

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 535.361.551:511.6:621.371

## Анализ технических решений при проектировании турбулентного лидара

И.А. Разенков✉\*

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

Поступила в редакцию 30.03.2022 г.;  
после доработки 15.04.2022 г.;  
принята к печати 16.07.2022 г.

Определены проектные характеристики турбулентного лидара, влияющие на его термомеханическую стабильность. Дано сравнительное описание двух различных конструкций, в которых реализованы разные подходы при выборе приемопередающей оптики, детекторов приемника, организации системы температурного контроля для стабилизации оптической скамьи лидара. Предложена схема моделирования лидарного приемопередатчика, включающая расчет смещений оптических элементов относительно базовых точек на оптической скамье и трассировку лучей от лазера в атмосферу и обратно. Рассмотрено влияние температурного градиента между противоположными сторонами оптической скамьи на работу приемных каналов. Представлены результаты экспериментального исследования лидаров на устойчивость к изменению температуры. Сформулированы рекомендации по улучшению конструкции турбулентного лидара.

*Ключевые слова:* турбулентный лидар, атмосферная турбулентность, эффект увеличения обратного рассеяния, термомеханическая стабильность, температурные деформации; turbulent lidar, atmospheric turbulence, backscatter enhancement effect, thermo-mechanical stability, temperature deformation.

### Введение

Турбулентный лидар — это специальный микроимпульсный двухканальный аэрозольный оптический локалор, который одновременно регистрирует эхосигнал от молекул и аэрозольных частиц и эхосигнал, состоящий из суммы упомянутого эхосигнала и эхосигнала, обусловленного интенсивностью флуктуаций коэффициента преломления воздуха. Флуктуации коэффициента преломления описываются структурной характеристикой  $C_n^2$  и являются следствием температурных флуктуаций в турбулентной атмосфере. При двукратном распространении световой волны в случайной среде, благодаря принципу взаимности и когерентным эффектам, происходит увеличение обратного рассеяния (УОР), которое проявляется в повышении средней интенсивности рассеянного излучения на оси лазерного пучка [1, 2].

В турбулентном лидаре одновременно реализованы две схемы построения приемопередатчика — коаксиальная и биаксиальная, поскольку один приемный канал совмещен с передатчиком, а другой располагается в стороне [3, 4]. Эхосигнал первого приемного канала  $P_1$  является основным, он нормируется на эхосигнал дополнительного приемного

канала  $P_2$ , чтобы получить пространственный профиль функции  $q(x) = P_1(x)/P_2(x) - 1$ , зависящей только от турбулентного состояния атмосферы и не зависящей от распределения коэффициента аэрозольного рассеяния вдоль направления зондирования  $x$ . Процедуры калибровки лидара и восстановления  $C_n^2$  из функции  $q(x, C_n^2)$  изложены в [4, 5].

Турбулентный лидар предназначен для дистанционного непрерывного контроля оптической турбулентности и атмосферного аэрозоля в автоматическом режиме в пограничном слое атмосферы [6]. Лидар может быть спроектирован для работы как в помещении, так и на открытом воздухе. Для обеспечения длительного стабильного функционирования лидара необходимо прогнозировать его термомеханическое состояние с учетом воздействующих на лидар факторов, определяющих тепловой баланс внутри системы. К ним относятся тепловыделение от аппаратуры, циркуляция воздуха внутри лидара и работа системы обеспечения теплового режима. На распределение температуры внутри лидара влияют геометрические характеристики самой системы и теплофизические свойства материалов, из которых изготовлены отдельные части, например оптическая скамья и защитный кожух. В литературе можно найти подробное описание различных типов лидаров [7–10], кроме турбулентного [3–6], который появился сравнительно недавно и пока недостаточно изучен.

\* Игорь Александрович Разенков (lidaroff@iao.ru).

Цель настоящей работы заключается в анализе технических решений, положенных в основу существенно отличающихся друг от друга турбулентных лидаров УОР-4 (532 нм) и УОР-5 (355 нм), с акцентом на температурную стабильность конструкций. На основе результатов анализа предполагалось сформулировать рекомендации, которые позволят в будущем создать усовершенствованную версию турбулентного лидара.

## Проектные характеристики лидара

Турбулентный лидар – это оптический локатор, для стабильной работы которого в первую очередь необходимо обеспечить постоянство диаграмм направленности и постоянство взаимного расположения оптических осей передатчика и приемников. В противном случае лидар будет регистрировать изменения эхосигналов, обусловленные, например, деформациями конструкции, а не процессами, происходящими в атмосфере.

Все оптические элементы лидара крепятся на жесткое основание – оптическую скамью, которая размещается в закрытом кожухе. Будем полагать, что в процессе эксплуатации лидара динамические нагрузки отсутствуют, поэтому деформация скамьи и, следовательно, взаимное смещение оптических осей передатчика и приемника может возникнуть по причине неравномерного распределения температуры внутри лидара и появления температурных градиентов. Очевидно, что величина деформации скамьи будет зависеть от целого ряда параметров, таких как ее размеры, материал, расположение элементов на скамье и прочее.

Полная деформация неравномерно нагретого тела, в частности материала оптической скамьи, состоит из суммы температурных деформаций и температурных напряжений [11]. Мы ограничимся рассмотрением только температурных деформаций, возникающих при равномерном линейном расширении, равном  $\alpha\Delta T$ , где  $\alpha$  – коэффициент линейного

расширения материала;  $\Delta T$  – изменение температуры. Это ограничение оправдано, если оптическая скамья не является сплошной, а ее сердцевина в основном пустотелая.

На рис. 1 представлена схема проектных характеристик, влияющих на термомеханическую стабильность турбулентного лидара. При выборе конструкции приемопередатчика следует руководствоваться принципом минимизации его размеров, из которого следует вывод о необходимости компактного размещения элементов и использования обеих сторон оптической скамьи.

Выбор материала для изготовления оптической скамьи очень важен. Он должен обеспечивать ее жесткость, т.е. сопротивляемость деформации, и скамья при этом не была тяжелой. Для этого можно использовать алюминий, который в 2,9 раза легче стали. Однако следует учитывать, что коэффициент теплового линейного расширения алюминия в 1,7 раза больше, чем стали. Сегодня при проектировании размеростабильных высокоточных конструкций, в частности при создании космических платформ, используют углепластик с почти нулевым коэффициентом теплового расширения: 10 мкм/м для линейных и 2'' (10 мкрад) для угловых смещений при изменении температуры на  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$  [12]. Для оптической скамьи лидара углепластик может стать идеальным материалом, но при этом необходимо располагать технологией обработки, изготовления и сборки скамьи из углепластика.

Габариты лидарного приемопередатчика зависят от типа принимающей оптики. В турбулентном лидаре это может быть один двухзеркальный афокальный телескоп средних размеров системы Мерсен (парабола-парабола) или Далл-Кирхем (эллипсоид-сфера) либо два небольших отдельных телескопа, один из которых зеркальный [4]. Заметим, что с одним приемопередающим телескопом система более стабильна, чем с двумя, так как в конструкции с единым телескопом фиксируется положение оптических осей приемных каналов по отношению друг к другу, но габариты лидара при этом больше.



Рис. 1. Проектные характеристики турбулентного лидара

Для управления температурным режимом внутри лидара следует использовать термозащитный кожух и термоэлектрический преобразователь (холодильник Пельтье). Другой, более простой способ предполагает прокачку наружного воздуха через систему, но тогда необходимо принять меры, чтобы пыль снаружи не попадала на оптические поверхности.

## Лидары УОР-4 и УОР-5

Рассмотрим две различные конструкции турбулентного лидара: УОР-4 [13] и УОР-5 [14, 15]. Заметим, что лидар УОР-4 был модернизирован, и в настоящее время основной приемопередающий канал состоит из внеосевых параболических зеркал, а дополнительный приемный канал является линзовым [16]. Оба лидара были спроектированы для работы внутри помещения, однако при проведении измерений во время летних экспедиций лидары неоднократно работали на улице под навесом.

Оптические схемы лидаров представлены на рис. 2. Обозначения одинаковых оптических элементов и расстояний между элементами на обеих схемах совпадают. В лидарах УОР-4 и УОР-5 используются твердотельные лазеры 1 на гранате с длинами волн, соответственно, 532 нм и 355 нм. Расходимость исходного лазерного пучка в УОР-4 больше, чем в УОР-5, поэтому на схеме УОР-4 (рис. 2, а) рядом с лазером установлена коллимирующая линза 2.

Турбулентный лидар работает следующим образом. Короткий световой импульс лазера 1 с линейной поляризацией, совпадающей с плоскостью рисунка, направляется в сторону тонкопленочного поляризатора 3, проходит сквозь него и далее через четвертьволновую пластинку 4 поступает в телескоп 5. После пластинки 4 поляризация пучка преобразуется в круговую. Поляризатор 3 и пластинка 4 представляют антенный ключ, поэтому приходящее из атмосферы излучение после повторного прохода через пластинку 4 вновь становится ли-

нейно поляризованным с плоскостью поляризации, перпендикулярной плоскости рисунка. Пришедшее излучение отражается от поляризатора 3 и направляется на фотоприемник 11.

Приемопередающий телескоп 5 лидара УОР-4 диаметром 50 мм (рис. 2, а) состоит из пары внеосевых параболических зеркал. Приемопередающий телескоп 5 лидара УОР-5 диаметром 260 мм (рис. 2, б) состоит из пары осевых параболических зеркал. На одной стороне телескопа круглая зона работает на передачу и на прием; симметрично относительно оси телескопа располагается другая зона, работающая только на прием. Диаметр приемных апертур можно изменять от 50 до 90 мм.

На схеме УОР-4 на рис. 2, а функцию второго приемного канала выполняет линзовый телескоп 6 системы Кеплера, состоящий из пары положительных линз. Афокальные телескопы 5 и 6 лидара УОР-4 имеют одинаковое увеличение  $10\times$ . Увеличение телескопа 5 в УОР-5 равно  $12,5\times$ . На схеме УОР-4 (рис. 2, а) эхосигналы с телескопов 5 и 6, соответственно, поляризатором 3 и зеркалом 7 направляются на интерференционный светофильтр 8, отсекающий фоновую засветку неба. Аналогично для схемы УОР-5 (рис. 2, б) пришедшие пучки отражаются от тонкопленочного поляризатора 3 и поступают на фильтр 8. На рис. 2, а в дополнительном приемном канале поляризационный светоделительный куб 9 отсекает компоненту эхосигнала с поперечной поляризацией. В основном приемном канале эта компонента отсекается автоматически поляризатором 3.

В лидаре УОР-4 (рис. 2, а) в качестве детекторов используются лавинно-пролетные диоды (ЛПД) 11 и 13 с диаметром чувствительной площадки 0,1 мм, которая одновременно выполняет функцию полевой диафрагмы. Фокусирующие линзы 10 и 12 имеют фокусное расстояние 25 мм. Полное поле зрения лидара УОР-4 составляет  $0,1 \text{ мм} / (25 \text{ мм} \times 10^\circ) = 400 \text{ мкрад}$ . В лидаре УОР-5 (рис. 2, б) в качестве детекторов используются фотоэлектронные

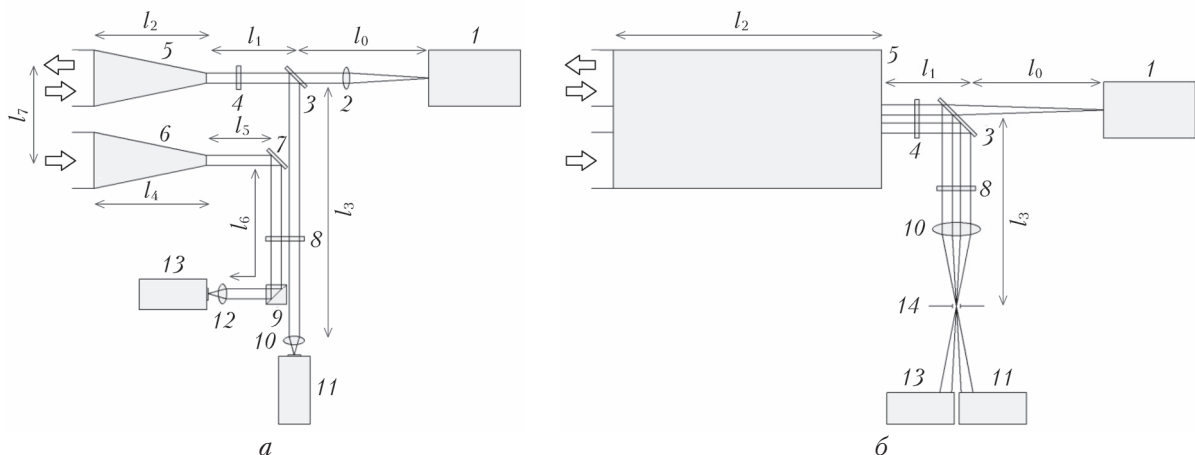


Рис. 2. Упрощенная оптическая схема приемопередатчика турбулентного лидара УОР-4 с двумя телескопами (а) и лидара УОР-5 с одним телескопом (б). Обозначения в тексте

умножители (ФЭУ) 11 и 13 с размером катода 8 мм. Поле зрения в УОР-5 определяется фокусным расстоянием линзы 10 (150 мм) и диафрагмой 14 (0,5 мм) и составляет  $0,5 \text{ мм}/(130 \text{ мм} \cdot 12,5^\circ) = 267 \text{ мкрад}$ .

На рис. 3, а показан внешний вид лидара УОР-4 с убранными передней и верхней панелями и с открытым приемным блоком. Внешний вид лидара УОР-5 со снятой верхней крышкой кожуха представлен на рис. 3, б. В УОР-4 (рис. 3, а) приемный блок с детекторами располагается на оптиче-

ской скамье сверху, внизу находится лазер и телескопы. В УОР-5 (рис. 3, б) наверху скамьи располагаются лазер и приемный блок, а низ занят приемопередаточным телескопом. Заметим, что в УОР-5 у главного зеркала телескопа для уменьшения габаритов приемопередатчика верхний и нижний края отрезаны, поэтому сечение телескопа – прямоугольник [14].

Характеристики обоих лидаров приведены в таблице, включая основные геометрические размеры  $l_0 - l_7$ , показанные на рис. 2. Пространственное раз-

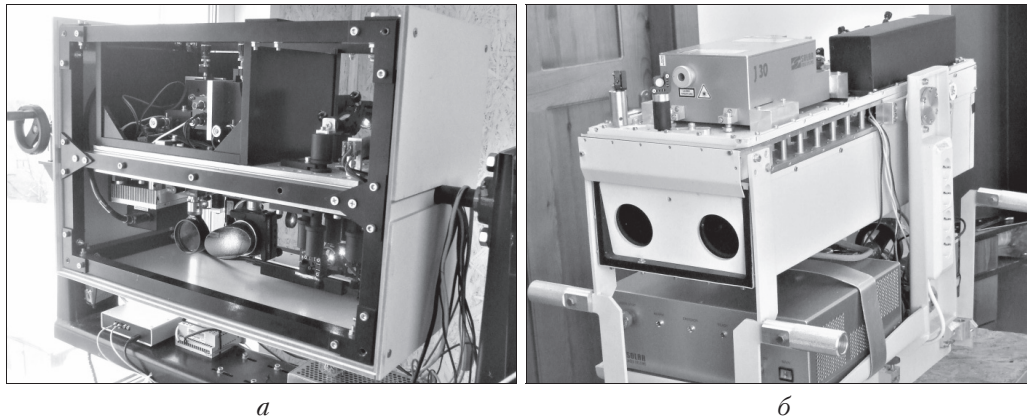


Рис. 3. Внешний вид лидара УОР-4 (а) и лидара УОР-5 (б)

**Основные характеристики лидаров УОР-4 и УОР-5**

Характеристика	УОР-4	УОР-5
<i>Передатчик</i>		
Лазер	Cobolt Tor 532	Solar JX-330
Длина волны	532 нм	355 нм
Длительность импульса	5 нс	30 нс
Частота повторения	6 кГц	10 кГц
Мощность лазера	240 мВт	500 мВт
Энергия в импульсе	40 мкДж	50 мкДж
Качество пучка	TEM <sub>00</sub> , M <sup>2</sup> < 1,2	TEM <sub>00</sub> , M <sup>2</sup> < 1,2
Размер пучка (~ 1/e <sup>2</sup> )	50 мм	70 мм
Расходимость пучка	< 30 мкрад	0 мкрад
<i>Приемник</i>		
Зеркальный афокальный телескоп	Мерсен (10°)	Мерсен (12,5°)
Линзовый афокальный телескоп	Кеплер (10°)	
Диаметр или размеры телескопа	50 мм	260 × 110 × 650 мм <sup>3</sup>
Число приемных каналов	2	2
Апертура приемника	50 мм	50...90 мм
Поле зрения каналов	400 мкрад	267 мкрад
Пространственное разрешение	15 м	15 м
Время накопления	от 15 с	от 15 с
Фотоприемник	50% (ЛПД)	30% (ФЭУ)
Интерференционный фильтр	1 нм	1 нм
<i>Геометрические размеры</i>		
Приемопередатчик (Д × Ш × В)	340 × 630 × 440 мм <sup>3</sup>	850 × 280 × 320 мм <sup>3</sup>
Толщина оптической скамьи	46 мм	48 мм
Материал оптической скамьи	Алюминий	Алюминий
$l_0$ (лазер 1 – поляризатор 3)	1010 мм	2090 мм
$l_1$ (поляризатор 3 – телескоп 5)	50 мм	320 мм
$l_2$ (размер телескопа 5)	165 мм	650 мм
$l_3$ (поляризатор 3 – линза 10)	590 мм	
$l_4$ (поляризатор 3 – диафрагма 14)		210 мм
$l_5$ (размер телескопа 6)	550 мм	
$l_6$ (телескоп 6 – зеркало 7)	80 мм	
$l_7$ (зеркало 7 – линза 12)	580 мм	
$l_7$ (разнос осей приемных каналов)	150 мм	150 мм

решение лидача определяется параметрами системы регистрации. Временное разрешение лидача можно задать любым, но, исходя из опыта зондирования быстропротекающих в пограничном слое атмосферы процессов, а именно волны Кельвина–Гельмгольца, оно выбрано равным 15 с (таблица) [6].

### Деформация оптической скамьи

Стабилизация формы оптической скамьи имеет важное значение для работы турбулентного лидача. Деформация скамьи возникает, когда температура на одной стороне скамьи отличается от температуры на противоположной стороне. На рис. 4 показаны два случая: недеформированная скамья (рис. 4, а), когда температура  $T_1$  на верхней стороне совпадает с температурой  $T_2$  на нижней стороне; деформированная скамья, когда  $T_1 > T_2$  (рис. 4, б).

В случае появления положительного градиента температуры  $\Delta T = T_1 - T_2$  между верхом и низом

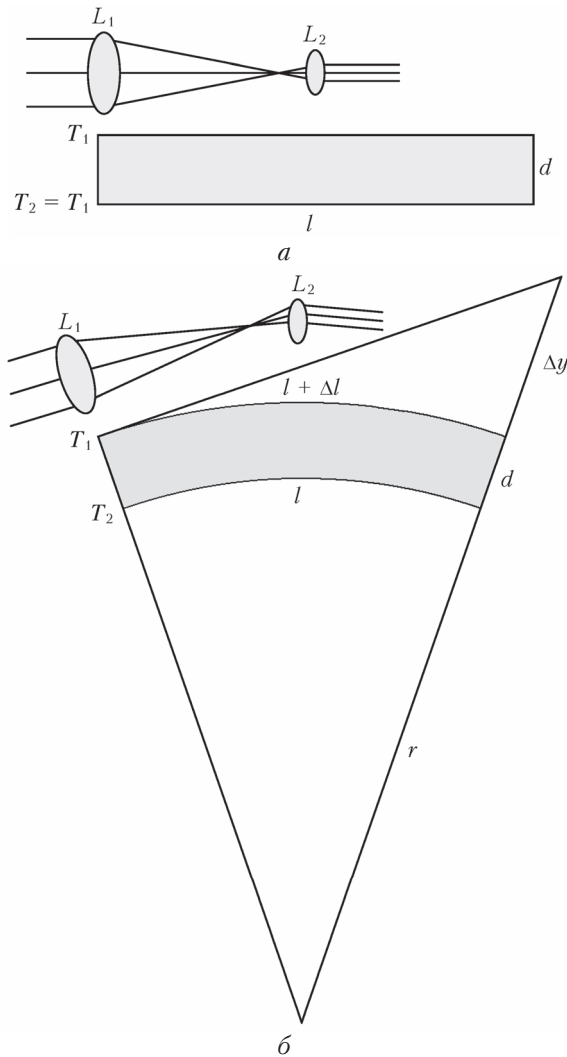


Рис. 4. Недеформированная оптическая скамья,  $T_1 = T_2$  (а); деформированная скамья,  $T_1 > T_2$  (б). Обозначения в тексте

скамьи верхняя сторона  $l$  расширяется на величину  $\Delta l = l\alpha\Delta T$ . Верх скамьи становится выпуклым и представляет собой часть сферы радиусом  $r$ . Если толщина скамьи равна  $d$ , тогда из подобия треугольников на рис. 4, б получаем

$$r = \frac{d}{\alpha\Delta T}. \quad (1)$$

Из (1) следует, что деформация скамьи будет тем меньше, чем больше ее толщина  $d$ .

Оптическая скамья не должна быть сплошной, это ее сильно утяжелит. Коммерческая скамья собирается из двух стальных пластин, между которыми помещается легкая ячеистая структура из стальной фольги [17]. Мы поступаем иначе, соединяя алюминиевые ( $\alpha = 23 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) пластины между собой большим количеством алюминиевых втулок, как это показано на рис. 3, б. Втулки придают скамье жесткость и способствуют выравниванию температуры между противоположными сторонами, понижая температурный градиент и, следовательно, уменьшая деформацию скамьи.

На рис. 4, б проведем касательную линию с левого верхнего края скамьи вправо до пересечения с продолжением радиуса  $r$  и, используя теорему о касательной и секущей, определим высоту подъема касательной над противоположным краем скамьи

$$\Delta y = \frac{l^2\alpha\Delta T}{2d}. \quad (2)$$

Смещение  $\Delta y$  пропорционально  $l^2$ , следовательно, уменьшение размера скамьи  $l$  в два раза приведет к четырехкратному уменьшению смещения  $\Delta y$ . Вывод: размещение оптических элементов на обеих сторонах скамьи с целью уменьшения ее размера абсолютно оправдано. Заметим, что наличие плоских поворотных зеркал в оптической схеме на величину смещения  $\Delta y$  не влияет, в этом случае длина  $l$  равна сумме отрезков от начальной точки распространения луча до конечной.

В лидаре УОР-4 оптическая скамья толщиной  $d = 46$  мм и шириной  $l = 600$  мм изготовлена из алюминиевых пластин, соединенных пятью продольными алюминиевыми балками. Если на противоположных сторонах скамьи возникает градиент температуры  $\Delta T = 1$  °С, тогда в соответствии с (1) и (2) получаем  $r = 2$  км и  $\Delta y = 0,09$  мм. Очевидно, что для лидача УОР-4, у которого размер чувствительной площадки детектора 0,1 мм, такая деформация может показаться запредельной. Однако при распространении света через оптические элементы, обладающие ненулевой оптической силой, ситуация меняется в лучшую сторону. Покажем это на примере.

Деформация скамьи смещает оптические элементы относительно друг друга. На рис. 4 на верхней стороне скамьи установлен приемный телескоп Кеплера, состоящий из положительных линз  $L_1$  и  $L_2$ .

При деформации скамьи линза  $L_2$  смещается и наклоняется по отношению к  $L_1$ . Ход лучей на рис. 4, б показывает, что смещение линзы  $L_2$  компенсирует нежелательное смещение лучей вверх, направляя их примерно по касательной в точке расположения линзы  $L_2$ .

При проектировании лидарного приемопередатчика важно оценить допустимый предел деформации оптической скамьи, который не нарушит работу лидара. С учетом сказанного решение задачи моделирования турбулентного лидара следует разбить на несколько этапов.

1. Составить оптическую схему лидара, подходящую для решения поставленной задачи. Здесь в качестве примера будем использовать схему лидара УОР-4 на рис. 2, а.

2. Выбрать материал для оптической скамьи и ее размеры (длина, ширина, толщина). Эти параметры для лидара УОР-4 приведены в таблице.

3. Зная габаритные размеры оптических элементов и их фокусные расстояния, составить план их расположения на оптической скамье и определить расстояния  $l_0, l_1, \dots, l_7$ .

4. Задать градиент температуры  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$  и по формуле (2) определить смещение каждого элемента относительно выбранной базовой точки на оптической скамье.

5. Используя программу оптического моделирования Zemax [18] или аналогичную, в соответствии с намеченным планом произвести трассировку лучей от лазера до намеченной дистанции в атмосфере и обратно до площадки фотодетектора.

6. Проанализировать полученные результаты, сделать соответствующие выводы. Возможно, в модели придется что-то изменить и повторить все сначала.

В качестве примера на рис. 5 показано моделирование приемных каналов лидара УОР-4. В верхней части рисунка дана оптическая схема дополни-

тельного приемного канала с указанием номеров оптических элементов по каталогу фирмы Thorlabs [19]. На рис. 2, а этому каналу соответствуют линзовый телескоп 6, линза 12 и детектор 13. Основной приемный канал на рис. 5 показан в нижней части рисунка, на оптической схеме на рис. 2, а ему соответствуют зеркальный телескоп 5, линза 10 и детектор 11.

Изображения четырех точек на удалении 10 км от лидара, привязанных к противоположным краям лазерного пучка в атмосфере и отстоящих друг от друга на 1 м, показаны на круглой площадке детектора на рис. 5. В центре каждой площадки нанесен диск Эйри, соответствующий дифракционному размытию изображения точки.

Расчет производился для градиентов температуры  $\Delta T = 0$  и  $1^\circ\text{C}$ . При  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$  возникала деформация скамьи и изображения точек смещались в вертикальном направлении, оставаясь на площадке детектора. Фактически это означает смещение оптической оси принимающей оптики относительно положения фотоприемника. При проведении расчетов в качестве базовых точек выбиралось положение оптических элементов на входе излучения в лидар, а именно положение линзы AC508-500 [19] для дополнительного приемного канала и зеркала MPD269 [19] для основного приемного канала. Взаимные смещения осей приемных каналов из-за их близкого расположения друг к другу в расчет не принимались.

С учетом расходимости лазера (см. таблицу) геометрический размер пучка на удалении 10 км от лидара должен быть 35 см, но при наличии турбулентности он может быть больше. Из рис. 5 следует, что если размер пучка на дистанции 10 км не превысит 1 м, то изменение температуры на краях оптической скамьи на  $1^\circ\text{C}$  на измерения не повлияет.

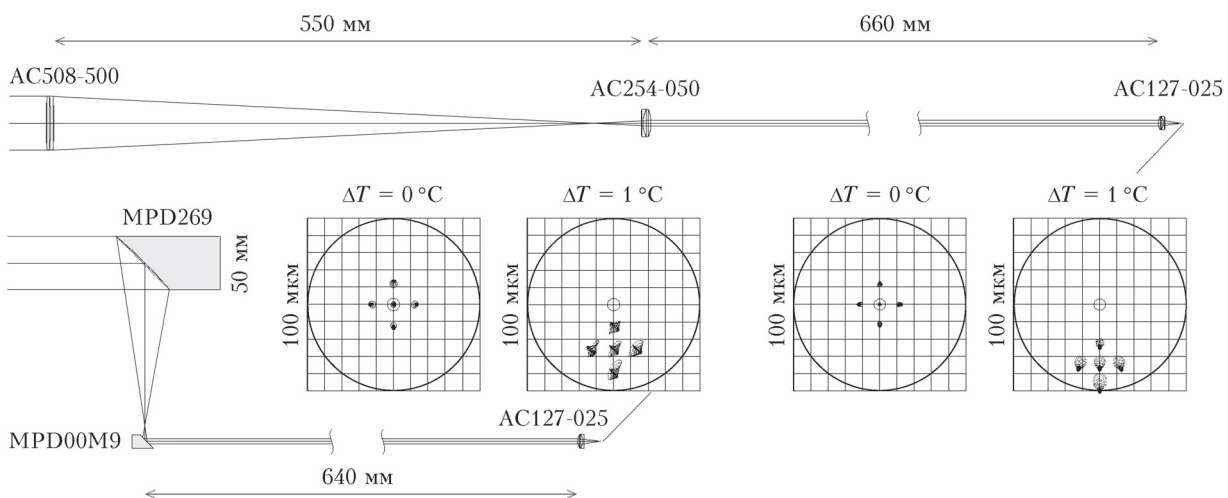


Рис. 5. Оптическая модель приемных каналов лидара УОР-4 (Zemax): дополнительный канал сверху; основной канал внизу; изображения на круглом детекторе точек, находящихся на удалении 10 км от лидара и отстоящих на 1 м друг от друга для градиентов температуры  $\Delta T = 0$  и  $1^\circ\text{C}$ , кружок в центре детектора — диск Эйри;  $d = 46$  мкм

## Температурный контроль внутри лидара

Для поддержания постоянной температуры внутри лидара требуется защитный кожух, желательно с толстыми стенками из материала с низкой теплопроводностью, и термоэлектрический преобразователь (ТЭП) для охлаждения внутреннего объема, где лазер и электроника выделяют тепло. Такой подход мы использовали при создании лидара УОР-4 [13], схема охлаждения которого изображена на рис. 6, *а*. Панели кожуха были изготовлены из пластин вспененного полистирола, толщина которых, по-видимому, оказалась недостаточной. Расположение основных элементов на рис. 6, *а* совпадает с изображением лидара УОР-4 на рис. 3, *а*. Заметим, что на фотографии на рис. 3, *а* верхняя панель с ТЭП удалена.

Внутри лидара УОР-4 (рис. 6, *а*) два вентилятора (на рисунке не показаны) циркулируют воздух таким образом, чтобы не препятствовать движению теплого воздуха от лазера вверх (слева) и опусканию холодного воздуха от ТЭП вниз (справа). Заметим, что ТЭП в лидаре работает только на охлаждение в режиме «вкл/выкл» при заданном температурном пороге срабатывания.

На рис. 6, *б* показана схема охлаждения лидара УОР-5 [14], в котором линейка из пяти маленьких вентиляторов (на рисунке не показаны) прокачивает наружный воздух через оптическую скамью. Лазер имеет воздушное охлаждение, причем воздух в лазер поступает из воздушного потока внутри скамьи, а теплый воздух из лазера возвращается обратно в скамью.

Если сравнивать два варианта охлаждения оптической скамьи, показанные на рис. 6, то сразу становится очевидным, что первый вариант сложнее и дороже, при этом размеры приемопередатчика больше из-за защитного кожуха. Второй вариант проще и дешевле, но температура внутри лидара полностью зависит от температуры в помещении.

Чтобы лучше понять, какой способ охлаждения предпочтительнее, мы провели измерения при одновременном контроле температурного режима внутри и снаружи лидара. Для этого два температурных датчика поместили внутри лидара (рис. 6): датчик  $T_1$

был установлен на верхней стороне скамьи, а датчик  $T_2$  — на нижней. Датчик  $T_3$  располагался снаружи корпуса лидара, датчик  $T_4$  показывал уличную температуру. Погрешность датчиков составляла 0,06 °С.

Лидар УОР-4 тестировался на Базовом экспериментальном комплексе (БЭК, 56°28'36.34" с.ш., 85°02'53.02" в.д.) ИОА СО РАН им. В.Е. Зуева. Лидар работал в юго-восточном направлении под углом наклона трассы зондирования 4°, трасса проходила над лесостепью. Зондирование проводилось в теплое время года. Лидар располагался в небольшом помещении, которое днем нагревалось и ночью остывало. Для поддержания температуры внутри помещения ночью работал обогреватель, а днем кондиционер.

На рис. 7 представлены результаты зондирования за двое суток в виде пространственно-временных распределений эхосигнала основного приемного канала  $P_1$ , дополнительного приемного канала  $P_2$ , структурной характеристики коэффициента преломления  $C_n^2$ , а также графики температуры внутри  $T_3$  и снаружи  $T_4$  помещения, температуры внутри лидара  $T_1$  и  $T_2$ , градиент температуры  $\Delta T = T_1 - T_2$ .

Температура на улице менялась от 11 до 32 °С, в помещении — от 16 до 26 °С (рис. 7, *з*) и внутри лидара — от 22 до 25,5 °С (рис. 7, *д*). В лидаре порог срабатывания термоэлектрического преобразователя был установлен на 24 °С. Когда температура в помещении превышала 24 °С, ТЭП работал непрерывно, а когда он не справлялся, температура в лидаре превышала порог (рис. 7, *д*).

Разность температур  $\Delta T$  показана на рис. 7, *е*. Когда температура в помещении была ниже порога 24 °С, тогда разность  $\Delta T \approx +0,2$  °С, т.е. верхняя сторона скамьи была теплее. Когда температура в помещении повышалась и включался ТЭП, тогда  $\Delta T \approx -0,8$  °С, т.е. верхняя сторона оказывалась холоднее нижней. За 48 ч наблюдений разность температур  $\Delta T$  по модулю не превысила 1 °С.

Результаты зондирования на рис. 7, *а–в* показывают, что данные из атмосферы не зависят от изменения температуры внутри лидара. Это свидетельствует о нормальной работе лидара и вполне согласуется с модельными оценками, полученными выше.

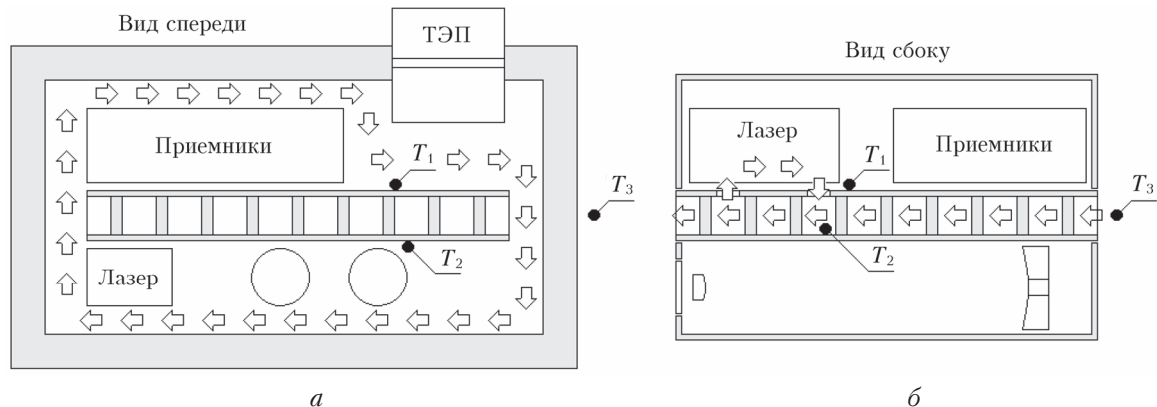


Рис. 6. Схемы охлаждения оптической скамьи в лидаре УОР-4 (*а*) и УОР-5 (*б*). Стрелками показано направление движения воздуха. Датчики температуры  $T_1$  и  $T_2$  находятся внутри лидара, датчик  $T_3$  — снаружи

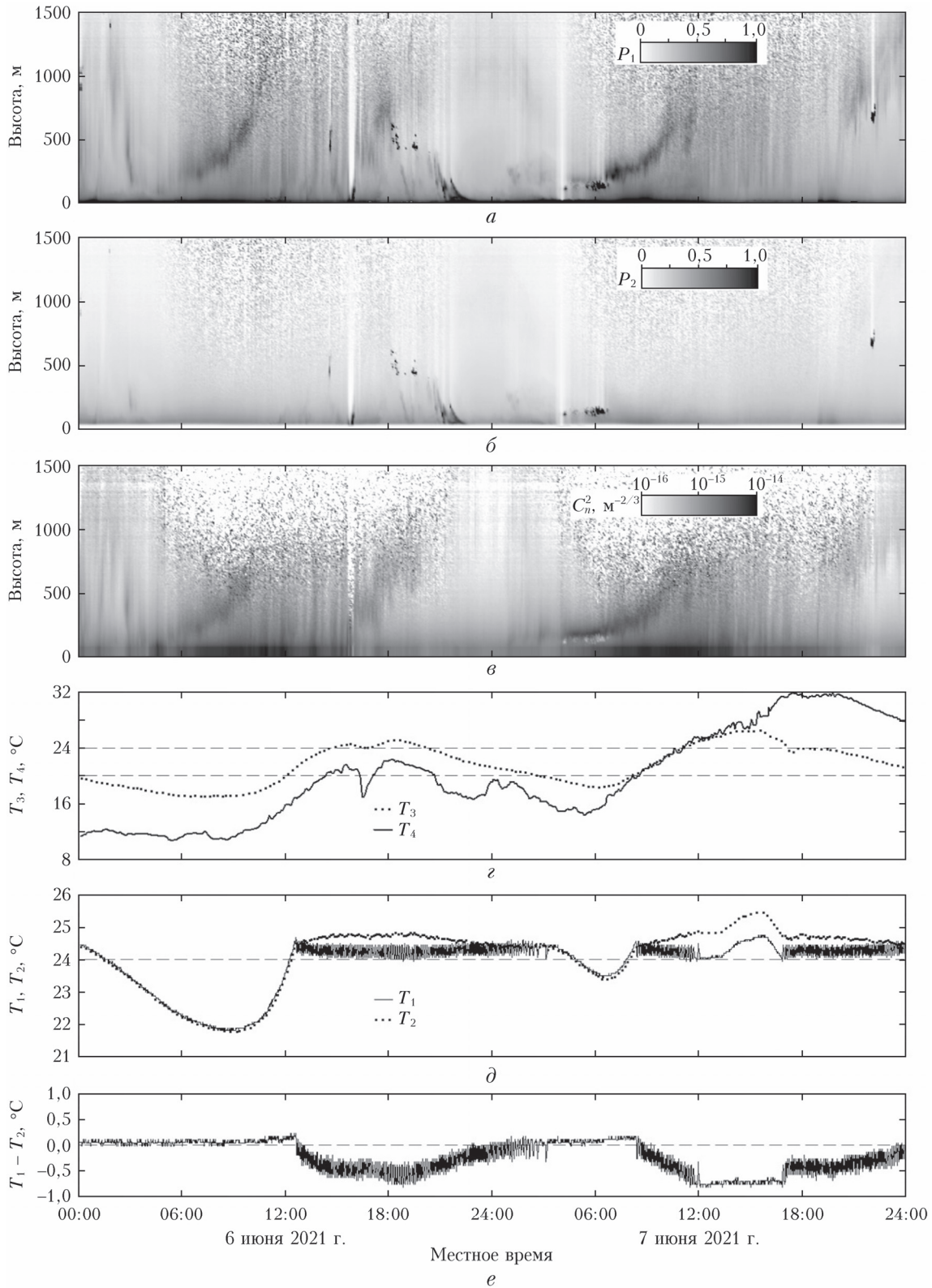


Рис. 7. Пространственно-временное распределение эхосигналов основного  $P_1$  (а) и дополнительного приемных каналов  $P_2$  (б), структурной характеристики коэффициента преломления  $C_n^2$  (в); графики температуры внутри  $T_3$  и снаружи помещения  $T_4$  (д), внутри лидара  $T_1$  и  $T_2$  (е). Лидар УОР-4, БЭК, наклон трассы  $4^\circ$

Эхосигнал аэрозольного рассеяния дополнительного приемного канала  $P_2$  (рис. 7, б) за двое суток менялся незначительно. Эхосигнал основного прием-

ного канала  $P_1$  (рис. 7, а) изменялся в соответствии с турбулентным состоянием атмосферы. Поведение  $C_n^2$  (рис. 7, в) показывает повышение интенсивности



флуктуаций коэффициента преломления утром и расширение вверх зоны турбулентности до высоты ~ 1 км.

Ультрафиолетовый лидар УОР-5 (рис. 8) тес- тировался в Томске, трасса зондирования была го- ризонтальной и проходила над городом. Во время

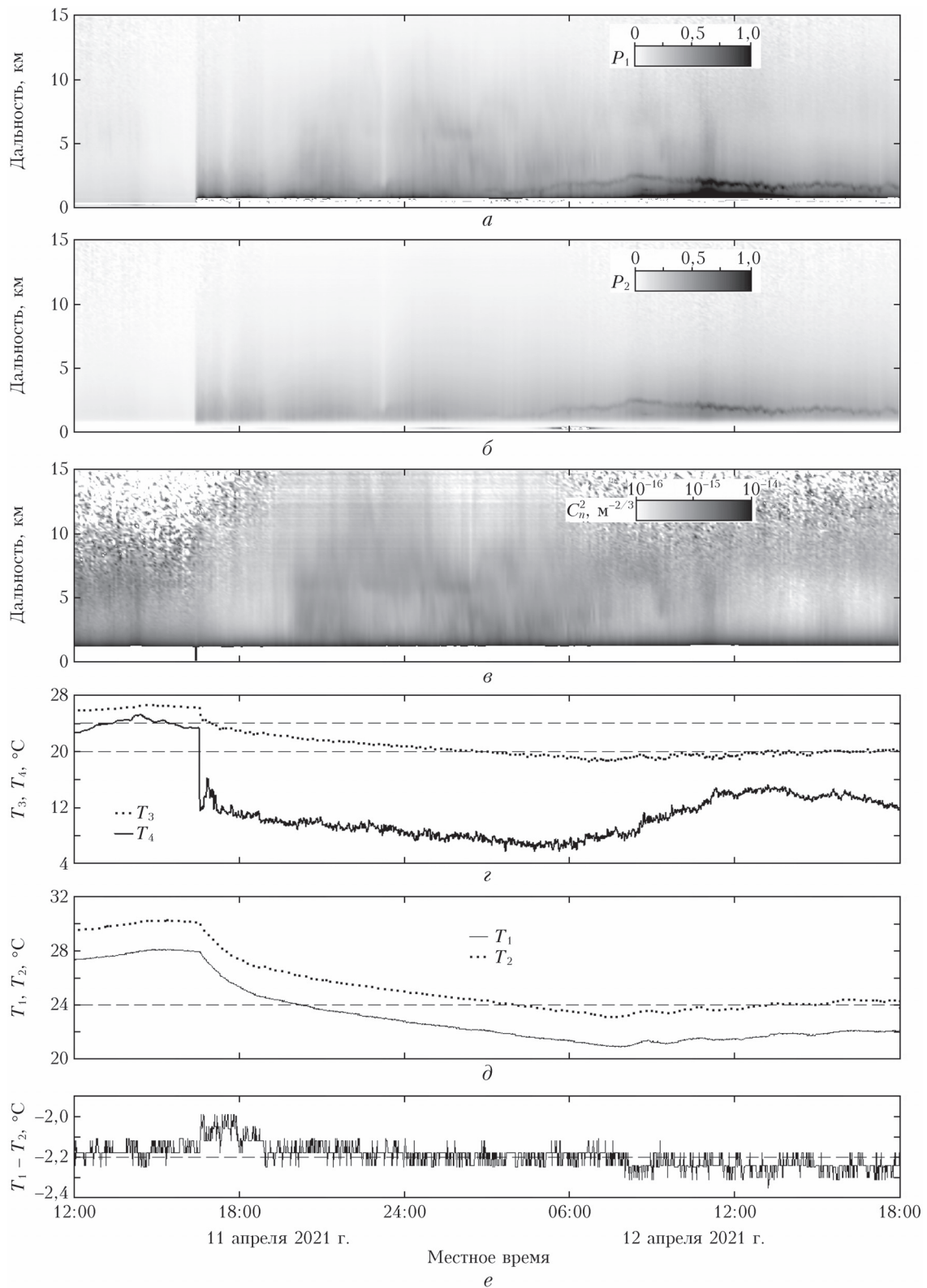


Рис. 8. Пространственно-временное распределение экосигналов основного  $P_1$  (*a*) и дополнительных приемных каналов  $P_2$  (*b*), структурной характеристики коэффициента преломления  $C_n^2$  (*в*); графики температуры внутри  $T_3$  и снаружи помещения  $T_4$  (*г*), внутри лидара  $T_1$  и  $T_2$  (*д*); градиент температуры  $T_1 - T_2$  (*е*). Лидар УОР-5, Томск, наклон трассы  $0^{\circ}$

эксперимента при работающем лидаре открыли окно, через которое осуществлялось зондирование. После открытия окна наблюдалось резкое повышение эхосигнала, поскольку ультрафиолетовое излучение (355 нм) сильно поглощается оконным стеклом. Эксперимент длился 30 ч. До момента открытия окна датчик температуры  $T_4$  находился в помещении. Температура на улице за время наблюдений менялась от 6 до 16 °С (рис. 8, *з*), в помещении – от 19 до 26 °С (рис. 8, *з*) и внутри лидара – от 21 °С до 28 °С (рис. 8, *д*).

Датчик температуры  $T_2$  находился внутри скамьи, как это показано на рис. 6, *б*, и регистрировал температуру теплого воздуха на выходе из лазера. Градиент температуры  $\Delta T$ , показанный на рис. 8, *е*, отрицательный и его среднее значение составляло  $\Delta T = -2,2$  °С, причем разброс  $\Delta T$  за 30 ч был в небольших пределах от  $-2,0$  до  $-2,3$  °С. Это означает, что оптическая скамья была деформирована, но во время проведения измерений форму она не меняла.

Результаты зондирования на рис. 8, *а–в* показывают, что данные фактически не зависят от изменения температуры внутри лидара, поскольку градиент  $\Delta T$  на сторонах скамьи оставался постоянным.

## Рекомендации по усовершенствованию лидара

Практический опыт работы с лидарами УОР-4 и УОР-5 позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, можно отказаться от использования термоэлектрического преобразователя и использовать простой защитный кожух. Во-вторых, для уменьшения градиента температуры между сторонами оптической скамьи можно использовать прокачку наружного воздуха через середину скамьи. В-третьих, можно разместить выделяющие тепло элементы, такие как лазер и блоки питания, в изолированных секциях и обеспечить прокачку наружного воздуха через эти секции для охлаждения.

На основании сделанных выводов схема лидарного приемопередатчика может быть такой, как показано на рис. 9. Отметим, что двустороннее использование оптической скамьи предполагает, что световые пучки несколько раз пересекают скамью, переходя снизу вверх и обратно. В этом случае, чтобы пыль снаружи не могла попасть на оптические поверхности, в местах перехода пучков следует вклеить трубки, изготовленные из того же материала,

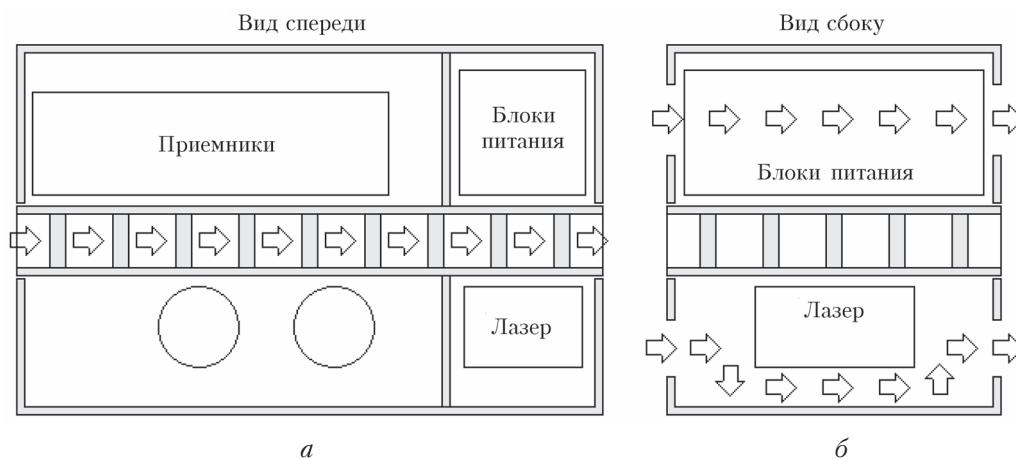


Рис. 9. Рекомендуемая схема расположения основных элементов. Охлаждение лидара осуществляется посредством прокачки наружного воздуха через середину оптической скамьи и через изолированные секции с лазером и блоками питания: вид спереди (*а*) и вид сбоку (*б*)

Профиль сигнала аэрозольного рассеяния дополнительного приемного канала  $P_2$  (рис. 8, *б*) от времени фактически не зависел. Турбулентный сигнал основного приемного канала  $P_1$  (рис. 8, *а*) менялся незначительно. Трасса зондирования была горизонтальная, поэтому распределение  $C_n^2$  было почти равномерным (рис. 8, *в*).

Эксперимент показал, что в лидарах обе системы температурного контроля работали нормально несмотря на то, что температура в помещении значительно менялась. В лидаре УОР-4 принудительная циркуляция воздуха и ТЭП поддерживали градиент температуры на уровне  $|\Delta T| < 1$  °С. В УОР-5 градиент температуры  $\Delta T = -2,2$  °С, но при изменении температуры снаружи на 7 °С он фактически не менялся.

что и оптическая скамья. Аналогично необходим пылезащищенный канал для зондирующего пучка между лазером и стенкой, отделяющей чистую секцию с оптикой от секции с лазером.

## Заключение

Определены проектные характеристики турбулентного лидара, влияющие на его термомеханическую стабильность. Особое внимание уделено факторам, определяющим тепловой баланс конструктивных элементов системы, таким как тепловыделение от аппаратуры, циркуляция воздуха внутри лидара и работа системы обеспечения теплового режима.

Дано сравнительное описание двух различных конструкций турбулентного лидара: УОР-4 (532 нм)

и УОР-5 (355 нм). В лидарах реализованы различные подходы к выбору афокальной оптики приемопередатчика, детекторов, организации системы температурного контроля для стабилизации оптической скамьи.

Рассмотрено влияние температурного градиента между противоположными сторонами оптической скамьи, который деформирует ее и изменяет положение оптических осей приемных каналов относительно положения площадок детекторов. Предложен порядок моделирования лидарного приемопередатчика, включающий расчет смещений оптических элементов относительно базовых точек на оптической скамье и трассировку лучей от лазера в атмосферу и обратно до детекторов.

Проведено экспериментальное исследование лидаров УОР-4 и УОР-5 на устойчивость к изменению температуры в помещении. В лидаре УОР-4 для стабилизации температуры используется термоэлектрический преобразователь, а в лидаре УОР-5 производится прокачка наружного воздуха через оптическую скамью. При изменении внешней температуры на 10 °С температурный градиент в лидаре УОР-4 менялся от +0,2 до -0,8 °С, однако на данные из атмосферы это не повлияло. Внутри УОР-5 при изменении внешней температуры в помещении на 7 °С градиент температуры на оптической скамье оставался постоянным на уровне -2,2 °С, и на данные из атмосферы это также не сказалось.

Проведенные исследования позволили сформулировать рекомендации, которые в будущем можно использовать для создания улучшенной версии турбулентного лидара. Предложено отказаться от применения термоэлектрического преобразователя и использовать прокачку наружного воздуха через середину скамьи, а выделяющие тепло элементы разместить в изолированных секциях и также обеспечить прокачку наружного воздуха через эти секции.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-15-2021-934).

## Список литературы

1. *Виноградов А.Г., Гурвич А.С., Кашикарров С.С., Кравцов Ю.А., Татарский В.И.* Закономерность увеличения обратного рассеяния волн. Свидетельство на открытие № 359. Приоритет открытия: 25 августа 1972 г. в части теоретического обоснования и 12 августа 1976 г. в части экспериментального доказательства закономерности. Государственный реестр открытий СССР // Бюлл. изобретений. 1989. № 21.
2. *Кравцов Ю.А., Саичев А.И.* Эффекты двукратного прохождения волн в случайно неоднородных средах // Успехи физ. наук. 1982. Т. 137, вып. 3. С. 501–527.
3. *Устройство для регистрации усиления обратного рассеяния в атмосфере:* Пат. 153460. МКП, G01S 17/95. Разенков И.А., Банах В.А., Надеев А.И.; Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. № 2014149951/28; Заявл. 10.12.2014; Опубл. 20.07.2015. Бюл. № 20.
4. *Разенков И.А.* Турбулентный лидар. I. Конструкция // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 1. С. 41–48; *Razenkov I.A.* Turbulent lidar: I – Design // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 3. P. 273–280.
5. *Разенков И.А.* Эвристический подход к определению структурной характеристики показателя преломления по данным турбулентного лидара // Оптика атмосфер. и океана. 2022. Т. 35, № 3. С. 195–204.
6. *Разенков И.А.* Перспективы применения турбулентного УОР-лидара для исследования пограничного слоя атмосферы. // Оптика атмосфер. и океана. 2021. Т. 34, № 1. С. 26–35. DOI: 10.15372/AOO20210104.
7. *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere / Claus Weitkamp (ed.).* Berlin: Springer, 2005. 443 p.
8. *Kovalev V.A., Eichinger W.E.* Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis Methods. USA: Wiley-IEEE, 2004. 616 p.
9. *Савиных В.П., Соломатин В.А.* Оптико-электронный системы дистанционного зондирования. М.: Машиностроение, 2014. 432 с.
10. *McManamon P.* Field Guide to Lidar. USA: SPIE Press Book, 2015. V. FG36. 152 p.
11. *Боли Б., Уэйнер Дж.* Теория температурных напряжений. М.: Мир, 1964. 520 с.
12. *Климакова Л.А., Половый А.О.* Возможности использования углепластиков в термостабильных структурах прецизионных конструкций // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2008. № 2. С. 22–28.
13. *Razenkov I.A., Banakh V.A., Gorgeev E.V.* Lidar “BSE-4” for the atmospheric turbulence measurements // Proc. SPIE. N 10833. 2018. DOI: 10.1117/12.2505183.
14. *Разенков И.А., Надеев А.И., Зайцев Н.Г., Гордеев Е.В.* Ультрафиолетовый турбулентный лидар УОР-5 // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 4. С. 289–297; *Razenkov I.A., Nadeev A.I., Zaitsev N.G., Gordeev E.V.* Turbulent UV Lidar BSE-5 // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 4. P. 406–414.
15. *Устройство для регистрации усиления обратного рассеяния в атмосфере:* Пат. 165087. Россия, МКП, G01S 17/95. Разенков И.А., Банах В.А.; Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. № 2016117721/28; Заявл. 04.05.2016; Опубл. 10.10.2016. Бюл. № 28.
16. *Аэрозольный турбулентный лидар:* Пат. 208927. Россия, МКП, G01S 17/95. Разенков И.А., Надеев А.И.; Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. № 2021130316; Заявл. 19.10.2021; Опубл. 24.01.2022. Бюл. № 3.
17. *Newport.* USA, 2022. URL: <http://www.newport.com> (last access: 23.03.2022).
18. *Zemax: An Ansys Company.* USA, 2022. URL: <http://www.zemax.com> (last access: 23.03.2022).
19. *Thorlabs.* USA, 2022. URL: <http://www.thorlabs.com> (last access: 23.03.2022).

### *I.A. Razenkov. Engineering and technical solutions when designing a turbulent lidar.*

The design characteristics of the turbulent lidar affecting its thermo-mechanical stability are determined. A comparative description of two different designs is given, where different approaches are implemented to the selection of transceiving optics and receiver detectors and organization of the temperature control system for stabilizing the lidar optical bench. A simulation scheme of a lidar transceiver is suggested, including the calculation of the displacements of optical elements relative to the base points on the optical bench and the ray tracing from the laser into the atmosphere and back. The influence of the temperature gradient between the opposite sides of the optical bench on the operation of the receiving channels is considered. The results of the experimental study of lidars for resistance to temperature changes are presented. Recommendations for improving the design of a turbulent lidar are formulated.