

В.А. Ковалев, Е.Е. Рыбаков, М.В. Захарян, В.М. Игнатенко

ОБ ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ДАННЫХ ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВИДИМОСТИ В НАКЛОННЫХ НАПРАВЛЕНИЯХ

Огни высокой интенсивности взлетно-посадочной полосы становятся невидимыми, когда оптическая толщина атмосферного слоя между наблюдаемыми огнями и наблюдателем достигает 3-х и более (до 10-ти и более в ночное время), в то время, как дальность действия лидара соответствует значениям τ , равным $1,5 \div 2$. В этом случае представляется оправданным допущение о независимости среднего показателя ослабления, измеренного в некотором слое атмосферы h , от угла наклона к горизонту. Это основное допущение было проверено в большой серии лидарных наблюдений.

В соответствии с рекомендациями ИКАО и Конференций по воздушной навигации существует требование об обеспечении летчика перед совершением посадки информацией о дальности наклонной видимости (ДНВ), которая дала бы ему возможность оценить, сможет ли он заблаговременно установить необходимый контакт с определенным количеством наземных ориентиров. Конкретное содержание понятия дальности наклонной видимости не определено, но ДНВ должна указывать, на какой высоте пилот должен ожидать вступления в визуальный контакт с наземной светосигнальной системой; должно быть также подтверждение, что этот контакт будет сохраняться до завершения посадки [1].

Для того, чтобы оценить ДНВ или высоту визуального контакта (ВВК), необходима информация о том, как средний показатель ослабления или коэффициент пропускания изменяется с высотой. Такая информация может быть получена с помощью приборов, основанных на методах лазерно-локационного зондирования атмосферы. К сожалению, существенным недостатком таких приборов (лидаров) при работе в условиях ухудшенной видимости является их малая дальность действия по сравнению с искомой дальностью видимости световых ориентиров взлетно-посадочной полосы (огней приближения или посадочных огней высокой интенсивности). Известно, что расстояние, с которого эти огни могут быть обнаружены, соответствует оптической толщине атмосферного слоя между наблюдателем и наблюдаемым огнем, равной 3 и более, достигая в темное время суток значений порядка 10–12. В то же время дальность действия лидаров ограничена оптическими толщинами около 1,5–2 [2–4]. Естественным способом преодоления этой трудности при измерении наклонной видимости аэродромных огней является использование тех или иных методов экстраполяции данных лидарного зондирования за пределы зондируемого слоя. Вопросам практической применимости экстраполяции при наклонном лидарном зондировании и посвящена данная статья.

Наиболее простым подходом к решению проблемы определения видимости в негоризонтальных направлениях является использование условия послышной атмосферы, согласно которому нижний приземный слой атмосферы представляется в виде набора тонких горизонтальных слоев, внутри каждого из которых показатель ослабления постоянен [5]. Если условие реально выполнимо, то проблема определения ДНВ разрешима. Отметим также, что такое условие может быть одновременно использовано и как априорное допущение, устраняющее неоднозначность решения уравнения лазерной локации.

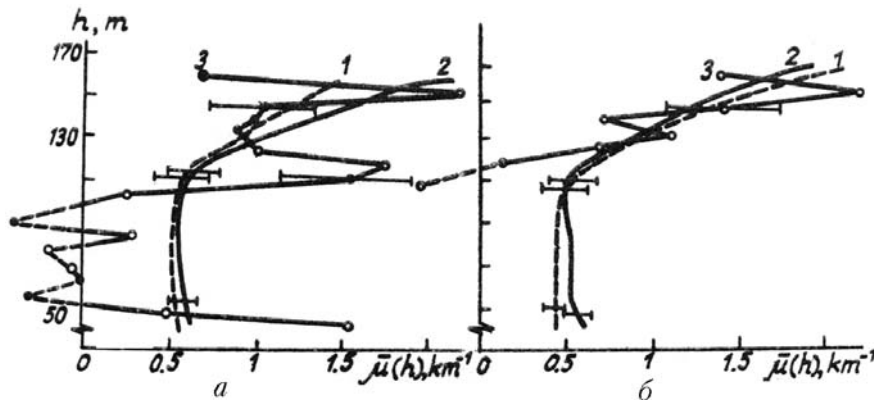


Рис. 1. Вид профилей показателя ослабления при использовании разных методов обработки сигналов обратного рассеяния

Однако первые же экспериментальные исследования, проведенные нами, подтвердили справедливость высказанных в разное время в литературе сомнений о выполнимости модели слоисто-однородной атмосферы в реальных условиях; это условие, если и выполняется, то с большими оговорками, и его непосредственное использование на практике, при определении наклонной видимости, весьма затруднено. В качестве иллюстрации на рис. 1 приведены профили показателя ослабления в зависимости от высоты $\bar{\mu}(h)$, полученные по данным лидара «Электроника-03» с аналого-цифровым преобразователем при зондировании под углами 8 и 12° к горизонту в относительно стабильной слабозамутненной облачной атмосфере. При построении профилей $\bar{\mu}(h)$ использовалось осреднение сигналов обратного рассеяния по 5–10 реализациям, причем кривые 1, 2 получены обычными интегральными методами обработки [4], ломаные 3 – методом Кано [6], основанным на непосредственном применении условия послойно-однородной атмосферы. Использование последнего, как это видно из рисунка, приводит к весьма сильным вариациям расчетных значений показателя ослабления (в ряде случаев получаются даже отрицательные значения $\bar{\mu}(h)$), что может быть обусловлено как большой чувствительностью метода [6] к инструментальным погрешностям прибора, так и плохим выполнением исходного априорного допущения этого метода о послойной однородности атмосферы. Отметим, что измерения, проведенные в течение нескольких часов, дали профили, аналогичные приведенным на рис. 1, при этом кривые 1, 2, при построении которых условие послойной однородности не использовалось, имели достаточно стабильный характер.

Таким образом, при экстраполяции данных лидарного зондирования за пределы зондируемого слоя следует использовать менее жесткие априорные допущения, нежели условие послойно-однородной атмосферы. Таким условием является, на наш взгляд, предложенное в [7] условие независимости среднего показателя ослабления в интересующем нас слое h от угла зондирования. Иначе говоря, для измерения видимости в некотором слое h достаточно, чтобы оптическая толщина этого слоя под произвольными углами наклона φ и ψ к горизонту подчинялась бы условию

$$\frac{\tau_{\varphi}(h)}{\tau_{\psi}(h)} = \frac{\sin\psi}{\sin\varphi}. \quad (1)$$

Другой вид записи условия (1)

$$\int_0^h \mu_{\varphi}(h') dh' = \int_0^h \mu_{\psi}(h') dh', \quad (1a)$$

где $\mu_{\varphi}(h')$ и $\mu_{\psi}(h')$ – локальные значения показателя ослабления на пути зондирующего луча при углах зондирования φ и ψ соответственно.

На рис. 2 представлены иллюстрирующие вышеизложенные положения профили локального (рис. 2, а) и среднего (рис. 2, б) показателя ослабления в функции высоты h , полученные при лидарном зондировании атмосферы под разными углами наклона к горизонту; каждый профиль, как и на рис. 1, получен по осредненному сигналу обратного рассеяния. Условия, при которых проводилось зондирование (20.11.1987 г.), указаны в таблице.

Приведенные на рис. 2 профили отражают довольно распространенную, по-видимому, атмосферную ситуацию, когда структура подоблачной дымки, сохраняя общую тенденцию возрастанию облака, в то же время непрерывно варьирует в пространстве и во времени. Нетрудно заметить, что выбор условия (1) (или (1a)) в этом случае предпочтительнее использования традиционного условия равенства локальных значений $\mu_{\varphi}(h')$ и $\mu_{\psi}(h')$ в пределах $0 \leq h' \leq h$.

Естественно, что в условиях реальной атмосферы вполне вероятны ситуации, когда условие (1, 1a) также может не выполняться (например, при образовании или рассеянии тумана, при наличии отдельных крупномасштабных неоднородностей на трассе зондирования и т.д.). В этих случаях результаты лидарного измерения наклонной дальности видимости окажутся зависящими от установленного угла зондирования. Соответственно оптимальным способом проверки выполнимости условия (1, 1a) на практике является нахождение того или иного параметра, определяющего наклонную видимость в приземном слое, по сигналам лидара, полученным при разных углах зондирования; если это условие выполняется, то результаты лидарного измерения не будут меняться при изменении угла зондирования.

Практическая применимость условия (1, 1a) в реальной атмосфере исследовалась с помощью лидара, построенного по общепринятой схеме (приемо-передающее устройство – аналого-цифровой преобразователь – ЭВМ) и работающего на длине волны 0,694 мкм. В качестве параметров, характеризующих видимость в приземном слое, исследовались следующие связанные с ней величины [8–12]:

- высота обнаружения огней высокой интенсивности в районе порога ВПП с глиссады снижения (h_1);
- высота установления визуального контакта с необходимой для ориентации пилота в пространстве группой огней приближения (h_2);
- высота $h_{0,m} = S_{0,m} \cdot \sin\nu_0$, определяемая как проекция на вертикальную ось метеорологической оптической дальности $S_{0,m}$, измеренной под углом глиссады ν_0 .

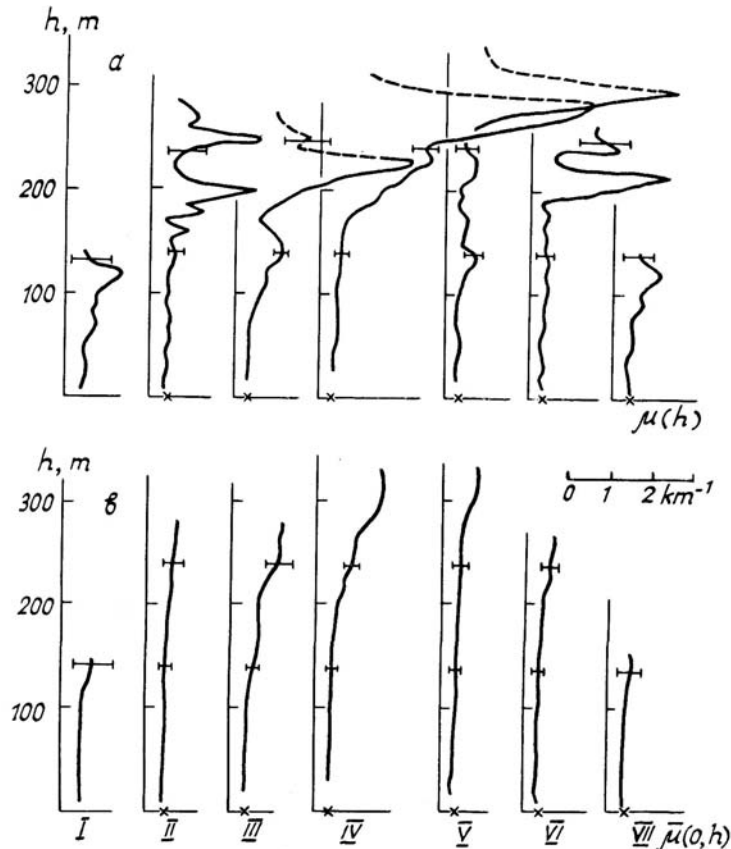


Рис. 2. Профили показателя ослабления (локальные $\mu(h)$ и средние $\bar{\mu}(0, h)$), полученные при лидарном зондировании под разными углами наклона. Крестиками на горизонтальных осях показаны значения показателя ослабления на поверхности Земли по показаниям базисного регистратора в момент зондирования

№ п/п	Время зон- диро- вания	Угол зон- диро- вания, град	Гори- зонталь- ная МОД*, км	Высота обла- ков, м
1	18.38	3	5,2	—
2	18.43	6	5,8	—
3	18.48	11	6,0	—
4	18.53	17	6,0	340
5	19.10	11	6,4	440
6	19.15	6	6,4	—
7	19.19	3	6,6	2

*Метеорологическая оптическая дальность.

Кривые временного хода параметров h_1 , h_2 и $h_{0,м}$, полученные по результатам лидарного зондирования под разными углами к горизонту, показаны на рис. 3.

Приведенные кривые типичны для всего массива полученных данных. Характерными особенностями кривых является, во-первых, корреляция значений высот h с дальностью видимости в нижнем слое; коэффициент корреляции в ряде атмосферных ситуаций достигает значений 0,91. Во-вторых, в большинстве случаев наблюдалась относительная временная стабильность этих величин и отсутствие их резких колебаний от измерения к измерению (исключениями являются случаи резкого изменения видимости во времени или наличие разорванной, многослойной облачности).

Результаты экспериментальных исследований показывают, что высоты h_1 , h_2 , $h_{0,м}$, полученные на основе лидарных данных, как правило, не зависят от установленного угла зондирования (при условии, естественно, соответствия дальности зондирования под выбранным углом искомой высоте), что подтверждает целесообразность использования допущения вида (1, 1а) при лидарном определении

негоризонтальной видимости. Более того, степень постоянства результатов измерения при изменении угла зондирования может служить критерием достоверности полученных результатов.

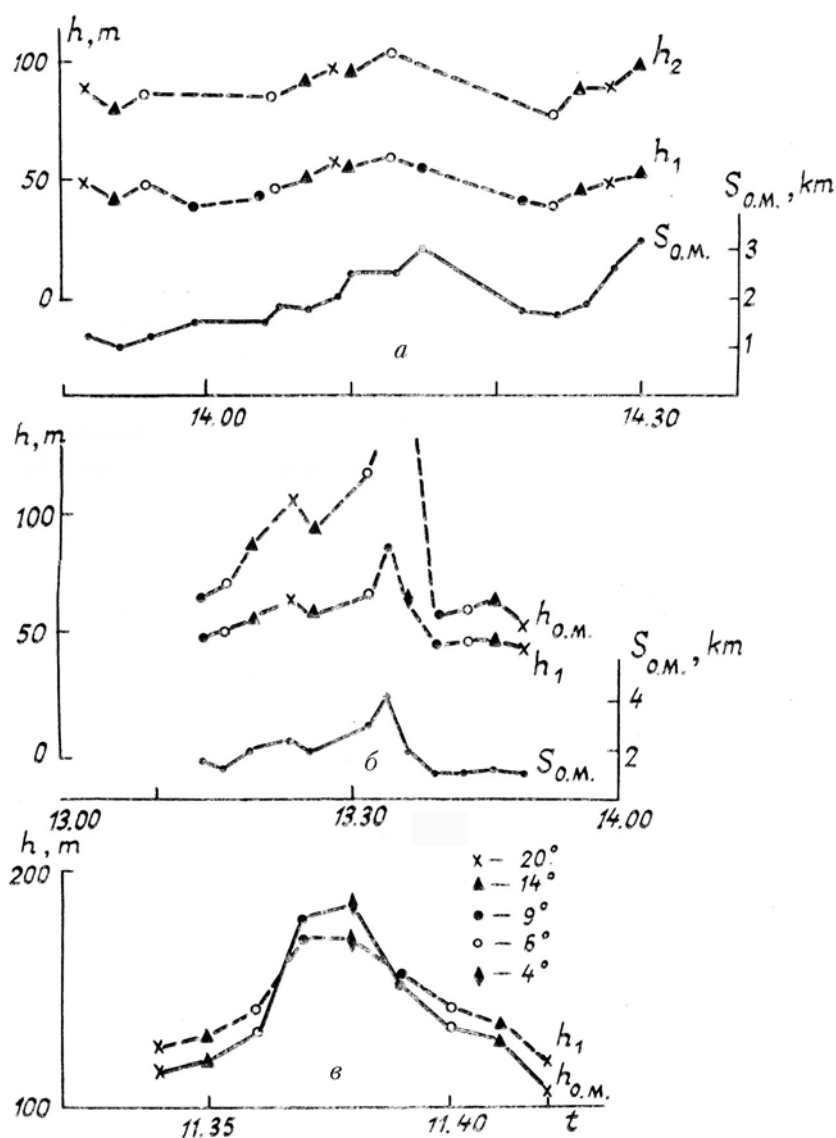


Рис. 3. Временной ход характеристик наклонной видимости по данным многоуглового зондирования

Для иллюстрации сказанного на рис. 3, в показан ложный ход параметров h_1 и $h_{0.m.}$, наблюдавшийся во время измерений характеристик видимости 4.11.89 г. Очевидным доказательством ложности этого хода является устойчивая корреляция между углом зондирования и значением измеренных высот h_1 и $h_{0.m.}$. Появление такого ложного хода, как показывает анализ, было обусловлено не нарушением условия (1, 1а), а влиянием так называемого краевого эффекта [4] или, в более широком смысле, несоответствием использованного алгоритма обработки лидарных сигналов существовавшей атмосферино-оптической ситуации.

Возникновение систематического хода определяемого параметра при изменении угла зондирования может служить сигналом о неправильном выборе граничных условий при решении уравнения лазерной локации; иначе говоря, постоянство искомого параметра при изменении угла зондирования может служить одним из критериев для апостериорной оценки правильности выбранных алгоритмов обработки лидарных условий.

В 1989 г. лидарные измерения характеристик наклонной видимости проводились непосредственно на аэродроме; лидар при этом размещался на ближнем приводе рабочего старта на расстоянии около 1 км от начала ВПП. На рис. 4 показан полученный по результатам лидарного зондирования под тремя различными углами к горизонту (9° , 14° и 20°) временной ход высоты h_1 (кривая 1) и высоты h_2 (кривая 2). Кривая 3 показывает временной ход нижней границы облаков по штатному облакомеру в районе ближнего привода. Цифрой 4 отмечены фактические значения высот визуального обнаружения ВПП с глиссады снижения, полученные с борта воздушных судов во время посадки.

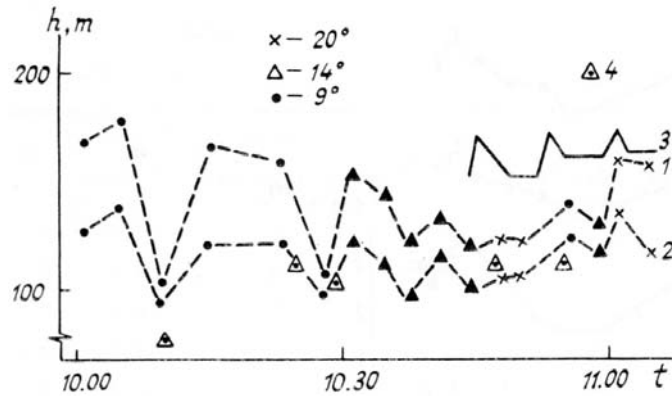


Рис. 4. Временной ход характеристик наклонной видимости по данным лидарных измерений на аэродроме и результаты визуальных наблюдений с воздушных судов

Приведенные результаты являются типичными для полученного массива данных. Всего во время сравнений было зафиксировано 73 высоты установления визуального контакта с борта воздушных судов и получено 1300 отсчетов по лидарному измерителю. Результаты сравнения подтверждают целесообразность использования исходного допущения (1, 1а) при лидарном определении характеристик наклонной видимости.

1. Manual of Runway Visual Range Observing and Reporting Practices. Doc. ИКАО. 1981. № 9328-AN/908.
2. Кавкьянов С.И., Креков Г.М. //Исследование атмосферного аэрозоля методами лазерного зондирования. Новосибирск: Наука, 1980. С. 3–17.
3. Зуев В.Е., Кавкьянов С.И., Креков Г.М. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1983. Т. 19. № 3. С. 255–266.
4. Зуев В.Е., Креков Г.М., Крекова М.М. //Дистанционное зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1978. С. 3–46.
5. Рацимор М.Я. //Метеорология и гидрология. 1967. № 1. С. 28–33.
6. Капо М. //Pap. Met. Geophys. 1968. V. 19. № 1. P. 121–129.
7. Ковалев В.А. //Тр. ГГО. 1974. Вып. 324. С. 117–184.
8. Рацимор М.Я. Наклонная видимость. Методическое пособие для специалистов ГАМУ, АМУ и АМСГ. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 136 с.
9. Рацимор М.Я. //Метеорология и гидрология. 1984. № 12. С. 39–46.
10. Белгородский С.Л., Титов А.Н. //Наука и техника гражданской авиации. Серия: системы навигации, посадки и управления воздушным движением. 1981. № 1. С. 14–18.
11. Гаврилов В.А. Видимость в атмосфере. Л.: Гидрометеоздат, 1966. 323 с.
12. Ковалев В.А. Видимость в атмосфере и ее определение. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 215 с.

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова,
Госкомгидромет СССР, Ленинград

Поступила в редакцию
21 мая 1990 г.

V. A. Kovalev, E. E. Rybakov, V. M. Ignatenko, M. V. Zakharyan. **On the Extrapolation of Lidar Data for Atmospheric Visibility Determination.**

High intensity runway lights become invisible when the optical thickness (τ) of the atmospheric layer between the light and an observer is 3 or more (up to 10 at night time), while the lidar operation range corresponds to τ value of 1.5 to 2. In this case an assumption seems to be justified that the mean extinction coefficient measured in an atmospheric layer h is independent on the elevation angle. This basic assumption has been checked in a long series of the lidar observations.