

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 535.361.551:511.6:621.371

Применение турбулентного лидара для обеспечения авиационной безопасности

И.А. Разенков^{✉1}, Б.Д. Белан¹, А.В. Михальчишин², Г.А. Ивлев^{1*}

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

²Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А. Чаплыгина
630051, г. Новосибирск, ул. Ползунова 21/1

Поступила в редакцию 01.09.2023;
после доработки 20.10.2023;
принята к печати 22.10.2023

В свободной атмосфере в интервале высот 6–12 км наибольшую опасность для авиации представляет турбулентность ясного неба (ТЯН). Переमेжаемость и случайная локализация ТЯН в спокойном окружающем воздушном потоке существенно ограничивают возможности ее прогнозирования. С учетом изменения климата и увеличения вероятности возникновения ТЯН создание систем дистанционного обнаружения турбулентных зон становится особенно актуальным. Приведены результаты зондирования турбулентности ультрафиолетовым лидаром УОР-5 с борта самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик». Летный эксперимент проводился в сентябре 2022 г. в рамках программы исследования Арктики. Лидар регистрировал зоны умеренной турбулентности в нижней части тропосферы, где вероятность турбулентности максимальная; также были зафиксированы единичные случаи ТЯН на высоте 9 км. Турбулентный лидар может использоваться на практике для дистанционного обнаружения турбулентных зон на высотах, где осуществляется большинство коммерческих авиарейсов. Также показана перспектива наземного применения турбулентного лидара для решения задач авиационной безопасности при полетах в нижней тропосфере. Представлены результаты зондирования лидаром УОР-5 в зимнее время, когда было зарегистрировано повышение интенсивности турбулентности в слое 0,4–1,6 км при прохождении холодного фронта.

Ключевые слова: турбулентный лидар, увеличение обратного рассеяния, неустойчивость Кельвина–Гельмгольца, турбулентность ясного неба; turbulent lidar, backscattering enhancement, Kelvin–Helmholtz instability, clear air turbulence.

Введение

Турбулентностью ясного неба (ТЯН) называют турбулентные зоны (пятна) в чистой свободной атмосфере при отсутствии конвективных движений, а также турбулентность в перистых облаках [1]. Такая турбулентность возникает в результате гидродинамической неустойчивости стратифицированного по скорости и температуре воздушного потока и характеризуется перемежаемостью и сильной изменчивостью как по размерам, так и времени жизни [2]. Размеры турбулентных пятен могут превосходить 100 км по горизонтали и 1 км по вертикали [3]. Часто ТЯН существует продолжительное время, поэтому несколько воздушных судов (ВС) могут испытывать болтанку, пролетая последовательно через одну турбулентную зону. В верхней тропосфере повторяемость ТЯН, вызывающей болтанку самолетов, максимальна на высотах 6–11 км и составляет 15% [4].

Турбулентность ясного неба представляет опасность для ВС, так как она не регистрируется системами самолета и не обнаруживается визуально. Обычно ТЯН приводит к неожиданной сильной болтанке, но были зафиксированы случаи и полного разрушения воздушного судна. Из обзора ИКАО авиационных происшествий по 16 категориям по данным за 2019 г. наибольшее количество авиационных происшествий (26%), повлекших серьезные травмы экипажей воздушных судов или пассажиров, произошло в результате турбулентности [5].

В бывшем СССР работы по созданию устройств для регистрации ТЯН начались в конце 1980-х гг., но после распада страны финансирование прекратилось. За рубежом исследования систем заблаговременного оповещения о приближении зон турбулентности продолжались. С 2001 г. Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA) совместно с Mitsubishi Electric создало самолетный лидар (проект SafeAvio), принцип работы которого основан на эффекте Доплера. Впоследствии JAXA усовершенствовала лидар, что увеличило дальность зондирования с 2 (2002 г.) до 17 км (2017 г.). Параллельно с этим японские ученые снизили вес системы со 150 (2011 г.) до 84 кг (2018 г.) [6, 7]. Интенсивность

* Игорь Александрович Разенков (lidaroff@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Андрей Владимирович Михальчишин (lib2005@ngs.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru).

турбулентности оценивается доплеровским лидаром путем сравнения текущего вектора скорости воздушного потока с предшествующим значением скорости [8]. В реализации такого подхода имеется ряд проблем. Во-первых, в доплеровских лидарах эхосигнал формируется только аэрозольными частицами, которых в чистом воздухе на указанных высотах немного [9]. Во-вторых, сложно точно определить уширение доплеровского спектра, что также дает информацию об интенсивности турбулентности. Сообщалось, что доплеровский лидар JAXA прошел испытания на Boeing 777 и начата его сертификация. Информации о том, чем завершились испытания доплеровской системы JAXA, ни в общественной, ни в научной литературе найти не удалось.

Другой способ обнаружения ТЯН основан на регистрации флуктуаций плотности воздушного потока. Он был реализован в рамках европейского проекта FP-7 DELICAT (2009–2014 гг.) на самолете Cessna Citation-2 [10]. Способ предполагает использование лидара высокого спектрального разрешения для выделения молекулярной компоненты из принимаемого суммарного эхосигнала. Созданная аппаратура получилась громоздкой и сложной, в частности из-за наличия мощного лазера и необходимости постоянно контролировать строго горизонтальное расположение лазерного пучка. Цель проекта DELICAT заключалась в демонстрации технологии детектирования ТЯН и не предполагала создание прототипа для авиации [10].

В данной статье представлена лазерная система, предназначенная для регистрации интенсивности турбулентности и обнаружения ТЯН. Она альтернативна подходам, изложенным выше. В 1972 г. в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова теоретически было доказано, что если волна, распространяющаяся в случайной среде, рассеивается в обратном направлении, то на оси источника происходит повышение средней интенсивности рассеянного света [11]. А.С. Гурвич с коллегами [12] подтвердил это экспериментально в лаборатории и позже предложил использовать явление увеличения обратного рассеяния (УОР) для дистанционного контроля интенсивности оптической турбулентности. Первый действующий макет турбулентного лидара на основе эффекта УОР был создан в Институте

оптики атмосферы им. В.Е. Зуева в 2013 г. Лидар работает на молекулярном и аэрозольном рассеянии и позволяет дистанционно регистрировать интенсивность атмосферной турбулентности [13].

Использование эффекта УОР предполагает регистрацию интенсивности рассеянного света в месте расположения источника излучения. Для измерения интенсивности рассеянного турбулентной атмосферой света на оси зондирующего лазерного пучка потребовалось применить микроимпульсный лазер с диодной накачкой, что позволило совместить передающий канал с принимающим, не перегружая при этом детектор лазерным излучением, рассеянным на оптических элементах. Заметим, что при малых габаритах средняя выходная мощность микроимпульсного лазера вполне приемлема и составляет сотни милливатт за счет высокой частоты следования импульсов. Кроме того, преимущество микроимпульсных лазерных систем заключается в их безопасности для глаз, а ресурс непрерывной работы составляет не менее года.

Современный уровень техники дистанционного зондирования оптической турбулентности на основе эффекта увеличения обратного рассеяния позволил нам провести летные испытания с применением лидара УОР-5 на борту самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик».

Цель настоящей работы – познакомить читателя с первыми результатами по лидарному обнаружению турбулентности в нижней тропосфере и в ясном небе и наметить план работы, которая представляется нам важной, на будущее.

1. Материалы и методы

1.1. Турбулентный лидар как инструмент обнаружения ТЯН

В летном эксперименте использовался ультрафиолетовый турбулентный лидар УОР-5 [14], упрощенная оптическая схема которого представлена на рис. 1. Лидар имеет один передающий канал и два принимающих: основной, точно совмещенный с передающим, и дополнительный, расположенный рядом. В системе используется один афокальный

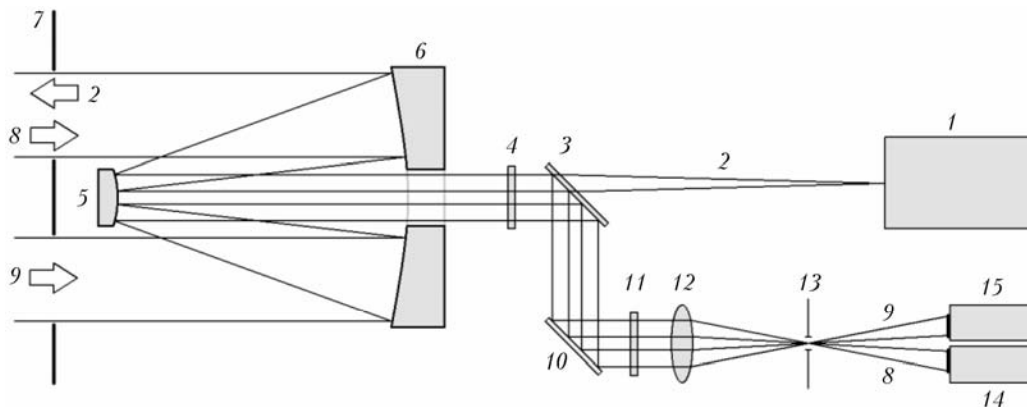


Рис. 1. Упрощенная оптическая схема лидара УОР-5. Обозначения см. в тексте

телескоп (система Мерсен), состоящий из пары параболических зеркал 5 и 6. Приемные каналы расположены симметрично по обе стороны относительно оптической оси телескопа. Слабо расходящийся линейно-поляризованный пучок 2 от лазера 1 проходит сквозь тонкопленочный поляризатор 3 и четвертьволновую пластинку 4, которая преобразует линейную поляризацию излучения лазера в круговую. Далее пучок 2 расширяется телескопом 5–6 и через верхнее отверстие в экране 7 отправляется в атмосферу. Экран 7 имеет два одинаковых круглых отверстия, расположенных симметрично относительно оси телескопа.

Рассеянное в атмосфере излучение в виде основного 8 и дополнительного 9 пучков возвращается на телескоп 5–6. Пучки 8 и 9 сужаются и проходят сквозь четвертьволновую пластинку 4, которая круговую поляризацию рассеянного излучения преобразует обратно в линейную, но теперь плоскость поляризации повернута на 90° относительно поляризации лазера. Поэтому пучки 8 и 9 отражаются от тонкопленочного поляризатора 3 и зеркалом 10 направляются в приемный модуль, в котором располагаются: интерференционный светофильтр 11, отсекающий фоновую засветку; формирователь

поля зрения лидара, состоящий из фокусирующей линзы 12 и апертурной диафрагмы 13; фотодетекторы 14 и 15 для регистрации эхосигналов, соответственно, основного 8 и дополнительного 9 приемных каналов.

На рис. 2, а представлена фотография лидара УОР-5 в лаборатории со снятыми верхним кожухом и боковой планкой, на рис. 2, б — он же на борту Ту-134 «Оптик». Лидар установлен напротив люка запасного выхода слева по борту самолета. Штатное пластиковое окно люка заменено толстым оптическим кварцевым стеклом. Трасса зондирования направлена перпендикулярно фюзеляжу. Основные характеристики лидара представлены в табл. 1.

Турбулентный лидар регистрирует эхосигнал основного приемного канала $P_1(x)$ и дополнительный эхосигнал $P_2(x)$. При обработке лидарных данных эхосигнал $P_1(x)$ нормируется на эхосигнал $P_2(x)$, чтобы исключить влияние изменения коэффициента рассеяния вдоль направления зондирования x . При распространении лазерного пучка в турбулентной атмосфере полная мощность обратнорассеянного излучения не изменяется, а только перераспределяется в пространстве [15]. При этом на оси лазерного

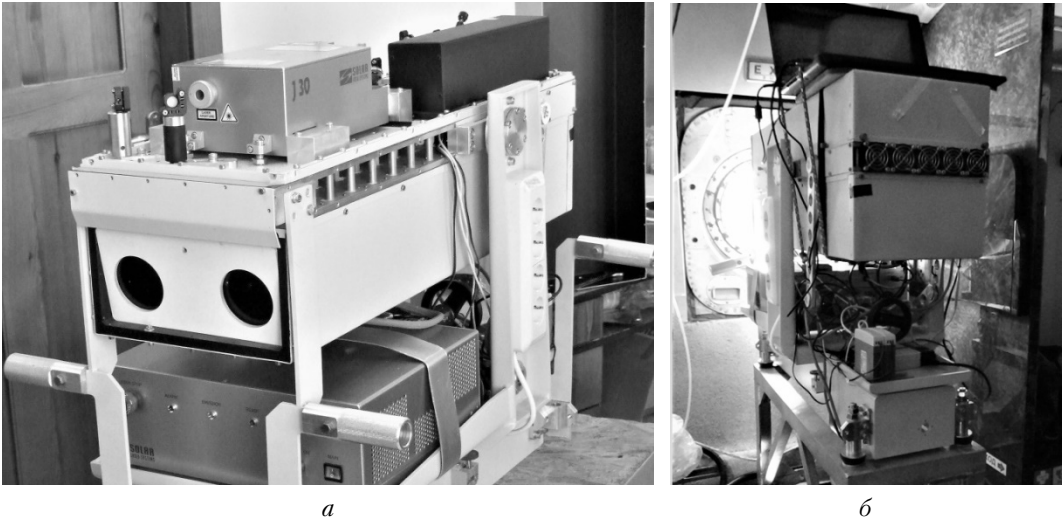


Рис. 2. Лидар УОР-5 в помещении (а) и на борту самолета-лаборатории Ту-134 «Оптик» (б)

Таблица 1

Основные характеристики лидара УОР-5			
Характеристика	Значение	Характеристика	Значение
Передатчик		Приемник	
Лазер	Solar JX-330	Зеркальный афокальный телескоп	Мерсен (12,5°)
Длина волны, нм	355	Размеры телескопа (Д × Ш × В), мм³	260 × 110 × 650
Длительность импульса, нс	30	Число приемных каналов, шт.	2
Частота повторения, кГц	8	Апертура приемника, мм	70
Мощность лазера, мВт	400	Разнос осей приемных каналов, мм	150
Энергия в импульсе, мкДж	50	Поле зрения приемных каналов, мкрад	400
Качество пучка, $M^2 < 1,2$	TEM ₀₀	Пространственное разрешение, м	15
Размер пучка (~1/ε²), мм	70	Время накопления эхосигналов, с	от 10
Расходимость пучка, мкрад	< 30	Фотоприемник	ФЭУ (30%)
Габариты лидара (Д × Ш × В), мм³	850 × 280 × 320	Интерференционный фильтр, нм	0,15

пучка происходит повышение средней интенсивности излучения, в результате увеличивается эхосигнал P_1 в основном приемном канале. Для определения вдоль трассы зондирования профиля структурной характеристики коэффициента преломления $C_n^2(x)$ из отношения эхосигналов $P_1(x)$ и $P_2(x)$ используется приближение Воробьева [16] с уточненной константой «3,0» вместо «0,49»:

$$C_n^2(x) = \frac{q(x) \left[1 + 0,4 \frac{r^2}{r_F^2(x)} \right]^{7/6}}{3,0 k_0^{7/6} x^{11/6}}, \quad (1)$$

где r — радиус приемной апертуры; $q(x) = P_1(x)/P_2(x) - 1$ — фактор влияния турбулентности на среднюю мощность рассеянного света на приемнике; $r_F(x) = \sqrt{x/k_0}$ — масштаб Френеля; $k_0 = 2\pi/\lambda$ — волновое число; λ — длина волны излучения лазера.

1.2. Модельный расчет эхосигналов турбулентного лидара

На рис. 3, а представлены модельные распределения параметра $C_n^2(x)$ для статистически однородной турбулентности (модель 1, $C_n^2(x) = \text{const}$) и при наличии турбулентной зоны на расстоянии 10 км от лидара (модель 2). Фоновое значение параметра $C_n^2 = 10^{-17} \text{ м}^{-2/3}$ в модели на рис. 3 соответ-

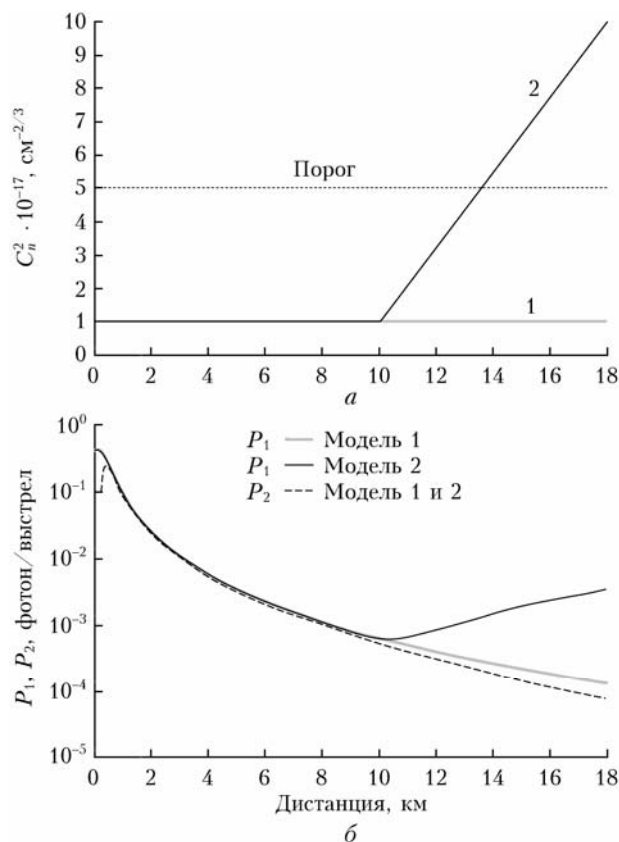


Рис. 3. Модели 1 и 2 распределения параметра C_n^2 вдоль горизонтальной трассы зондирования (а) и соответствующие эхосигналы основного $P_1(x)$ и дополнительного $P_2(x)$ приемных каналов (б)

ствует значению C_n^2 модели Хафнагеля—Волли на высоте 10 км [17]. На рис. 3, б приведены эхосигналы, рассчитанные с помощью уравнения переноса для моделей 1 и 2 на рис. 3, а. Турбулентная зона начинается на дистанции 10 км, причем параметр C_n^2 линейно растет и увеличивается в 10 раз на расстоянии 18 км от лидара. Эхосигнал основного канала $P_1(x)$ при наличии турбулентной зоны тоже увеличивается более чем на порядок.

Данный расчет показывает, что в идеальном случае, т.е. при отсутствии шумов, обнаружение турбулентной зоны представляется вполне возможным, так как можно ожидать кратное увеличение эхосигнала. Однако в реальном эксперименте всегда присутствует шум, обусловленный разными причинами. На рис. 3, а пунктиром показано выбранное произвольно пороговое значение $C_n^2 = 5 \cdot 10^{-17} \text{ м}^{-2/3}$, которое в последствие можно уточнить. При анализе реальных данных значения C_n^2 ниже выбранного порога можно не принимать в расчет, так как ошибка определения C_n^2 здесь большая.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Эксперимент с лидаром на борту Ту-134

В сентябре 2022 г. был проведен комплексный эксперимент, цель которого состояла в исследовании изменения состава воздуха и характеристик подстилающей поверхности в районе Западной Сибири и Карского моря. При этом проводились синхронные наземные, корабельные и самолетные измерения. При выполнении основной задачи эксперимента во время полетов самолет часто менял эшелон (высоту) от 200 м до 9 км. Заметим, что зондирование ТЯН не было приоритетной задачей. Кроме того, трасса зондирования была направлена не по курсу полета, а в сторону под углом 90° .

Турбулентный лидар работал непрерывно в автоматическом режиме: включался заранее на земле и выключался после приземления. Лазерные импульсы посылались в атмосферу с частотой 8 кГц, что соответствовало максимальной дальности зондирования 18,8 км. Приходящие из атмосферы эхосигналы регистрировались в режиме счета фотонов и накапливались в течение 10 с. Затем производилась запись принятых сигналов в отдельный файл и рабочий цикл повторялся.

На борту Ту-134 работала многоканальная система регистрации параметров полета «КомпаНав-5.2», которая с частотой 50 Гц формировала информационные пакеты, включающие данные акселерометра, воздушную скорость, давление и пр. Для сопоставления лидарных данных с параметрами перегрузки (болтанки) использовалось ускорение в вертикальном направлении, записываемое системой «КомпаНав-5.2». Ускорение вертикальной составляющей воздушного потока и величины перегрузки в центре масс самолета связаны соотношением, зависящим от многих

Таблица 2

Интенсивность болтанки воздушного судна

Интенсивность болтанки	Обозначения	Приращения перегрузок $ \Delta n $
Слабая	$\delta^{(1)}$	$< 0,2$
Умеренная	$\delta^{(2)}$	$< 0,5$
Сильная	$\delta^{(3)}$	$< 1,0$
Очень сильная	$\delta^{(4)}$	$> 1,0$

параметров, таких как площадь несущих поверхностей ВС (крыло, оперение, фюзеляж), масса самолета, плотность воздуха и др. Здесь мы ограничимся эмпирическими данными о связи степени болтанки ВС с приращением перегрузки Δn в долях ускорения свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, приведенными в табл. 2 [2].

На рис. 4 представлены данные полета 10.09.2022 г. в течение 4 ч по маршруту г. Салехард – Карское море – г. Салехард. Первые 30 мин самолет находился на земле. На временной оси нулевой отметке соответствует 06:04 UTC. Заметим, что

начиная с 100-й мин полет проходил над Карским морем вплоть до ухода с высоты 9 км на 210-й мин.

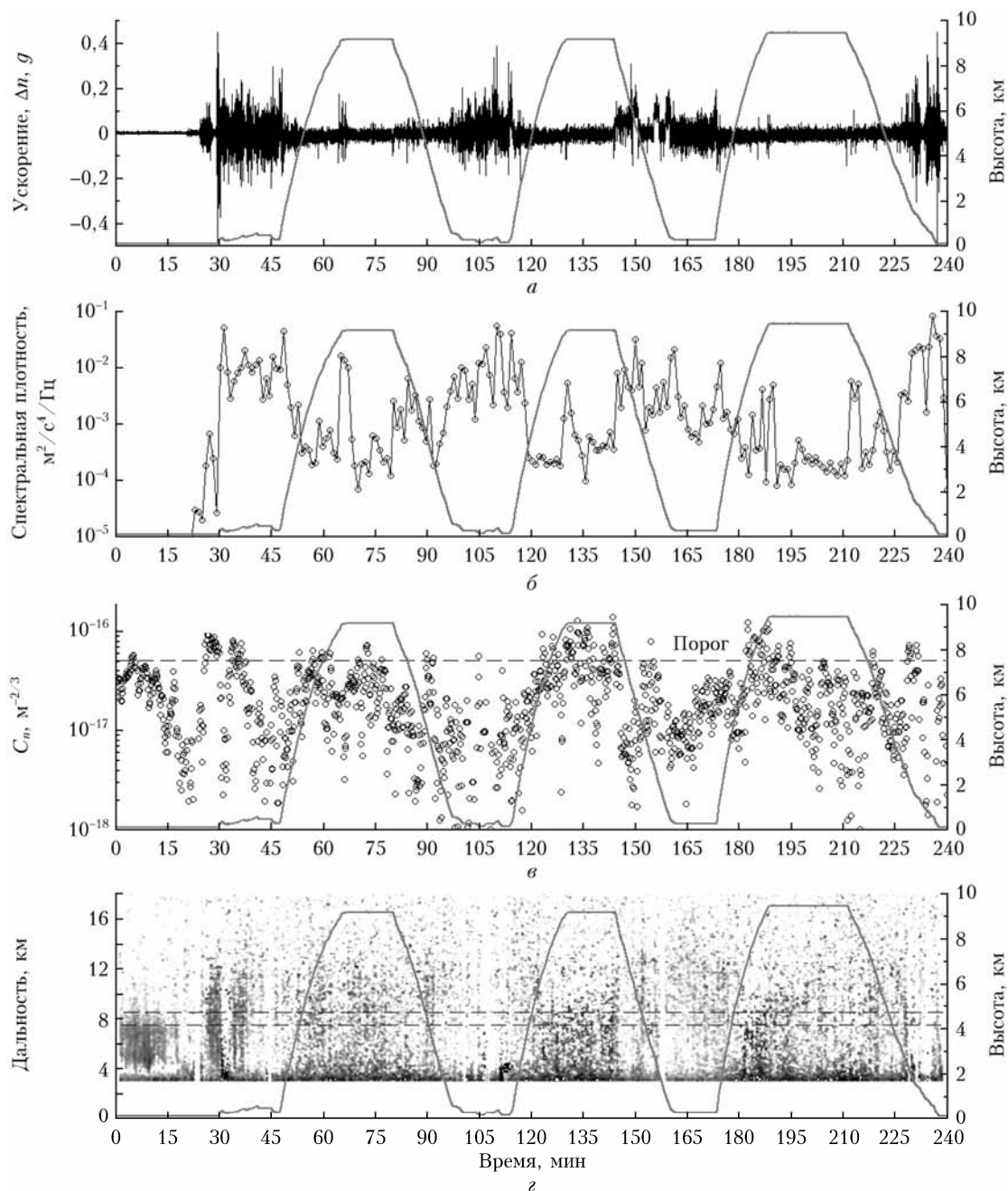


Рис. 4. Временной ряд вертикального ускорения в единицах g (а); ряд значений спектра мощности флуктуаций ускорения на частоте 0,1 Гц (б); параметр C_n^2 в интервале расстояний 7,5–8,5 км от лидара (в) и его пространственно-временное распределение с разрешением 60 м (г); сплошные кривые – профили высоты полета. Отсчет времени от 06:04 UTC 10.09.2022 г.

Полная реализация вертикального ускорения в единицах g по данным «КомпаНав-5.2», состоящая из 720000 отсчетов, показана на рис. 4, *а*. Максимальные значения модуля вертикального ускорения в течение полета составили $3,8 \text{ м/с}^2$. Соответствующие максимальные приращения перегрузок в единицах ускорения g не превышали $\Delta n = \pm 0,4$ (рис. 4, *а*). Согласно табл. 2 в полете наблюдалась болтанка, не превышающая $b^{(2)}$. В основном она была $b^{(1)}$, поскольку $|\Delta n| < 0,2$.

Реализация вертикального ускорения (рис. 4, *а*) была разбита на отрезки, равные 1 мин. Для каждого отрезка был рассчитан спектр с использованием быстрого преобразования Фурье. Вибрации корпуса самолета происходят на относительно высоких частотах, $> 1 \text{ Гц}$, поэтому для сопоставления лидарных данных с акселерометром использовалась спектральная оценка на частоте $0,1 \text{ Гц}$ (рис. 4, *б*).

Из рис. 4, *а* и *б* можно заключить, что $b^{(2)}$ имела место при взлете, посадке и полете на высоте 200 м, а на высоте 9 км была в основном $b^{(1)}$. Заметим, что наряду с болтанкой акселерометр регистрирует вибрации корпуса самолета, которые с учетом возраста самолета и усталости его деталей могут быть больше обычных значений. При полете на высоте 200 м каждый раз наблюдается повышение вибрации до значений $\Delta n = \pm 0,2$, по-видимому, вызванное снижением скорости движения ВС и увеличением плотности воздуха.

На протяжении всего эксперимента 10.09.2022 г. самолет трижды находился в горизонтальном полете на высоте 200 м и трижды на высоте 9 км, при этом «КомпаНав-5.2» каждый раз показывал примерно одинаковые значения вибраций для каждой высоты. Этот факт дает основания полагать, что в действительности акселерометр при слабой болтанке регистрировал в основном вибрации корпуса самолета, тем более что датчик располагался в хвостовой части Ту-134 ближе к силовой установке. Следовательно, акселерометр мог регистрировать лишь уровни начиная с $b^{(2)}$ или даже $b^{(3)}$.

Результат зондирования лидаром интенсивности оптической турбулентности в виде параметра C_n^2 показан на рис. 4, *в* и *г*. Основным источником шума, ограничивающим дальность зондирования, была фоновая засветка, так как полет проходил днем. Пространственное разрешение составляло 60 м. Для уменьшения влияния шума к записанным данным был применен медианный фильтр с пространственным окном 540 м (9 точек) и временным 50 с (5 точек). Очевидно, что дневной фон неба представлял собой существенную помеху. Уменьшить ее влияние за счет увеличения времени накопления (усреднения) сигналов мы не можем, так как в будущем это сократит подлетное время до турбулентной зоны после того, как лидар выдаст сигнал тревоги о наличии ТЯН по курсу полета.

Для борьбы с фоновой засветкой можно будет предпринять следующие меры: 1) повысить мощность передатчика; 2) установить светофильтр, блокирующий фон, с более узкой полосой пропускания, например интерферометр Фабри–Перо; 3) уменьшить угол поля зрения приемной системы. Заметим, что каждый из этих шагов имеет свои плюсы и минусы.

Пространственно-временное распределение параметра C_n^2 представлено на рис. 4, *г*, причем отенки серого отображают изменения C_n^2 в интервале $(1-30) \cdot 10^{-17} \text{ м}^{-2/3}$. Здесь же нанесены две пунктирные прямые, которые показывают интервал 7,5–8,5 км, для которого рассчитаны средние значения C_n^2 , представленные в виде графика на рис. 4, *в*. Порог $C_n^2 = 5 \cdot 10^{-17} \text{ м}^{-2/3}$ на рис. 4, *в* показан пунктиром. Максимальная величина $C_n^2 = 3 \cdot 10^{-16} \text{ м}^{-2/3}$ пока самолет находился на земле.

Из рис. 4, *в* следует, что на высоте 9 км пороговое значение $C_n^2 = 5 \cdot 10^{-17} \text{ м}^{-2/3}$ (отмечено пунктиром) было превышено между 130-й и 150-й мин полета во время второго и в начале третьего подъема. Заметим, что в это время на высоте 9 км наблюдалась перистая облачность. Акселерометр при этом также показал слабое повышение уровня вибраций (см. рис. 4, *а* и *б*). Расхождение данных лидара с акселерометром можно объяснить тем фактом, что трасса лидара была направлена в сторону. При работе лидара по курсу движения самолета можно было бы ожидать лучшее совпадение данных, но с некоторой задержкой по времени.

На рис. 5 представлены данные полета 11.09.2022 г. в течение 4,5 ч по маршруту г. Салехард – г. Томск. Первые 30 мин самолет находился на земле. На временной оси нулевой отметке соответствует 04:52 UTC. Полная реализация вертикального ускорения в единицах g , состоящая из 810000 отсчетов, показана на рис. 5, *а*.

В течение полета самолет дважды поднимался на высоту 9 км, причем второй раз находился там 45 мин. Из лидарных данных на рис. 5, *в* и *г* следует, что наблюдались лишь редкие слабые превышения C_n^2 над пороговым значением, т.е. выраженной ТЯН на большой высоте в этом полете не отмечалась.

Тем не менее на рис. 5, *в* можно выделить четыре участка полета, когда параметр C_n^2 превышал порог $10^{-17} \text{ м}^{-2/3}$ в течение 15 мин и более. В бортовом журнале отмечено время, когда в полете явно ощущалась болтанка, а именно между 90-й и 105-й мин и после 240-й мин вплоть до приземления. Два других случая, зарегистрированные лидаром, возможно, забыли отметить в журнале. Заметим, что на этот раз акселерометр фактически синхронно с лидаром указывал на болтанку, показывая повышение уровня вибраций Δn (рис. 5, *а*) и спектральной оценки на частоте $0,1 \text{ Гц}$ (рис. 5, *б*).

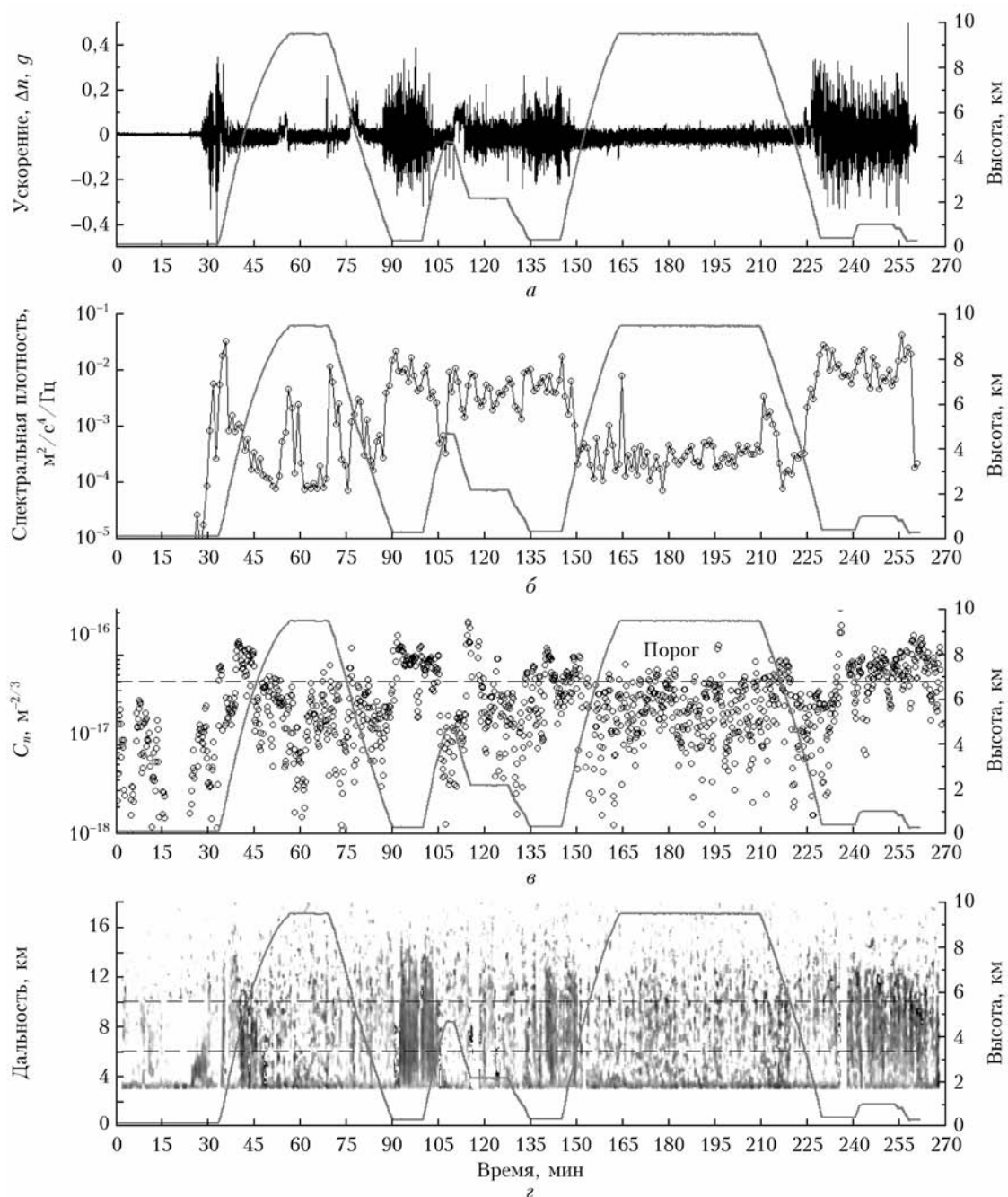


Рис. 5. То же, что и на рис. 4, для интервала расстояний 6–10 км. Отсчет времени от 04:52 UTC 11.09.2022 г.

2.2. Зондирование турбулентности в нижней тропосфере

Вероятность встретить турбулентность в нижней части тропосферы (0–2 км) максимальная и составляет в среднем 25–30% [1]. С лидаром УОР-5 был организован наземный эксперимент по обнаружению турбулентности в нижнем двухкилометровом слое атмосферы. Цель эксперимента заключалась в исследовании возможности контроля интенсивности турбулентности в нижней тропосфере наземным лидаром. Очевидно, что работа лидара как на бор-

ту, так и на земле расширяет области его применения. Измерения с земли позволяют сопоставлять случаи возникновения турбулентности с синоптической обстановкой и тем самым исследовать обоснованность синоптических критериев прогноза турбулентности [1, 4].

Эксперимент проводился в зимнее время. Лидар располагался в помещении и работал через одинарное оконное стекло для уменьшения потерь, трасса проходила над городской застройкой и имела наклон 11°. Пространственное разрешение составляло 9 м, временное — 10 с.

Обычно в зимнее время пограничный слой термически стратифицирован устойчиво. При наличии вертикального градиента скорости ветра и числе Ричардсона менее $1/4$ имеет место неустойчивость Кельвина–Гельмгольца [3], которая регистрируется турбулентным лидаром. По нашим данным и работам других авторов [18, 19], наиболее часто волны Кельвина–Гельмгольца возникают в пограничном километровом слое атмосферы. Турбулентные зоны выше 1 км лидаром, расположенным на земле, регистрируются гораздо реже.

На рис. 6 в виде пространственно-временного распределения C_n^2 представлено возникновение турбулентной зоны, зарегистрированной в ночь с 24 на 25.01.2023 г. Здесь мы наблюдаем два близко расположенных друг к другу турбулизированных слоя на высотах 0,4–0,8 и 0,8–1,6 км.

На вставке показано контрастное изображение увеличенного участка параметра C_n^2 на высоте 1 км, зарегистрированного в 23:30. Оно имеет явно выраженный волновой характер, что указывает на волновое происхождение турбулентных слоев.

Результат, показанный на рис. 6, был получен при прохождении холодного фронта, когда темпе-

ратура воздуха у земли упала с -7°C в 19:00 24.01.2023 до -26°C в 04:00 25.01.2023 г. по данным модели ICON (icosahedral nonhydrostatic) [20]. Эта ситуация соответствует синоптическому критерию прогноза ТЯН, когда зона турбулентности располагается вблизи оси барической ложбины со стороны области низкого давления [1]. Кроме того, в это время имело место струйное течение с максимумом скорости ветра 21 м/с на высоте 1500 м [20].

На рис. 7, а приведены усредненные за 1 мин эхосигналы P_1 (кривые 1 и 3) и P_2 (кривые 2 и 4), записанные в два момента времени: когда турбулентный слой присутствовал (23:22:30 24.01.2023 г.) и сразу после его исчезновения (00:22:30 25.01.2023 г.). Соответствующие восстановленные профили параметра C_n^2 показаны на рис. 7, б. Пространственное разрешение данных на рис. 7 составляет 45 м, временное – 1 мин. Профиль C_n^2 (кривая 2) на рис. 7, б представляет фоновое значение, которое с высотой в соответствии с теорией убывает по закону « $-4/3$ » (пунктирная кривая) [21]. В турбулентном слое на дистанции 6 км, соответствующей высоте 1,2 км, наблюдалось трехкратное увеличение C_n^2 относительно фоновое значения.

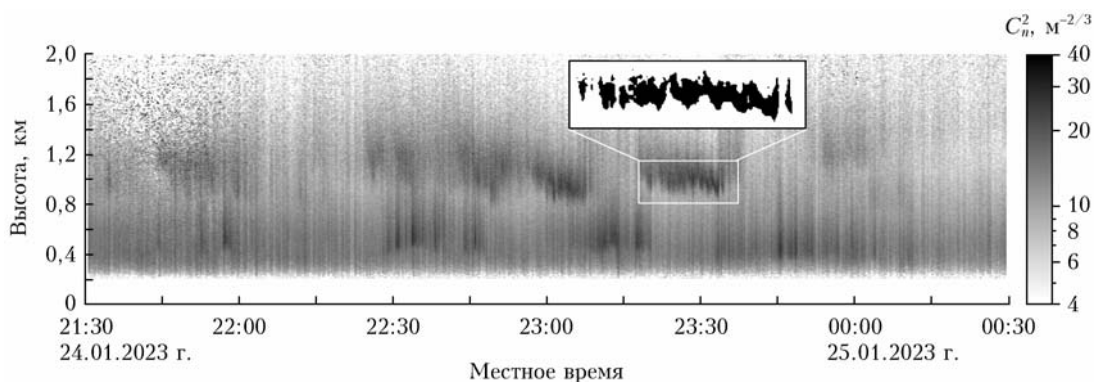


Рис. 6. Пространственно-временное распределение параметра C_n^2 при зондировании турбулентности с земли. Лидар УОР-5, 24–25.01.2023 г.

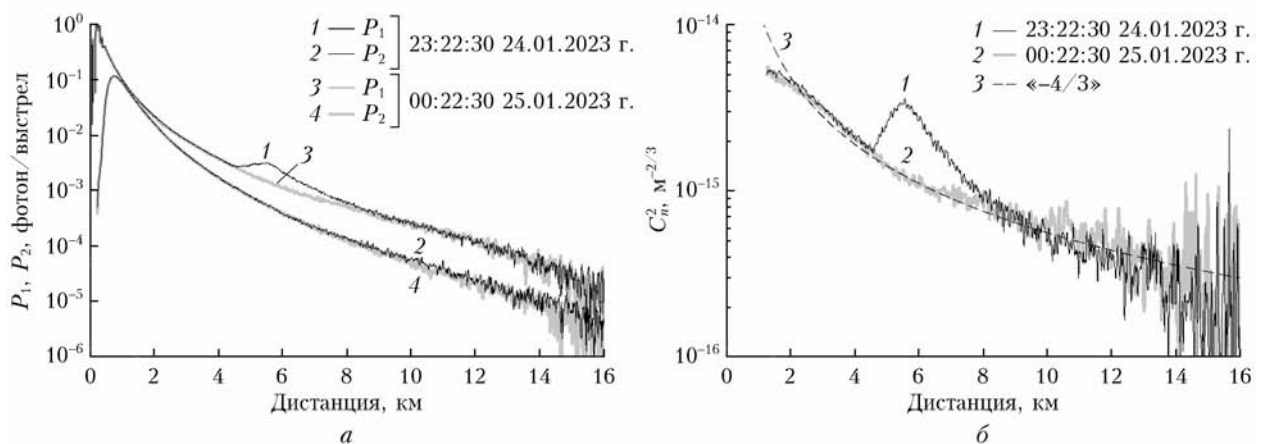


Рис. 7. Эхосигналы P_1 (кривые 1 и 3) и P_2 (кривые 2 и 4) (а) и соответствующие им восстановленные значения C_n^2 (б), полученные при наличии (1) и отсутствии (2) турбулентной зоны. Теоретический профиль C_n^2 показан пунктиром (кривая 3). Лидар УОР-5, 24–25.01.2023 г.

Заключение

Представлены первые экспериментальные результаты зондирования турбулентности специализированным ультрафиолетовым лидаром УОР-5, размещенным на самолете-лаборатории Ту-134 «Оптик». Турбулентный лидар работает на основе эффекта увеличения обратного рассеяния, когда при двукратном прохождении волн в атмосфере происходит перераспределение обратно рассеянного излучения в пространстве и увеличение его средней интенсивности на оси лазерного пучка.

В качестве основных результатов, полученных турбулентным лидаром на борту самолета, выделим следующие. Показана принципиальная возможность регистрации параметров оптической турбулентности до высоты 9 км. Дальность зондирования днем составила 8–10 км (измерения ночью не проводились). Есть все основания полагать, что в турбулентном лидаре использование ультрафиолетового лазера с длиной волны 355 нм является оптимальным по сравнению с видимым и инфракрасными диапазонами длин волн, поскольку: 1) при отсутствии облаков эхосигнал больше за счет молекулярного рассеяния; 2) выше чувствительность метода УОР к изменению интенсивности турбулентности; 3) излучение безопасно для глаз; 4) излучение невидимое, поэтому не привлекает внимания.

Во время измерений трасса зондирования турбулентного лидара была направлена в сторону под прямым углом относительно направления полета, поэтому полученные результаты следует рассматривать как предварительные. В настоящее время ведется работа по переоборудованию выходного порта для лидара, что позволит направить лазерный луч вперед по курсу полета самолета. Кроме того, завершается работа по созданию турбулентного лидара УОР-6, который будет установлен на борту Ту-134. Во время предстоящих полетов предполагается проведение длительных непрерывных измерений в автоматическом режиме, которые позволят накопить экспериментальный статистический материал по лидарному обнаружению турбулентности ясного неба [22].

Использование турбулентного лидара не ограничивается его применением только на борту воздушного судна. Лидар наземного базирования позволяет производить измерения в нижней тропосфере. Представлены данные зондирования с земли тем же самым лидаром УОР-5; в зимнее время угол наклона трассы составлял 11°. Лидар позволял обнаружить турбулентные слои на высотах до 2 км. Возможной причиной повышения интенсивности турбулентности была неустойчивость Кельвина–Гельмгольца, поскольку изменения структурной характеристики C_n^2 во времени и в пространстве имели волновой характер.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой 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. Винниченко Н.К., Пинус Н.З., Шмелер С.М., Шур Г.Н. Турбулентность в свободной атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 288 с.
3. Шакина Н.П. Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 308 с.
4. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. М.: ТРИАДА ЛТД, 2016. 312 с.
5. *Safety Report.* International Civil Aviation Organization. Canada: Montreal, 2020. 64 p.
6. Японское агентство аэрокосмических исследований. URL: <https://www.aero.jaxa.jp/eng/research/star/safeavio> (дата обращения: 12.02.2023).
7. Информационное агентство ОРЕАНДА. URL: https://www.oreanda.ru/en/transport/Boeing_and_JAXA_to_Flight-test/article1173457/ (дата обращения: 12.02.2023).
8. Asahara T., Inokuchi H. Method for measuring airspeed by optical air data sensor. United States patent No.: US 8,434,358 B2. May 7, 2013.
9. Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Ковалевский В.К., Плотников А.П., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н. Многолетняя изменчивость тропосферного аэрозоля над Западной Сибирью // *Оптика атмосф. и океана.* 2000. Т. 13, № 6–7. С. 627–630.
10. Научно-исследовательские проекты Европейского Союза. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/233801> (дата обращения: 12.02.2023).
11. Виноградов А.Г., Гурвич А.С., Кашкаров С.С., Кравицов 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.
12. Гурвич А.С. Лидарное зондирование турбулентности на основе усиления обратного рассеяния // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2012. Т. 48, № 6. С. 655–665.
13. Разенков И.А. Турбулентный лидар. I. Конструкция // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, № 1. С. 41–48; Razenkov I.A. Turbulent lidar: I – Desing // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 3. P. 273–280.
14. Разенков И.А. Анализ технических решений при проектировании турбулентного лидара // *Оптика атмосф. 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.
15. Кравицов Ю.А., Саичев А.И. Эффекты двукратного прохождения волн в случайно неоднородных средах // *Успехи физ. наук.* 1982. Т. 137, вып. 3. С. 501–527.
16. Воробьев В.В. О применимости асимптотических формул восстановления параметров «оптической» турбулентности из данных импульсного лидарного зондирования. I. Уравнения // *Оптика атмосф. и океана.* 2016. Т. 29, № 10. С. 870–875; 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.
17. Voitsekhovich V.V., Orlov V.G., Guevas S., Avila R. Efficiency of off-axis astronomical adaptive systems:

- Comparison of theoretical and experimental data // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1998. V. 133. P. 427–430.
18. *Разенков И.А.* Зондирование волн Кельвина–Гельмгольца турбулентным лидаром // *Оптика атмосф. и океана.* 2023. Т. 36, № 11. С. 910–920. DOI: 10.15372/AOO20231106; *Razenkov I.A.* Sounding of Kelvin–Helmholtz waves by a turbulent lidar: I–BSE-4 Lidar // *Atmos. Ocean. Opt.* 2024. V. 37, N 1. P. 55–65.
 19. *Каллистратова М.А., Люлюкин В.С., Кузнецов Р.Д., Петенко И.В., Зайцева Д.В., Кузнецов Д.Д.* Содарные исследования волн Кельвина–Гельмгольца в низкоразрывных струйных течениях // *Динамика волновых и обменных процессов в атмосфере.* М.: ГЕОС, 2017. 508 с. С. 212–259.
 20. *Приложение* Ventusky компании InMeteo в Чехии. URL: <https://www.ventusky.com/> (дата обращения: 12.02.2023).
 21. *Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С.* Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 280 с.
 22. *Способ и лидарная система для оперативного обнаружения турбулентности в ясном небе с борта воздушного судна:* Пат. 2798694. Россия, МКП, G01S 17/95. *Разенков И.А., Белан Б.Д., Рышков К.А., Ивлев Г.А.;* Федер. гос. бюд. учр. науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. № 2023106962; Заявл. 23.03.2023; Оpubл. 23.06.2023. Бюл. № 18.

I.A. Razenkov, B.D. Belan, A.V. Mikhali'chishin, G.A. Ivlev. The use of turbulent lidar for aviation safety.

A flight experiment was carried out in which turbulence was sounded with the UV lidar BSE-5 from the Tu-134 Optik laboratory aircraft. The experiment was conducted in September 2022 as part of the Arctic exploration program. During the flights, lidar recorded zones of moderate turbulence in the lower troposphere, where the probability of turbulence is maximal, and isolated cases of clear air turbulence (CAT) at an altitude of 9 km. The intensity of the aircraft shaking was monitored using a 3-coordinate accelerometer. It was found that the turbulent lidar can be used in practice for remote detection of turbulent zones at altitudes where most commercial flights are carried out. The prospect of ground-based application of turbulent lidar for solving aviation safety problems during flights in the lower troposphere is shown. The results of the BSE-5 lidar sounding in winter, when an increase in the intensity of turbulence in the 0.4–1.6 km layer was recorded during the passage of a cold front, are presented.