

# Сравнительный анализ лидарных, радиозондовых и спутниковых измерений температуры в нижней стратосфере региона Западной Сибири

МАРИЧЕВ В. Н., БОЧКОВСКИЙ Д. А.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск

email: marichev@iao.ru, moto@iao.ru

Ранее нами в работе [1] сообщалось об измерении температуры в тропосфере лидаром с приемным зеркалом диаметром 1м и передатчиком на базе эксимерного ХеСл-лазера. В лидаре использовался канал для приема СКР-сигналов на первом колебательно-вращательном переходе молекул азота. Возбуждение данного перехода молекул  $N_2(384\text{нм})$  производилось излучением на длине волны 353нм, получаемой, в свою очередь, при ВКР-преобразовании лазерного излучения с длиной волны 308нм в кювете с водородом.

В плане дальнейшего развития технологии измерений температуры в атмосфере была проведена модернизация вышеуказанного лидара. В лидаре были созданы три канала для приема сигналов СКР и упругого рэлеевского рассеяния света, что позволило охватить диапазон измерений температуры во всей стратосфере и нижней термосфере от 10 до 60км. В качестве передатчика использовался Nd-YAG лазер с генерацией на второй гармонике 532нм. Прием СКР-сигналов проводился на возбужденном излучением лазера колебательно -вращательном переходе молекул азота 607нм.

Блок-схема лидара в его современном состоянии представлена на рис.1.

Луч лазера направляется в коллиматор 2 и затем сколлимированный пучок через плоское зеркало 3 выводится вертикально в атмосферу.

Обратнорассеянное излучения поступает на телескоп системы Ньютона 4 с диаметром главного зеркала 1 м и фокусным расстоянием 2 м. В фокальной плоскости телескопа установлена полевая диафрагма 6, предназначенная для формирования поля зрения приемной антенны и выполняющая, в конечном счете, роль пространственной селекции сигналов. Отфильтрованные от фоновых засветок оптические сигналы направляются в приемный блок, в котором производится их спектральная селекция и фотоэлектронное преобразование. В приемном блоке установлены четыре фокусирующие линзы 7, 8, 9,10, дихроичная пластина 11 для разделения излучений на длинах волн 532 и 607нм, пластина 12 для разделения излучения на длине волны 532нм на пучки с примерным процентным соотношением 10% и 90% (уменьшение динамического диапазона при приеме сигналов ближней и дальней зон) и интерференционные светофильтры 532(13) и 607(14) нм. Разделенные оптические сигналы по трем отдельным каналам через фокусирующие линзы поступают на фотосенсорные модули 15, 16, 17, где происходит их преобразование в электрические сигналы. Преобразование световых сигналов осуществляется в режиме счета фотонов. Далее производится их регистрация 18 с дальнейшей передачей данных в компьютер для сбора и накопления 19.

Зондирование проводится в ночное время суток. Используемое вертикальное разрешение измерения сигнала (длина строба) составляет 192м (при этом дискрет по стробу равен 12м). Единичная серия измерений равнялось 10мин., а среднее время проведения измерений за ночь – около двух часов Восстановление температурных профилей из СКР-сигналов проводился через концентрацию молекул азота, т.е. через плотность атмосферы. Для расчета температуры  $T$  по СКР-сигналам было получено выражение, аналогичное для расчета температуры по рэлеевским сигналам [1,2]

$$T(H) = \frac{P_1(H)P_2(H)}{N(H)H^2} \left[ \frac{N(H_m)}{P_1(H_m)P_2(H_m)} T(H_m) + \frac{1}{R^*} \int_{H_m}^H \frac{N(h)h^2g(h)dh}{P_1(h)P_2(h)} \right]$$

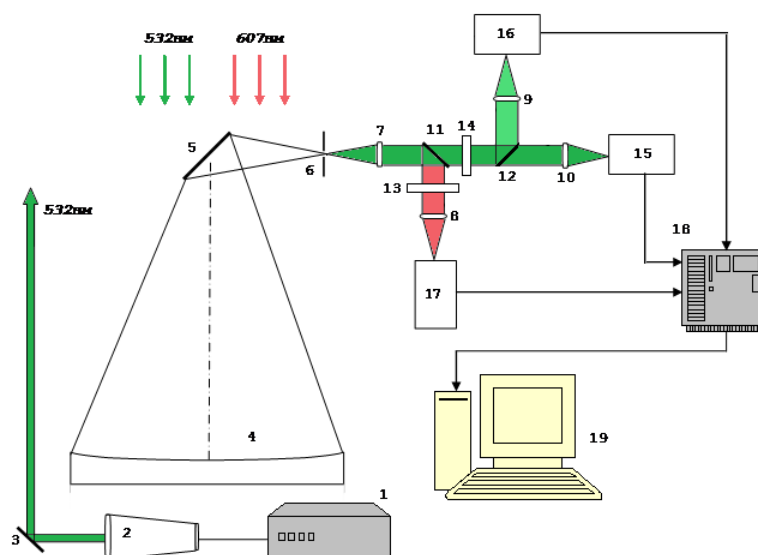


Рис. 1. Структурная схема лидара. 1 – лазер, 2 – коллиматор, 3 – плоское зеркало, 4 – главное параболическое зеркало, 5 – плоский контроотражатель, 6 – диафрагма, 7, 8, 9, 10 – фокусирующие линзы, 11 – дихроичная пластина, 12 – светоделительная пластина, 13, 14 – интерференционные светофильтры, 15,16,17 - фотосенсорные модули, 18 – счетчик фотонов, 19 – вычислительная техника.

Здесь  $P_1(H), P_2(H)$  – прозрачность атмосферы от уровня расположения лидара до высоты  $H$  на длинах волн 532 и 607 нм,  $R^*$  – удельная газовая постоянная,  $g(h)$  – ускорение свободного падения,  $H_m$  – максимальная высота, с которой регистрируются достаточно надежные для обработки сигналы (так называемая высота калибровки, на которой задаются граничные значения температуры  $T(H_m)$ ).

Сравнение лидарных измерений температурных профилей в нижней стратосфере, полученных методом СКР, проводилось с данными радиозондовых и спутниковых измерений. В качестве независимых данных были взяты профили температуры, полученные на аэрологической станции г. Новосибирска (удаление от Томска 210км) и со спутника "Аура"[3]. Результаты лидарных измерений температуры, полученные за длительный период март-декабрь 2015г. представлены на рис.2.

Как видно из рисунка, измерениями по СКР-сигналам был освоен высотный диапазон от 10 до 25км. Выше для расчета температуры использовались сигналы рэлеевского рассеяния света, на которые в том числе производилась калибровка сигналов СКР. В большинстве случаев отмечается достаточно хорошее соответствие вертикального распределения температуры, полученное из лидарных, радиозондовых и спутниковых измерений. По представленным выше графикам был рассчитан средний разброс измеренных значений температуры, приведенный в таблице 1.

Таблица1.Разброс данных измерений температуры лидаром по сравнению с радиозондом и спутником "Аура".

Оцененный разброс между экспериментальными измерениями на высотах от 15 до 30км не выходил из интервала стандартной ошибки лидарных измерений температуры, который на высотах 15, 20 и 25км не превышал 2.4%, 5% и 10% для расчета по сигналам СКР и на высотах 25 и 30км - 4% и 10% - для расчета по сигналам упругого рассеяния света.

Таким образом, сравнение данных лидарных и радиозондовых, а также спутниковых измерений температуры дало их очень хорошее и качественное и количественное совпа-

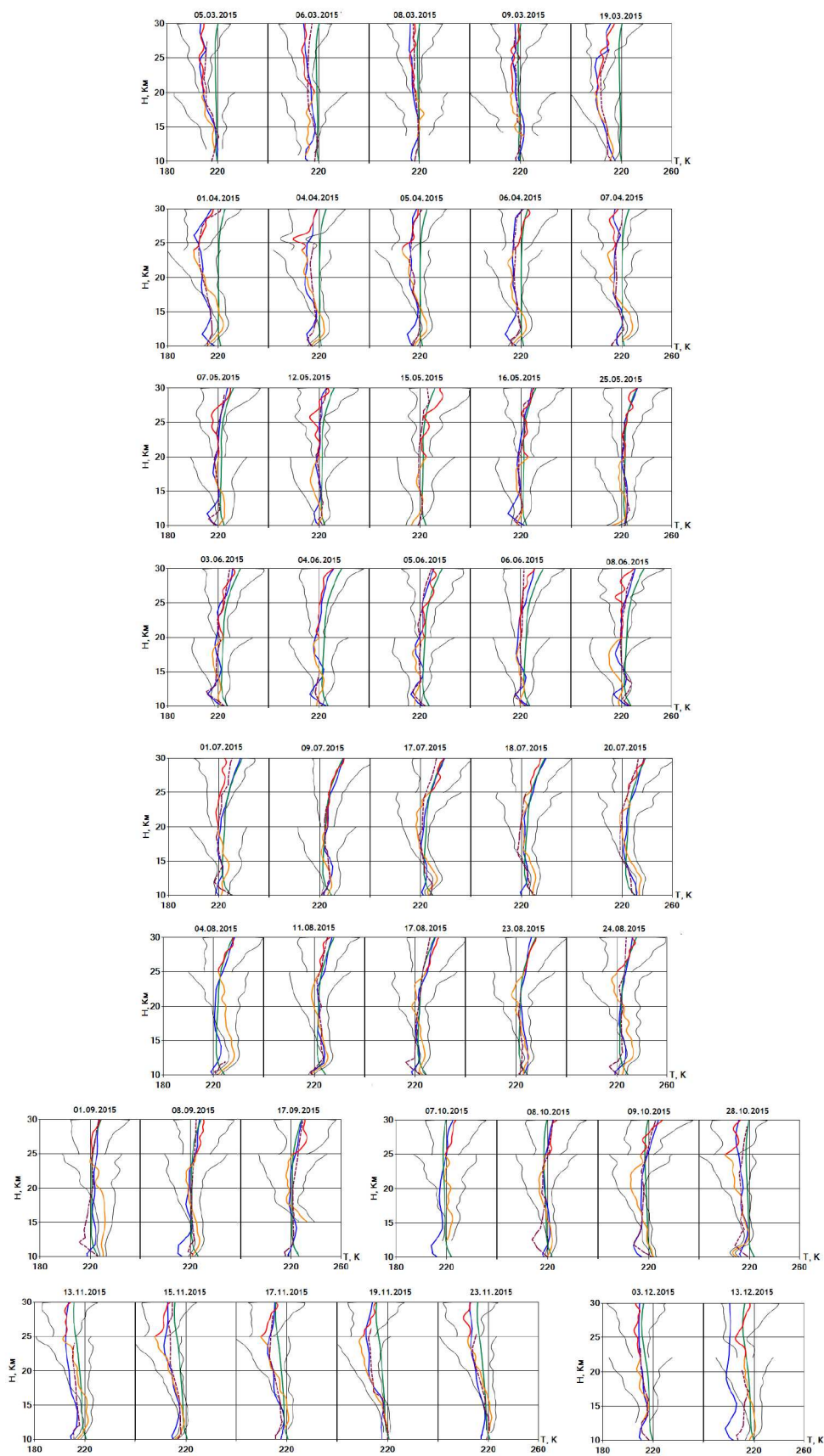


Рис. 2. Результаты измерений температуры лидаром в сравнении с радиозондовыми и спутниковыми измерениями. Кривые цвета: желтого - лидар, СКР; красного -лидар, релейское рассеяние; черного - стандартное отклонение лидарных измерений; синего - спутник "Аура"; зеленого - модель CIRA-86[4]. Штриховая кривая - радиозонд.

Высота	Зонд	Кол-профилей	Аура	Кол-во профилей
10 км	3,27	38	4,59	36
15 км	3,68	41	4,06	42
20 км	2,82	40	2,14	42
25 км	3,69	36	2,97	42
30 км	4,38	31	1,96	42

дение. Полученный результат показал перспективность лидарного СКР-канала с использованием первого колебательно-вращательного перехода молекул азота на длине волны 607нм при накачке лазерной гармоникой с длиной волны 532нм для измерения температуры в нижней стратосфере. При одновременной работе на каналах рамановского и рэлеевского рассеяния света, как это было показано нами в работе [5], были получены протяженные профили температуры в области высот от 7 до 60км, охватывающую верхнюю тропосферу и среднюю атмосферу.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ НШ4714.2014.5 в части проведения мониторинговых измерений, гранта РФФИ №14-27-00022 в части модернизации лидарного комплекса МСВЗА и гранта РФФИ № 16-05-00901 в части анализа данных лидарного зондирования стратосферы.

#### Литература

1. Зуев В.В., Маричев В.Н., Бондаренко С.Л., Долгий С.И., Шарабарин Е.В. Предварительные результаты зондирования температуры в тропосфере СКР-лидаром на первом колебательно-вращательном переходе молекул азота. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 12. С. 1609-1611.
2. Зуев В.В., Маричев В.Н., Бондаренко С.Л. Лидарные измерения температуры по рэлеевскому рассеянию света в нижней стратосфере за период май-декабрь 1995г. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т.9.№10, С.1386-1393.
3. <http://mirador.gsfc.nasa.gov>
4. Rees D., Barnett J.J., Labitske K. COSPAR International Reference Atmosphere: 1986. Part II, Middle Atmosphere Models // Adv. Space Res. 1990. V. 10, N 12. 525 p
5. В.Н.Маричев.Комбинированный метод оптического зондирования нижней и средней атмосферы.// Оптика атмосферы и океана. 2016. Т.2 9. № 3. С.