------------|-----------------|----------------------------------|--|--|---|
| Г               | 10,45           | 660; 684; 691; 695; 690          | 684                                    | 3,5  | 2,6   |
| НДМГ            | 8,75            | 560; 549; 531; 565; 540          | 549                                    | 3,5  | 3,2   |
| Т               | 9,01            | 144; 148; 143; 145; 140          | 144                                    | 2,8  | 2,5   |
| NH <sub>3</sub> | 8,54            | 154; 156; 150; 162; 158          | 156                                    | 3,8  | 3,6   |

Примечание:  $\delta\alpha = t_{0,95;5} \cdot \delta\bar{\alpha}$ , где  $t_{0,95;5} = 2,8$  (коэффициент Стьюдента);  $\delta\bar{\alpha}$  – среднее квадратическое отклонение среднего арифметического.

Погрешность определения  $\alpha$  не превысила 4% для любого из компонентов. Небольшие значения погрешностей объясняются величиной соотношения между ширинами линии излучения лидара и полосы поглощения газа, состоящей из серии узких неразрешенных колебательно-вращательных линий. Ширина линии излучения, равная 0,3 см<sup>-1</sup>, превышает ширину отдельной линии поглощения, но меньше, по крайней мере на порядок, интегральной полосы, содержащей большое количество линий поглощения. Поэтому при небольших изменениях длины волны (в эксперименте:  $\Delta\lambda \sim 10^{-4}$  мкм для НДМГ и NH<sub>3</sub> и  $\Delta\lambda \sim 5 \cdot 10^{-3}$  мкм для Т и Г) относительная погрешность определения показателей поглощения газов оказалась мала (< 4%).

Были проведены испытания лидара в натуральных условиях на трассе длиной 80 м с отражающим экраном в конце трассы, а также определены концентрации Г, НДМГ, Т, NH<sub>3</sub> в кювете, размещенной на трассе зондирования длиной 80 м, с помощью лидара относительно фонового уровня данных компонентов на трассе. Измерения проводились на длинах волн, приведенных в табл. 1. Измерялись отраженные от экрана сигналы, прошедшие через кювету, заполненную поочередно либо смесью исследуемого газового компонента с азотом, либо только одним азотом. Значения концентрации газов в кювете относительно фонового уровня на трассе рассчитывались по формуле

$$C = \ln \left( \frac{P_{\lambda_1} P'_{\lambda_2}}{P_{\lambda_2} P'_{\lambda_1}} \right) / \Delta\alpha L, \quad (2)$$

где  $\Delta\alpha = |\alpha_1 - \alpha_2|$ .

В табл. 3 приведены результаты определения концентраций газов в кювете, расположенной на трассе зондирования, с помощью лидара и стандартными химическими методами.

Систематическое превышение значения концентрации газа, найденной по лидарным измерениям, над значением, определенным химическим методом, на наш взгляд, можно объяснить аппаратными погрешностями.

Отличие результатов измерений не превышает 20%. Значения погрешности определения концентраций лидаром 22,7–25,9% объясняются в основном большой величиной погрешности стандартных химических методов (~20%), применявшихся для нахождения концентраций газов в кювете при расчетах их показателей поглощения.

Концентрации Г, НДМГ, Т, NH<sub>3</sub> в кювете, определенные лидаром и стандартными химическими методами

| Газ             | $\lambda$ , мкм | Лидарный метод<br>$C \pm \delta C$ , мг/м <sup>3</sup> | Химический метод<br>$C^* \pm \delta C^*$ , мг/м <sup>3</sup> | $\frac{ C - C^* }{C}$ , % |
|-----------------|-----------------|--|--|---------------------------|
| Г               | 10,15           | 1350±350   | 1100±200   | 18,5                      |
|                 | 10,45           |  |  |                           |
| НДМГ            | 8,42            | 1950±450   | 1800±350   | 7,7                       |
|                 | 8,75            |  |  |                           |
| Т               | 8,76            | 3400±800   | 3100±600   | 8,8                       |
|                 | 9,01            |  |  |                           |
| NH <sub>3</sub> | 8,54            | 2200±500   | 1900±400   | 13,6                      |
|                 | 8,60            |  |  |                           |

С помощью экспериментального макета ИК-лидара измерены лазерные спектры поглощения в информативных участках диапазона 8÷13 мкм Г, НДМГ, Т и NH<sub>3</sub>. Определены показатели поглощения данных газовых компонентов на длинах волн, соответствующих их максимальному и минимальному поглощению. Проведены измерения концентраций газов в кювете, размещенной на трассе зондирования длиной 80 м. Получено хорошее соответствие найденных с помощью лидара и стандартными химическими методами значений концентраций Г, НДМГ, Т и NH<sub>3</sub> в кювете.

1. Городничев В.А., Козинцев В.И., Сильницкий А.Ф. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 12. С. 33–35.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
3. Pierson R.H., Fletcher A.N., Gantz E. St. // Anal. Chem. 1956. V. 28 N 8. P. 1218–1239.

Научно-исследовательский институт  
радиоэлектроники и лазерной техники  
Московского государственного  
технического университета им.Н.Э. Баумана

Поступила в редакцию  
28 марта 1994 г.

V. A. Gorodnichev, V. I. Kozintsev. **Infrared DIAL System for Monitoring Atmospheric Pollution.**

The CdSe optical parametric oscillator (OPO) with continuous tuning of wavelength inside spectral interval from 8 to 13  $\mu\text{m}$  was employed in the differential-absorption lidar (DIAL) system.

Transmittance spectra and absorption coefficients of ammonia (NH<sub>3</sub>), hydrazine, unsymmetrical dimethylhydrazine (UDMH) and tetramethyltetrazene (T) were measured in the informative regions from 8 to 13  $\mu\text{m}$  with this DIAL.

Concentrations of the gases inside a cell, placed on 80 m path, were measured with DIAL and standard chemical methods. Good agreement of the results obtained is shown.