

## АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 535.361.551:511.6:621.371

# Самолетный лидар УОР-6 для дистанционного обнаружения турбулентности в ясном небе

Б.Д. Белан, И.А. Разенков<sup>✉</sup>, К.А. Рынков\*

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

Поступила в редакцию 23.04.2024;

после доработки 18.06.2024;

принята к печати 19.06.2024

Создание средств дистанционного обнаружения турбулентности в ясном небе (ТЯН) для заблаговременного оповещения экипажа воздушного судна об опасности сегодня представляется особенно актуальным. В настоящей работе описаны конструктивные и технические особенности турбулентного лидара УОР-6, предназначенного для экспериментальной проверки метода зондирования ТЯН. Описана процедура юстировки лидара. Качество сборки и юстировки проверялось сопоставлением теоретического расчета с реальными эхосигналами. Проведено тестирование системы на термомеханическую устойчивость. В перспективе совершенствование турбулентного лидара позволит заблаговременно обнаруживать ТЯН с борта воздушного судна и дистанционно с земли контролировать интенсивность турбулентности в пограничном слое атмосферы, например, на глиссаде в аэропортах.

*Ключевые слова:* турбулентный лидар, эффект увеличения обратного рассеяния, турбулентность в ясном небе, авиационная безопасность; *turbulent lidar, backscatter enhancement effect, clear-air turbulence, aviation safety.*

## Введение

По данным Международной организации гражданской авиации первостепенной причиной авиационных происшествий является турбулентность, когда воздушное судно испытывает сильную болтанку и может временно стать неуправляемым [1, 2]. Турбулентность в ясном небе (ТЯН) возникает внезапно в верхней тропосфере в зонах струйных течений на высотах от 6 до 12 км. От других видов турбулентности она отличается тем, что не сопровождается значительной облачностью. Визуально ТЯН трудно обнаружить, поскольку явные признаки отсутствуют. Бортовой метеорологический радар регистрирует эхосигнал только от крупных аэрозольных частиц, поэтому ТЯН радар не воспринимает. На сегодняшний день проблема дистанционного обнаружения ТЯН для раннего предупреждения экипажа воздушного судна об опасности актуальна и требует решения.

Перспективным представляется метод оптического зондирования ТЯН с помощью лазерных локаторов (лидаров), и такой опыт уже имеется. Например, положительные результаты дистанционного обнаружения ТЯН с применением инфракрасного доплеровского лидара были получены Японским агентством аэрокосмических исследований (JAXA) [3, 4].

\* Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Игорь Александрович Разенков (lidaroff@iao.ru); Константин Альбертович Рынков (lcrpg@iao.ru).

Альтернативой доплеровскому лидару может быть лазерная система, принцип работы которой основан на эффекте увеличения обратного рассеяния (УОР) в видимом или ультрафиолетовом (УФ) диапазоне спектра [5, 6].

Турбулентный лидар — это специализированный микроимпульсный аэрозольный безопасный для глаз оптический локатор с двумя приемными каналами [7]. В лидаре одновременно реализованы две схемы построения приемопередатчика: коаксиальная (основной приемопередающий канал) и биаксиальная (дополнительный принимающий канал) [8, 9]. Первый канал основной, он совмещен с передающим; второй канал дополнительный и находится рядом с основным. Дополнительный приемный канал регистрирует лидарный эхосигнал от молекул и аэрозольных частиц. Эхосигнал основного канала отличается от эхосигнала дополнительного канала только турбулентной компонентой, которая возникает из-за увеличения обратного рассеяния. УОР-компонента в эхосигнале — это результат двукратного распространения световой волны в случайной среде, причем ее величина пропорциональна интенсивности турбулентности [10]. По отношению основного и дополнительного эхосигналов оценивается профиль интенсивности оптической турбулентности вдоль направления зондирования. Подробное описание метода зондирования турбулентным лидаром дано в [11].

В сентябре 2022 г. с помощью УФ-лидара УОР-5 были получены первые результаты зондирования

турбулентности с борта самолета Ту-134, которые позволили на высоте 9 км зарегистрировать изменения структурной характеристики турбулентных флуктуаций показателя преломления воздуха  $C_n^2$  на дистанциях до 8 км [12]. Зондирование производилось перпендикулярно фюзеляжу самолета. За время четырехчасового полета при проходе через турбулентные зоны  $C_n^2$  изменялась более чем на порядок.

В мае 2024 г. Сибирским научно-исследовательским институтом авиации им. С.А. Чаплыгина модифицирован и сертифицирован люк запасного выхода самолета Ту-134, что позволит осуществлять зондирование в направлении полета.

Цель работы – создание бортового турбулентного лидара УОР-6, предназначенного для установки на борт самолета-лаборатории Ту-134.

## 1. Конструкция лидара

Возможны два варианта построения приемопередающей оптики турбулентного лидара: использовать один большой телескоп, как в лидаре УОР-5, или два маленьких, как в лидаре УОР-4 [7]. В первом случае систему проще юстировать, но при этом она имеет большие размеры. Для бортового лидара был выбран вариант с двумя отдельными телескопами для уменьшения габаритов системы и облегчения конструкции.

При проектировании лидара принимались во внимание рекомендации, изложенные в [7], чтобы создать компактную и термомеханически стабильную конструкцию, когда изменения температуры снаружи системы не влияют на ее работу. Для уменьшения размеров лидара было решено использовать обе стороны оптической скамьи, разместив на одной стороне приемопередатчик, а на другой – приемную часть с фотодетекторами (рис. 1).

Для понижения градиента температуры между сторонами оптической скамьи была организована прокачка наружного воздуха через середину скамьи. Оптическая скамья обычно состоит их пары алюминиевых пластин, соединенных множеством алюминиевых втулок, что делает ее легкой и жесткой. Все тепловыделяющие элементы, такие как лазер и блоки питания, было решено разместить в изолированных секциях, обеспечив через них прокачку наружного воздуха для охлаждения [7]. В месте перехода световых пучков через оптическую скамью необхо-

дима установка пылезащищенного канала (на рис. 1 не показано).

Оптическая схема лидара представлена на рис. 2. Приемопередатчик собран на стороне 1 оптической скамьи, приемный модуль и блоки питания установлены на стороне 2. Пучок 4 (помечен стрелками), выходящий из лазера 3, поворотными зеркалами 5–7 и тонкопленочным поляризатором 9 направляется на 10-кратный афокальный телескоп диаметром 50 мм, составленный из внеосевых параболических зеркал 12 и 13 (Мерсен). На рис. 2, *a* элемент 8 – коллимирующая линза, 11 – четвертьволновая пластинка, преобразующая линейную поляризацию излучения лазера в круговую. Телескоп 12–13 расширяет пучок 4 в 10 раз и отправляет в атмосферу. Тонкопленочный поляризатор 9 и четвертьволновая пластинка 11 образуют антенный переключатель, перенаправляя приходящие из атмосферы световые пучки в приемный модуль 32. Элемент 10 на схеме – это крепление оптического волокна, по которому часть излучения лазерного импульса передается в счетчик фотонов в качестве сигнала синхронизации.

Приходящие пучки – основной 15 и дополнительный 16 (отмечены стрелками) – поступают соответственно на телескопы, состоящие из зеркал 12 и 13 (основной приемопередающий канал) и 18 и 19 (дополнительный принимающий канал). Зеркала 18 и 19 дополнительного приемного канала идентичны зеркалам 12 и 13. Элементы 14 и 17 – просветленные клиновидные окна. Пучки 15 и 16 зеркалами 20 и 21 ориентируются параллельно друг другу и поворотными зеркалами 22–24 направляются в приемный модуль 32.

На входе в модуль 32 установлен интерференционный светофильтр 25. Далее располагается пространственный фильтр, определяющий поле зрения приемной системы и состоящий из фокусирующей 26 и коллимирующей 28 линз и апертурной диафрагмы 27. Пучок 15 основного приемного канала поворотным эллиптическим зеркалом 30 направляется на детектор 31, пучок 16 дополнительного канала поступает на детектор 29. Лазер 3 и блоки питания 33 и 34 располагаются в вентилируемых изолированных секциях на противоположных сторонах оптической скамьи. На рис. 3 показана модель лидара, фотография приемопередатчика и внешний вид лидара. Параметры лидара приведены в таблице.



Рис. 1. Концепция бортового турбулентного лидара. Стрелками указано направление прокачки воздуха через оптическую скамью (в центре) и секции с лазером и блоками питания (справа)

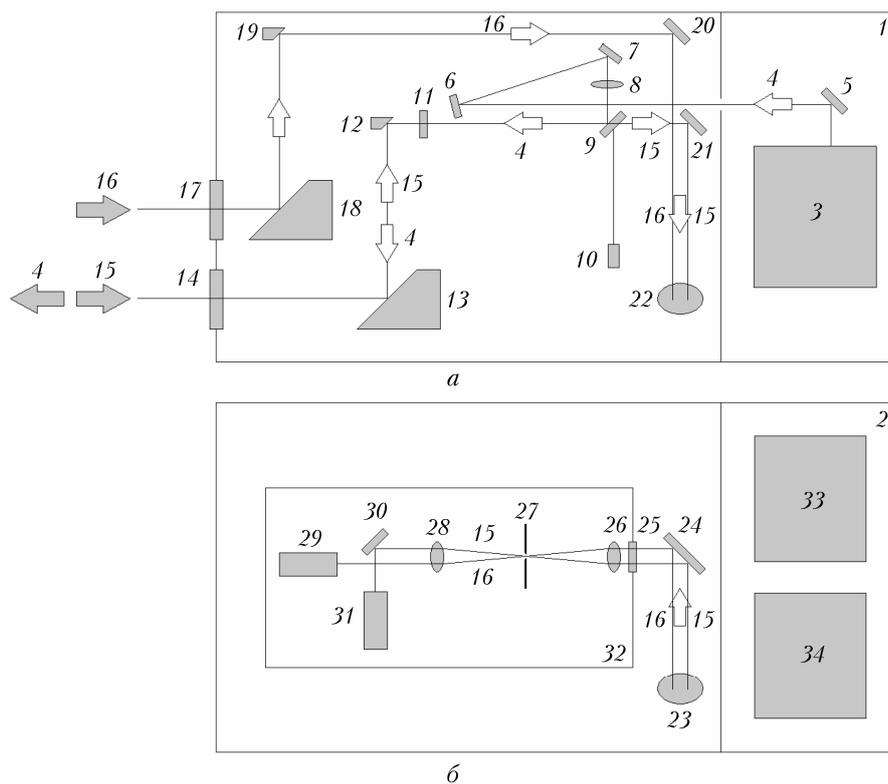


Рис. 2. Оптическая схема лидара УОР-6. Приемопередатчик собран на стороне 1 оптической скамьи (а), приемный модуль расположен на стороне 2 скамьи (б). Обозначения см. в тексте

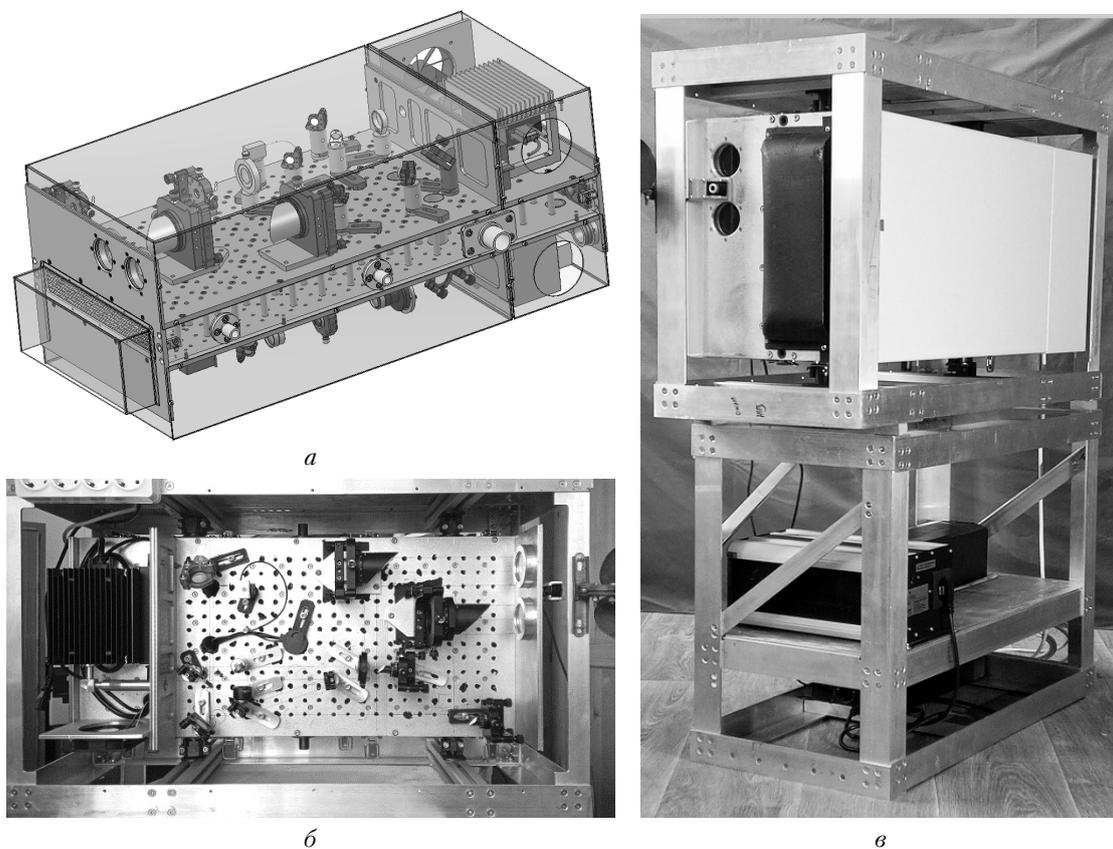


Рис. 3. Модель (а), фотография приемопередатчика (б) и внешний вид лидара УОР-6 (в)

### Параметры лидара УОР-6

Параметр	Значение
Длина волны лазера (Cobolt)	355 нм
Энергия импульса	18 мкДж
Частота импульсов	7 кГц
Длительность импульса	5 нс
Выходная мощность лазера	125 мВт
Качество лазерного пучка	TEM <sub>00</sub> , M <sup>2</sup> < 1,3
Диаметр пучка на выходе из лидара	50 мм
Расходимость пучка на выходе из лидара	20 мкрад
Количество телескопов (Мерсен)	2
Расстояние между осями телескопов	85 мм
Диаметр телескопа	50 мм
Увеличение телескопа	10 <sup>×</sup>
Поле зрения приемников	100 мкрад
Полоса пропускания светофильтра	0,15 нм
Квантовая эффективность ФЭУ (Н10682-210Р)	33%
Способ регистрации	Счет фотонов
Пространственное разрешение	15 м
Временное разрешение	10 с
Дальность зондирования	10 км
Диапазон измерения C <sub>n</sub> <sup>2</sup>	10 <sup>-17</sup> –10 <sup>-13</sup> м <sup>-2/3</sup>
Режим работы лидара	Продолжительный
Интервал рабочей температуры	+10...+35 °С
Потребляемая мощность	Менее 100 Вт
Габаритные размеры Д × Ш × В	1017 × 427 × 446 мм <sup>3</sup>
Масса приемопередатчика	50 кг

Приемопередатчик закреплен в алюминиевой раме (рис. 3, в). Вертикальное расположение обусловлено формой и размерами обтекателя, находящегося на внешней стороне фюзеляжа самолета. Наружный обтекатель снабжен двумя кварцевыми окнами и прямоугольным поворотным зеркалом, также расположенными вертикально. Рама с лидаром через резиновые амортизаторы крепится к нижней раме, внутри которой размещаются блок бесперебойного питания и преобразователь бортового постоянного напряжения (+27 В) в переменное (~220 В).

## 2. Юстировка приемопередатчика лидара

Настройка и юстировка сложных оптических систем является важным этапом их создания. В нашем случае процедура юстировки имеет ряд особенностей, обусловленных применением двух афокальных телескопов, состоящих из внеосевых параболических зеркал. Задача юстировки включала: 1) точное совмещение фокальных точек зеркал 12 и 13, 18 и 19 (рис. 4) для каждого телескопа; 2) настройку положения осей телескопов параллельно друг другу; 3) настройку положения телескопов параллельно оптической скамье.

Для проведения юстировки была организована внешняя трасса 130 м, на конце которой был установлен белый экран. Лидар находился в помещении. Дополнительно использовались: лазер G (532 нм), интерферометр сдвига для контроля параллельности лучей пучков лазера G, ретрорефлекторы (на рис. 4 не показаны) и зрительная труба. Ретрорефлекторы позволяли: 1) развернуть на 180° в передающем канале излучение центральной части пучка 4 УФ-лазера 3; 2) перенаправить из передающего канала краевую часть пучка 4 во второй принимающий канал.

На рис. 4 показано, что видимый пучок (532 нм) вспомогательного лазера G коллимируется положительной линзой, затем парой зеркал вводится на оптическую скамью лидара, потом зеркалами 21 и 20 делится пополам и в виде пучков A и B направляется на зеркала 12 и 13, 18 и 19. Одновременно пучок 4 УФ-лазера 3 тоже отправляется на зеркала 12 и 13. Все три пучка проецируются на экран на удалении 130 м.

Процесс юстировки заключался в коллимации видимых пучков A и B при помощи интерферометра на выходе из лидара и совмещении пучков 4 и A на белом экране при условии, что оси всех пучков параллельны, а отражения от ретрорефлекторов возвращаются в лидар параллельно оптической скамье. Слева на рис. 4 показан снимок пучка 4 УФ-лазера 3 и пучка B зеленого лазера G, полученный после завершения юстировки.

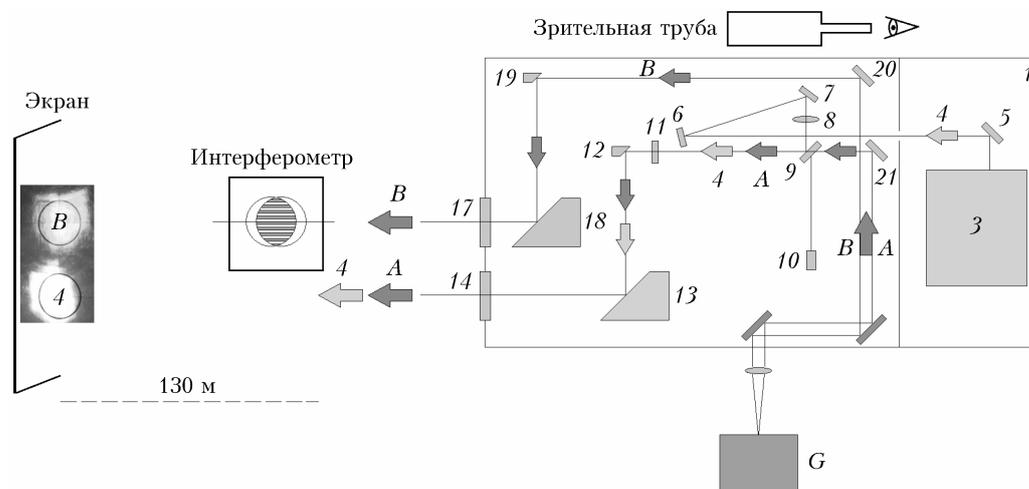


Рис. 4. Схема юстировки лидара. Обозначения и пояснения см. в тексте

На выходе из лидара пучки имели гауссову форму, но на экране (130 м) она искажена (см. фотографию слева на рис. 4). По-видимому, использованная нами методика юстировки лидара не позволила свести к минимуму возникшие aberrации. Для ответа на вопрос, считать ли полученный результат удовлетворительным, была проведена теоретическая оценка лидарного эхосигнала.

### 3. Бюджет фотонов и сопоставление с реальными эхосигналами

Качество сборки и юстировки лидара было оценено сопоставлением ожидаемого результата с реальным экспериментом. Для этого были рассчитаны эхосигналы. При проведении расчетов использовались коэффициенты отражения зеркал, пропускания линз и других оптических элементов, счетная чувствительность ФЭУ и др. Вначале были оценены оптические потери внутри лидара при передаче световой энергии лазера в атмосферу и приеме эхосигналов. Затем использовали лидарное уравнение для расчета эхосигнала [11], в которое подставили модельные значения коэффициентов молекулярного и аэрозольного рассеяния.

В лидаре УОР-6 установлены оптические элементы компаний Thorlabs (<https://www.thorlabs.com/>) и Edmund Optics (<https://www.edmundoptics.com/>). (Данные от производителей: коэффициент отражения зеркал 0,92; для прозрачных элементов коэффициент пропускания 0,99.) С учетом потерь на оконном стекле (0,50), через которое осуществлялось зондирование по горизонтальной трассе, общее пропускание приемопередатчика составило 0,187.

Для расчета эхосигналов использовались параметры лидара, приведенные в таблице, и средние модельные значения коэффициентов рассеяния. Для рэлеевского (молекулярного) рассеяния на длине волны 355 нм принимались следующие значения: коэффициент рассеяния  $0,0071 \text{ км}^{-1} \cdot \text{срад}^{-1}$ ; коэффициент ослабления  $0,06 \text{ км}^{-1}$ . Измерения проводились в чистой атмосфере. Во время измерений из лидарного эхосигнала методом логарифмической производной [9] была получена оценка общего коэффициента ослабления, равная  $0,14 \text{ км}^{-1}$ . Следовательно, коэффициент аэрозольного ослабления составил  $0,14 - 0,06 \text{ км}^{-1} = 0,08 \text{ км}^{-1}$ . Лидарное отношение приняты равным  $50 \text{ срад}^{-1}$ , тогда коэффициент аэрозольного рассеяния —  $0,0016 \text{ км}^{-1} \cdot \text{срад}^{-1}$ .

Эхосигналы турбулентного лидара в количестве регистрируемых фотонов были рассчитаны с учетом пространственного разрешения 15 м (строб 100 нс) и интервала накопления 10 с (70000 выстрелов) при средней выходной мощности лазера 100 мВт. На рис. 5, а представлены результаты расчета (кривая 1) и эксперимента (крестики 2). Турбулентность в расчет не принималась.

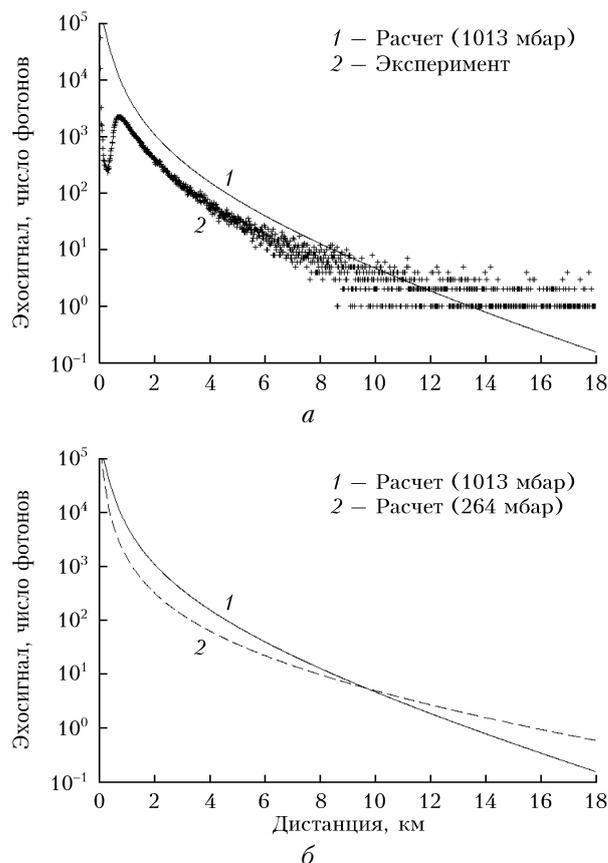


Рис. 5. Сопоставление теоретической оценки эхосигнала с экспериментом (а); оценки эхосигналов (б) у земли (1013 мбар) и на высоте 10 км (264 мбар)

Экспериментальный эхосигнал был записан на горизонтальной трассе вблизи земли при ясной погоде. Максимум эхосигнала на дистанции 1 км обусловлен геометрией приемопередатчика. В расчетах геометрический фактор не учитывался, поэтому кривая 1 максимума не имеет. Было важно сравнить результаты в дальней зоне.

Из рис. 5, а следует, что до дистанции 10 км, где отношение «сигнал-шум» больше 1, расчетный эхосигнал в два раза больше реального. Одной из причин этого могла стать погрешность в настройке телескопов, на что указывает негауссова форма пучков на рис. 4.

На рис. 5, б показан расчет эхосигналов для приземной горизонтальной трассы (кривая 1, давление 1013 мбар) и трассы на высоте 10 км (кривая 2, давление 246 мбар). В расчете эхосигнала на высоте 10 км учитывалось только молекулярное рассеяние. Из рис. 5, б следует, что на высоте 10 км эхосигнал вблизи лидара меньше из-за низкой плотности воздуха. Начиная с дистанции  $\sim 10$  км эхосигнал становится больше из-за высокой прозрачности атмосферы. Значит, теоретический потенциал лидара (дальность зондирования) на высоте 10 км сопоставим с его потенциалом у земли.

#### 4. Тестирование лидара на термомеханическую стабильность

Лидар УОР-6 был создан для проведения продолжительных измерений в автоматическом режиме, поэтому было важно обеспечить постоянство взаимного расположения оптических осей передатчика и приемников. Основной причиной возможного рассогласования осей является деформация изгиба оптической скамьи, которая возникает при появлении температурного градиента между противоположными сторонами скамьи [7].

Температурное тестирование лидара УОР-6 проводилось в холодное время года в течение двух суток при температуре на улице  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Лидар работал в штатном режиме. В полночь автоматический выключатель в помещении на три часа отключал электронагреватель. Помещение представляло утепленную веранду, поэтому температура внутри быстро понижалась с  $+25$  до  $+17\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 6).

На рис. 6, *а* показан ход температуры воздуха на входе  $T_1$  и выходе  $T_2$  оптической скамьи. Днем, в районе полудня, в помещении имело место повышение температуры на  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Кроме того, черный светозащитный экран с передней стороны лидара нагревался солнечными лучами (трасса зондирования была направлена на юг), поэтому в полдень температура  $T_2$  оказывалась меньше температуры  $T_1$ .

На следующем графике (рис. 6, *б*) приведен ход температуры верха  $T_3$  и низа  $T_4$  корпуса лидара. Днем температура верхнего кожуха лидара повышалась до  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На рис. 6, *в* показан ход температуры на верхней  $T_5$  и нижней  $T_6$  сторонах оптической скамьи. Значения  $T_5$  и  $T_6$  синхронно изменялись в больших пределах от  $+16$  до  $+26\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Градиент температуры между входом и выходом скамьи  $T_2 - T_1$  и ее низом и верхом  $T_6 - T_5$  представлен на рис. 6, *г*. Из рис. 6, *б* следует, что за 48 ч температура корпуса лидара изменялась на  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Амплитуда градиента воздушного потока на входе и выходе скамьи достигала  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Градиент

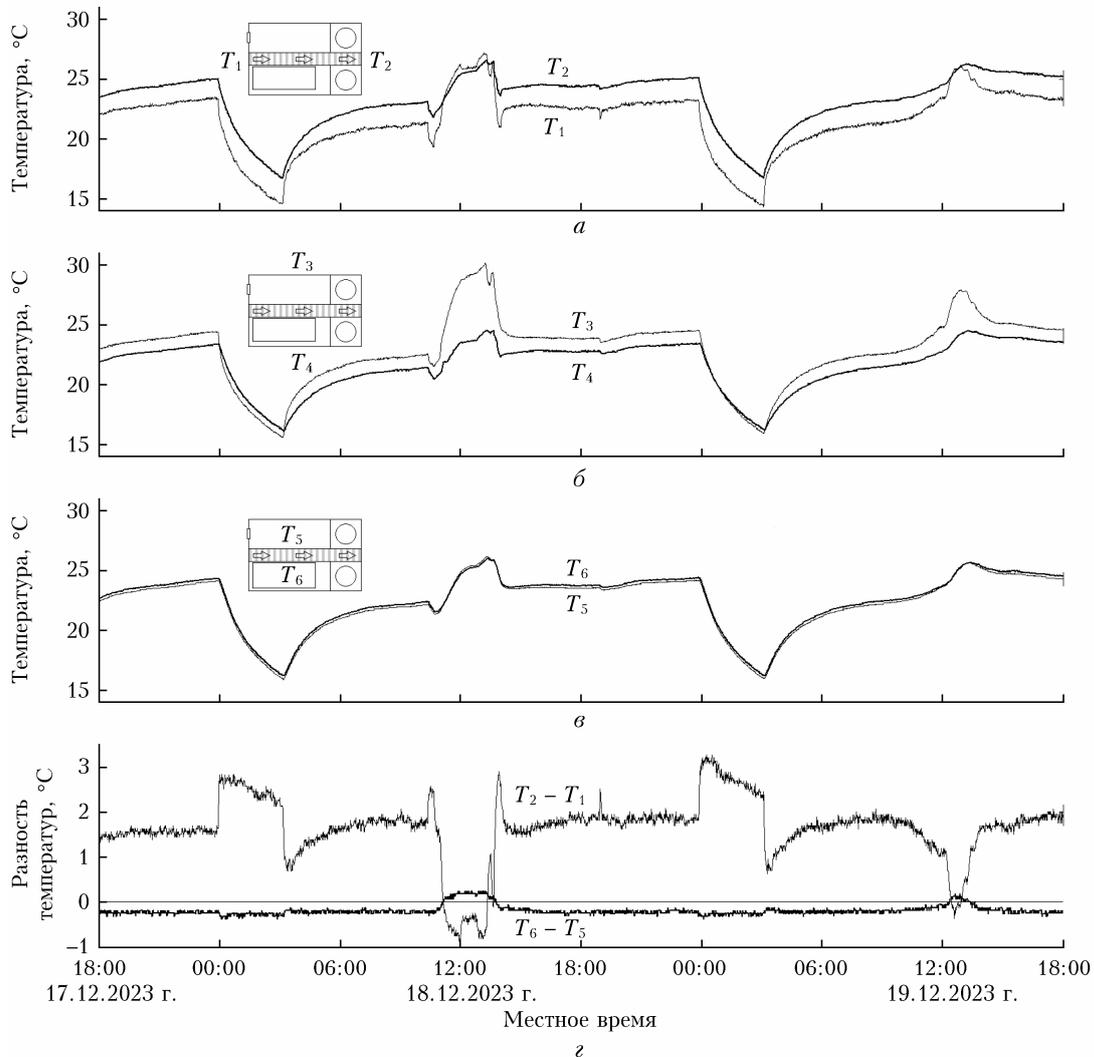


Рис. 6. Графики температуры и градиента температуры во время испытания лидара на стабильность: температура воздушного потока на входе  $T_1$  (серая кривая) и выходе  $T_2$  (полужирная кривая) оптической скамьи (*а*); температура верха  $T_3$  и низа  $T_4$  корпуса лидара (*б*); температура верха  $T_5$  и низа  $T_6$  оптической скамьи (*в*); градиенты температуры  $T_2 - T_1$  и  $T_6 - T_5$  (*г*)

на противоположных сторонах оптической скамьи в основном оставался постоянным и равным  $-0,3^{\circ}\text{C}$ , повышаясь до  $+0,3^{\circ}\text{C}$  только днем от прямых солнечных лучей.

Эксперимент показал, что если температуру в помещении поддерживать в пределах  $+15...+25^{\circ}\text{C}$ , избегая попадания прямых солнечных лучей на корпус лидара, тогда градиент температуры на сторонах скамьи будет постоянным и равным  $-0,3^{\circ}\text{C}$ . Постоянство градиента на краях скамьи означает фиксацию ее формы и, следовательно, стабилизацию взаимного расположения оптических осей передатчика и приемников. Заметим, что изменения температуры в помещении во время эксперимента не повлияли на результаты зондирования, что также указывает на стабильное поведение лидара.

### Заключение

Описана концепция и конструктивные особенности турбулентного лидара УОР-6 (355 нм), созданного для установки на борт воздушного судна. Лидар предназначен для экспериментальной проверки метода зондирования турбулентности в ясном небе на основе эффекта увеличения обратного рассеяния.

Компактность и облегчение конструкции лидара были получены за счет двухстороннего использования оптической скамьи. На одной стороне скамьи размещен приемопередатчик, на другой — приемный модуль.

Описаны процедура юстировки афокальных телескопов лидара, состоящих из внеосевых параболических зеркал, и настройки системы в целом. Качество сборки и юстировки лидара проводилось путем сопоставления реальных эхосигналов с расчетными. Реальные сигналы оказались в два раза меньше расчетных. Возможная причина расхождения заключалась в погрешностях, допущенных при юстировке системы.

Результаты наземного тестирования лидара на термомеханическую стабильность показали, что при изменении температуры в помещении от  $+15$  до  $+25^{\circ}\text{C}$  градиент температуры на противоположных сторонах оптической скамьи в лидаре оставался постоянным и равным  $-0,3^{\circ}\text{C}$ . Высокая термомеханическая стабилизация приемопередатчика лидара была получена за счет размещения тепловыделяющих элементов (лазер и блоки питания) в отдельных вентилируемых секциях. Лидар УОР-6 планируется установить на борт самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик», где он будет работать в непрерывном режиме во время полетных экспериментов.

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

### Список литературы

1. *Руководство по прогнозированию метеорологических условий для авиации.* Л.: Гидрометеиздат, 1985. 302 с.
2. *Шакина Н.П., Иванова А.Р.* Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М.: ТРИАДА ЛТД, 2016. 312 с.
3. *Японское агентство аэрокосмических исследований.* URL: <https://www.aero.jaxa.jp/eng/research/star/safeavio/> (дата обращения: 23.04.2024).
4. *Информационное агентство ОРЕАНДА.* URL: [https://www.oreanda.ru/en/transport/Boeing\\_and\\_JAXA\\_to\\_Flight-test/article1173457/](https://www.oreanda.ru/en/transport/Boeing_and_JAXA_to_Flight-test/article1173457/) (дата обращения: 23.04.2024).
5. *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.
6. *Гурвич А.С.* Лидарное зондирование турбулентности на основе усиления обратного рассеяния // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2012. Т. 48, № 6. С. 655–665.
7. *Разенков И.А.* Анализ технических решений при проектировании турбулентного лидара // *Оптика атмосфер. и океана.* 2022. Т. 35, № 9. С. 766–776. DOI: 10.15372/AOO20220910; *Razenkov I.A.* Engineering and technical solutions when designing a turbulent lidar // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N S1. P. S148–S158. DOI: 10.1134/S1024856023010141.
8. *Kovalev V.A., Eichinger W.E.* Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis Methods. Wiley-IEEE, 2004. 616 p.
9. *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere* / C. Weitkamp (ed.). Berlin: Springer, 2005. 443 p. DOI: 10.1007/b106786.
10. *Воробьев В.В.* О применимости асимптотических формул восстановления параметров «оптической» турбулентности из данных импульсного лидарного зондирования. I. Уравнения // *Оптика атмосфер. и океана.* 2016. Т. 29, № 10. С. 870–875. DOI: 10.15372/AOO20161012; *Vorob'ev V.V.* On the applicability of asymptotic formulas of retrieving “optical” turbulence parameters from pulse lidar sounding data: I — Equations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 2. P. 156–161. DOI: 10.1134/S1024856017020142.
11. *Разенков И.А.* Методика проведения измерений турбулентным лидаром и сравнение результатов зондирования с наземными наблюдениями // *Оптика атмосфер. и океана.* 2024 (в печати).
12. *Разенков И.А., Белан Б.Д., Михальчишин А.В., Излев Г.А.* Применение турбулентного лидара для обеспечения авиационной безопасности // *Оптика атмосфер. и океана.* 2024. Т. 37, № 5. С. 393–402. DOI: 10.15372/AOO20240506.

*B.D. Belan, I.A. Razenkov, K.A. Rynkov. Airborne lidar BSE-6 for remote detection of clear-air turbulence.*

The substantiation of the design and technical description of the turbulent lidar BSE-6, intended for installation on board aircraft, is given. In order to reduce the overall dimensions of the system, both sides of the optical bench are used: a transceiver is installed on one side, and a receiving module is mounted on the other. The heat-generating elements are placed in separate insulated ventilated sections. To minimize the deformation of the optical bench, external air is pumped through its middle. The lidar adjustment procedure is described. The quality of the assembly and alignment was tested by comparing the theoretical calculation with real echo signals. The system was also tested for thermomechanical stability.