

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.508.856, 551.510.413.2

Применение комбинированного метода фоторегистрации в лидарных измерениях температуры атмосферы на главном зеркале Сибирской лидарной станции

С.М. Бобровников, В.И. Жарков, Н.Г. Зайцев, Д.А. Трифонов✉*

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

Поступила в редакцию 18.05.2023 г.;
после доработки 21.07.2023 г.;
принята к печати 30.08.2023 г.

Подробно описан метод параллельной регистрации лидарных сигналов — в режиме счета фотонов и режиме накопления заряда — на Сибирской лидарной станции (СЛС) Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. Изготовлен и экспериментально апробирован прибор, реализующий комбинированный метод регистрации лидарных сигналов на уникальном лидаре СЛС. В ходе экспериментальной апробации прибора определены допустимые пределы применения предложенного метода для регулярных измерений вертикального распределения температуры атмосферы на основе лидарных сигналов чисто вращательных спектров спонтанного комбинационного рассеяния (СКР). Сравнение результатов лидарных и спутниковых измерений показывает их хорошее согласие, что доказывает высокую эффективность применения комбинации режимов регистрации и подтверждает возможность получать вертикальное распределение температуры атмосферы с доверительным интервалом (погрешность измерений) $2-4^\circ$ во всем диапазоне высот работы СКР-лидара СЛС на базе главного зеркала.

Ключевые слова: лидар, температура, атмосфера, спонтанное комбинационное рассеяние; lidar, temperature, atmosphere, Raman scattering.

Введение

Мониторинг физических параметров атмосферы имеет ключевое значение как при создании глобальных моделей циркуляции атмосферы, так и при оценке факторов изменения климата. Температура является важным метеорологическим параметром атмосферы, характеризующим интенсивность термодинамических процессов и эффективность теплообмена [1–4]. С точки зрения полноты получаемой геофизической информации очень важно осуществлять глобальный мониторинг вертикального распределения температуры атмосферы во всем диапазоне высот от приземного слоя до мезосферы с требуемым пространственно-временным разрешением [5–8].

В настоящее время существует ряд способов, которые позволяют получать высотные профили температуры атмосферы. В основном это радиозондовые, спутниковые и лидарные измерения. Использование радиозондов позволяет с высокой точностью (погрешность не превышает 1 К) измерять вертикальное распределение температуры, но высота подъема

шаров зависит от качества применяемой оболочки и, как правило, не превышает 30 км. При этом траектория полета шара-зонда непредсказуема, а стоимость запуска высока.

Методы лазерного зондирования атмосферы, основанные на анализе лидарных откликов [9–11], обеспечивают дистанционные и бесконтактные пространственно-разрешенные измерения вертикального распределения температуры атмосферы.

Наиболее перспективным способом дистанционного измерения температуры атмосферы является лидарный метод, основанный на анализе распределения интенсивности линий чисто вращательного спектра спонтанного комбинационного рассеяния (СКР) на молекулах азота и кислорода [2, 5, 10–12]. Методика дистанционного измерения температуры атмосферы в рамках рассматриваемой технологии предполагает выделение в спектре обратного рассеяния на молекулах азота и кислорода двух участков полос комбинационного рассеяния, линии которых обладают противоположной температурной зависимостью интенсивности, и последующее взятие отношения сигналов обратного рассеяния, регистрируемых в пределах выбранных участков. Данное отношение является функцией температуры и может быть использовано для ее измерения. Такой подход позволяет из отношения лидарных откликов получать вертикальное распределение температуры

* Сергей Михайлович Бобровников (bsm@iao.ru); Виктор Иванович Жарков (zharkov@iao.ru); Николай Геннадьевич Зайцев (ZaicevNG@iao.ru); Дмитрий Александрович Трифонов (trifonov@iao.ru).

атмосферы с погрешностью порядка 1 К до высоты 45 км с высоким пространственным и временным разрешениями без каких-либо априорных предположений. Однако малость сечения взаимодействия молекул азота и кислорода в процессе СКР ограничивает потолок зондирования высотой 30–40 км для лидаров со средними характеристиками [12].

Для лидарных установок с большой апертурой (приемным телескопом) и мощными источниками зондирующего излучения потолок зондирования может быть намного выше [5, 13–15], при этом качество получаемых лидарных данных может быть существенно лучше [12]. Большой размер зеркала приемного телескопа, необходимого для достижения высокого потолка зондирования, обуславливает значительное расширение динамического диапазона лидарных откликов, что, в свою очередь, существенно усложняет задачу фотодетектирования сигналов в линейном режиме [15–17]. Известно, что при малых отклонениях световой характеристики системы счета фотонов от линейности, вызванных эффектами просчета одноэлектронных импульсов, возможна компенсация потерь сигнала с помощью алгоритмов учета вероятности просчетов [18–20]. Однако при значительных перегрузках системы счета фотонов алгоритмические средства становятся бесполезными и приходится прибегать к более радикальным средствам расширения диапазона линейности системы регистрации сигналов.

Задача расширения динамического диапазона линейности может быть решена, например, за счет деления сигнала на диапазоны [5, 13], когда малая часть сигнала отводится в отдельный канал регистрации (диапазон ближней зоны), а оставшаяся часть детектируется обычным образом (диапазон дальней зоны) начиная с дальностей, где условия линейности регистрации выполняются. Затем сигналы «сшиваются» с учетом коэффициента деления. Недостатком такого подхода является потеря сигнала при делении и необходимость использования удвоенного числа фотодетекторов.

Другим способом решения задачи расширения диапазона линейности является использование метода параллельной регистрации сигналов в режиме счета фотонов и режиме накопления заряда [20].

Целью данной работы является определение допустимых пределов применения метода параллельной регистрации сигналов в режиме счета фотонов и режиме накопления заряда на уникальном лидаре Сибирской лидарной станции (СЛС) для проведения регулярных измерений вертикального распределения температуры атмосферы на основе лидарных сигналов чисто вращательных спектров СКР.

Лидарный комплекс Сибирской лидарной станции

Лидарный комплекс Сибирской лидарной станции (г. Томск, Россия; 56,5° с.ш., 85° в.д.) (подробное описание см. в [15]) создавался как инструмент для исследования средней и верхней атмосферы, включая мезосферу, до 100 км [22]. Именно поэтому

при проектировании станции в качестве приемной апертуры лидарной системы было решено использовать параболическое зеркало диаметром 2,2 м. Большая апертура лидара позволяет получать сигналы рэлеевского рассеяния с высот более 100 км, а СКР-сигналы — до высот 70 км. Высокий энергетический потенциал лидара СЛС позволяет детектировать сигналы чисто вращательного спектра СКР на молекулах азота и кислорода до высот 80–90 км.

Однако за счет квадрата расстояния (фактор телесного угла) и особенно за счет убывания плотности атмосферы с высотой динамический диапазон изменения лидарного сигнала рэлеевского рассеяния составляет 6–7 порядков. В этой связи на первый план выходит проблема обеспечения работы системы фотодетектирования в линейном режиме в столь широком динамическом диапазоне.

Комбинированный метод фоторегистрации сигналов в лидарных измерениях температуры атмосферы

Счет фотонов является наиболее эффективным методом регистрации оптических сигналов, поскольку позволяет измерять интенсивность светового потока путем подсчета числа квантов света, пришедших на фотоприемник за определенный интервал времени. При этом в процессе регистрации используется минимальное число преобразований сигнала, а шумы фотодетектора отрезаются порогом дискриминации. Именно поэтому режим счета фотонов позволяет осуществить прецизионные измерения интенсивности оптических сигналов, необходимые, в частности, при лидарных измерениях температуры атмосферы. Однако в условиях большого динамического диапазона изменения сигнала при возрастании скорости прихода квантов на фотокатод ФЭУ наступает такой момент, когда система счета фотонов оказывается не в состоянии различить два близко расположенных во времени события и допускает просчеты. Эффект просчетов приводит к потере сигнала и отклонению от линейности световой характеристики системы фотодетектирования. Из-за большой интенсивности сигналов эффект просчетов, в частности, приводит к заметным искажениям лидарных откликов на начальном участке трассы зондирования и не позволяет корректно определить температуру из отношения сигналов.

На рис. 1 в качестве примера показан характерный вид лидарных СКР-сигналов, зарегистрированных на главном зеркале СЛС.

Для определения диапазона линейности системы фотодетектирования в режиме счета фотонов был создан стенд, позволяющий имитировать эталонный лидарный сигнал с помощью импульсного источника света изменяемой интенсивности. В процессе исследования линейности системы счета фотонов было показано, что при средней мгновенной частоте следования фотонов 5 МГц (16 МГц при условии применения формулы коррекции лидарного сигнала) отклонение от линейности при регистрации отношения сигналов составляет менее 1%, что

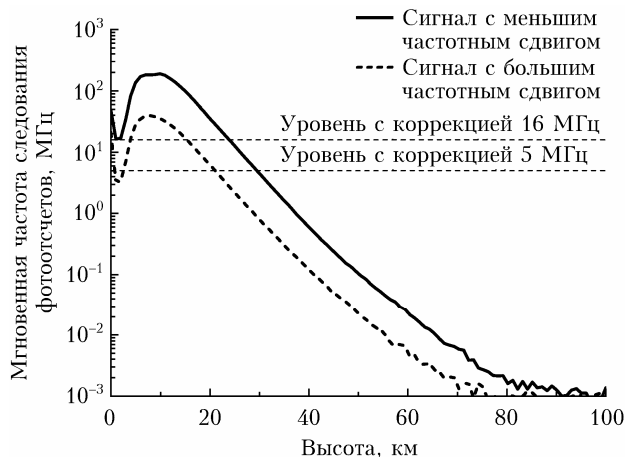


Рис. 1. Лидарные сигналы участков чисто вращательных спектров СКР на молекулах азота и кислорода канала измерения температуры на главном зеркале СЛС. Режим регистрации – счет фотонов; пространственное разрешение – 1 км, время измерения с 23:30 2.05.2019 г. до 00:00 3.05.2019 г. (время местное)

примерно соответствует погрешности 1 К в измерениях температуры [20]. Как видно из рис. 1, для лидарного сигнала с большим частотным сдвигом (штриховая линия) условия линейности выполняются для диапазона высот от 15 км и выше, а для более интенсивного сигнала с меньшим частотным сдвигом – начиная с высоты 20 км. Таким образом, несмотря на высокое быстродействие системы счета фотонов, применяемой для регистрации лидарных сигналов (предельная скорость счета 200 МГц),

не удастся осуществить неискаженную оцифровку лидарных откликов в режиме счета фотонов во всем диапазоне высот и требуется использование дополнительных средств расширения динамического диапазона системы фотодетектирования.

Как уже было сказано выше, одним из способов расширения этого диапазона является применение метода параллельной синхронной регистрации сигнала в режиме накопления заряда и в режиме счета фотонов. При этом предполагается разделение электрического сигнала с выхода фотодетектора на два канала – аналоговый и счетный [20, 23].

На рис. 2 показана разработанная нами блок-схема комбинированной системы фотодетектирования, реализованной на базе совместного использования АЦП «ЛАН10-12USB-Y» и счетчика фотонов «PHCount4».

В системе реализовано четыре независимых канала фотодетектирования с параллельной регистрацией сигналов в режиме накопления заряда и счета фотонов. Аналоговые части каждого из каналов идентичны и состоят из фотодетектора, интегрирующего усилителя аналогового сигнала, быстродействующего усилителя и компаратора-формирователя счетных импульсов. Каждый из аналоговых каналов содержит схемы управления напряжением питания ФЭУ и порогом компаратора. Аналоговый сигнал с выхода интегрирующего усилителя подается на вход АЦП. Время интегрирования усилителя примерно в два раза превосходит период квантования АЦП. Интегрирование сигнала позволяет регистрировать даже одиночные одноэлектронные импульсы в режиме накопления заряда. Параллельно

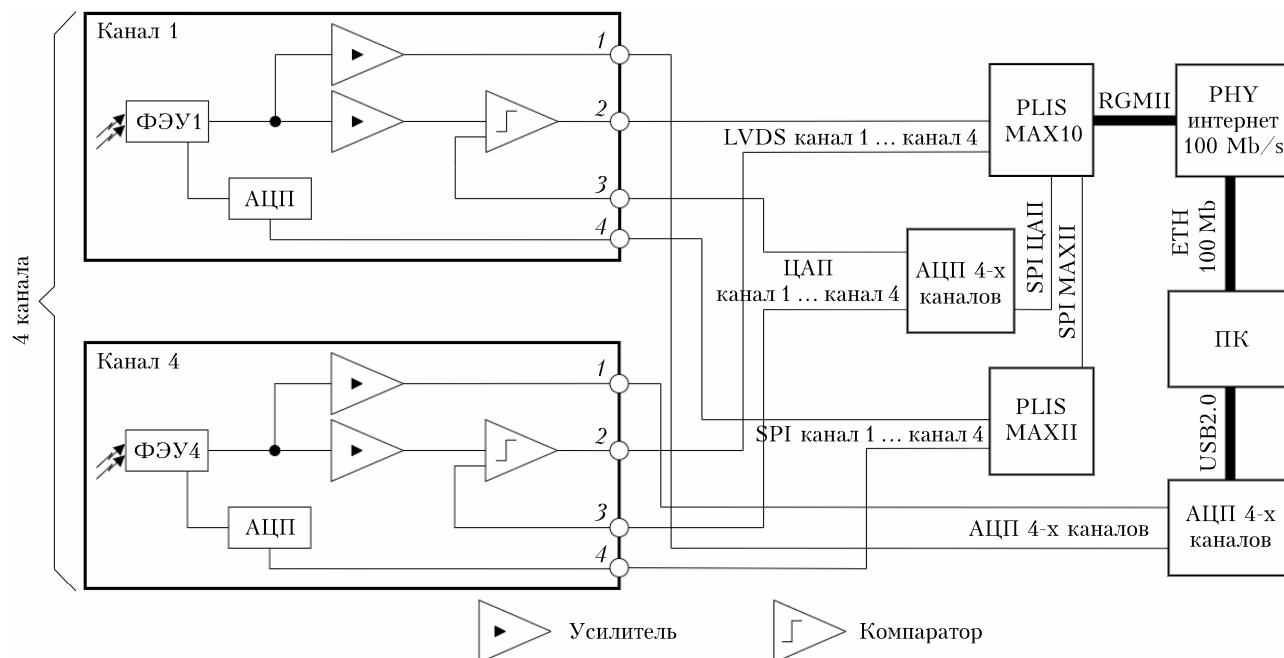


Рис. 2. Блок-схема комбинированной системы фотодетектирования на базе АЦП «ЛАН10-12USB-Y» и счетчика фотонов «PHCount4»: 1 – выход усиленного аналогового сигнала; 2 – выход счетного канала (цифровой LVDS сигнал); 3 – вход: напряжение порога дискриминации; 4 – вход: данные установки напряжения питания ФЭУ (SPI шина); PHY – интегральная схема, предназначенная для выполнения функций физического уровня сетевой модели OSI; MAXII – это энерго-независимые ПЛИС, готовые к работе сразу после включения питания

сигнал с выхода компаратора-формирователя в виде счетного импульса стандартной амплитуды поступает на вход системы счета фотонов.

Накопление сигналов в процессе измерения осуществляется во внутренней памяти счетчика фотонов для канала счета фотонов и в памяти компьютера для канала накопления заряда соответственно.

Лидарные отклики, полученные в режиме накопления заряда, используются для расчета температуры в диапазоне высот 3–25 км, а лидарные сигналы, зарегистрированные в режиме счета фотонов, — для восстановления температуры в высотном диапазоне 20 ÷ 80 км.

На рис. 3 представлен лидарный сигнал одного из участков чисто вращательных спектров СКР на молекулах азота и кислорода канала измерения температуры на главном зеркале СЛС, зарегистрированный одновременно в режиме счета фотонов и режиме накопления заряда.

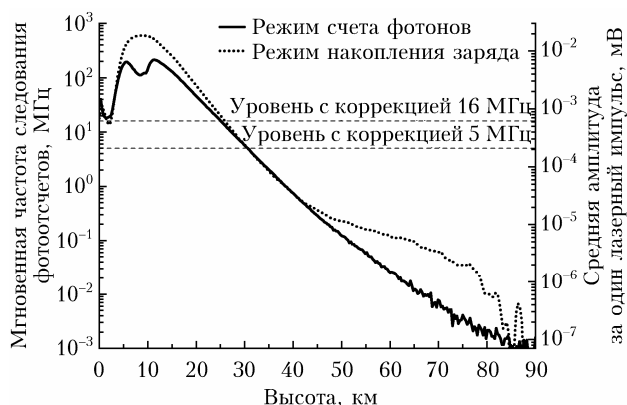


Рис. 3. Лидарный сигнал одного из участков чисто вращательных спектров СКР на молекулах азота и кислорода канала измерения температуры на главном зеркале СЛС, зарегистрированный одновременно в режиме счета фотонов и режиме накопления заряда

Как видно из рис. 3, лидарный сигнал, зарегистрированный методом счета фотонов в области высот 0–25 км, отличается от того же сигнала, зарегистрированного в режиме накопления заряда в меньшую сторону, что подтверждает наличие эффекта просчетов на этом участке трассы. На больших высотах (25 ÷ 40 км) оба режима регистрации дают одинаковый результат, который говорит о том, что режим накопления заряда может быть использован и для регистрации достаточно слабых сигналов (мгновенная частота прихода одноэлектронных импульсов порядка 1 МГц). Регистрация же более слабых сигналов в этом режиме вызывает трудности, обусловленные влиянием собственных шумов аналогового канала регистрации. Именно поэтому использование режима счета фотонов в области высот более 40 км и выше становится безальтернативным. Таким образом, сравнение результатов регистрации одного лидарного отклика в двух режимах регистрации позволяет сделать вывод, что режим накопления заряда адекватно оцифровывает сигнал в диапазоне высот 0 ÷ 40 км, тогда как режим счета фотонов работает без искажения в области высот 25 км и выше. Очевидно, что сочетание двух способов регистрации позволяет адекватно оцифровать лидарный отклик в диапазоне высот 0 ÷ 100 км. При этом имеется диапазон высот (25 ÷ 40 км), где оба режима фоторегистрации работают корректно, что позволяет сшить лидарные сигналы, полученные в режиме счета фотонов и режиме накопления заряда.

На рис. 4 представлены результаты расчетов температуры из отношения реальных лидарных сигналов для трех способов регистрации лидарных откликов: режим накопления заряда, режим счета фотонов и комбинация этих режимов, в сравнении с модельным профилем атмосферы (сплошная кривая). Результат сравнения показывает эффективность применения комбинации режимов регистрации

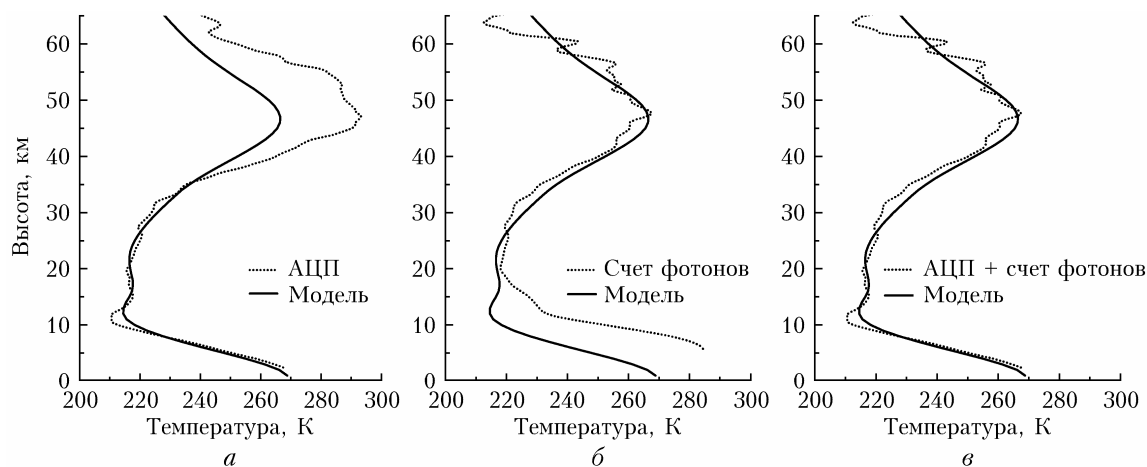


Рис. 4. Сравнение результатов расчета температуры для трех способов регистрации лидарных откликов: в режиме накопления заряда (а); в режиме счета фотонов (б); комбинация режимов (в); сплошная кривая — вертикальное распределение температуры по стандартной модели атмосферы (NRLMSISE-00) [24]

и подтверждает невозможность использования каждого из режимов в отдельности во всем диапазоне высот работы СКР-лидара СЛС на базе главного зеркала.

Результаты измерения температуры атмосферы при использовании комбинированного метода регистрации лидарных откликов

Лидарные измерения вертикального распределения температуры атмосферы на СКР-лидаре СЛС проводятся в ночное время в ясную погоду. Выполнение этих требований необходимо для снижения шума фонового свечения неба и обеспечения стационарных условий накопления сигналов в течение длительного времени. Как уже было сказано выше, лидарный метод измерения температуры по отношению интенсивностей участков чисто вращательных спектров СКР на молекулах азота и кислорода не требует привязки к данным радиозонда или данным других средств измерения температуры. Однако в процессе отработки технологии регистрации сигналов и проверки правильности результатов измерений очевидна необходимость сравнения лидарных данных с данными независимых измерений. В качестве независимых источников информации о вертикальном распределении температуры атмосферы над Томском использовались данные инфракрасного радиометра HIRDLS (High Resolution Dynamic Limb Sounder) спутника EOS (Earth Observing System) Aura и многоканального радиометра SABER (Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry) спутника миссии TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics).

Спутниковые данные представлены в виде высотных профилей в интервале высот $10 \div 80$ км. Погрешность измерения температуры радиометра спутника Aura составляет 3 К при переменном пространственном разрешении $1 \div 5$ км в диапазоне высот $15 \div 70$ км [25–27]. Измерение температуры радиометром SABER с борта спутника TIMED проводится в диапазоне высот $13 \div 110$ км. Погрешность измерения температуры составляет 1–2 К в диапазоне высот $15 \div 80$ км при пространственном разрешении около 0,4 км [28, 29].

В окрестности места спутники пролетают два раза в сутки. Момент пролета определяется параметрами орбиты и хорошо известен. Разброс времен пролета составляет примерно 1 ч. Для Томска это 13:00–14:00 местного времени днем и 02:00–03:00 ночью для спутника Aura и 09:00–10:00 и 21:00–23:00 для спутника TIMED соответственно. При этом максимальное пространственное отклонение положения спутника относительно СЛС в момент пролета составляет ± 600 км.

На рис. 5–7 представлены профили вертикального распределения температуры атмосферы (сплошная линия) для трех разных дней наблюдений, восстановленные из лидарных измерений при двух-

часовом усреднении и спутниковых данных на ближайшие моменты пролета спутников Aura и TIMED (штриховая и точечная линии), а также разность значений температуры, полученных из лидарных и спутниковых данных.

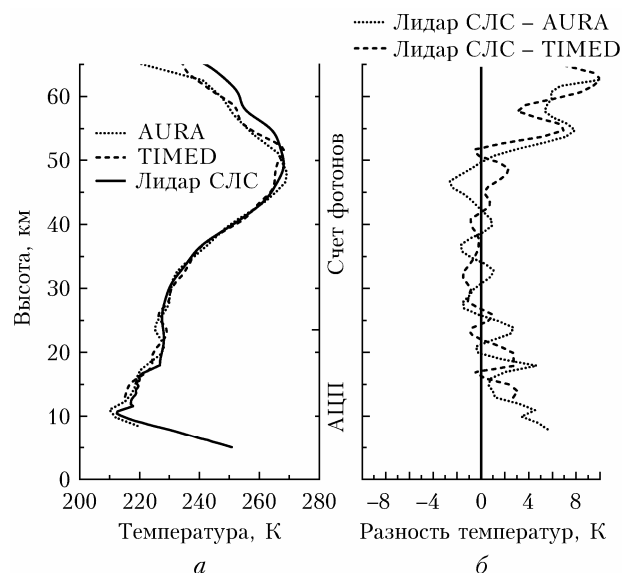


Рис. 5. Профили: *a* – вертикального распределения температуры атмосферы, полученные с помощью лидара и спутников; *б* – разности значений температуры, полученных из лидарных и спутниковых данных. Время накопления лидарного сигнала 130 мин с 22:45 2.05.2019 г. по 00:55 3.05.2019 г., пространственное разрешение 500 м. Наблюдения спутником EOS Aura проводились в 13:48, TIMED – в 02:07 3.05.2019 г.

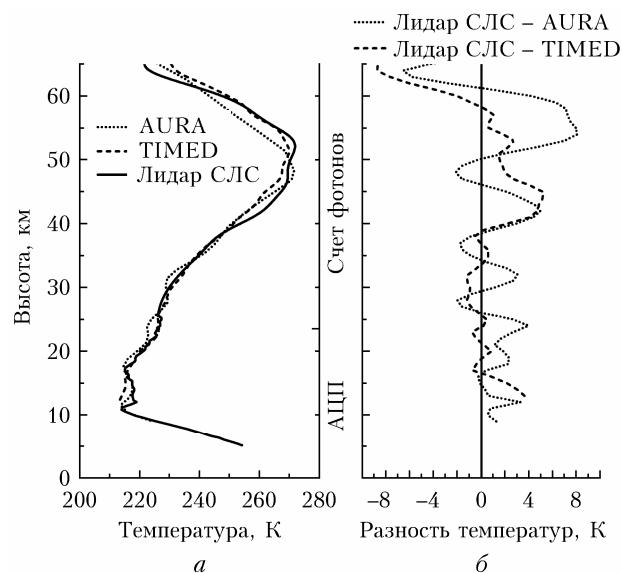


Рис. 6. То же, что и на рис. 5, но время накопления лидарного сигнала 100 мин с 22:45 6.05.2019 г. по 00:25 7.05.2019 г.; пространственное разрешение 500 м; наблюдения спутником EOS Aura проводились в 14:18, TIMED – в 23:30 6.05.2019 г.

Как видно из рис. 5–7, в диапазоне $15 \div 50$ км разброс значений температуры, полученных из лидарных и спутниковых данных, не превышает 4 К.

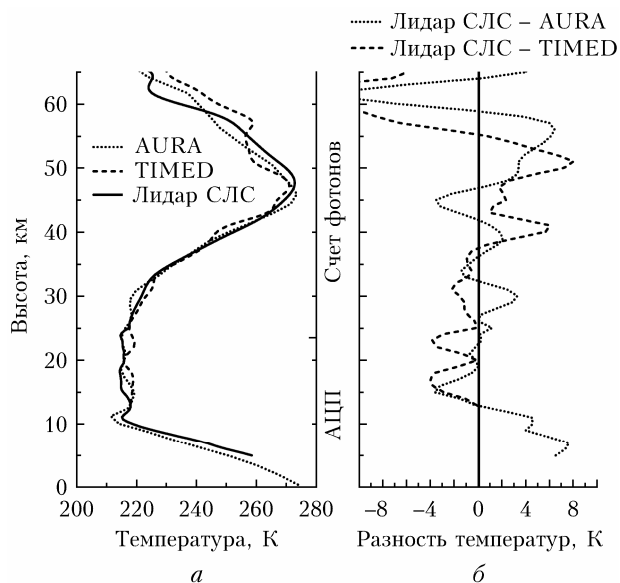


Рис. 7. То же, что и на рис. 5, но время накопления лидарного сигнала 110 мин с 22:00 по 23:50 12.04.2020 г.; наблюдения спутником EOS Aura проводились в 13:41 13.04.2020 г., TIMED – в 21:14 12.04.2020 г.

Результаты сравнения лидарных и спутниковых измерений показывает высокую эффективность применения комбинации режимов регистрации и подтверждает возможность получать корректное вертикальное распределение температуры атмосферы во всем диапазоне высот работы СКР-лидара СЛС на базе главного зеркала, согласующееся с данными спутниковых измерений.

Заключение

Приемное зеркало диаметром 2,2 м СЛС обеспечивает большой потенциал лидарного комплекса и открывает новые возможности для решения задач лазерного зондирования атмосферы, в том числе измерения температуры атмосферы с помощью СКР-лидара до высот 60–70 км. Однако при этом возникает проблема регистрации лидарных сигналов в широком динамическом диапазоне. Для решения этой задачи нами была разработана система, позволяющая осуществлять параллельное детектирование лидарных откликов в режиме счета фотонов и режиме накопления заряда.

В ходе тестирования системы определены допустимые пределы применения метода счета фотонов и метода накопления заряда при детектировании и оцифровке лидарных откликов СКР-лидара на базе главного зеркала Сибирской лидарной станции. Эксперименты показали, что применение комбинированного метода регистрации лидарных откликов чисто вращательного спектра СКР на молекулах азота и кислорода позволяет получать адекватное вертикальное распределение температуры атмосферы, согласующееся с данными спутниковых измерений в пределах статистических погрешностей [20] ($\pm 2 \div 3$ К для диапазона $15 \div 50$ км).

Финансирование. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Атмосфера» при частичной финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (договор № 075-15-2021-661) и в рамках госзадания ИОА СО РАН (№ 121031500341-3).

Список литературы

1. Radlach M., Behrendt A., Wulfmeyer V. Scanning rotational Raman lidar at 355 nm for the measurement of tropospheric temperature fields // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8. P. 159–169.
2. Chen S., Qiu Z., Zhang Y., Chen H., Wang Y. A pure rotational Raman lidar using double-grating monochromator for temperature profile detection // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2011. V. 112, iss. 2 P. 304–309.
3. Bobrovnikov S.M., Gorlov E.V., Trifonov D.A., Zharikov V.I. Raman lidar for measuring the temperature of the stratosphere // *Proc. SPIE.* 2018. V. 10833. P. 715–718.
4. Golitsyn G.S., Semenov A.I., Shefov N.N., Fishkova L.M., Lysenko E.V., Perov S.P. Long-term temperature trends in the middle and upper atmosphere // *Geophys. Res. Lett.* 1996. V. 23, N 14. P. 1741–1744.
5. Li Y., Lin X., Song S., Yang Y., Cheng X., Chen Z., Liu L., Xia Y., Xiong J., Gong S., Li F. A Combined rotational Raman–Rayleigh lidar for atmospheric temperature measurements over 5–0 km with self-calibration // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2016. V. 54, iss. 12. P. 7055–7065.
6. Alpers M., Eixmann R., Fricke-Begemann C., Gerding M., Höffner J. Temperature lidar measurements from 1 to 105 km altitude using resonance, Rayleigh, and Rotational Raman scattering // *Atmos. Chem. Phys.* 2004. V. 4. P. 793–800.
7. Gerding M., Höffner J., Lautenbach J., Rauthe M., Lübken F.J. Seasonal variation of nocturnal temperatures between 1 and 105 km altitude at 54° N observed by lidar // *Atmos. Chem. Phys.* 2008. V. 8, N 24. P. 7465–7482.
8. Yu C., Yi F. Atmospheric temperature profiling by joint Raman, Rayleigh and Fe Boltzmann lidar measurements // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2008. V. 70, N 10. P. 1281–1288.
9. Vaughan G., Wareing D.P., Pepler S.J., Thomas L., Mitev V. Atmospheric temperature measurements made by rotational Raman scattering // *Appl. Opt.* 1993. V. 32, N 15, P. 2758–2764.
10. Behrendt A., Reichardt J. Atmospheric temperature profiling in the presence of clouds with a pure rotational Raman lidar by use of an interference-filter-based polychromator // *Appl. Opt.* 2000. V. 39, N 9. P. 1372–1378.
11. Nedeljkovich D., Hauchecorne A., Chanin M.L. Rotational Raman lidar to measure temperature from the ground to 30 km // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1993. V. 31, N 1. P. 90–101.
12. Jingyu Jia, Fan Yi. Atmospheric temperature measurements at altitudes of 5–30 km with a double-grating-based pure rotational Raman lidar // *Appl. Opt.* 2014. V. 53, N 24. P. 5330–5343.
13. Von Zahn U., von Cossart G., Fiedler J., Fricke K.H., Nelke G., Baumgarten G., Rees D., Hauchecorne A., Adolfsen K. The ALOMAR Rayleigh/Mie/Raman lidar: Objectives, configuration, and performance // *Ann. Geophys.* 2000. V. 18, iss. 7. P. 815–833.
14. Schoch A., Baumgarten G., Fiedler J. Polar middle atmosphere temperature climatology from Rayleigh lidar measurements at ALOMAR (69° N) // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26, N 7. P. 1681–1698.

15. Bobrovnikov S.M., Gorlov E.V., Trifonov D.A., Zharkov V.I. Lidar complex for measuring the atmospheric temperature at the Siberian lidar station // *Proc. SPIE*. 2019. V. 11208. P. 112083S-1–6.
16. Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И., Трифонов Д.А. Методика юстировки и оценка размера кружка рассеяния главного зеркала Сибирской лидарной станции // *Оптика атмосфер. и океана*. 2020. Т. 33, № 7. С. 559–564; Bobrovnikov S.M., Gorlov E.V., Zharkov V.I., Trifonov D.A. Alignment technique and quality check of the primary mirror of the Siberian Lidar Station // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 6. P. 696–701. DOI: 10.1134/S1024856020060081.
17. Носов В.В., Лукин В.П., Носов Е.В., Торзаев А.В. Структура турбулентных движений воздуха в шахте главного зеркала Сибирской лидарной станции ИОА СО РАН. Эксперимент и численное моделирование // *Оптика атмосфер. и океана*. 2016. Т. 29, № 11. С. 905–910. DOI: 10.15372/AOO20161102.
18. Миронов А.В. Основы астротометрии. Практические основы фотометрии и спектрофотометрии звезд. М.: Физматлит, 2008. 260 с.
19. Donovan D.P., Whiteway J.A., Carswell A.I. Correction for nonlinear photon-counting effects in lidar systems // *Appl. Opt.* 1993. V. 32, N 33. P. 6742–6753.
20. Bobrovnikov S.M., Gorlov E.V., Zharkov V.I., Zaitsev N.G., Nadeev A.I., Trifonov D.A. Evaluation of efficiency of the combined LIDAR signal photo-detection technique // *Proc. SPIE*. 2020. V. 11560. P. 659–664.
21. Bobrovnikov S.M., Zharkov V.I., Zaitsev N.G., Nadeev A.I., Trifonov D.A. Photon counting system with automated detection and selection of photodetector discrimination thresholds // *Proc. SPIE*. 2022. V. 12341. P. 392–396.
22. Кривошукский А.А., Репнев А.И., Миронова И.А., Груздев А.Н., Тунияц Т.И. Результаты российских исследований средней атмосферы в 2015–2018 г. // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана*. 2019. Т. 55, № 6. С. 48–65.
23. Li Y., Lin X., Yang Y., Xia Y., Xiong J., Song S., Liu L., Chen Z., Cheng X., Li F. Temperature characteristics at altitudes of 5–80 km with a self-calibrated Rayleigh – rotational Raman lidar: A summer case study // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2017. V. 188. P. 94–102.
24. Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2002. V. 107(A12). P. S1A15–16.
25. Schwartz M.J., Lambert A., Manney G.L., Read W.G., Livesey N.J., Froidevaux L., Ao C.O., Bernath P.F., Boone C.D., Cofield R.E., Daffer W.H., Drouin B.J., Fetzer E.J., Fuller R.A., Jarnot R.F., Jiang J.H., Jiang Y.B., Knosp B.W., Krüger K., Li J.-L.F., Mlynarczyk M.G., Pawson S., Russell III J.M., Santee M.L., Snyder W.V., Stek P.C., Thurstans R.P., Tompkins A.M., Wagner P.A., Walker K.A., Waters J.W., Wu D.L. Validation of the Aura Microwave Limb Sounder temperature and geopotential height measurements // *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 2008. V. 113. N D15.
26. Черниговская М.А. Временные вариации температуры средней атмосферы над регионом юга Восточной Сибири по спутниковым данным MLS Aura // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2013. Т. 10, № 2. С. 212–224.
27. URL: https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/data/satellite/Aura/MLS/V04/L2GPOVP_Prof/Temp/Tomsk/ (дата обращения: 18.09.2022).
28. Remsberg E.E., Marshall B.T., Garcia-Comas M., Krueger D., Lingenfelser G.S., Martin-Torres J., Mlynarczyk M.G., Russell III J.M., Smith A.K., Zhao Y., Brown C., Gordley L.L., Lopez-Gonzalez M.J., Lopez-Puertas M., She C.-Y., Taylor M.J., Thompson R.E. Assessment of the quality of the Version 1.07 temperature-versus-pressure profiles of the middle atmosphere from TIMED/SABER // *J. Geophys. Res.: Atmospheres*. 2008. V. 113. N D17.
29. URL: <http://saber.gats-inc.com/coin.php> (дата обращения: 18.09.2022).

S.M. Bobrovnikov, V.I. Zharkov, N.G. Zaitcev, D.A. Trifonov. Application of the combined method of photo registration in lidar temperature measurements on the primary mirror of the Siberian lidar station.

A technique for parallel registration of lidar signals in photon counting and charge accumulation modes at the Siberian lidar station of Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (SLS) is described in detail. A device is designed and experimentally tested for recording lidar signals with the use of the combined technique at the unique SLS lidar. During the experimental testing of the device, the limits of applicability of the technique suggested to regular measurements of the vertical distribution of air temperature based on lidar signals of purely rotational Raman spectra are determined. The comparison between the lidar and satellite measurements shows their good agreement, which proves the high efficiency of the combined technique and confirms the capability of deriving the vertical distribution of atmospheric temperature throughout the altitude range of the primary mirror of the Raman lidar of SLS.