

УДК 535.36

# Мониторинг молекул сероводорода в атмосферном пограничном слое лидаром дифференциального поглощения и рассеяния из космоса

© 2018 г. **В. Е. ПРИВАЛОВ\***, ДОКТОР ФИЗ.-МАТ. НАУК;  
**В. Г. ШЕМАНИН\*\***, ДОКТОР ФИЗ.-МАТ. НАУК

\*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург;

\*\*Новороссийский политехнический институт (филиал) Кубанского государственного технологического университета, Новороссийск

E-mail: vaevpriv@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.08.2017

Представлены результаты численного решения лидарного уравнения для дифференциального поглощения и рассеяния при зондировании молекул сероводорода в атмосфере с концентрацией на уровне  $10^{11} \text{ см}^{-3}$  с космической платформы на высотах от сотен километров до геостационарной орбиты. Показано, что время измерения для уровня такой концентрации исследуемых молекул сероводорода на длине волны лазерного излучения 3,83 мкм и высоты от 100 до 36000 км лежит в диапазоне 0,8 мкс – 10,5 с для лидара дифференциального поглощения и рассеяния. Поэтому таким лидаром с космической платформы можно измерять концентрации исследуемых молекул сероводорода на уровне  $10^{11} \text{ см}^{-3}$ .

**Ключевые слова:** лидар, уравнение, дифференциальное поглощение и рассеяние, молекула, сероводород, концентрация, космическая платформа.

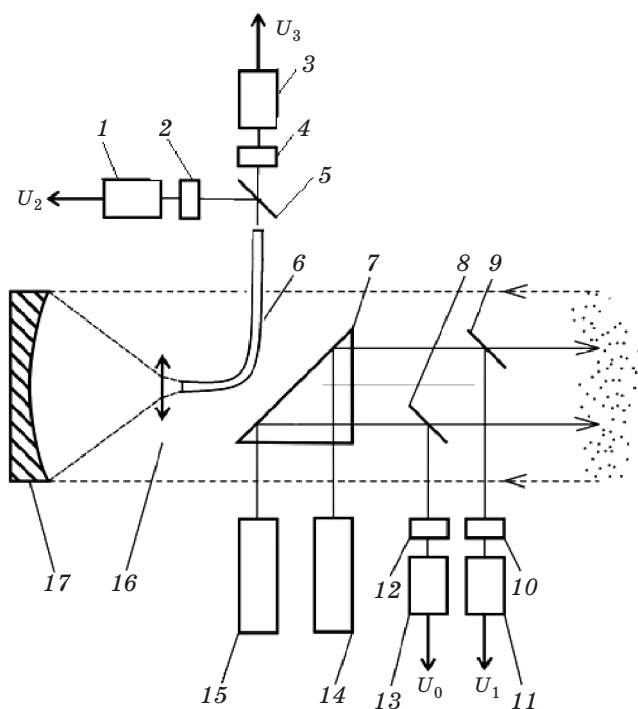
**Коды OCIS:** 280.3640.

Загрязнение атмосферы молекулами сероводорода представляет большую проблему в связи с его высокой токсичностью. Разработка новых дистанционных методов измерения концентрации молекул  $\text{H}_2\text{S}$  на уровне предельно-допустимых концентраций (ПДК) —  $0,008 \text{ мг/м}^3$  [1] или порядка  $1,4 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$  — для их мониторинга с космической орбиты в рамках дистанционного зондирования Земли требует оценки возможностей лидарного мониторинга для решения таких задач. В работах [1–3] был выполнен анализ методов лазерного зондирования молекул предельных углеводородов в атмосфере и получено, что лидар дифференциального поглощения и рассеяния (ДПР) может использоваться для дистанционного измерения концентрации молекул на уровне ПДК. Однако представляет интерес теоретическая оценка возможностей такого лидара для мониторинга молекул сероводорода в атмосферном пограничном слое [4] на уровне концентрации порядка ПДК и выше с космической орбиты в диапазоне высот от 100 км до геостационарной орбиты.

Поэтому целью настоящей работы является выбор оптимальных параметров лидара ДПР для мониторинга молекул сероводорода в атмосфере на уровне ПДК с космической платформы на указанных высотах. Для этого было выполнено численное решение лидарного уравнения для ДПР молекулами сероводорода для выбора параметров лидара и получения максимального значения сигнала лидара, соответствующего минимальной концентрации молекул.

Лидарная система мониторинга молекул сероводорода в атмосфере построена на базе моностатического лидара, у которого два лазерных луча распространяются вдоль оси приёмного телескопа [1, 5]. Оптическая схема этой системы приведена на рис. 1.

Лидар ДПР подразумевает использование двухволнового излучателя. Одна длина волны лазерного излучения попадает в центр ИК полосы поглощения молекул сероводорода, а другая — вне этой полосы [6]. Рассмотрим применение двух длин волн 3,83 и 3,9 мкм с длительностью импульсов 10 нс и энергиями в импульсе до 1 мДж при часто-



**Рис. 1.** Оптическая схема лидарной системы. 1, 3, 11, 13 — фотоприёмники, 2, 4, 10, 12 — интерференционные светофильтры, 5 — светоделитель, 6 — световод, 7 — поворотная призма, 8, 9 — плоскопараллельные стеклянные пластины, 14, 15 — лазеры, 16 — объектив, 17 — сферическое зеркало.

те следования лазерных импульсов  $f$  до 100 кГц [1, 2]. Излучение лазеров 14 и 15 на длинах волн 3,83 и 3,9 мкм направляется вдоль оси приёмного телескопа 17 перпендикулярно поверхности Земли. Прошедшее через атмосферу зондирующее излучение на длине волны 3,83 мкм ослабляется за счёт поглощения исследуемыми молекулами [1, 3, 6], а рассеянное аэрозолем и газовыми молекулами атмосферы назад излучение на этой длине волны и на длине волны 3,9 мкм собирается телескопом типа Ньютона со сферическим зеркалом 17 диаметром 0,4 м и фокусируется линзовым объективом 16 в световод 6. Светоделителем 5 создаются два луча, и каждый направляется через интерференционный фильтр 2 или 4 на свой фотоприёмник 1 или 3, напряжение с которых  $U_2$  и  $U_3$  записывается платой сбора данных в ПК. Часть лазерного излучения каждого лазера 14 и 15 направляется стеклянными пластинами 8 и 9 через интерференционные фильтры 12 и 10 на фотоприёмники 13 и 11 (напряжения  $U_0$  и  $U_1$ ) для контроля энергии лазерных импульсов и формирования начала отсчёта времени измерения.

На первом этапе для оценки величины сигнала рассеяния выполним численное решение лидарного уравнения для суммарного рассеяния Ми на аэрозольных частицах и молекулах газов в атмос-

фере в направлении назад в режиме синхронного счёта фотонов в виде [2]

$$n(H) = n_0 K_1 \Delta H G(H) f t_d S_0 \times \exp \left[ -2 \int_0^H \alpha(\lambda, z) dz \right] \rho / H^2, \quad (1)$$

где  $n(H)$  — число фотонов, зарегистрированное фотодетектором лидара на длине волны лазерного излучения  $\lambda$  с высоты  $H$  на шаге по расстоянию  $\Delta H$ ,  $n_0$  — число фотонов на длине волны лазерного излучения  $\lambda$ , которое определяется выражением  $n_0 = E_0 \lambda / hc$ , где  $E_0$  — энергия импульса лазерного излучения длительностью  $\tau$ ,  $h$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света. Кроме того, обозначены  $K_1$  — лидарная константа на длине волны  $\lambda$ ,  $S_0$  — площадь приёмной апертуры телескопа,  $G(H)$  — геометрическая функция лидара,  $t_d$  — время измерения,  $\alpha(\lambda, z)$  — коэффициент ослабления на длине волны лазерного излучения в атмосфере и  $\rho$  — суммарный коэффициент обратного рассеяния в атмосфере, равный  $10^{-7}$  по данным [3].

Ширина линии лазерного излучения современных параметрических генераторов света, которые и являются излучателями в ближнем ИК диапазоне, не превышает 1 ГГц, а ширина полос поглощения молекул атмосферных газов доходит до 10 ГГц. Но, главное, спектральная ширина аппаратной функции лидара ещё на порядок больше. В работе [2] выполнен анализ лидарного уравнения для ДПР и показано, что решающим фактором является спектральная ширина аппаратной функции  $G_a$ . А она постоянна и, кроме того, мы рассматриваем случай однородной атмосферы. Поэтому и используем лидарное уравнение типа (1).

Будем рассматривать однократное рассеяние и однородную атмосферу [1, 3]. Мерой сигнала рассеяния будет длительность времени измерения  $t_d$ , которое выразим из уравнения (1) в виде

$$t_d = n(H) H^2 / [n_0 K_1 \Delta H G(H) f S_0 T^2(\lambda, H) \rho]. \quad (2)$$

Для нашей экспериментальной ситуации возьмем концентрацию молекул сероводорода в диапазоне  $N(z) = 10^{11} - 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Значение максимума полосы валентных SH колебаний молекул  $\text{H}_2\text{S}$  из [1, 3] равно  $2611 \text{ см}^{-1}$  или 3,83 мкм. В качестве опорного канала возьмём лазерное излучение второго лазера с длиной волны 3,9 мкм. Значения коэффициентов ослабления для этих длин волн  $\alpha(\lambda_0, z)$  и  $\alpha(\lambda_1, z)$  равны соответственно 0,05 и 0,04  $\text{км}^{-1}$ , сечения резонансного поглощения на длине волны 3,83 мкм равно  $4 \times 10^{-18} \text{ см}^2$ , а лидарной константы  $K_1$  — 0,49 были взяты как и в [1, 3, 5].

Поперечное сечение зеркала приёмного телескопа лидара равно  $0,13 \text{ м}^2$ , а шаг по расстоянию

выбирался от 100 м до 10 км в зависимости от уровня концентрации исследуемых молекул и высоты нахождения космического аппарата. При расчётах пропускания атмосферы на заданных длинах волн учитывалась зависимость величины коэффициента ослабления  $\alpha(\lambda, z)$  от высоты  $z$  в соответствии с [7, с. 382].

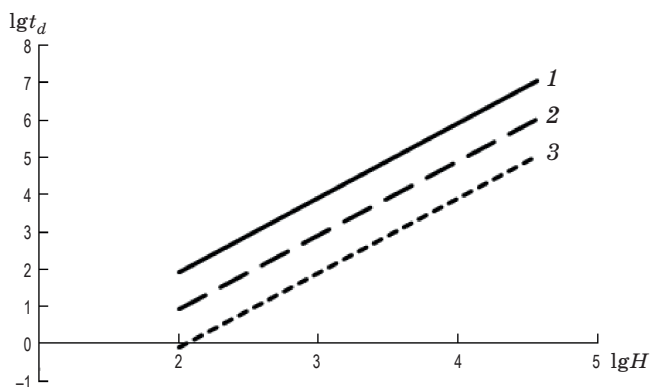
Рассмотрим численное решение уравнения (2) в предположении, что  $G(H)$  для нашего случая равно 1, и за время измерения  $t_d$  будут зарегистрированы 10 фотонов. Зондирование молекул сероводорода производится с космического аппарата, находящегося как на геостационарной (или геосинхронной) орбите высотой 35786 км, так и до высоты 100 км для концентрации исследуемых молекул  $N(z) = 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . Результаты решения уравнения (2) представлены на рис. 2.

Как следует из графика рис. 2 увеличение шага по расстоянию  $\Delta H$  в уравнении (2) на порядок приводит к такому же уменьшению времени измерения.

Минимальное время измерения для высоты 100 км составит для 100 м почти 80 мкс, а для шага 10 км — 800 нс, для высоты 600 км и шага 100 м — 3 мс, а шага 10 км — 29,2 мкс при частоте следования лазерных импульсов 100 кГц. Для геостационарной орбиты с высотой 35786 км минимальное время измерения для шага 10 км составит 10,5 с.

Для оценки потенциальных возможностей такой системы мониторинга молекул сероводорода в атмосфере с космической платформы было выполнено численное решение лидарного уравнения для дифференциального поглощения и рассеяния, которое рассмотрим в виде [6]

$$\int_0^H N(z) dz = \frac{1}{2\sigma_0} \left\{ \ln \left[ \frac{n(\lambda_1, H) n_0 K_{10} \rho_0}{n(\lambda_0, H) n_1 K_{11} \rho_1} \right] - \frac{1}{\sigma_0} \int_0^H [\alpha(\lambda_0, z) - \alpha(\lambda_1, z)] dz \right\}, \quad (3)$$



**Рис. 2.** Рассчитанная по уравнению (2) зависимость логарифма времени измерения  $T_d$  (в мкс) от логарифма высоты зондирования  $H$  (в км) для трёх значений длины шага по расстоянию  $\Delta H$ : 100 м (1), 1 км (2) и 10 км (3).

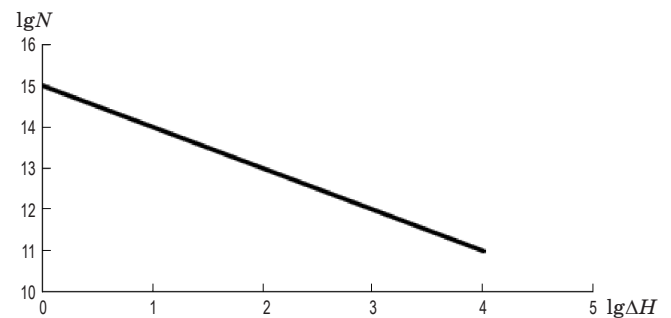
где  $N(z)$  — концентрация исследуемых молекул на высоте или расстоянии зондирования,  $z$ ,  $\sigma_0$  — их сечение резонансного поглощения,  $n(\lambda, H)$  — регистрируемое лидаром число фотонов на каждой длине волны на высоте  $H$ ,  $n_0, n_1$  — число фотонов в импульсе лазерного излучения на каждой длине волны,  $K_{10}$  и  $K_{11}$  — лидарные константы на каждой длине волны,  $\rho_0$  и  $\rho_1$  — суммарные коэффициенты аэрозольного и молекулярного рассеяния назад в атмосфере на каждой длине волны. Все величины определены для двух длин волн лазерного излучения  $\lambda_0$  и  $\lambda_1$ , причём вторая длина волны находится вне полосы поглощения исследуемых молекул сероводорода.

В общем случае оптическая плотность  $D$  при дифференциальном поглощении [2] определяется сечением резонансного поглощения  $\sigma_0$  исследуемых молекул, их концентрацией  $N$  и толщиной поглощающего слоя атмосферы  $\Delta H$ . С другой стороны, эта оптическая плотность определяется логарифмом отношения лидарных сигналов или чисел фотонов на двух выбранных длинах волн согласно лидарному уравнению (3).

Используя те же самые значения параметров задачи, по уравнению (3) были выполнены численные расчёты оптической плотности дифференциального поглощения для выбранных значений концентраций исследуемых молекул и выбранных длин волн в диапазоне шага по расстоянию  $\Delta H$  от 1 до 10000 м. Результаты расчётов приведены на рис. 3.

График на рис. 3 показывает зависимость детектируемой лидаром концентрации молекул сероводорода от величины шага по высоте, причём для значения  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  эта длина составляет всего 1 м. В это же время для концентрации  $10^{11} \text{ см}^{-3}$  длина трассы увеличивается до 10 км.

Эти результаты подтверждают, что метод дифференциального поглощения имеет ограничения снизу и сверху на диапазон возможных значений произведений концентрации на толщину поглощающего слоя, определяемых временем одного из-



**Рис. 3.** График рассчитанной по уравнению (3) зависимости логарифма концентрации  $N$  (в  $\text{см}^{-3}$ ) от логарифма шага по расстоянию или длины трассы  $\Delta H$  (в м) для значения оптической плотности  $D = 0,36$ .

мерения  $t_1 = 2\Delta H/c$ . Так как динамический диапазон фотоприёмников ограничен [5], будем считать, что максимальное значение оптической плотности может быть равно 2. Для исследования зависимости оптической плотности  $D$  от величины шага по высоте  $\Delta H$  и уровня концентрации  $N$  были выполнены расчёты по уравнению (3) для значений оптической плотности в диапазоне 0,1–2,0. На рис. 4 представлена зависимость оптической плотности в этом диапазоне от расстояния зондирования для уровня концентрации исследуемых молекул  $10^{11} \text{ см}^{-3}$ .

Анализ графика на рис. 4 показывает возможность регистрации сигнала с концентрацией молекул  $10^{11} \text{ см}^{-3}$  на трассах зондирования от 3,5 до 51 км, а если длина трассы постоянна и равна 10 км, то для тех же параметров лидара можно зарегистрировать уровни концентрации молекул сероводорода в диапазоне  $2,5 \times 10^{10} - 5 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ , что подтверждается графиком на рис. 5.

Для оценки полученных результатов учтём перемещение космической платформы с лидаром. Эта платформа движется по круговой орбите со скоростью не менее 7,9 км/с. В то же время из-за вращения Земли поле зрения приёмного телескопа на её поверхности перемещается со скоростью 464 м/с. Тогда эта точка на поверхности переместится за время измерения на минимальное расстояние около 4,87 км для времени измерения 10,5 с на геостационарной орбите. Кроме того, поле зрения приёмного телескопа с расходимостью приблизительно  $10^{-3}$  будет выглядеть на земной поверхности как круг с диаметром 36 км. Поэтому максимальный измерительный объём за время регистрации 10,5 с для исследуемых молекул сероводорода будет равен  $1753 \text{ км}^3$  для высоты столба атмосферы 10000 м.

Таким, образом, анализ полученных результатов показывает, что время измерения для уровня концентрации исследуемых молекул сероводорода  $10^{11} \text{ см}^{-3}$  на длине волны лазерного излучения 3,83 мкм и высоты от 100 до 36000 км лежит в диапазоне 0,8 мкс–10,5 с для такого варианта лидара

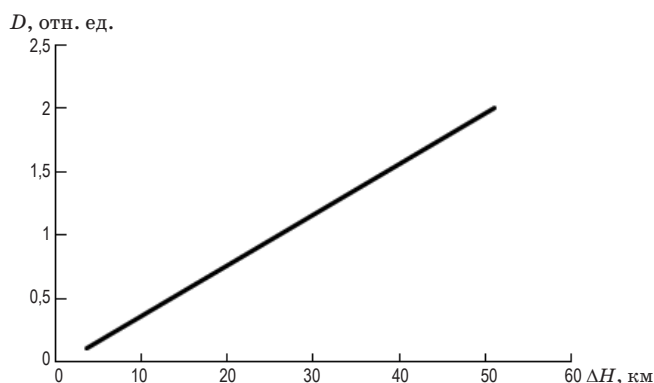


Рис. 4. График рассчитанной по уравнению (3) зависимости оптической плотности  $D$  от шага по высоте или длине трассы  $\Delta H$  для значения концентрации молекул  $10^{11} \text{ см}^{-3}$ .

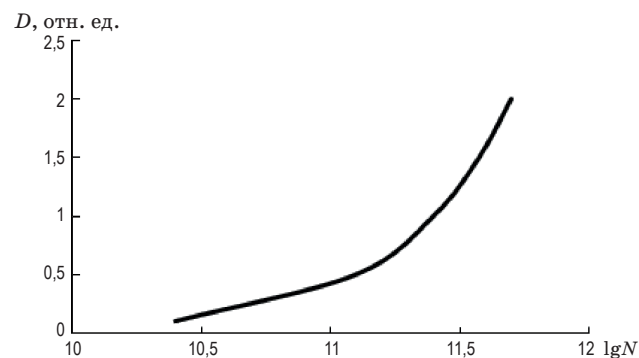


Рис. 5. График рассчитанной по уравнению (3) зависимости оптической плотности  $D$  от шага по расстоянию или длине трассы  $\Delta H$  для значения концентрации молекул в диапазоне  $10^{10} - 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

ДПР. Поэтому можно вести речь о регистрации таким лидаром с космической платформы концентрации исследуемых молекул сероводорода на уровне до  $10^{11} \text{ см}^{-3}$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке основной части Гос. задания Министерства образования и науки РФ, задание № 5.7721.2017/БЧ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Привалов В.Е., Фотиади А.Э., Шеманин В.Г. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы. СПб.: Лань, 2013. 288 с.
2. Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Лидарное уравнение с учётом конечной ширины линии генерации лазера // Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79. № 2. С. 170–180.
3. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.
4. Лайхтман Д.Л. Физика пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидромет. изд-во, 1970. 340 с.
5. Привалов В.Е., Шеманин В.Г. Параметры лидара дифференциального поглощения для обнаружения молекулярного йода в атмосфере // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 2. С. 40–42.
6. Зуев В.В., Катаев М.Ю., Макогон М.М., Мицель А.А. Лидарный метод дифференциального поглощения. Современное состояние исследований // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 8. С. 1136–1164.
7. Справочник по лазерам. Том I / Под ред. Прохорова А.М. М.: Советское Радио, 1978. 504 с.