

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.510.42

Модернизация лидара «ЛОЗА-А2» для одновременных измерений колебательно-вращательного и чисто вращательного спектров комбинационного рассеяния

Ю.С. Балин[✉], М.Г. Клемашева, Г.П. Коханенко, С.В. Насонов,
М.М. Новоселов, С.В. Самойлова, И.Э. Пеннер*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 15.07.2023 г.;

после доработки 25.07.2023 г.;

принята к печати 29.07.2023 г.

Представлены результаты модернизации мобильного аэрозольно-рамановского лидара «ЛОЗА-А2». Наряду с измерениями колебательной компоненты спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) лидарных сигналов лидар одновременно измеряет сигналы чисто вращательного комбинационного рассеяния. Рассмотрена методология интерпретации лидарных данных СКР-зондирования. Получены данные одновременных измерений колебательно-вращательной и чисто вращательной компонент СКР при зондировании атмосферы над озером Байкал. Представлены результаты восстановления вертикальных профилей оптических характеристик атмосферы для длины волны 532 нм по этим данным.

Ключевые слова: лидар, комбинационное рассеяние, атмосфера, коэффициент рассеяния, коэффициент ослабления, лидарное отношение; lidar, Raman scattering, atmosphere, scattering coefficient, extinction coefficient, lidar ratio.

Введение

Атмосферный аэрозоль в значительной степени влияет на радиационный баланс атмосферы и является одним из ключевых объектов в климатических исследованиях и вопросах прогнозирования погоды [1–3]. Аэрозоль генерируется различными источниками — естественными и антропогенными, поэтому его микрофизические и оптические свойства весьма разнообразны [4]. Дистанционные лидарные методы во многих случаях являются практически единственным средством оперативного контроля атмосферных параметров с высоким временным и пространственным разрешением [5]. С помощью лидарных систем изучаются такие процессы, как климатические изменения, антропогенные загрязнения атмосферы, опасные природные явления и техногенные катастрофы [6–9]. Эти исследования являются основой для планирования и реализации

мероприятий по минимизации их отрицательных последствий для природы и человека.

Уже практически повсеместно в аэрозольных лидарах наряду с измерениями упругого обратного рассеянного излучения от аэрозолей используют неупругое комбинационное рассеяние (рамановское) от молекулярной составляющей атмосферы, что позволяет корректно восстанавливать вертикальные профили аэрозольных коэффициентов обратного рассеяния и ослабления. Наиболее распространенным в таких лидарных измерениях является метод колебательно-вращательного комбинационного рассеяния на молекулах азота [6]. Существенные недостатки этого метода — низкое сечение обратного рассеяния и значительный частотный сдвиг колебательной компоненты. Эти проблемы во многом снимаются при использовании чисто вращательного спектра комбинационного рассеяния, характеризуемого более высоким сечением обратного рассеяния и минимальным сдвигом частоты, что практически убирает зависимость от показателя Ангрестрама [10].

Современные реалии исследований атмосферного аэрозоля методами лазерного зондирования побуждают совершенствовать технические возможности лидаров, повышая точность и информативность проводимых с их помощью измерений, увеличивая высотный диапазон исследований и расширяя

*Юрий Степанович Балин (balin@iao.ru); Марина Георгиевна Клемашева (marina@iao.ru); Григорий Павлович Коханенко (kokh@iao.ru); Сергей Владимирович Насонов (nsvtsk@iao.ru); Михаил Михайлович Новоселов (novoselov@iao.ru); Светлана Викторовна Самойлова (ssv@seversk.tomsknet.ru); Иоганес Эрнстович Пеннер (penner@iao.ru).

диапазон условий эксплуатации. В этой связи актуальной задачей является создание многофункциональных компактных и мобильных лидарных комплексов. Их преимущество заключается в возможности размещения на подвижных носителях (автомобилях, кораблях, самолетах) и использования в сложных экспедиционных условиях, в том числе в труднодоступных местах, с целью исследования пространственного распределения аэрозольных полей как в локальных, так и в глобальных масштабах.

Цель данной работы – модернизация приемопередатчика мобильного (самолетно-корабельного) аэрозольно-рамановского лидара «ЛОЗА-А2», а также проведение его натурных испытаний.

Методология интерпретации данных лидарного зондирования

С математической точки зрения связь между мощностью лидарного сигнала и оптическими характеристиками аэрозоля на зондирующей длине волны $\lambda_0 = 532$ нм в двухкомпонентной среде в приближении однократного рассеяния описывается лидарным уравнением

$$P(\lambda_0, h) = \frac{P_0}{h^2} [\beta_{\text{mol}}(\lambda_0, h) + \beta_{\text{aer}}(\lambda_0, h)] \times \exp \left\{ -2 \int_{h_0}^h [\sigma_{\text{mol}}(\lambda_0, h') + \sigma_{\text{aer}}(\lambda_0, h')] dh' \right\}, \quad (1)$$

где $P(\lambda_0, h)$ – мощность сигнала, обусловленного молекулярным и аэрозольным рассеянием на высоте h ; P_0 – аппаратная постоянная; $\beta_{\text{mol}}(\lambda_0, h)$ и $\beta_{\text{aer}}(\lambda_0, h)$ – коэффициенты молекулярного и аэрозольного обратного рассеяния на длине волны λ_0 ; $\sigma_{\text{mol}}(\lambda_0, h)$ и $\sigma_{\text{aer}}(\lambda_0, h)$ – соответствующие коэффициенты ослабления.

Характеристики молекулярного рассеяния могут быть рассчитаны по измеряемым с помощью зондов либо модельным высотным профилям температуры и давления. Основным способом восстановления коэффициента аэрозольного ослабления по сигналу упругого обратного рассеяния является так называемый метод Фернальда–Клетта [11, 12], который нашел применение в европейской лидарной сети [13]. Этот метод со всеми его последующими модификациями и улучшениями обладает известным ограничением, обусловленным тем, что уравнение (1) содержит две неизвестные величины – $\beta_{\text{aer}}(\lambda_0, h)$ и $\sigma_{\text{aer}}(\lambda_0, h)$, которые должны определяться только по одному измеренному лидарному сигналу. Решение невозможно без предположений о связи между ними и оценки граничных или эталонных значений коэффициентов в калибровочной точке h^* . В качестве связи используют отношение $Lr_{\text{aer}}(\lambda_0) = \sigma_{\text{aer}}(\lambda_0, h) / \beta_{\text{aer}}(\lambda_0, h)$ (*a priori* задаваемое среднее по слою лидарное отношение). Наибольшее влияние на корректность восстановления оказывает приближенное к истинному значению лидарное от-

ношение. Точность задания значений $\beta_{\text{aer}}(\lambda_0, h^*)$ и $\sigma_{\text{aer}}(\lambda_0, h^*)$ в калибровочной точке h^* играет второстепенную роль [14]. Эти результаты показывают необходимость дополнительных независимых измерений, которые могут дать подходящую аппроксимацию лидарного отношения.

С этой целью в аэрозольных лидарах наряду с измерениями упругого обратного рассеянного излучения от аэрозолей используют комбинационное (рамановское) рассеяние (КР) от молекулярной составляющей атмосферы, сечение рассеяния которой известно. В рамановском лидаре на сигнал неупругого (рамановского) обратного рассеяния влияет аэрозольное ослабление излучения, но не интенсивность аэрозольного обратного рассеяния. Это позволяет независимо восстанавливать вертикальные профили аэрозольных коэффициентов обратного рассеяния и ослабления.

Общий формализм алгоритмов определения коэффициента ослабления из рамановского лидарного сигнала был дан в работе [15] и существенно доработан в [16]. Для смещенных длин волн $\lambda_{R_1} = 607$ нм колебательно-вращательного комбинационного рассеяния или $\lambda_{R_2} = 530$ нм чисто вращательного комбинационного рассеяния на молекулах азота мощность лидарного сигнала имеет вид

$$P(\lambda_{R_i}, h) = \frac{P_0}{h^2} \beta_{R_i}(\lambda_{R_i}, h) \exp \left\{ - \int_0^h [\sigma_{\text{mol}}(\lambda_{0i}, h') + \sigma_{\text{aer}}(\lambda_{0i}, h') + \sigma_{\text{mol}}(\lambda_{R_i}, h') + \sigma_{\text{aer}}(\lambda_{R_i}, h')] dh' \right\}. \quad (2)$$

Коэффициент $\beta_{R_i}(\lambda_{R_i}, h)$ рассчитывается из плотности азота.

Совместное решение уравнений (1) и (2) дает возможность одновременно определять коэффициенты обратного рассеяния и ослабления. После преобразования (1) и (2) к виду

$$\Psi(\lambda_{0i}, h, h^*) = \frac{P(\lambda_{0i}, h)h^2}{P(\lambda_{0i}, h^*)h^{*2}} [\beta_{\text{aer}}(\lambda_{0i}, h^*) + \beta_{\text{mol}}(\lambda_{0i}, h^*)] \times \exp \left\{ -2 \int_h^{h^*} \sigma_{\text{mol}}(\lambda_{0i}, h') dh' \right\},$$

$$\Psi(\lambda_{R_i}, h, h^*) = \frac{P(\lambda_{R_i}, h)h^2}{P(\lambda_{R_i}, h^*)h^{*2}} \frac{\beta(\lambda_{R_i}, h^*)}{\beta(\lambda_{R_i}, h)} \times \exp \left\{ - \int_h^{h^*} [\sigma_{\text{mol}}(\lambda_{0i}, h') + \sigma_{\text{mol}}(\lambda_{R_i}, h')] dh' \right\}$$

профили оптических параметров могут быть получены из соотношений

$$\beta_{\text{aer}}(\lambda_{0i}, h) = -\beta_{\text{mol}}(\lambda_{0i}, h) + \frac{\Psi(\lambda_{0i}, h, h^*)}{[\Psi(\lambda_{R_i}, h, h^*)]^{2/(1+\mu)}}, \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{aer}}(\lambda_{0i}, h) = \frac{d}{dh} \left[\frac{1}{1+\mu} \ln \Psi(\lambda_{R_i}, h, h^*) \right] = \frac{d}{dh} \tau_{\text{aer}}(\lambda_{0i}, h), \quad (4)$$

$$Lr_{\text{aer}}(\lambda_{0i}, h) = \sigma_{\text{aer}}(\lambda_{0i}, h) / \beta_{\text{aer}}(\lambda_{0i}, h), \quad (5)$$

где $Lr_{\text{aer}}(\lambda_0, h)$ – лидарное отношение; $\mu = [\lambda_{0i} / \lambda_{Ri}]^{A\sigma_{\text{aer}}}$, $A\sigma_{\text{aer}}$ – параметр Ангстрема для коэффициента ослабления.

Как видно из представленных соотношений, при восстановлении этих оптических параметров по сигналам чисто-вращательного КР зависимость от показателя Ангстрема пропадает.

Модернизация конструкции и оптической схемы лидара

Лидар «ЛОЗА-А2» предназначен для дистанционного зондирования атмосферы в полевых экспедиционных условиях с возможностью его установки как на стационарной сканирующей платформе, так и на различных подвижных носителях: автомобиле, корабле и самолете. Такая мобильность накладывает ограничения на его жесткость конструкции и весогабаритные параметры, вследствие чего представляется невозможным применение прецизионных и объемных оптических устройств для выделения отдельных линий спектра комбинационного рассеяния. Предпочтение отдается простым и надежным оптическим элементам, осуществляющим селективное спектральное разделение сигналов упругого и рамановского рассеяния. В качестве таковых используются интерференционные дихроичные зеркала и узкополосные фильтры.

Оптическая блок-схема лидара представлена на рис. 1. Подробное описание функциональных возможностей и технических характеристик системы приведены в работе [17]. Лидар «ЛОЗА-А2» включен в перечень научного оборудования Центра коллективного пользования «Атмосфера» (ЦКП «Атмосфера») Института оптики атмосферы СО РАН [18].

Лидар первоначально был оснащен каналом для регистрации колебательной компоненты спектра рамановского сигнала на длине волны 607 нм. Для измерения чисто вращательной компоненты спектра рамановского сигнала лидар был дооборудован каналом регистрации на длине волны 530 нм (на рис. 1 выделен черным штрихпунктиром). Не изменяя общих габаритов приемопередатчика лидара, этот канал конструктивно был размещен в основной канал регистрации на длине волны 1064 нм. Пространственно эти длины волн были разведены с помощью дихроичного зеркала BS (DMLP900R-TohrLabs, коэффициент отражения $R \geq 90\%$ в полосе 400–870 нм, коэффициент пропускания $T \geq 90\%$ в полосе 930–1300 нм). Однолинзовый асферический объектив (AL1 на рис. 1) для длины волны 1064 нм был заменен на ахроматический двухлинзовый объектив, чтобы устранить хроматические aberrации и корректно регистрировать сигналы в широком спектре длин волн от видимой до ближней ИК-области. Селекция полосы спектра чисто вращательного КР осуществлялась с помощью интерференционного фильтра IF 530.2-2 OD6 фирмы Alluxa (США).

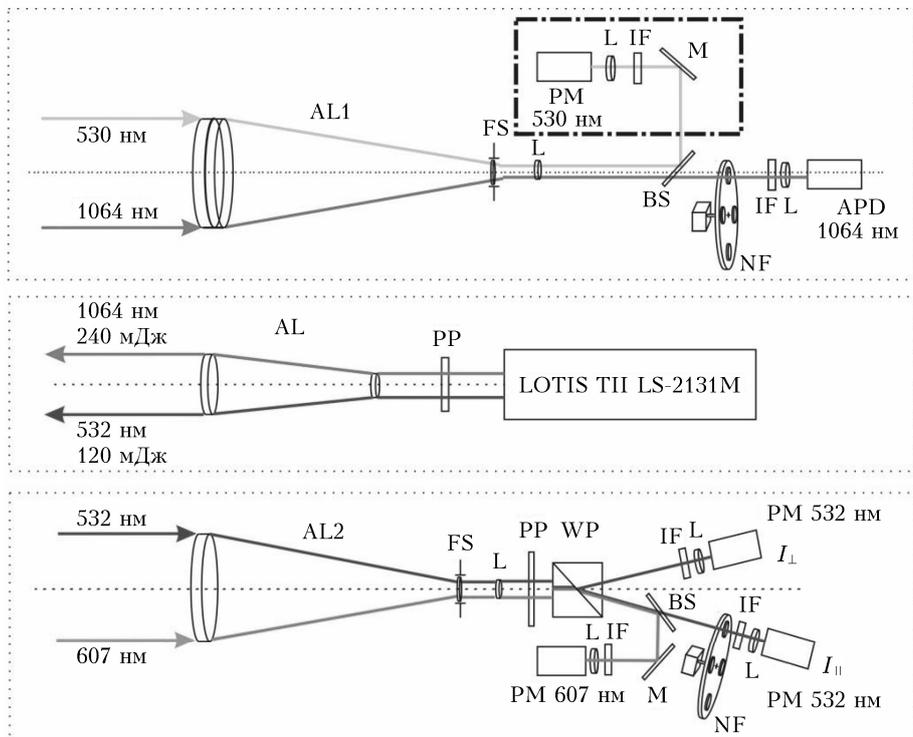


Рис. 1. Блок-схема лидара: LOTIS – Nd:YAG-лазер; PP – поляризационные пластины; AL – ахроматический трехлинзовый коллиматор; AL1, AL2 – асферические линзовые объективы; FS – моторизированные присовые диафрагмы; L – линзы; NF – моторизированные блоки сменных нейтральных фильтров; IF – интерференционные фильтры; APD – фотоприемный модуль на основе лавинного фотодиода; WP – призма Волластона; PM – приемные фотомодули; BS – дихроичное интерференционное зеркало; M – зеркало

На рис. 2 (серые треугольные точки) показан спектр пропускания фильтра по паспортным данным производителя. Ширина пропускания фильтра с $T \geq 90\%$ составляет 2,5 нм с центром на 529,5 нм, оптическое подавление на крыльях не превышает четырех порядков. В эту полосу спектра попадает до 70% антистоксовых линий чисто вращательного КР на молекулах азота и кислорода.

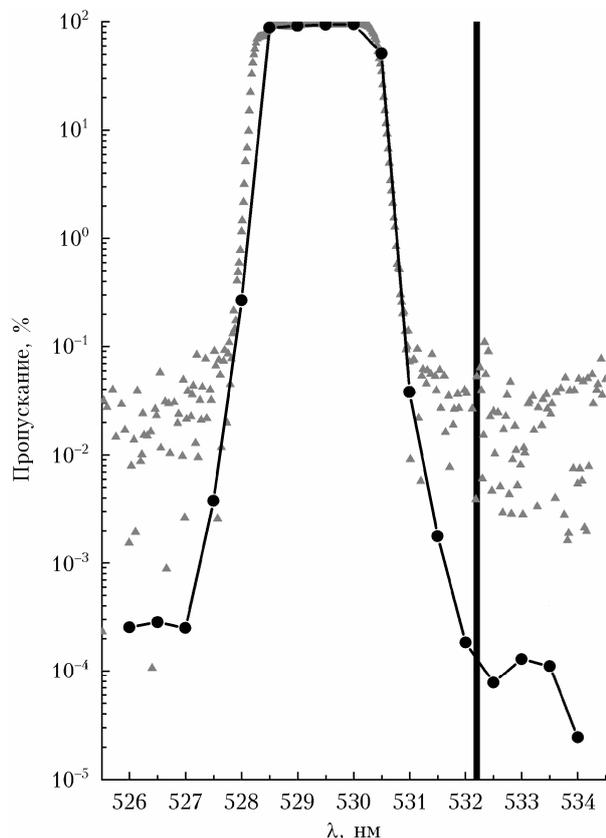


Рис. 2. Пропускание одиночного (серые треугольники) и двойного (соединенные черные точки) интерференционных фильтров; длина волны лазера (черная линия)

Как показано в работе [19], суперпозиция линий в этой полосе спектра характеризуется низкой температурной зависимостью сечения рассеяния. Чтобы близко расположенная линия лазерного излучения не проникала в полосу пропускания интерференционного фильтра, используется пакет из двух одинаковых интерференционных фильтров. На рис. 2 представлено пропускание пакета из двух фильтров IF 530.2-2, измеренное многоканальным анализатором спектра PMA-12 фирмы Hamamatsu (Япония) с разрешением 0,5 нм (соединенные линией черные точки). Оптическое подавление на линии лазерного излучения 532,2 нм составляет более шести порядков.

Были выполнены тестовые измерения рамановских сигналов при зондировании в условиях плотной многоярусной облачности. Результат таких измерений приведен на рис. 3, на котором показаны лидарные сигналы упругого обратного рассеяния и чисто вращательного КР, а также отношение рассеяния R

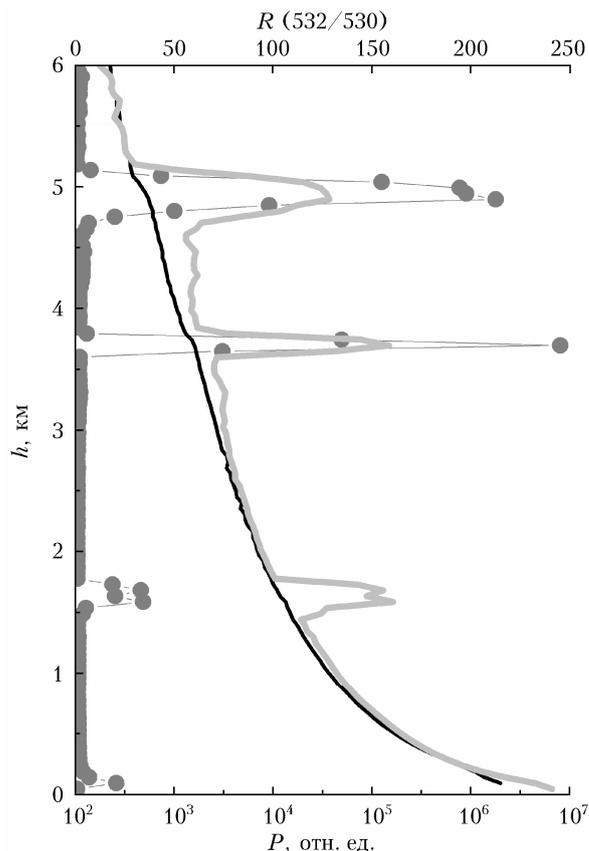


Рис. 3. Профили лидарных сигналов упругого обратного рассеяния ($\lambda = 532$ нм, серая кривая) и чисто вращательного КР ($\lambda = 530$ нм, черная кривая), а также отношения рассеяния R (соединенные линией точки)

(полного упругого к молекулярному). Несмотря на то что значение параметра R достигает 250, проникновение сигнала упругого рассеяния в канал вращательного КР не наблюдается. Сигналы комбинационного рассеяния регистрируются однотипными фотоприемными модулями H10682-01 (Hamamatsu Photonics, Япония), работающими в режиме счета фотонов. Сигналы комбинационного обратного рассеяния регистрировались системой счета фотонов с максимальной скоростью счета до 200 МГц.

Результаты одновременных измерений сигналов спонтанного комбинационного рассеяния

Мобильный аэрозольно-рамановский лидар «ЛОЗА-А2» показал свою эффективность при проведении в течение ряда лет комплексных экспедиций по исследованию атмосферы над оз. Байкал [20, 21]. Зондирование проводилось на двух длинах волн излучения лазера 1064 и 532 нм. Приемной системой лидара регистрировалось упругое обратное рассеяние на аэрозолях на этих длинах волн, а также неупругое рассеяние на длине волны 607 нм, обусловленное колебательно-вращательной компонентой комбинационного рассеяния на молекулах азота. После мо-

дернизации в лидар был добавлен канал для регистрации чисто вращательной компоненты комбинационного рассеяния в узкой полосе спектра около длины волны 530 нм. Одновременные измерения рамановских сигналов были выполнены в ходе корабельной экспедиции на оз. Байкал. Регистрация этих сигналов осуществлялась в темное время суток с накоплением профиля в течение 20 мин и 24000 выстрелов лазера, пространственное разрешение строба накопления составляло 48 м. На рис. 4 представлены профили рамановских сигналов, полученные в сеансе зондирования лидаром «ЛОЗА-А2» в условиях «чистой» безоблачной атмосферы.

Сигналы упругого рассеяния суммировались в один профиль за тот же период накопления, что и профили КР, как это показано на рис. 4. Накопленный за 20-минутный сеанс зондирования сигнал вращательного КР (ВКР) почти в два раза превышает сигнал колебательного КР (ККР) по достигнутой высоте при равной величине отношения сигнал/шум ≥ 10 . Среднее отношение интенсивности сигналов вращательного спектра к колебательному за 100 двадцатиминутных сеансов зондирования составило $20,3 \pm 1,2$. После коррекции на разницу в спектральной квантовой эффективности фотокатода фотомодуля Н10682-01 для длин волн 530/607 нм, значение которой составило 1,28, отношение интенсивности сигналов ВКР/ККР стало 15,8.

Профили лидарных сигналов (рис. 4) были использованы для сопоставления восстановленных оптических параметров аэрозоля по результатам одновременных измерений рамановских сигналов. На рис. 5 представлены рассчитанные по формулам (3) и (4) коэффициенты обратного рассеяния $\beta_{\text{аер}}(\lambda_0, h)$ и ослабления $\sigma_{\text{аер}}(\lambda_0, h)$, а также восстановленные по этим первичным оптическим характеристикам аэрозоля профили лидарного отношения (5) $Lr_{\text{аер}}(\lambda_0, h)$ и накопленной оптической толщи $\tau(\lambda_0, h)$.

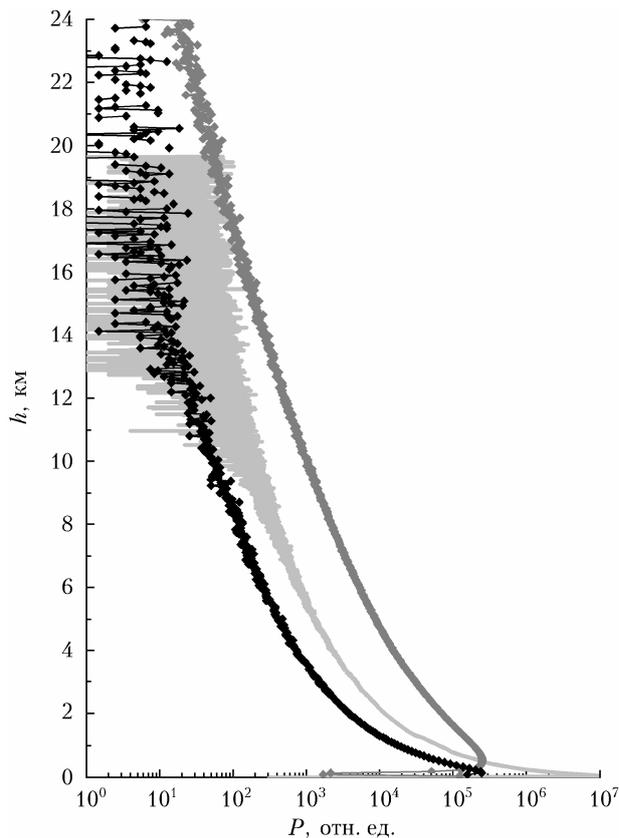


Рис. 4. Профили лидарных сигналов: упругого рассеяния ($\lambda = 532$ нм, светло-серая кривая), вращательного КР ($\lambda = 530$ нм, темно-серая кривая), колебательного КР ($\lambda = 607$ нм, черная кривая)

Сопоставление производилось в диапазоне высот от 3 до 6 км. Нижний предел обусловлен ограниченной до 5 МГц линейной скоростью счета фотонов у фотомодулей РМ607 и РМ530. В ближней зоне интенсивность сигнала ВКР на порядок больше и фотомодуль в этом канале выходил на линейность

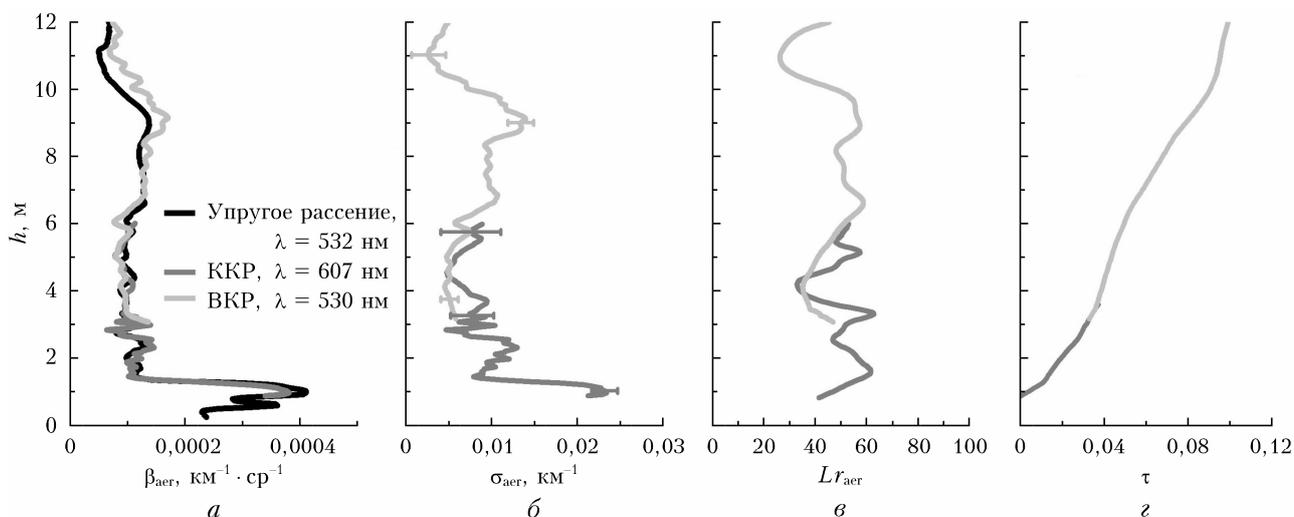


Рис. 5. Вертикальные профили оптических характеристик атмосферного аэрозоля над оз. Байкал, восстановленные по данным зондирования лидаром «ЛОЗА-А2»: *a* – коэффициент обратного рассеяния; *b* – коэффициент ослабления; *в* – лидарное отношение; *г* – оптическая толщина

счета с дистанций выше 2,5 км, а в канале ККР — 1 км. Верхний предел ограничен низким отношением сигнал/шум для дистанций более 6 км.

В сопоставимом диапазоне высот среднее расхождение коэффициентов обратного рассеяния $\beta_{\text{аер}}$, вычисленных из колебательного и вращательного сигналов КР, не превышает 3%. Расхождение $\beta_{\text{аер}}$, рассчитанных по упругому сигналу и ВКР на высотах от 3 до 8 км, не превышает 5%. Значительно большее расхождение получено для коэффициента ослабления $\sigma_{\text{аер}} = 20\%$. Это обусловлено меньшим отношением сигнал/шум для ККР и, следовательно, большей погрешностью вычислений (они указаны на графике коэффициента ослабления). Вклад в такое расхождение может вносить некорректный учет показателя Ангстрема при восстановлении показателя ослабления по сигналам ККР. Для лидарных отношений, восстановленных по сигналам ККР и ВКР, среднее по профилю рассогласование достигает 15%. Реализованные в данном лидаре одновременные измерения колебательно-вращательного и чисто вращательного комбинационного рассеяния позволяют уверенно восстанавливать профиль (см. рис. 5) накопленной оптической толщи $\tau(\lambda_0, h)$ до высот тропопаузы.

Заключение

Модернизированный поляризационный аэрозольно-рамановский лидар «ЛОЗА-А2» позволяет одновременно регистрировать сигналы упругого рассеяния, колебательно-вращательный и чисто вращательный спектры комбинационного рассеяния, тем самым существенно повышая точность измерения оптических параметров и «потолок» зондирования.

Эффективность работы лидара «ЛОЗА-А2» доказана в корабельных и самолетных экспедициях.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант № 075-15-2020-787).

Список литературы

1. *Кондратьев К.Я.* От нано- до глобальных масштабов: свойства, процессы образования и последствия воздействий атмосферного аэрозоля. 7. Аэрозольное радиационное возмущающее воздействие и климат // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 7. С. 535–556.
2. *Zhang B.W.* The effect of aerosols to climate change and society // J. Geosci. Environ. Protect. 2020. N 8. P. 55–78. DOI: 10.4236/gep.2020.88006.
3. *Intergovernmental Panel on Climate Change.* Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. DOI: 10.1017/SBO9781107415324.
4. *Кондратьев К.Я.* Аэрозоль и климат: современное состояние и перспективы разработок. 1. Образование, свойства аэрозоля и их трансформация // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 1. С. 5–22.
5. *Ansmann A., Müller D.* Lidar and atmospheric aerosol particles / C. Weitkamp (ed.). Lidar. Springer Series in Optical Sciences. New York: Springer, 2005. V. 102. DOI: 10.1007/0-387-25101-4_4.
6. *Matthias V., Balis D., Bösenberg J., Eixmann R., Iarlori M., Komguem L., Mattis I., Papayannis A., Pappalardo G., Perrone M.R., Wang X.* Vertical aerosol distribution over Europe: Statistical analysis of Raman lidar data from 10 European Aerosol Research Lidar Network (EARLINET) stations // J. Geophys. Res. 2004. V. 109, N D18. P. 1–12. DOI: 10.1029/2004JD004638.
7. *Winker D.M., Pelon J.R., McCormick M.P.* The CALIPSO mission: Spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds // Proc. SPIE. 2003. N 4893. DOI: 10.1117/12.466539.
8. *Uno I., Eguchi K., Yumimoto K., Takemura T., Shimizu A., Uematsu M., Liu Zh., Wang Z., Hara Yu., Sugimoto N.* Asian dust transported one full circuit around the globe // Nature Geosci. 2009. V. 2. P. 557–560. DOI: 10.1038/ngeo583.
9. *Colarco P.R., Schoeberl M.R., Doddridge B.G., Marufu L.T., Torres O., Welton E.J.* Transport of smoke from Canadian forest fires to the surface near Washington, D.C.: Injection height, entrainment, and optical properties // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. D06203. DOI: 10.1029/2003JD004248.
10. *Arshinov Yu.F., Bobrovnikov S.M., Zuev V.E., Mittev V.M.* Atmospheric temperature measurements using a pure rotational Raman lidar // Appl. Opt. 1983. V. 22, N 19. P. 2984–2990.
11. *Klett J.D.* Stable analytical inversion solution for processing lidar returns // Appl. Opt. 1981. V. 20. P. 211–220.
12. *Fernald F.G.* Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments // Appl. Opt. 1984. V. 24. P. 1609–1613.
13. *Böckmann C., Wandinger U., Ansmann A., Bosenberg J., Amiridis V., Boselli A., Delaval A., De Tomasi F., Frioud M., Hågård A., Horvat M., Iarlori M., Komguem L., Kreipl S., Larchevêque G., Matthias V., Papayannis A., Pappalardo G., Rocadembosch F., Rodriguez J.A., Schneider J., Shcherbakov V., Wiegner M.* Aerosol lidar intercomparison in the framework of the EARLINET project. 2. Aerosol backscatter algorithms // Appl. Opt. 2004. V. 43. P. 977–989.
14. *Sasano Y., Browell E.V., Ismail S.* Error caused by using a constant extinction backscattering ratio in the lidar solution // Appl. Opt. 1985. V. 24. P. 3929–3932.
15. *Ansmann A., Riebesell M., Weitkamp C.* Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar // Opt. Lett. 1990. V. 15. P. 746–748.
16. *Shcherbakov V.* Regularized algorithm for Raman lidar data processing // Appl. Opt. 2007. V. 46. P. 4879–4889.
17. *Nasonov S., Balin Yu., Klemasheva M., Kokhanenko G., Novoselov M., Penner I., Samoilova S., Khodzher T.* Mobile aerosol Raman polarizing lidar LOSA-A2 for atmospheric sounding // Atmosphere. 2020. V. 11, N 1032. P. 1–12. DOI: 10.3390/atmos11101032.
18. *Центр коллективного пользования «Атмосфера».* [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iao.ru/ru/structure/juc> (дата обращения: 16.11.2021).
19. *Veselovskii I., Whiteman D.N., Korenskiy M., Suvorina A., Pérez-Ramírez D.* Use of rotational Raman measurements in multiwavelength aerosol lidar for evaluation of particle backscattering and extinction // Atmos. Meas. Tech. 2015. V. 8. P. 4111–4122. DOI: 10.5194/amt-8-4111-2015.
20. *Popovicheva O., Molozhnikova E., Nasonov S., Potemkin V., Penner I., Klemasheva M., Marinaite I., Golobokova L., Vratolis S., Eleftheriadis K., Khodzher T.* Industrial and wildfire aerosol pollution over

world heritage Lake Baikal // J. Environ. Sci. 2021. JESC-D-20-02236. DOI: 10.1016/j.jes.2021.01.011.

21. Ходжер Т.В., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Деметьева А.Л., Цыдытов В.В., Балин Ю.С., Пеннер И.Э., Коханенко Г.П., Насонов С.В., Клемашева М.Г., Голобокова Л.П., Потемкин В.Л. Результаты корабельных исследований аэрозольно-газовых примесей над акваторией оз. Байкал летом 2018 г. //

Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 4. С. 289–295; *Khodzher T.V., Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Dement'eva A.L., Tsydyrov V.V., Balin Yu.S., Penner I.E., Kokhanenko G.P., Nasonov S.V., Klemasheva M.G., Golobokova L.P., Potemkin V.L.* Ship-based studies of aerosol-gas admixtures over Lake Baikal basin in summer 2018 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 4. P. 434–441. DOI: 10.1134/S1024856019020192.

Yu.S. Balin, M.G. Klemasheva, G.P. Kokhanenko, S.V. Nasonov, M.M. Novoselov, S.V. Samoilova, I.E. Penner. **Modernization of the “LOZA-A2” lidar for simultaneous measurements of the vibrational-rotational and purely rotational Raman spectra.**

The results of the modernization of the mobile aerosol Raman lidar “LOZA-A2” are presented. Along with measurements of the vibrational component of spontaneous Raman scattering of lidar signals simultaneous measurements of signals of purely rotational Raman scattering are carried out. The technique for interpreting Raman lidar sensing data is considered. The data of simultaneous measurements of the vibrational-rotational and purely rotational components of the Raman scattering during sounding of the atmosphere above Lake Baikal are obtained. The results of retrieving the vertical profiles of the optical characteristics of the atmosphere at a wavelength 532 nm from these data are presented.