

# Специфика зондирования пограничного слоя атмосферы турбулентным лидаром

И.А. Разенков\*

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

Поступила в редакцию 15.04.2020 г.

Даны рекомендации по применению аэрозольного турбулентного лидара для исследований в пограничном слое атмосферы. Особенность работы турбулентного лидара заключается в том, что наклон трассы зондирования не должен превышать  $10^\circ$ . Получено, что оптимальный угол наклона трассы, при котором можно определить структурную постоянную показателя преломления  $C_n^2$  в интервале высот от 100 м до 1 км, составляет  $4^\circ$ . Этот интервал высот можно расширить в 2 раза, если зондировать под двумя или тремя углами к горизонту.

*Ключевые слова:* турбулентность, лидар, пограничный слой атмосферы; turbulence, lidar, atmospheric boundary layer.

## Введение

Активные дистанционные средства лазерного зондирования (лидары) в настоящее время широко применяются для оперативного контроля таких параметров атмосферы, как коэффициенты полного и обратного аэрозольного рассеяния, температура воздуха, скорость и направление ветра и др. [1]. Из эхосигналов лидара, предназначенного для определения интенсивности оптической турбулентности, находится величина структурной характеристики показателя преломления  $C_n^2$ . Способ решения этой задачи зависит от принципа, на котором конкретный прибор работает. Известен подход к созданию турбулентного лидара, в котором реализована дифференциальная методика регистрации дрожания опорной звезды (differential image motion) [2]. Для DIM-лидара характерны большие размеры, а для получения одного высотного профиля параметра  $C_n^2$  требуется довольно продолжительное время, так как для каждой высоты приходится перефокусировать пучок мощного лазера, чтобы создать искусственную звезду.

Сравнительно недавно появился новый тип аэрозольного оптического локатора, позволяющий получать информацию об интенсивности турбулентности [3]. Это микроимпульсный турбулентный лидар, принцип действия которого основан на эффекте увеличения обратного рассеяния (УОР). Этот эффект был открыт в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова примерно полвека назад [4, 5],

позже А.С. Гурвич предложил применить его для зондирования турбулентности [6], но первое техническое решение не было удачным [7, 8]. Использование микроимпульсного лазера позволило создать компактную, надежную и безопасную для глаз [9, 10] конструкцию УОР-лидара.

Эффект УОР возникает при двукратном распространении волны в случайной среде, когда под воздействием атмосферной турбулентности гауссов лазерный пучок искажается и на некотором расстоянии от источника возникают флуктуации интенсивности. Рассеянная в обратном направлении волна возвращается тем же путем, и на приемной апертуре, которая совмещена с передающей, тоже возникают флуктуации интенсивности. Появление флуктуаций приходящего излучения на приемнике сопровождается повышением среднего значения интенсивности на оси лазерного пучка [4, 11]. Чтобы учесть изменение принимаемого сигнала из-за непостоянства плотности рассеивающих аэрозольных частиц в атмосфере, приемная часть турбулентного лидара двухканальная. Эхосигнал основного приемного канала, на который турбулентность оказывает прямое воздействие, нормируется на сигнал дополнительного приемного канала, на который турбулентность почти не влияет [12].

Опубликованные ранее лидарные данные были получены при зондировании на горизонтальной трассе [13, 14]. В основном эти исследования были направлены на совершенствование техники зондирования [12], изучение пика увеличения обратного рассеяния [13, 15], оптимизацию геометрических характеристик приемо-передатчика [16] и на сравнение лидарных данных с независимыми измерениями характеристики  $C_n^2$  [3, 13].

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

Средства дистанционного зондирования создаются с целью измерения вертикального распределения атмосферных параметров. Представляется актуальным практическое исследование возможностей турбулентного лидара для зондирования высотного профиля  $C_n^2$ , поскольку ранее на основании теоретических расчетов уже высказывалось сомнение в возможности измерения интенсивности турбулентности на наклонных трассах лидарным способом на основе УОР [17]. В настоящей работе мы рассмотрим некоторые особенности наклонного зондирования и сформулируем рекомендации для работы УОР-лидара в турбулентном пограничном слое атмосферы.

### Мысленный эксперимент и модельный расчет

Проведем мысленный эксперимент. Предположим, что над поверхностью земли существует статистически однородный ( $C_n^2 = \text{const}$ ) протяженный турбулентный слой (рис. 1, а). Пусть высота  $h$  этого слоя составляет 100 м, и пусть выше этого слоя турбулентность отсутствует ( $C_n^2 = 0$ ). Результаты зондирования турбулентного слоя под разными углами  $\varphi$  будут отличаться, так как протяженность трассы внутри слоя будет разной и, следовательно, можно ожидать повышения эхосигнала за счет турбулентности при уменьшении угла наклона трассы зондирования.

Подробное описание турбулентного лидара можно найти в [3, 12]. В настоящей работе нам достаточно рассмотреть фактор  $q$ , который В.В. Воробьев назвал «фактором влияния турбулентности на среднюю мощность рассеянного света на приемнике» [18] и который определяется через отношение эхосигналов основного приемного канала к дополнительному приемному каналу. В случае статистически однородной турбулентной среды ( $C_n^2 = \text{const}$ ) хорошее приближение для функции  $q$  [18]:

$$q(x, R, C_n^2) = \frac{0,49 C_n^2 k_0^{7/6} x^{11/6}}{[1 + 0,4 R^2 / r_F^2(x)]^{7/6}}, \quad (1)$$

где  $x$  — расстояние от лидара;  $R$  — радиус приемопередающей апертуры;  $r_F(x) = \sqrt{x / k_0}$  — масштаб Френеля;  $k_0 = 2\pi / \lambda$  — волновое число;  $\lambda$  — длина волны. Числитель формулы (1) — это фактически, с точностью до постоянного множителя, нормированная дисперсия флуктуаций интенсивности (индекс мерцания) для прямого распространения волны [19], а знаменатель — фактор, который учитывает длину волны излучения  $\lambda$  и размер приемопередающей апертуры  $R$ . С увеличением расстояния  $x$  функция  $q(x, R, C_n^2)$  растет почти квадратично; при увеличении  $R$  функция  $q$  быстро уменьшается;  $q$  прямо пропорциональна интенсивности турбулентности ( $C_n^2 \neq 0$ ), а в ее отсутствие ( $C_n^2 = 0$ )  $q = 0$ .

Чувствительность турбулентного лидара можно охарактеризовать некоторым порогом фактора  $q$ , ниже которого преобладает влияние шумов. Этот

порог был определен нами ранее и составляет 0,05 [3]. Используя выражение (1), определим величину параметра  $C_n^2$  в зависимости от угла наклона  $\varphi$  трассы зондирования, когда  $q = 0,05$ . Результат расчета приведен на рис. 1, б, и он дает минимальное значение  $C_n^2$ , при котором система будет способна обнаружить турбулентный слой.

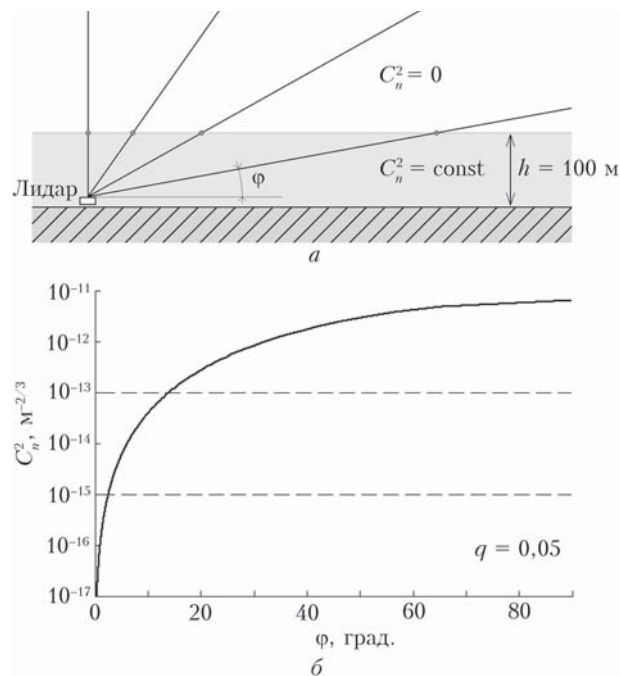


Рис. 1. Схема мысленного эксперимента (а); значение  $C_n^2$  (б), при котором для трассы зондирования под углом наклона  $\varphi$  на границе турбулентного слоя фактор  $q = 0,05$

Проанализируем полученный график. При вертикальном зондировании для  $\varphi = 90^\circ$  получается большое значение  $C_n^2 \approx 10^{-11} \text{ м}^{-2/3}$ , которое вряд ли можно встретить в нормальных условиях. Диапазон реальных значений  $C_n^2$  в интервале от  $10^{-15}$  до  $10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$  на рис. 1, б отмечен пунктирными линиями. Этим значениям параметра  $C_n^2$  соответствует интервал углов  $\varphi$  наклона трассы зондирования от 3 до 13°. Заметим, что для уверенного приема угол зондирования должен быть еще меньше, чем показано на графике. Сильная зависимость кривой  $C_n^2$  на рис. 1, б от  $\varphi$  обусловлена, согласно формуле (1), зависимостью  $q(x) \sim x^{11/6}$ .

Теперь проведем расчет на основе модельного представления профиля  $C_n^2$ , который будет ближе к реальности. На рис. 2, а приведена модель профиля  $C_n^2$  [19], где для интервала высот от 2,5 до 50 м реализуется высотный профиль  $C_n^2 \sim h^{-2/3}$  и от 50 до 1000 м —  $C_n^2 \sim h^{-4/3}$ . Снова воспользуемся выражением (1), чтобы для заданного профиля  $C_n^2(h)$  оценить минимальную высоту  $h_{\text{min}}$  в зависимости от угла наклона трассы  $\varphi$ , когда достигается пороговое значение  $q = 0,05$ . Из предыдущего примера следует, что зондирование с большими углами наклона практически бесполезно. Поэтому для получения оценки  $C_n^2$  с использованием выражения (1) мы вправе полагать, что при небольших углах зон-

дирования параметр  $C_n^2$  будет медленно изменяться вдоль трассы зондирования.

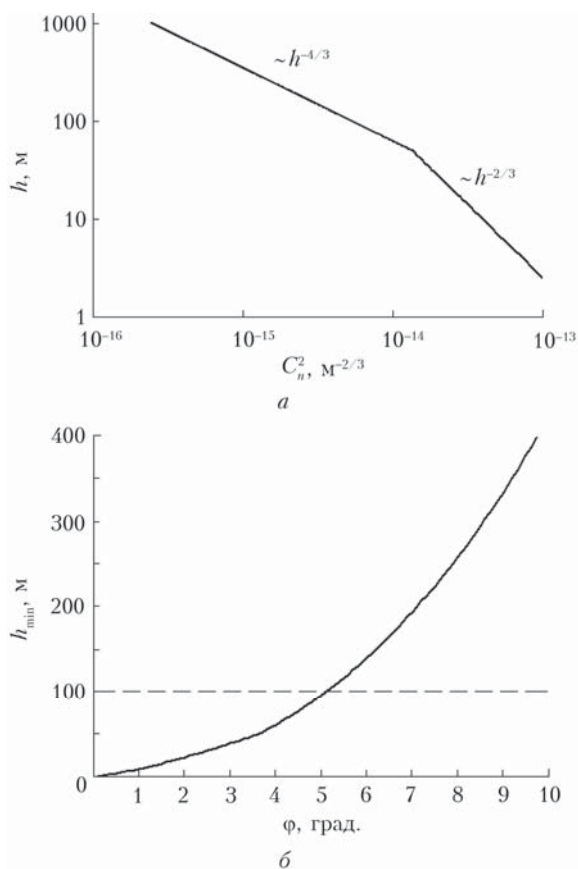


Рис. 2. Модельный профиль  $C_n^2$  (а); график минимальной высоты  $h_{min}$  при зондировании профиля  $C_n^2(h)$  в зависимости от угла наклона трассы  $\phi$ , когда фактор  $q = 0,05$  (б)

Результат расчета для модели на рис. 2, а приведен на рис. 2, б. Наклону трассы зондирования  $\phi = 5^\circ$  соответствует минимальная высота 100 м, отмеченная пунктиром. Чтобы понизить минимальную высоту зондирования  $C_n^2$ , потребуется работать под углом  $< 5^\circ$ . Если максимальная дальность зондирования при этом останется прежней, тогда максимальная высота зондирования  $C_n^2$  при уменьшении  $\phi$  также уменьшится. Заметим, что максимальная дальность и, следовательно, потолок зондирования ограничены шумами и статистикой фотонов [16].

Оказалось, что турбулентному лидару при зондировании пограничного слоя атмосферы требуется своеобразный «разгон» для искажения лазерного пучка при распространении настолько, чтобы в атмосфере возникли флуктуации интенсивности. При обратном рассеянии и распространении в турбулентной среде флуктуации усиливаются и передаются на приемную апертуру, повышая при этом среднее значение эхосигнала основного приемного канала [5, 11].

## Эксперимент

Для проверки предположения о необходимости зондирования параметра  $C_n^2$  вдоль трассы с не-

большим углом наклона был проведен эксперимент с лидаром УОР-4 [20], который после модернизации регулярно используется при проведении атмосферных исследований в поле. УОР-4 работает на  $\lambda = 532$  нм в режиме счета фотонов и имеет приемо-передающие апертуры одинакового размера 50 мм. Во время измерений средняя выходная мощность излучения не превышала 100 мВт при частоте следования лазерных импульсов 2,5 кГц. Два лавинно-пролетных фотодиода в лидаре служат в качестве приемников рассеянного излучения. Эксперимент проводился весной 2020 г. на Базовом экспериментальном комплексе (БЭК) Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева на восточной окраине г. Томска.

Зондирование осуществлялось последовательно под несколькими углами  $\phi$  от 1 до  $16^\circ$ . Один цикл измерений занимал 30 мин. Работа проводилась в темное время суток, когда уровень фоновой засветки был минимальным. Время накопления эхосигналов составляло 5 мин, пространственное разрешение — 60 м. Трасса зондирования была направлена на восток, проходила над полями и лесом. Результаты зондирования для  $\phi = 1, 4$  и  $8^\circ$  показаны на рис. 3. Данные для  $\phi = 12$  и  $16^\circ$  не приводятся, чтобы не загромождать графики и по причине, о которой будет сказано ниже.

На рис. 3 приведены данные двух последовательных циклов измерений. С ростом угла наклона трассы эффект увеличения обратного рассеяния проявляется слабее, на что указывает уменьшение абсолютных значений фактора  $q$  на начальном отрезке от 2 до 6 км (рис. 3, а). После 6 км фактор  $q$  для  $\phi = 1^\circ$  (косые крестики) понижается, а для  $4^\circ$  (кружочки) и  $8^\circ$  (прямые крестики) продолжает расти. Влияние шумов на фактор  $q$  становится значительным начиная с 12 км.

Для получения оценки  $C_n^2$  мы воспользовались формулой (1), которая позволяет из функции  $q(x)$  рассчитать  $C_n^2(x)$ . Заметим, что в настоящее время отсутствует точное решение обратной задачи для турбулентного лидара [6], поэтому по соображениям, изложенным в [14], использовалось приближение В.В. Воробьева [18]. На рис. 3, б кроме экспериментальных данных показана сплошной линией модель параметра  $C_n^2$  (см. рис. 2, а), где в качестве начального значения  $C_n^2 = 4 \cdot 10^{-14} M^{-2/3}$  взято показание датчика (сцинтиллометра), который на горизонтальной трассе 500 м (БЭК) регистрировал флуктуации интенсивности непрерывного лазера (532 нм). Параметр  $C_n^2$  определялся из относительной дисперсии флуктуаций интенсивности с интервалом 5 мин [19].

На рис. 3, б, г лидарные данные для  $\phi = 1^\circ$  совпадают с моделью на высоте  $\sim 100$  м. Данные для  $\phi = 4^\circ$  располагаются ближе к модели начиная с 200 м, а данные для  $\phi = 8^\circ$  совпадают с данными для  $\phi = 4^\circ$  начиная с 400 м. Данные для  $\phi = 8^\circ$  дают приемлемый результат до высоты  $\sim 1,6$  км, что соответствует дальности зондирования 12 км. С увеличением угла наклона трассы значения  $C_n^2$  смещаются по высоте.

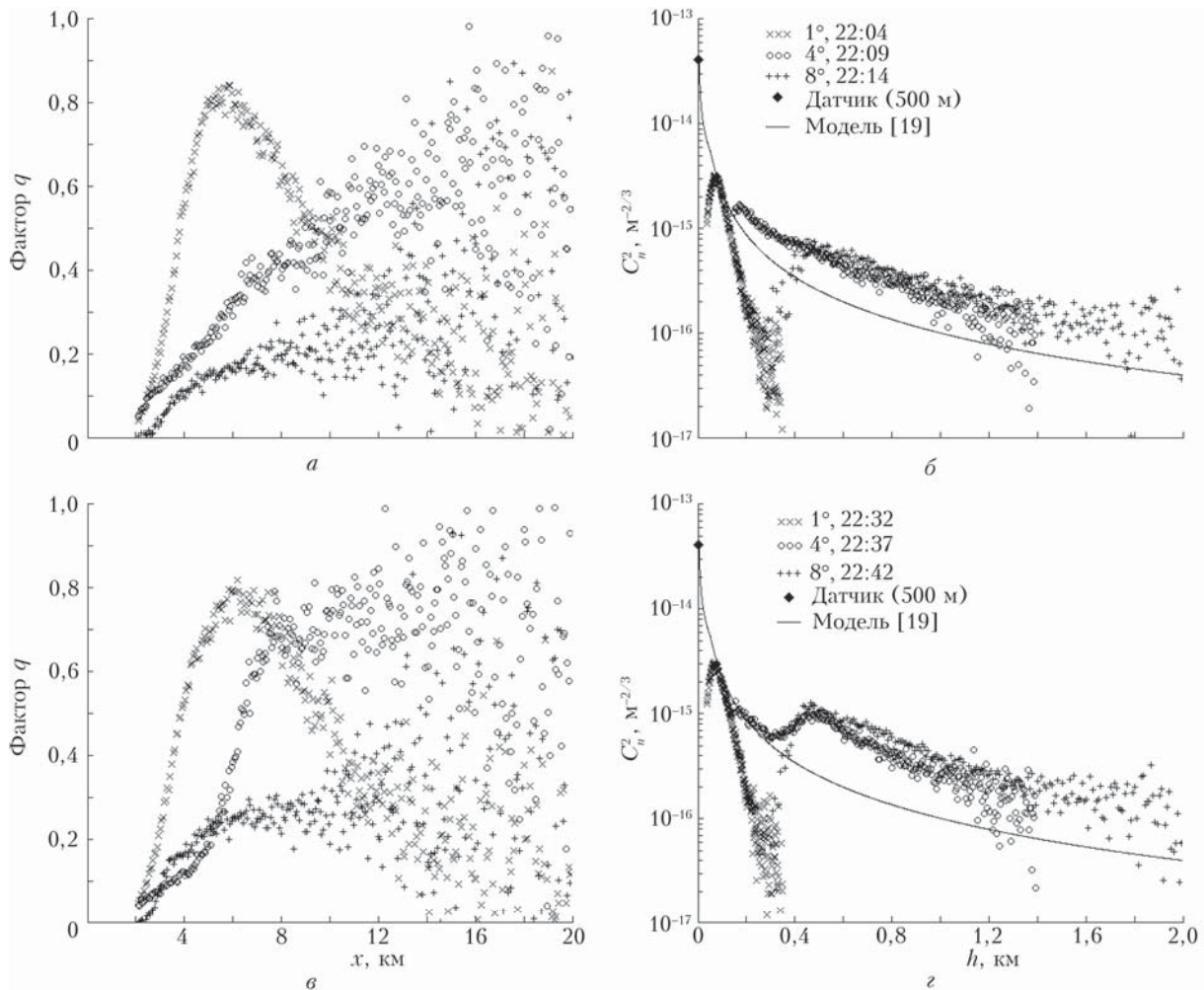


Рис. 3. Фактор  $q$  (а, в) и оценка параметра  $C_n^2$  (б, г) для наклонов трассы зондирования 1, 4 и 8°; измерения в 22:04–22:14 30 марта 2020 г. (а, б) и 22:32–22:42 31 марта 2020 г. (в, г) (по местному времени), окраина г. Томска

Во время измерений (рис. 3) в пограничном слое атмосферы происходило формирование турбулентного слоя на высоте  $\sim 500$  м. На этот факт указывают результаты следующего цикла измерений (рис. 3, в, г). Отметим, что наиболее отчетливо этот слой наблюдается в данных трассы с наклоном 4°. При этом фактор  $q$  (кружочки) сначала медленно увеличивался до дистанции 5 км, а затем рос быстрее до дистанции 8 км. Профили  $q(x)$  и  $C_n^2(h)$  для  $\varphi = 8^\circ$  после высоты 400 м тоже возросли, причем  $C_n^2(h)$  для трасс с углами наклона 4 и 8° почти совпадают. Полагаем, что это совпадение говорит о правомерности использования формулы (1) для получения оценок  $C_n^2(h)$ .

С увеличением угла наклона трассы зондирования результат для  $C_n^2(h)$  смещается по высоте, при этом из-за шумов увеличивается разброс значений. Данные для  $\varphi = 12$  и  $16^\circ$  мы не приводим, так как фактически они ничего не добавляют к уже полученному результату при зондировании под меньшими углами  $\varphi = 4$  и  $8^\circ$ . На первый взгляд это кажется парадоксальным, поскольку при увеличении угла зондирования эхосигнал с заданной

высоты растет, так как уменьшается расстояние. Но дело в том, что этот рост не обусловлен турбулентностью, более того, из-за уменьшения турбулентной толщи с подъемом трассы зондирования добавка в эхосигнал за счет эффекта УОР в виде фактора  $q$  только уменьшается.

Зондированием вдоль трасс с разным углом наклона можно расширить диапазон высот определения  $C_n^2(h)$ . Если зондирование осуществляется только под одним углом, тогда следует выбрать некое среднее оптимальное его значение не выше  $10^\circ$ , которое обеспечит максимальный интервал высот или будет соответствовать решению конкретной задачи. Мы полагаем, что оптимальным можно считать угол наклона трассы зондирования от 3 до  $5^\circ$ .

Вышеописанный эксперимент по зондированию под разными углами проводился 31 марта 2020 г. По его окончании лидар УОР-4 в автоматическом режиме продолжал работать под углом  $4^\circ$ . На рис. 4 приведен результат непрерывной записи за 21 час, с 23:00 31 марта до 20:00 1 апреля 2020 г. Данные представлены в виде пространственно-временного распределения  $C_n^2$  до высоты 1200 м.

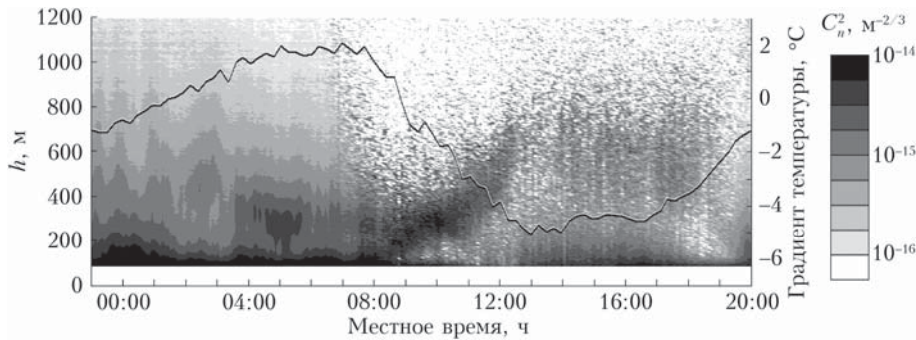


Рис. 4. Пространственно-временное распределение параметра  $C_n^2$ , полученное лидаром УОР-4, и временной ход градиента температуры (сплошная линия), полученный радиометром МТР-5. Наклон трассы зондирования  $4^\circ$ , 1 апреля 2020 г., окраина г. Томска

Более темный цвет на рис. 4 соответствует большей интенсивности турбулентности. До 8:00 умеренная турбулентная зона простиралась от земли до высоты 400–600 м.

Температурный градиент по данным сканирующего радиометра МТР-5 [21] в интервале высот от 10 м до 500 м на рис. 4 показан сплошной линией (шкала справа). До 9:00 пограничный слой атмосферы был стратифицирован устойчиво с градиентом до  $+2^\circ\text{C}$  в 07:00. Минимальная температура  $+2^\circ\text{C}$  на высоте 500 м была в 08:00, а с восходом солнца началось нагревание поверхности и имел место подъем инверсии до высоты  $\approx 1$  км после полудня. Максимальная температура  $+7^\circ\text{C}$  на высоте 500 м наблюдалась в 19:00, а минимальный градиент  $-5^\circ\text{C}$  – в 13:30. В приземном слое минимум  $C_n^2$  наблюдался утром с 10:00 до 12:00 и вечером с 18:00 до 20:00. Влияние фоновой засветки в светлое время суток понижает максимальную высоту определения параметра  $C_n^2$  до 500–1000 м в зависимости от положения солнца относительно трассы зондирования.

Чувствительность турбулентного лидара такова, что за минимальное регистрируемое значение  $C_n^2$  можно принять величину  $10^{-16}\text{ м}^{-2/3}$  [14], которая совпадает со значением модели  $C_n^2(h)$  на высоте 1–2 км (см. рис. 2, а). С учетом полученных экспериментальных данных  $\varphi = 4^\circ$  можно считать оптимальным. При этом  $C_n^2$  определяется в интервале высот от 100 м до 1 км; диапазон определяемых значений  $C_n^2$  в пограничном слое составляет 2–3 порядка, начиная с  $10^{-16}\text{ м}^{-2/3}$ . Для расширения интервала высот вниз до 50 м и вверх до 2 км зондирование следует производить по двум или трем трассам под углами от  $1$  до  $10^\circ$ . Заметим, что представленные здесь данные не единственные, а весь имеющийся материал в дальнейшем будет систематизирован.

### Заключение

Показано, что в пограничном слое атмосферы зондирование вертикального распределения структурной характеристики  $C_n^2$  турбулентным лидаром оптимально производить при наклоне трассы зон-

дирования  $4^\circ$ , при этом параметр  $C_n^2$  определяется в интервале высот от 100 м до 1 км. Зондирование под разными углами, например  $\varphi = 2, 4$  и  $8^\circ$ , позволит в 2 раза расширить интервал высот при проведении исследований в пограничном слое.

Полученные результаты наводят на мысль, что УОР-лидар в перспективе может быть применен для контроля турбулентной обстановки на глиссаде – траектории снижения летательных аппаратов при посадке. Международный стандарт для наклона глиссады –  $3^\circ$ . Турбулентный лидар при таком угле зондирования будет максимально эффективен, так как позволит оперативно получать информацию об интенсивности турбулентности на дистанции до 10–15 км в темное время суток и на дистанции до 6–8 км в светлое время. Использование турбулентного лидара на аэродроме будет способствовать повышению безопасности при взлете и посадке самолетов. В связи с этим, если работы будут продолжены, особое внимание следует уделить исследованию возможности дистанционного обнаружения нисходящих и восходящих потоков турбулентным лидаром.

Автор выражает глубокую признательность А.П. Ростову за консультации, полезное обсуждение результатов работы и за помощь в организации измерений интенсивности турбулентности с помощью сцинтиллометра.

Работа выполнена по проекту фундаментальных исследований РАН № АААА-А17-117021310149-4.

1. Хинкли Э.Д. Лазерный контроль атмосферы. М.: Мир, 1979. 416 с.
2. Gimmetstad G.G., Roberts D.W., Stewart J.M., Wood J.W. Development of the lidar technique for the profiling optical turbulence // Opt. Eng. 2012. V. 51, iss. 10. DOI: 10.1117/1.OE.51.10.101713.
3. Банух В.А., Разенков И.А. Лидарные измерения усиления обратного рассеяния // Оптика и спектроскопия. 2016. Т. 120, № 2. С. 339–348.
4. Виноградов А.Г., Гурвич А.С., Кашкаров 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.

5. *Виноградов А.Г., Кравцов Ю.А., Татарский В.И.* Эффект усиления обратного рассеяния на телах, помещенных в среду со случайными неоднородностями // Изв. вузов. Радиофиз. 1973. Т. 16, № 7. С. 1064–1070.
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. *Лидар*: Пат. № 116245. Россия, МПК, G 01 S 17/88. Гурвич А.С.; Учреждение Российской академии наук Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова (ИФА РАН). № 2011150933/28; Заявл. 15.12.2011; Оpubл. 20.05.2012.
8. *Афанасьев В.Л., Гурвич А.С., Ростов А.П.* Экспериментальное исследование эффекта усиления обратного рассеяния в турбулентной атмосфере // Тез. XVIII Междунар. симпози. «Оптика атмосфер. и океана, физ. атмосфер.», Иркутск, 2012. Томск: ИОА СО РАН, 2012. С. 95–99.
9. *Устройство для регистрации усиления обратного рассеяния в атмосфере*: Пат. № 153460. Россия, МПК, G 01 S 17/95. Разенков И.А., Банах В.А., Надеев А.И.; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. № 2014149951/28; Заявл. 10.12.2014; Оpubл. 20.07.2015. Бюл. № 20.
10. *Устройство для регистрации усиления обратного рассеяния в атмосфере*: Пат. № 165087. Россия, МПК, G 01 S 17/95. Разенков И.А., Банах В.А.; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. № 2016117721/28; Заявл. 04.05.2016; Оpubл. 10.10.2016.
11. *Кравцов Ю.А., Саичев А.И.* Эффекты двукратного прохождения волн в случайно неоднородных средах // Усп. физ. наук. 1982. Т. 137, вып. 3. С. 501–527.
12. *Разенков И.А.* Турбулентный лидар. I. Конструкция // Оптика атмосфер. 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.
13. *Разенков И.А.* Турбулентный лидар. II. Эксперимент // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 2. С. 81–89; *Razenkov I.A.* Turbulent lidar: II – Experiment // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 3. P. 281–289.
14. *Разенков И.А.* Оценка интенсивности турбулентности из лидарных данных // Оптика атмосфер. и океана. 2020. Т. 33, № 1. С. 1–9; *Razenkov I.A.* Estimation of the turbulence intensity from lidar data // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 3. P. 245–253.
15. *Banakh V.A., Razenkov I.A.* Refractive turbulence strength estimation based on the laser echo signal amplification effect // Opt. Lett. 2016. V. 41, iss. 19. P. 4429–4432.
16. *Разенков И.А.* Оптимизация параметров турбулентного лидара // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 1. С. 70–81; *Razenkov I.A.* Optimization of parameters of a turbulent lidar // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 3. P. 349–360.
17. *Банах В.А., Фалиц А.В., Залозная И.В.* Усиление средней мощности эхосигнала пространственно ограниченного лазерного пучка в турбулентной атмосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2019. Т. 32, № 5. С. 371–375.
18. *Воробьев В.В.* О применимости асимптотических формул восстановления параметров «оптической» турбулентности из данных импульсного лидарного зондирования. II. Результаты численного моделирования // Оптика атмосфер. и океана. 2016. Т. 29, № 11. С. 987–993; *Vorob'ev V.V.* On the applicability of asymptotic formulas of retrieving “optical” turbulence parameters from pulse lidar sounding data: II – Results of numerical simulation // Atmos. Ocean. Opt. 2017. V. 30, N 2. P. 162–168.
19. *Гурвич А.С., Кон А.И., Миронов В.Л., Хмелевцов С.С.* Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976. 280 с.
20. *Razenkov I.A., Banakh V.A., Gorgeev E.V.* Lidar “BSE-4” for the atmospheric turbulence measurements. Proc. SPIE 10833, 24th Internat. Sympos. Atmos. Ocean. Opt.: Atmos. Phys. V. 10833. P. 108332X. DOI: 10.1117/12.2505183.
21. URL: <http://attex.net/RU/index.php> (last access: 15.03.2020).

***I.A. Razenkov. Peculiarities of atmospheric boundary layer sounding with a turbulent lidar.***

Recommendations for the use of aerosol turbulent lidar for research in the atmospheric boundary layer are presented. The peculiarity of the turbulent lidar is that the sounding path angle should not exceed 10°. It is found that the optimal angle is 4°, at which it is possible to determine the structural constant of the refractive index  $C_n^2$  in the range of altitudes from 100 m to 1 km. This range can be extended by 2 times if sounding at two or three angles to the horizon.