

Зондирование молекул сероводорода лидаром комбинационного рассеяния света с летающей платформы

© В.Е. Привалов¹, В.Г. Шеманин²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 Санкт-Петербург, Россия

² Новороссийский политехнический институт, филиал Кубанского государственного технологического университета, 353900 Новороссийск, Россия

e-mail: vaepriv@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.05.2018 г.

В окончательной редакции 02.07.2018 г.

Численно решено лидарное уравнение для комбинационного рассеяния света молекулами сероводорода в направлении 180° при зондировании молекул сероводорода в атмосфере и воде с концентрациями в диапазоне $10^{11} - 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ с летающей платформы на высотах до 500 м в режиме синхронного счета фотонов. Показано, что время измерения для такого уровня концентраций исследуемых молекул на глубине до 100 м, на длине волны лазерного излучения 532 нм и высоте платформы до 500 м не превышает 34 мин. Разработка новых схем лидаров открывает дополнительные возможности для дистанционного зондирования низких концентраций молекул сероводорода в морской воде.

DOI: 10.21883/OS.2018.10.46714.129-18

Как известно [1], в Черном море существует обширный слой жидкого сероводорода, который расположен в разных частях моря на глубинах от 90 до 150 м. Уровень сероводородного слоя постоянно пульсирует, поднимается иногда до уровня 75 м, потом снижается. Поэтому возможно повышение концентрации молекул сероводорода в морской воде и загрязнение ими атмосферного воздуха над морем. Все это представляет серьезную проблему в связи с высокой токсичностью и взрывоопасностью сероводорода.

Мониторинг газовых молекул с летающей платформы может стать эффективным способом решения этой проблемы за счет большой площади охвата на поверхности моря или большого измерительного объема в атмосферном пограничном слое и возможности получить больше информации за короткий промежуток времени [2]. Поэтому становится актуальной задача разработки новых лидаров для измерения концентрации молекул H_2S на уровне от предельно допустимых концентраций (ПДК) 0.008 mg/m^3 [3] или $1.4 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ до тысяч ПДК, причем не только в атмосферном воздухе, но и в воде.

Ранее [2–4] были рассмотрены методы лазерного зондирования молекул сероводорода в атмосфере. Было показано, что лидар комбинационного рассеяния света (КРС) может использоваться для дистанционного измерения концентрации молекул на уровне сотен и тысяч ПДК. Представляет интерес теоретическая оценка возможностей лидара КРС для обнаружения молекул сероводорода в воде на уровне концентрации порядка ПДК и выше с летающей платформы в диапазоне высот до 500 м. Причем в качестве летающей платформы может рассматриваться любой летательный аппарат, включая беспилотные. Поэтому целью настоящей работы является оценка параметров лидара КРС для зондирования

молекул сероводорода в воде и в атмосферном пограничном слое на уровне ПДК и выше с летающей платформы на высотах порядка сотен метров в режиме синхронного счета фотонов.

Для этого было выполнено численное решение лидарного уравнения для КРС молекулами сероводорода в направлении 180° для выбора длины волны лазерного излучения, параметров лидара и получения минимального времени измерения сигнала комбинационного рассеяния света.

Оптическая схема такого лидара подробно рассмотрена в [2,3] и приведена на рис. 1.

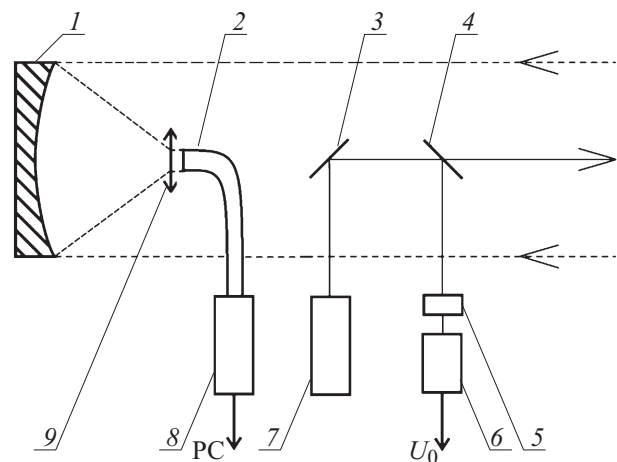


Рис. 1. Оптическая схема лидара КРС: 1 — сферическое зеркало приемного телескопа, 2 — волоконный ввод, 3 — глухое зеркало, 4 — стеклянная пластина, 5 — интерференционный светофильтр, 6 — фотоприемник, 7 — лазер, 8 — микроспектрометр, 9 — линзовый объектив.

В качестве возможных вариантов рассмотрим использование второй гармоники YAG:Nd-лазера (длина волны 532 nm) с накачкой полупроводниковым лазером и полупроводниковых лазеров с длинами волн 405 и 655 nm с длительностью импульсов 10 ns и энергиями в импульсе до 1 mJ при частоте следования лазерных импульсов f до 1 MHz [2]. Излучение лазера 7 направлялось вдоль оси приемного телескопа перпендикулярно поверхности моря. Излучение комбинационного рассеяния молекулами сероводорода в атмосферном пограничном слое и в воде в направлении назад собиралось приемным телескопом типа Ньютона со сферическим зеркалом 1 диаметром 400 mm и фокусировалось линзовым объективом 9 в волоконный ввод 2 микроспектрометра 8 типа FSD-8, работающего на линии с ПК. Часть лазерного излучения направлялась стеклянной пластиной 4 через интерференционный светофильтр 5 на фотодиод 6, напряжение U_0 с которого записывалось платой сбора данных в ПК для контроля энергии лазерного импульса и формирования начала отсчета времени измерения.

Лидарное уравнение для КРС исследуемыми молекулами в направлении назад в режиме счета фотонов запишем для чисел фотонов в виде [2]

$$n(\lambda, H) = n_0 K_1 \Delta H G(H) f t S_0 T_0(\lambda_0, H) \times T(\lambda, H) N(H) (d\sigma/d\Omega) / 2H^2, \quad (1)$$

где $n(\lambda, H)$ — число фотонов, зарегистрированное фотодетектором лидара на длине волны КРС λ с высоты H , n_0 — число фотонов на длине волны лазерного излучения λ_0 , K_1 — лидарная константа на длине волны λ , S_0 — площадь приемной апертуры телескопа, $G(H)$ — геометрическая функция лидара, $N(H)$ — концентрация исследуемых молекул, t — время измерения, множители (пропускание атмосферы) равны соответственно [5]

$$T_0(\lambda_L, H) = \exp \left[- \int_0^H \alpha(\lambda_L, z) dz \right],$$

$$T(\lambda, H) = \exp \left[- \int_0^H \alpha(\lambda, z) dz \right],$$

где $\alpha(\lambda_L, z)$ и $\alpha(\lambda, z)$ — коэффициенты ослабления на частотах лазерного излучения и КРС молекулами сероводорода, $d\sigma/d\Omega$ — дифференциальное сечение КРС-исследуемыми молекулами.

Будем рассматривать однократное комбинационное рассеяние и однородную среду (атмосферу или морскую воду) [3,5]. Тогда из уравнения (1) выразим время измерения, которое будет служить мерой эффективности лидара, в виде

$$t = n(\lambda, H) H^2 / [n_0 K_1 \Delta H G(H) f S_0 T_0(\lambda_0, H) \times T(\lambda, H) N(H) (d\sigma/d\Omega)]. \quad (2)$$

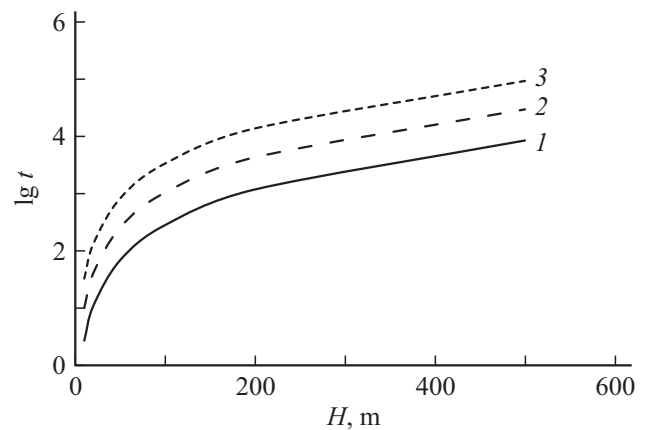


Рис. 2. Логарифмическая зависимость времени измерения t (в s) от расстояния H (в m), рассчитанная по уравнению (2) для длин волн лазерного излучения 405 (1), 532 (2) и 655 nm (3) при зондировании молекул сероводорода в атмосфере.

Для нашей экспериментальной ситуации возьмем концентрацию молекул сероводорода в диапазоне $N(z) = 10^{11} - 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Значение максимума полосы валентных колебаний SH молекул H_2S взято из [3] и равно 2611 cm^{-1} . Значения коэффициентов ослабления в атмосфере и воде для этих длин волн $\alpha(\lambda_L, z)$ и $\alpha(\lambda, z)$, дифференциальных сечений колебательного КРС собраны из [3,6] в таблице.

Поперечное сечение зеркала приемного телескопа лидара было 0.13 m^2 , а шаг по расстоянию — 7.5 m . Лидарная константа K_1 определялась как произведение спектрального пропускания приемного телескопа на относительную спектральную чувствительность фотоприемника $\xi(\lambda)$ на длине волны λ [3] из таблицы.

Рассмотрим численное решение уравнения (2) в предположении, что $G(H)$ для нашего случая равно 1, концентрация молекул сероводорода $N(z) = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ и за время измерения t будут зарегистрированы 10 фотонов. Результаты решения уравнения (2) для этого случая представлены на рис. 2.

Как следует из графика рис. 2, спектральные зависимости величин, входящих в уравнение (2), приводят к уменьшению времени измерения в ряду длин волн лазерного излучения 655–532–405 nm, но за первые 100 m это время измерения резко нарастает.

Минимальное время измерения можно получить на длине волны 405 nm: для 50 m это значение составит почти 70 s, для 100 m — 285 s, а для 500 m — почти 850 s при частоте следования лазерных импульсов 1 MHz и времени одного измерения 50 ns (шаг по высоте $\Delta H = 7.5 \text{ m}$). Очевидно, что уменьшение времени измерения возможно за счет увеличения частоты следования лазерных импульсов или увеличения их энергии.

Рассмотрим зависимость времени измерения от концентрации исследуемых молекул. На рис. 3 приведено решение уравнения (2) для концентрации молекул серо-

Длины волн лазерного излучения и полос КРС-молекул сероводорода, дифференциальные сечения колебательного КРС для этих полос, коэффициенты ослабления в атмосфере (*a*) и в воде (*w*) на этих длинах волн и относительная спектральная чувствительность фотоприемника

Длины волн, nm	Дифференциальное сечение КР $(d\sigma/d\Omega) \cdot 10^{30} \text{ cm}^2$	Коэффициент ослабления				Относительная спектральная чувствительность ФП $\xi(\lambda)$
		$\alpha_a(\lambda_0, z), \text{ km}^{-1}$	$\alpha_a(\lambda, z), \text{ km}^{-1}$	$\alpha_w(\lambda_0, z), \text{ km}^{-1}$	$\alpha_w(\lambda, z), \text{ km}^{-1}$	
655	1.35	0.14		0.08		
790.1			0.11		0.15	0.28
532	3.10	0.16		0.02		
617.8			0.15		0.07	0.48
405	9.23	0.24		0.05		
452.9			0.21		0.04	0.8

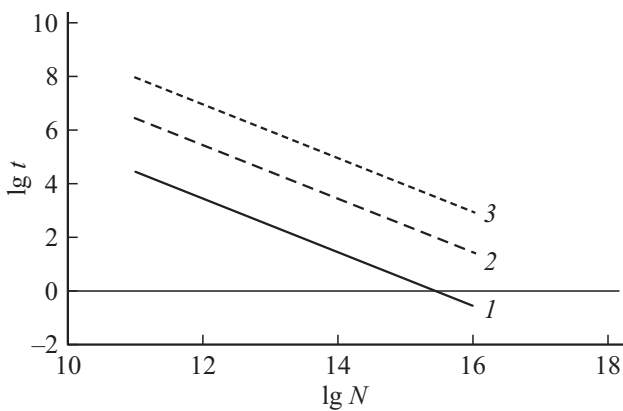


Рис. 3. Логарифмическая зависимость времени измерения *t* (в μs) от $\lg N$ (N в cm^{-3}), рассчитанная по уравнению (2) для длины волны лазерного излучения 405 nm при зондировании молекул сероводорода в атмосфере с высоты 10 (1), 100 (2) и 500 м (3).

водорода от 10^{11} до 10^{16} cm^{-3} и высот 10, 100 и 500 м, на которых летают различные летательные аппараты. В этом случае время, необходимое для регистрации сигнала с концентрацией молекул 10^{11} cm^{-3} и высоты 100 м, составляет для длины волны 405 nm 2.9 s, а высоты 500 м — 85 s. При этом за 85 s смещение летательного аппарата, движущегося со скоростью 10 м/с, составит 850 м и приведет к увеличению измерительного объема до почти $595\,000 \text{ m}^3$ с высотой 500 м, при этом на 7.5 м высоты придется около 9000 m^3 . Движение летающей платформы приводит к заметному увеличению измерительного объема с 769 до $595\,000 \text{ m}^3$ или почти в 800 раз по сравнению с неподвижной платформой.

Из уравнения (2) выразим время измерения для зондирования под водой в виде

$$t = 4n(\lambda, H_a, H_w)\pi n_w^2 (H_a + H_w/n_w)^2 / [n_0 K_1 \Delta H G(H) \times k_w f S_0 N(H_w) (d\sigma/d\Omega) T_0(\lambda_0, H_a) T(\lambda, H_a) \times T_{0w}(\lambda_0, H_w) T_w(\lambda, H_w)]. \quad (3)$$

Результаты расчетов по уравнению (3) для зондирования молекул сероводорода с концентрацией 10^{15} cm^{-3} на длине волны лазерного излучения 405 nm и глубин до 100 м приведены на рис. 4. Эти графики показывают, что увеличение глубины зондирования моря на 10 м при заданной концентрации исследуемых молекул ведет к увеличению времени измерения от 1.8 s для высоты платформы 100 м до 4.7 s для 500 м. Результаты расчетов для трех длин волн лазерного излучения в зависимости от глубины зондирования в воде представлены на рис. 5. Полученное различие связано с различием в двухпроходных коэффициентах пропускания границы раздела воздух–вода по данным [6]. Для расчетов были взяты из [6] значения для длины волны 405 nm — 0.2 m^{-1} , 532 nm — 0.1 m^{-1} , а для 655 nm — 0.35 m^{-1} , что и привело к невозможности зондирования на длине волны лазерного излучения 655 nm на глубинах более 60 м.

Выполним расчеты зависимости времени измерения от концентрации исследуемых молекул для пяти значений глубины зондирования в воде на длине волны

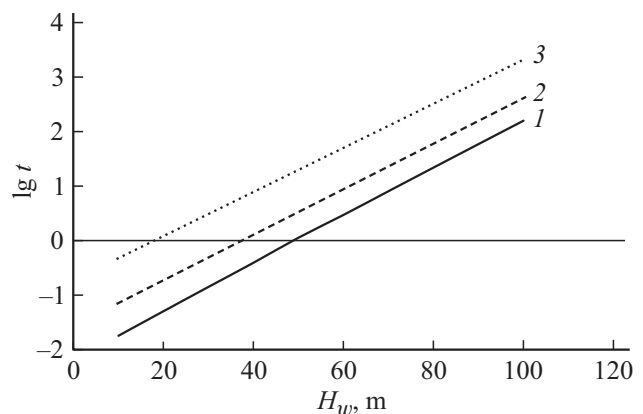


Рис. 4. Логарифмическая зависимость времени измерения *t* (в s) от глубины H_w (в м), рассчитанная по уравнению (3) для длины волны лазерного излучения 405 nm при зондировании молекул сероводорода с концентрацией 10^{15} cm^{-3} с движущейся летающей платформой на высотах 10 (1), 100 (2) и 500 м (3) над уровнем моря.

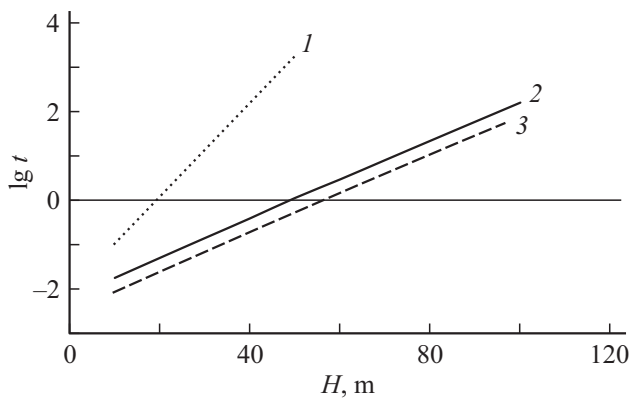


Рис. 5. Логарифмическая зависимость времени измерения t (в s) от глубины H_w (в m), рассчитанная по уравнению (3) для трех длин волн лазерного излучения 405 (2), 532 (3) и 655 nm (1) при зондировании молекул сероводорода с концентрацией 10^{15} cm^{-3} с движущейся летающей платформы на высоте 100 m над уровнем моря.

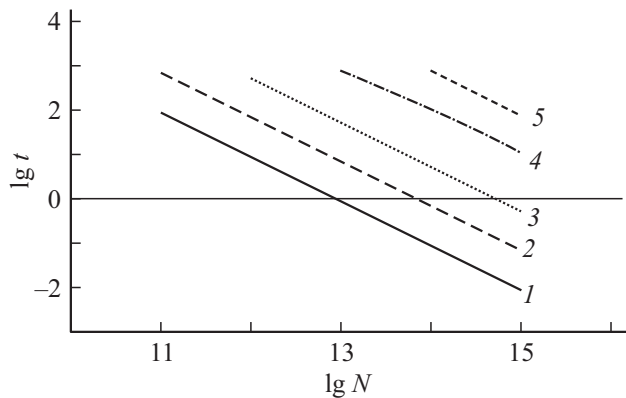


Рис. 6. Логарифмическая зависимость времени измерения t (в s) от $\lg N$ (N в cm^{-3}), рассчитанная по уравнению (3) для глубин $H_w = 10$ (1), 30 (2), 50 (3), 80 (4), 100 m (5) и длины волны лазерного излучения 532 nm при зондировании молекул сероводорода с концентрациями менее 10^{13} cm^{-3} на длине волны лазерного излучения 532 nm на глубинах более 80 m.

лазерного излучения 532 nm, причем время измерения было ограничено сверху значением 1000 s. Эта логарифмическая зависимость времени измерения от логарифма концентрации молекул сероводорода представлена на рис. 6. Представленный на рис. 6 результат свидетельствует о невозможности зондирования молекул сероводорода с концентрациями менее 10^{13} cm^{-3} на длине волны лазерного излучения 532 nm на глубинах более 80 m.

Таким образом, анализ полученных результатов показывает, что время измерения для уровня концентрации исследуемых молекул сероводорода 10^{15} cm^{-3} на длине волны лазерного излучения 532 nm, высоте полета платформы до 500 m и глубине зондирования в толщу воды до 100 m достигает 2030 s для принятого варианта лидара КРС. Поэтому можно вести речь о регистрации таким лидаром с летающей платформы за разумные

времена концентрации исследуемых молекул сероводорода на уровне ПДК с высоты 100 m. Следовательно, можно будет зондировать молекулы сероводорода в воде с концентрациями на уровне ПДК и выше с высоты до 100 m.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными [6] и отражают различие в уровнях ПДК исследованных молекул углеводородов [3], а разработка новых вариантов лидаров, например [2], открывает потенциальные возможности для дистанционного зондирования низких концентраций молекул сероводорода в воде с летающей платформы.

Работа была частично поддержана в рамках Основной части Гос. задания Министерства образования и науки РФ № 5.7721.2017/БЧ.

Список литературы

- [1] Иванов А. Из Черного моря уходит жизнь. <http://svpressa.ru/society/article/155858/?cbt=1>
- [2] Привалов В.Е., Шеманин В.Г. // Опт. и спектр. 2017. Т. 123. № 6. С. 941.
- [3] Привалов В.Е., Фотиади А.Э., Шеманин В.Г. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы. СПб.: Лань, 2013. 288 с.
- [4] Privalov V.E., Shemanin V.G. // Proc. SPIE. 1998. V. 3345. P. 6.
- [5] Донченко В.А., Кабанов М.В., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. Атмосферная электрооптика. Томск: Изд-во НТЛ, 2010. С. 178–181.
- [6] Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование. М.: Мир, 1987. 550 с.