

А.В. Мигулин, Т.Б. Разумихина, А.И. Холодных, В.М. Хулугуров

ЛИДАР С ИЗЛУЧАТЕЛЕМ НА F_2^+ -ЦЕНТРАХ ОКРАСКИ ДЛЯ ТРАССОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ АТМОСФЕРЫ В ДИАПАЗОНЕ 0,9 ... 1,0 МКМ

Описано устройство лидара с излучателем на F_2^+ -центрах окраски, обеспечивающего высокую спектральную яркость перестраиваемого по частоте выходного излучения — ширина линии генерации $0,08 \text{ см}^{-1}$, диапазон перестройки $0,9 \dots 1,0 \text{ мкм}$, мощность излучения несколько сотен кВт. С помощью лидара были прописаны спектры пропускания атмосферы на трассах различной длины в городских условиях. Экспериментально полученные спектры сопоставлены с расчетными, при общем совпадении спектров на ряде частот обнаруживаются их значительные расхождения.

Работа посвящена спектроскопии атмосферных газов и продолжает исследования, выполнявшиеся ранее с использованием ПГС-лидара [1].

К настоящему времени накоплена обширная спектроскопическая информация о спектрах поглощения различных атмосферных составляющих, полученная расчетным путем. Существенно меньше имеется спектров с высоким разрешением, снятых для реальной атмосферы. Созданная лидарная система дает возможность произвести запись спектра поглощения атмосферы в области $0,9 \dots 1,0 \text{ мкм}$ на трассах в несколько километров с разрешением $0,08 \text{ см}^{-1}$. Достаточно высокая спектральная яркость излучения и чувствительное фотоприемное устройство позволяют с использованием топографических отражателей регистрировать сигналы на трассах более 10 км, т.е. обеспечивают чувствительность по поглощению $10^{-7} \dots 10^{-8} \text{ см}^{-1}$, что сравнимо с чувствительностью методов внутривибрационной спектроскопии и измерений на базе уникальных многоходовых кювет [2].

Полученные экспериментальные спектры можно использовать для уточнения расчетных, т.е. для пополнения и уточнения спектроскопического банка данных, а в сочетании с данными других методов для дальнейшего повышения точности определения спектральных параметров линий поглощения.

В используемой спектральной области находится полоса поглощения водяного пара ($0,94 \text{ мкм}$), поэтому данную лидарную систему можно применять для измерения содержания паров как среднего значения на трассе, так и в лидарном режиме. В последнем случае измерения проводятся по методу сравнительного поглощения с опорным излучением на длине волны накачки ($1,08 \text{ мкм}$). Наличие плавной перестройки частоты позволяет при измерениях влажности выбирать наиболее подходящую для зондирования частоту излучения в зависимости от дальности зондирования и условий в атмосфере.

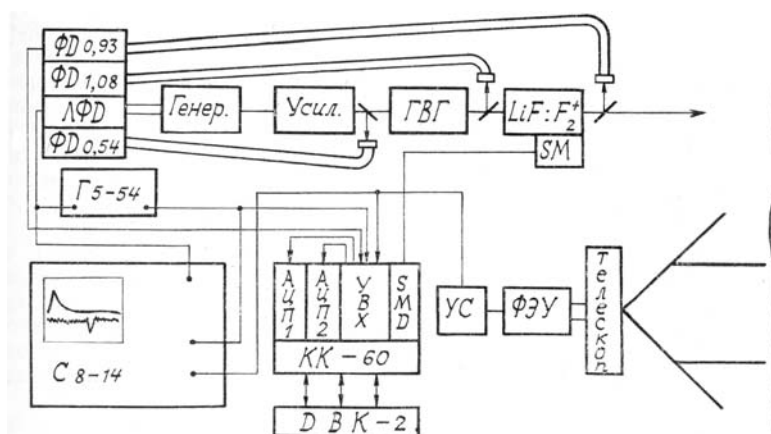


Рис. 1. Блок-схема лидара для трассовой спектроскопии атмосферы

Блок-схема лидара приведена на рис. 1. Излучатель состоит из генератора на алюминате иттрия ($\lambda = 1,08 \text{ мкм}$), выполненного по трехзеркальной V-образной схеме с двумя проходами излучения через активный элемент, одного каскада усиления, удвоителя частоты и собственно перестраиваемого по частоте лазера на кристалле LiF с F_2^+ центрами окраски ЦО. В систему регистрации и обработки сигнала входят: телескоп диаметром 30 см, блок контрольных фотодиодов, ФЭУ с усилителем, а также выполненные в стандарте КАМАК устройства оцифровки и управления шаговым двигателем, сопряженные с диалоговым вычислительным комплексом ДБК-2.

Устройство селективного резонатора лазера на ЦО со скользящим падением на дифракционную решетку (рис. 2) похоже на предложенное в [3]. Накачка лазера на ЦО производится второй гармоникой ($\lambda = 0,54$ мкм) базового лазера на алюминате, получаемой в кристалле КТР. Резонатор образован входным дихроичным зеркалом 1, дифракционными решетками 2, 3 и призмным расширителем 4. Входное зеркало пропускает более 85% накачки и имеет коэффициент отражения порядка 90% в диапазоне длин волн 0,9 ... 1,0 мкм. По отношению к излучению дифракционная решетка 2 (1200 штр/мм) была установлена под углом 80° , а решетка 3 (600 штр/мм) — в автоколлимационном режиме во втором порядке дифракции. Углы падения на призмный расширитель и решетку 2 выбирались из соображений получения максимальной добротности резонатора при заданном количестве засвеченных штрихов N решетки 2, играющей определяющую роль в формировании спектральных характеристик излучения. Коэффициент обратной связи k дисперсионного узла резонатора, характеризующий его добротность, определяется как: $k = T_1^2(\varphi) \cdot T_2^2 \cdot R_2^2(\theta) \cdot R_3$ — для резонатора с призмой и $k = R_2^2(\theta) \cdot R_3$ — для резонатора без призмы, где R_2, R_3 — дифракционные эффективности решеток 2 и 3 соответственно, а T_1, T_2 — пропускание рабочих граней призмы. Зависимости $T_1(\varphi)$ и $T_2(\varphi)$ легко рассчитываются по формулам Френеля, а $R_2(\theta)$ и $R_3(\theta)$ измерены экспериментально (см. рис. 2). Следует отметить, что в рабочем диапазоне углов φ и θ T_2 и R_3 практически постоянны и равны $T_2 = 96\%$, а $R_3 = 70\%$, в то время как $T_1(\varphi)$ и $R_2(\theta)$ изменяются весьма существенно. Ясно, что одно и то же значение k и k^* (то есть один и тот же коэффициент расширения Q) можно получить при различных парах значений φ и θ для резонатора с призмой и при некотором значении θ более близком к 90° в случае резонатора без призмы.

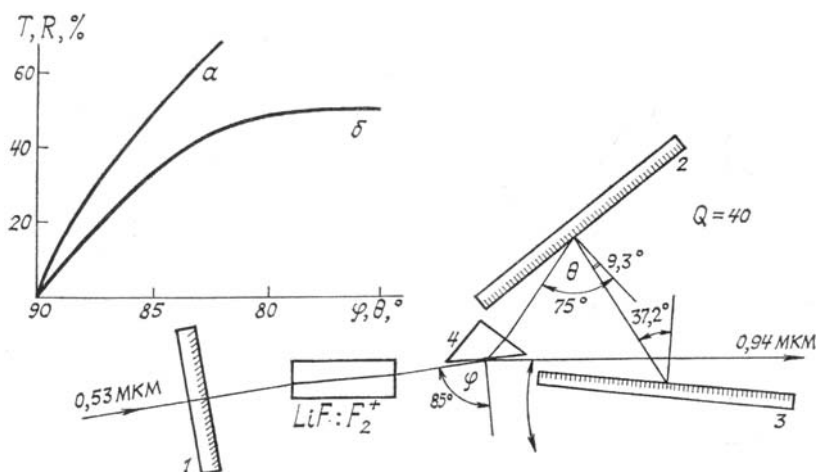


Рис. 2. Оптическая схема дисперсионного резонатора на LiF и главные оптические характеристики его элементов. 1 — входное дихроичное зеркало; 2, 3 — дифракционные решетки с 1200 и 600 штр/мм соответственно; 4 — призма; а — зависимость пропускания T_1 призмы 4 от угла падения φ ; б — зависимость дифракционной эффективности R_2 решетки 2 от угла падения света на решетку

Оценки k и k^* приведенные для случая $Q = 40$, показывают, что при использовании призмного расширителя максимальное значение $k = 8\%$, в то время как $k^* = 0,7\%$. Таким образом, использование призмного расширителя существенно увеличивает добротность резонатора без ухудшения его дисперсионных свойств и, следовательно, приводит к увеличению области перестройки частоты и увеличению контраста между генерацией и широкополосной суперлюминисценцией ЦО.

Перестройка частоты излучения осуществляется поворотом решетки 3 (т. е. изменением угла автоколлимации) с помощью программно управляемого шагового двигателя. Один шаг двигателя сдвигает частоту излучения на $0,03$ см⁻¹.

В качестве активного элемента лазера на ЦО использовался кристалл LiF : длиной 3 см. Контраст (отношение коэффициента пропускания накачки в просветленном состоянии к начальному) используемого элемента составлял 15. Область перестройки длины волны 0,88 ... 1,00 мкм. Максимальный КПД преобразования накачки достигал 10%, при этом энергия выходных импульсов составляла 3 мДж. Ширина линии генерации измерялась с помощью эталона Фабри—Перо как по основному излучению лазера на ЦО, так и по его второй гармонике, получаемой в кристалле иодата лития, и составила (0,09 ... 0,1) см⁻¹.

Запись и обработка спектров пропускания атмосферы велась по следующей схеме. На заданной длине волны излучения в атмосферу посылалось программно задаваемое число импульсов n . Частота следования импульсов — 2,5 Гц. Для каждого i -го импульса вычислялась величина

$$q_i = \frac{U_i - U_\Phi}{U_i^0}$$

где U_i^0, U_i, U_ϕ — напряжения на выходах фоторегистрирующей системы, соответствующие мощностям сигналов: 1) посылаемого в атмосферу (фотодиод), 2) принимаемого из атмосферы (ФЭУ), и 3) фоновой засветки (сигнал ФЭУ в отсутствие излучения лазера). Величина фона измерялась в начале эксперимента и уточнялась в течение сеанса записи спектра пропускания атмосферы. Затем для данной серии из n импульсов вычислялась средняя величина

$$\bar{q} = 1/n \sum_i^n q_i$$

и среднеквадратическая погрешность

$$D = \sqrt{1/n \sum (q_i)^2 - (\bar{q})^2}.$$

По окончании этого цикла программно управляемый шаговый двигатель поворачивал решетку на заданный угол, т.е. изменял на известную величину частоту зондирования, после чего измерительный цикл повторялся. В конце сеанса массив данных выводился на цифропечать.

Наиболее информативные записи спектров получены для двух достаточно коротких трасс длиной 375 и 1100 м. На более длинных трассах в весенне-летний период измерений для широких участков спектра происходило практически полное ослабление сигнала, принимаемого из атмосферы, что приводило к потере количественной информации для этих участков. В качестве ретрорефлекторов в обоих случаях использовались глухие стены зданий. В приемном тракте на выбранный интервал длин волн устанавливался интерференционный фильтр с полосой пропускания по уровню $1/2 - 70 \text{ см}^{-1}$, что в сочетании с полосовыми фильтрами позволяло проводить измерения в любое время суток. При этом отношение сигнал-шум превышало три порядка.

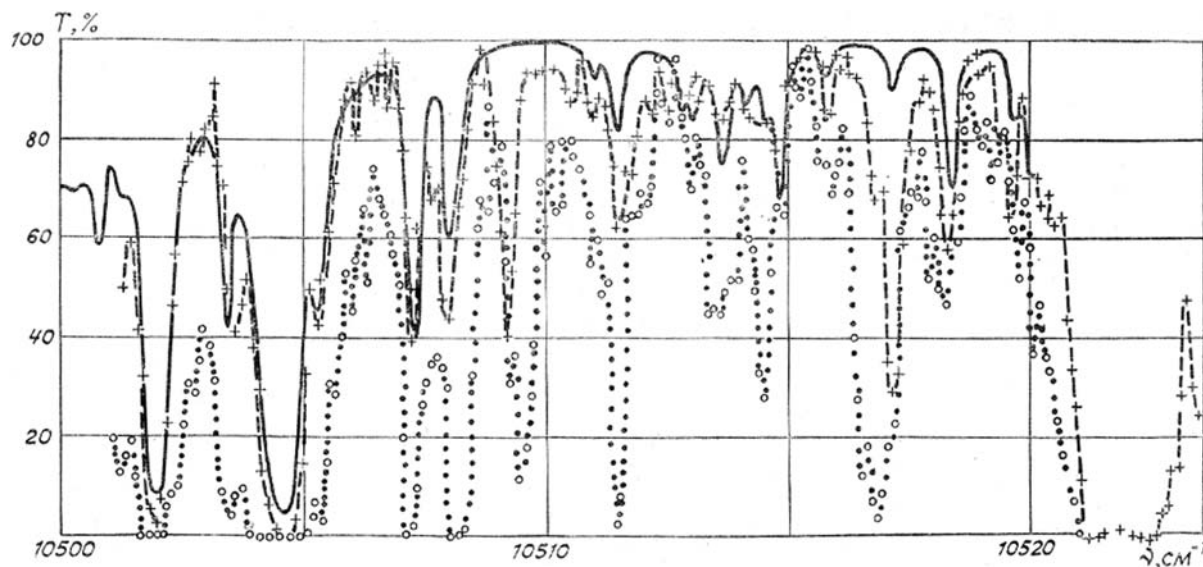


Рис. 3. Спектр пропускания атмосферы: + — + —+ эксперимент 21.06.88. Температура $-20,3^\circ\text{C}$, влажность -63% ; $\circ \dots \circ$ — эксперимент 29.06.88. Температура $-25,6^\circ\text{C}$, влажность -53% ; — — расчет: содержание водяных паров $2NR = 2,8 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, полуширина линии излучения $\gamma_a = 0,0 \text{ см}^{-1}$

На рис. 3 приведен пример записи спектра пропускания для трассы длиной 375 и 1100 м, здесь же дается расчетный спектр для этого интервала, построенный по данным атласа [4] по методике, описанной в [5]. При расчетах не учитывались линии интегральной интенсивностью менее 10^{24} см^{-1} , а полуширина линии излучения бралась $0,05 \text{ см}^{-1}$. Налицо хорошее совпадение расчетных и экспериментальных спектров, хотя имеются и расхождения. Так, на частоте $10517,4 \text{ см}^{-1}$ во всех проведенных измерениях пропускание атмосферы оказалось ниже расчетного, как если бы интенсивность линии поглощения на этой частоте была на порядок выше. В других участках спектра также имеются линии поглощения с интенсивностями, существенно отличающимися от расчетных, например, $\nu \approx 10509,5 \text{ см}^{-1}$. Использование длинных трасс в данном диапазоне длин волн наиболее интересно при низких температурах, когда количество паров воды на трассе мало. В этом случае в спектрах городской атмосферы возможно появление линий других малых атмосферных примесей. Получаемые спектры пропускания можно использовать для определения среднего по трассе значения абсолютной

влажности путем идентификации экспериментальных и расчетных спектров [5]. Для нахождения абсолютной влажности достаточно измерений на одной частоте. В этом случае оперативное вычисление концентрации поглощающей примеси ведется по формуле:

$$T = P/P_0 = \exp[-(2\sigma NR)^b],$$

где T — функция пропускания; P, P_0 — мощности принятого из атмосферы и посылаемого туда излучений, σ и b — коэффициенты. Нами показано [6], что данная эмпирическая формула с ошибкой аппроксимации, не превышающей 5%, описывает зависимость функции пропускания от количества поглощающей примеси на трассе зондирования для среды с нерегулярной структурой спектра поглощения и при зондирующем излучении произвольной спектральной ширины. Коэффициенты σ и b для лазерного излучения известной спектральной ширины и на выбранной частоте вычисляются заранее по имеющейся спектроскопической информации и заносятся в память ЭВМ. Естественно, что частоты зондирования надо выбирать в тех областях, где экспериментальные и расчетные спектры совпадают.

Для иллюстрации использования данного метода по экспериментальному спектру было определено пропускание для нескольких выбранных линий и для этих же частот были рассчитаны коэффициенты σ и b и построены зависимости функций пропускания T от NR (см. рис. 4). Найденные значения NR сравнивались с данными по влажности, полученными с метеостанции МГУ, вблизи которой проходила трасса зондирования. Из рис. 4 видно хорошее согласие результатов.

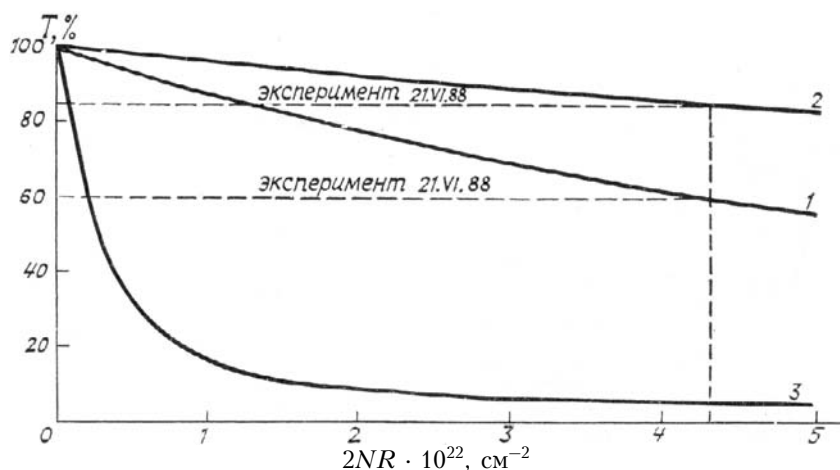


Рис. 4. Зависимость функций пропускания от количества водяных паров на трассе зондирования для различных линий поглощения. 1 — $\nu = 10518,54 \text{ см}^{-1}$ ($\sigma = 1,17 \cdot 10^{-23} \text{ см}^2$, $b = 0,956$); 2 — $\nu = 10514,30 \text{ см}^{-1}$ ($\sigma = 3,71 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$, $b = 0,993$); 3 — $\nu = 10502,05 \text{ см}^{-1}$ ($\sigma = 2,04 \cdot 10^{-22} \text{ см}^2$, $b = 0,603$). Пунктиром показано экспериментальное определение $2NR$ по данным от 21.06.88. Согласно метеоданным $2NR = 3,4 \cdot 10^{22}$, эксперименту — $4,3 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$

В заключение следует отметить, что на данной лидарной системе одновременно с влажностью можно определять и температуру. Для этого необходимо проводить зондирование на двух частотах, одна из которых служит для определения влажности описанным выше методом, а другая выбирается совпадающей с линией поглощения, которая обладает существенной температурной зависимостью. Предварительные оценки показывают, что данной установкой можно определять температуру на трассе зондирования с точностью в несколько градусов.

1. Кгбышкин А.П., Кузнецов В.И., Мигулин А.В., Рой И.В., Холодных А.И. // Изв. АН СССР. Сер. Физич. 1987. Т. 51. № 1. С. 219–223.
2. Зуев В.Е., Макушкин Ю.С., Пономарев Ю.Н. Спектроскопия атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат. 1987.
3. Елизаров А.Ю. // ЖТФ. 1985. Т. 5. Вып. 10. С. 2075–2077.
4. Chedin A., Musson N., Scott N.A. et al. The GEISA data bank 1984 version. // Laboratoire de Meteorologie Dynamique du C. N. R. S. 1986.
5. Кузнецов В.И., Мигулин А.В., Прялкин В.И., Разумихина Т.Б., Холодных А.И. Трассовые измерения влажности ПГС-лидаром. 1986. Т. 45. № 3. С. 468–473.
6. Мигулин А.В., Разумихина Т.Б. // 9-й Всес. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. 1986, 24–26 сент., г. Туапсе.

Московский госуниверситет
им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию
22 августа 1988 г.

A.V. Migulin, T.B. Razumikhina, A.I. Kholodnikh, V.I. Khulugurov. F_2^+ -
Color Center Laser Lidar for Atmospheric Spectroscopy in the 0.9–1.0 μm Range.

A design of a tunable F_2^+ -color center Laser lidar generating an output power of a few hundred kW in a narrow line of 0.08 cm^{-1} in the $0.9\text{--}1.0\ \mu\text{m}$ range is described. Atmospheric transmittance spectra measured along variable path lengths were compared with the available calculated data to show a considerable disagreement for a number of laser frequencies.