

И. Колев, Л. Йорданова, Вл. Поляков, О. Първанов

**ЛИДАРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ СТРАТИФИКАЦИЙ ПРИ РАДИАЦИОННЫХ ИНВЕРСИЯХ**

На основе лазерного зондирования аэрозоля в области температурных инверсий обнаружена связь корреляционных функций лидарных сигналов с параметрами устойчивости атмосферы. Показано, что в слоях, соответствующих значениям числа Ричардсона более 0,25, наблюдаются медленные изменения аэрозоля с периодами более 4 мин, которые можно связать с внутренними гравитационными волнами.

Исследования аэрозольной стратификации, температуры и скорости ветра в устойчиво стратифицированном планетарном пограничном слое (ППС) пока мало используются в экспериментальной метеорологии. В устойчиво стратифицированной атмосфере интенсивность турбулентности намного меньше, чем при конвекции. А это создает определенные трудности при исследованиях. Одновременное же существование в этих условиях турбулентности и внутренних волн дополнительно осложняет интерпретацию полученных данных. Затруднения связаны с наличием высокочастотных и низкочастотных колебаний исследуемых параметров [1,2]. Низкочастотные колебания требуют большой длительности непрерывных реализаций, а высокочастотные — высоких частот дискретизации. Эти два условия противоречат друг другу ввиду ограниченности оперативной памяти используемых ЭВМ.

В [1] дана сравнительно полная картина изменения температуры и скорости ветра в условиях радиационной инверсии для высот от 8 до 120 м. Была использована аппаратура, укрепленная на 300-метровой мачте Института экспериментальной метеорологии. В работах [2,3] такие же исследования были проведены на высотах до нескольких сотен метров радиолокаторами и содарами.

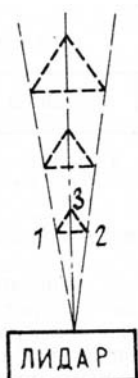


Рис. 1. Геометрическая схема лидарных измерений

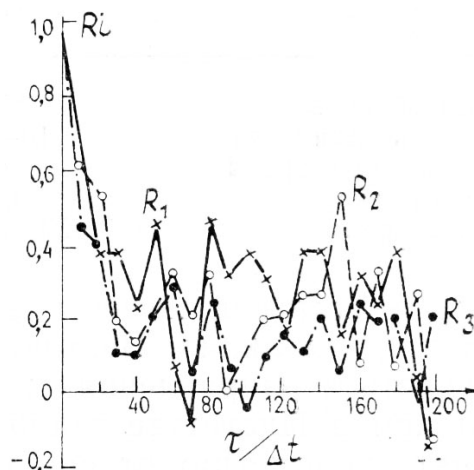


Рис. 2. Автокорреляционные функции лидарных сигналов при  $Ri < Ri_{кр}$ ; высота  $H = 540$  м, длительность реализаций  $T = 400$  с

Аэрозольные стратификации при температурных инверсиях являются объектом лидарных и содарных исследований [4–8]. При этом лидары и содары по сравнению с традиционными средствами (привязные аэростаты, самолеты-лаборатории) позволяют исследовать динамику этих слоев, благодаря более высокой временной и пространственной разрешающей способности. Лидары имеют дальность действия 1000–1500 м и это делает возможным исследование всего ППС, что недоступно обычным методам.

В работе приведены результаты лидарных исследований статистических характеристик аэрозольных неоднородностей для устойчиво стратифицированного ППС в сравнении с данными о протекающих метеорологических процессах, полученными традиционными средствами. В измерениях использован лидар, созданный в Институте электроники БАН. Особенностью данного лидара является наличие трех трасс зондирования, взаимное расположение которых понятно из рис. 1. Подробное описание лидара дано в [9], а в табл. 1 приведены его основные параметры, характеризующие потенциал.

Таблица 1

Лазер	Длина волны, нм	Длительность импульса, нс	Энергия импульса, Дж	Частота повторения, Гц	Приемный телескоп, мм	Фото-детектор	ЭВМ, память
ЛТИПЧ-7	532	15	0,005	12,5	∅ 150		64 Кбайт
«Quantel»	532	13	0,5	10	$f=2200$	ФЭУ-84	СС625;

Лидарные наблюдения проводились в летнее время с двух до пяти часов утра, когда температурные инверсии имеют квазистационарный участок развития. Длина отдельных реализаций составляла 1666 дискретов с периодом дискретизации  $\Delta t = 0,24$  с. Метеорологическая обстановка в период экспериментов дана в табл. 2.

Таблица 2

Метеорологические условия	17.07.84	18.07.84
Высота облаков	1500 м	1000—1200 м
Дальность видимости	10—12 км	10—12 км
Состояние атмосферы	ясно	ясно
Скорость ветра	6 м/с	8 м/с
Местное время	01-50; 02-40; 03-30	02-36; 03-00; 03-30

Метеопараметры приведены для аэропорта г. Софии, вблизи которого располагался лидар. Вертикальные профили температуры, влажности, скорости и направления ветра в 02 и 08 часов получены радиозондированием в Институте гидрологии и метеорологии БАН, находящемся в пяти километрах от места эксперимента. В некоторых случаях скорость ветра определялась шар-пилотным зондированием.

В результате лидарных исследований летних радиационных температурных инверсий можно отметить некоторые закономерности поведения связанных с ними аэрозольных слоев (АС):

- АС уплотняются в области температурной инверсии (200—300 м);
- в большинстве случаев скорость ветра достигает максимального значения ниже слоя температурной инверсии. В тех случаях, когда АС наблюдаются выше верхней границы температурной инверсии, скорость ветра выше инверсионного слоя незначительно возрастает, меняя направление;
- наиболее вероятное положение АС — ниже верхней границы температурной инверсии.

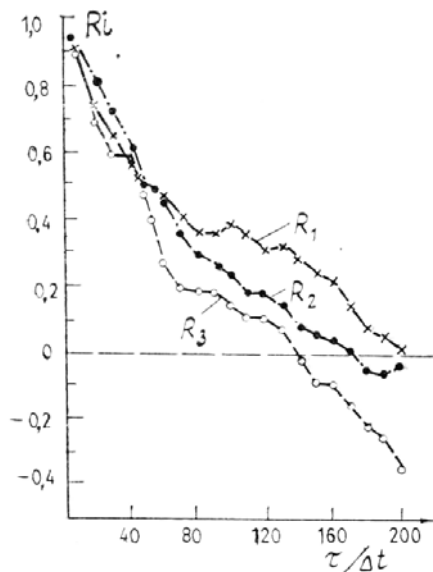


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, но  $Ri \geq Ri_{кр}$ ,  $H = 600$  м

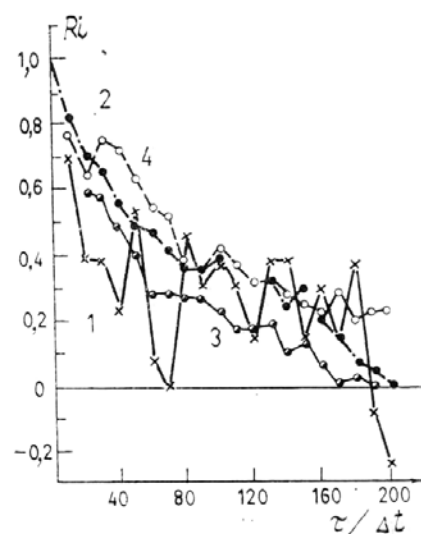


Рис. 4. Автокорреляционные функции сигналов для высот 1—540, 2—600, 3—640, 4—720 м;  $T = 400$  с

Динамика аэрозольных слоев анализировалась через автокорреляционные функции (АКФ) временных рядов сигналов, отраженных от аэрозольных неоднородностей на различных высотах при разном смещении трасс зондирования. Полученные корреляционные функции можно разделить на три группы:

1. АКФ с высокочастотными колебаниями, обусловленными развитой турбулентности в этих слоях. Примеры таких функций показаны на рис. 2.

2. АКФ с медленными изменениями (рис. 3), характерными для трендов. Период этих изменений, определенный из реализаций, превышает 4 минуты.

3. АКФ с присутствием обоих видов колебаний — высокочастотных и низкочастотных. Такие функции представлены на рис. 4. При этом для аэрозольных слоев вблизи нижней границы инверсного слоя характерно наличие высокочастотных колебаний АКФ. Тогда как для АКФ сигналов из слоев вблизи верхней границы более характерны низкочастотные изменения.

Попробуем интерпретировать вид АКФ временных рядов АС, полученных в районе температурных инверсий на основе сопоставления с профилями метеовелпчин. На рис. 5 показаны профили температуры  $T$ , скорости  $v$  и направления  $\alpha$  ветра, полученные радиозондированием 17 июля 1984 г. Как видно из рисунка, метеорологическая ситуация в период с двух до восьми часов существенно не изменялась. Из данных, полученных в два часа, хорошо прослеживается температурная инверсия в диапазоне высот 300 ... 700 м. Скорость ветра достигает максимума под инверсионным слоем.

Лидарные данные обнаруживают связь с метеовеличинами. Профиль температуры ясно показывает высоту задерживающего слоя, где происходит накопление аэрозоля, что и обуславливает возрастание лидарных сигналов. Максимум скорости ветра ниже температурной инверсии показывает наличие более интенсивной турбулентности на этой высоте. Это объясняет наличие высокочастотных флуктуации во временных рядах лидарных сигналов около нижней границы инверсии.

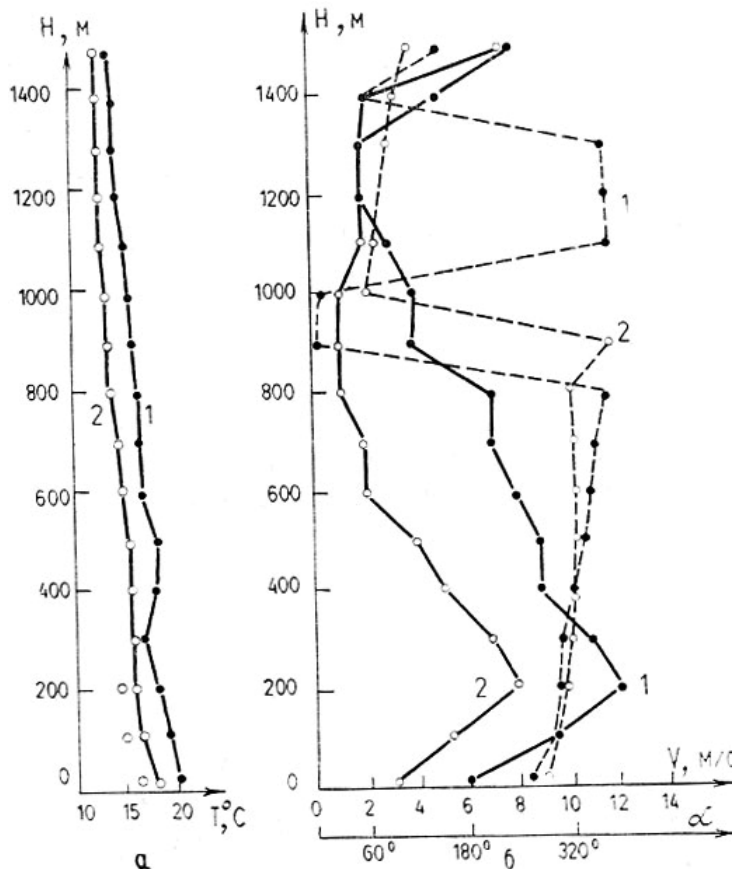


Рис. 5. Профили температуры (а), скорости (сплошные) и направления (штриховые линии) ветра (б). 1 — результаты зондирования для 2 ч, 2 — для 8 ч местного времени

Однако объяснить многообразие АКФ профилем температуры или скорости ветра в отдельности не удастся. Заметно их совместное влияние, которое может быть объединено таким параметром, как число Ричардсона  $Ri$  [1, 10]:

$$Ri = \frac{g}{T_0} \cdot \frac{\tilde{\gamma} - \gamma_a}{\beta^2},$$

где  $g$  — ускорение свободного падения;  $T_0$  — абсолютная температура;  $\gamma_a$  — сухоадиабатический температурный градиент;  $\gamma = -\frac{\partial T}{\partial z}$  — температурный градиент;  $\beta = \frac{\partial u}{\partial z}$  — вертикальный градиент горизонтальной скорости ветра. Число Ричардсона играет роль критерия устойчивости атмосферы [1, 3]. Значениям  $Ri < 0$  соответствует неустойчивая стратификация,  $Ri > 0$  — устойчивая. Причем при  $Ri \geq 0,25$  ( $Ri_{кр} = 0,25$ ) возможно появление внутренних гравитационных волн (ВГВ).

Для анализа устойчивости может быть использована и частота плавучести Бранта — Вайсяля

$$N = \left( \frac{g (\gamma - \gamma_a)}{T_0} \right)^{1/2},$$

которая дает частоту колебаний в данном слое. На рис. 6 даны профили  $Ri$  и  $N$ . Свяжем поведение АКФ со значениями параметров устойчивости. В слоях, близких к нижней границе температурной инверсии,  $Ri < 0$ . Соответствующие этому слою АКФ показаны на рис. 2. Их форма обусловлена развитой турбулентностью.

Случаи медленных изменений в АС (рис. 3), проявляющиеся как тренды или гармоника с периодами более 4 мин, могут быть связаны с ВГВ. В этих слоях  $Ri > Ri_{кр}$  и достигает 1 ... 3. Такие значения числа Ричардсона характерны для областей, близких к верхней границе инверсии, где в основном и проявляются ВГВ. Определенные из временных реализаций лидарных сигналов периоды больше периодов, соответствующих частоте плавучести, которая является максимально возможной частотой колебаний атмосферных частиц [3].

Наблюдаемые ВГВ относятся к микромасштабным движениям в атмосфере. Их регистрация становится возможной, благодаря высокой разрешающей способности лидара. Иллюстрацией этого факта является согласие высотного хода АКФ (рис. 4) и профилей  $Ri$  (рис. 6).

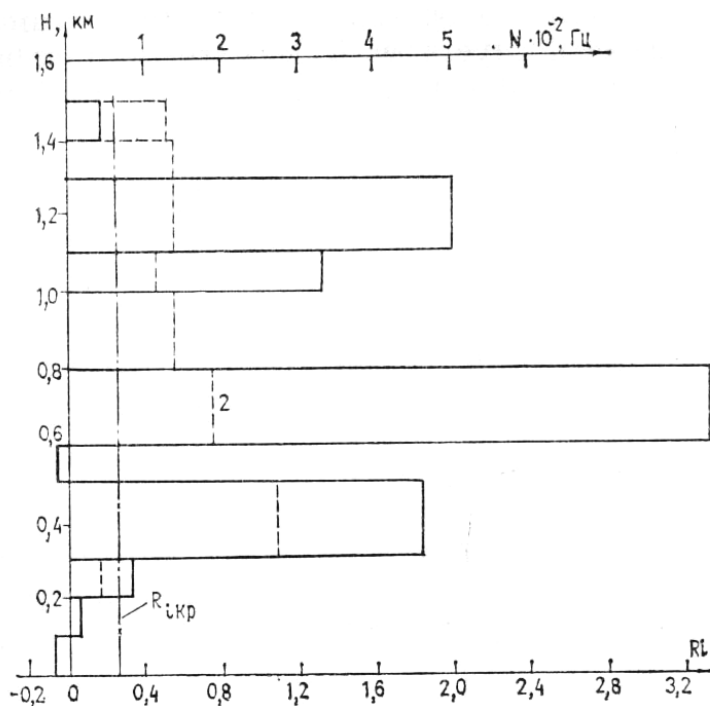


Рис. 6. Профили числа Ричардсона (1) и числа Бранта-Вайсяля (2), соответствующие метеоусловиям рис. 5

Возможной причиной возбуждения ВГВ в этом регионе могут служить орографические волны. Орографические волновые движения часто формируются при переносе воздушных масс через горы вблизи г. Софии и уже обнаруживались нами с помощью лидара [11].

В заключение отметим, что проанализированные в работе возможности лидара могут найти применение в авиации для краткосрочного прогноза сдвига ветра, локальной турбулентности и ВГВ. Используя корреляционный или спектральный анализ лидарных сигналов, можно разделять эффекты турбулентности и ВГВ. Полученные результаты весьма полезны также при исследовании распространения электромагнитного излучения в устойчиво стратифицированной атмосфере.

Авторы выражают свою благодарность старшему научному сотруднику, доктору географических наук В. Шарову за полезные обсуждения при интерпретации лидарных исследований.

1. Бызова Н.Л., Калиничева Т.А. — Труды ИЭМ, 1975, вып. 10, с. 53.
2. Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modelling, Eds F.T.M. Nieustadt, H. Van Dop, D. Riedel Publ. Company, Dordrecht, 1981.
3. Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. — М.: Мир, 1978.
4. Андрианов В.А., Ветров В.И., Ракитин Б.В. — В кн.: VI Всес. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы (Тезисы докладов). — Томск: ИОА СО АН СССР, 1980, ч. II, с. 142.
5. Дябин Ю.П., Ромашко В.Г., Танташев М.В. — В кн.: V Всес. симпозиум по лазерному и акустическому зондированию атмосферы (Тезисы докладов). — Томск: ИОА СО АН СССР, 1978, ч. I, с. 224.
6. Кауль Б.В. и др. — Гидрология и метеорология, 1983, т. 32, с. 48.
7. Каллистратова М.А. и др. — Известия АН СССР, ФАО, 1985, т. 21, с. 492.
8. Tzanev V.I. et al. — Bulg. J. Phys., 1986, v. 13, № 6, p. 551.
9. Колев И., Аврамова Р., Банков О. и др. — Изв. ДКНТП, 1983, кн. 18.
10. Полканов Ю.А. - Известия АН СССР, ФАО, 1985, т. 21, с. 720.
11. Kolev I., Parvanov O., Karpielov B. — 12-th ILRC, Aix EnProvenceFrance, 1984, p. 399.

Институт электроники  
Болгарской Академии  
наук, София

Поступила в редакцию  
5 ноября 1987 г.

**I. Kolev, L. Yordanova, V. Polyakov, O. P'rvanov. Laser Sensing of Aerosol Stratification under Radiation Inversions.**

The atmospheric aerosol stratification in the temperature inversion region was studied using laser sounding technique. The results obtained indicate the lidar correlation functions to be related with the parameters characterizing the atmospheric stability. The aerosol layers with Richardson number  $>0.25$  are shown to undergo slow variations attributable to the internal gravitational waves.