

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510+551.501.7

Ю.Ф. Аршинов, Б.Д. Белан, С.М. Бобровников, Н.П. Красненко, И.А. Разенков, М.Г. Фурсов

ВОЗМОЖНОСТИ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ДИСТАНЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Приводятся результаты комплексных экспериментальных исследований пограничного слоя атмосферы, выполненных с помощью лидара комбинационного рассеяния, аэрозольного лидара, акустического локатора и самолета-лаборатории. Рассматривается взаимосвязь вертикальных распределений температуры, влажности и аэрозоля. Найдены коэффициенты авто- и взаимной корреляции параметров. Приведенные результаты иллюстрируют возможности комплексного подхода к исследованию метеорологических и оптических параметров пограничного слоя.

Тесное взаимодействие и взаимообусловленность полей метеорологических величин в пограничном слое атмосферы (ПСА) [1] требует комплексного подхода к исследованию его характеристик. При таком подходе возможно выявление в ПСА определяющего действия того или иного атмосферного процесса. Создание средств лазерного и акустического зондирования открывает качественно новые возможности исследования ПСА [2, 3]. С этой целью в ИОА СО АН СССР, начиная с 1986 года, проводится эксперимент «Вертикаль». В этом эксперименте используются обычные контактные методы измерений характеристик атмосферы приборами, установленными на самолете-лаборатории [4], и дистанционные — лидаром комбинационного рассеяния (СКР-лидар) [5], аэрозольным лидаром ЛОЗА-4 [6] и акустическим локатором МАЛ-2 [3]. Технические характеристики перечисленных устройств описаны в [3—6].

В настоящей статье приведены некоторые данные, полученные в ходе выполнения программы «Вертикаль» при зондировании пограничного слоя атмосферы в районе г. Томска, иллюстрирующие возможности комплексного исследования ПСА. Так, на рис. 1 приведены результаты зондирования, полученные указанными методами.

Из рис. 1, *a* видно, что в нижнем 300-метровом слое ПСА наблюдается инверсия температуры, которая прослеживается и в самолетных, и в лидарных данных. Имеющиеся различия можно объяснить двумя причинами. Во-первых, у сравниваемых методов различные разрешения по вертикали и осреднения по времени. Во-вторых, самолет имеет большую горизонтальную составляющую скорости, которая в процессе измерений приводит к существенному горизонтальному осреднению регистрируемой характеристики. Поэтому трудно ожидать лучшего совпадения данных, чем то, которое представлено на рис. 1, *a*.

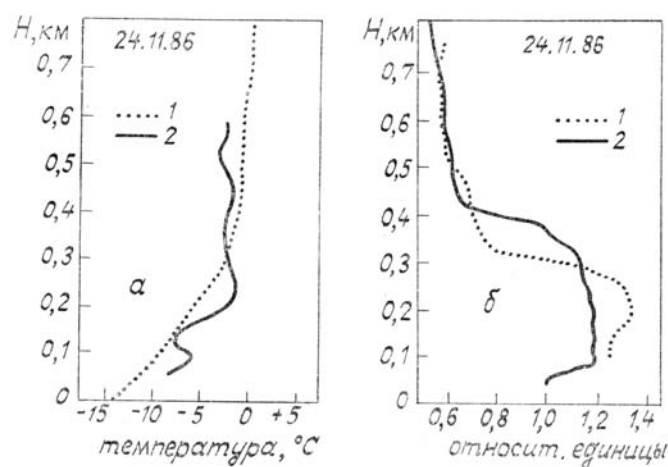


Рис. 1. Вертикальное распределение: *a* — температуры воздуха по самолетным данным (1) и по данным СКР-лидара (2); *б* — коэффициента аэрозольного ослабления: 1 — лидар ЛОЗА-4, 2 — СКР-лидар

Сравнение данных о высотном распределении коэффициента аэрозольного ослабления, измеренного СКР-лидаром и лидаром «ЛОЗА-4», представлено на рис. 1, б. Общим для обеих кривых является то, что в нижнем 300-метровом слое (слое инверсии), где концентрация аэрозоля высокая, наблюдаются повышенные значения коэффициента аэрозольного ослабления. Выше слоя инверсии происходит резкое уменьшение величины этого коэффициента, что отражает действие инверсии температуры как задерживающего слоя. Некоторое различие между кривыми 1 и 2 на рис. 1, б, выражающееся в том, что слои с высокими значениями коэффициента аэрозольного ослабления не совпадают по высоте, объясняется различными интервалами осреднения и методиками измерения.

Устойчивая зависимость процессов турбулентного переноса аэрозоля в ПСА от его термической стратификации [1], которая видна и на рис. 1, позволяет провести качественное сравнение данных лазерного и акустического зондирования.

Акустическое зондирование, как известно [3], дает общую картину температурной стратификации ПСА. Результаты совместных исследований структуры ПСА акустическим локатором и СКР-лидаром приводились ранее в [3] и показали хорошее совпадение. Здесь же остановимся на сравнении данных акустического зондирования и данных, полученных с помощью лидара ЛОЗА-4, представленных на рис. 2.

Рис. 2 построен следующим способом. На цифровую, полученную после обработки в ЭВМ двухтональную запись сигнала акустического локатора наложен профиль коэффициента обратного аэрозольного рассеяния, нормированный на максимум, зарегистрированный лидаром ЛОЗА-4. Почернение (звездочки) на факсимильной записи показывает на повышенную турбулентность в слое температурной инверсии. Отсутствие данных в начале трассы соответствует «мертвой зоне» локатора.

Видно (рис. 2), что турбулентный режим, который наблюдался в период с 18.00 до 19.30 в нижнем 300-метровом слое, способствовал переносу вверх из приземного слоя аэрозоля и накоплению его в слое инверсии. Профиль коэффициента обратного аэрозольного рассеяния, полученный в 19.50, фиксирует этот процесс в виде высоких значений в слое 0–280 м и резкое их уменьшение выше этого слоя. В период с 20.00 до 22.00 турбулентность в слое 200–300 м существенно ослабла, что и отразилось на профиле коэффициента обратного аэрозольного рассеяния, зафиксированного в 22.00 ч.

Таким образом, из проведенного анализа следует, что все средства, как контактные, так и дистанционные, дают сравнимую между собой информацию, взаимно дополняющую друг друга. Кроме того, оперативность получения информации с помощью дистанционных средств позволяет исследовать динамику ПСА. Это видно уже из рис. 2, на котором хорошо прослеживается динамика турбулентности в нижнем слое атмосферы. Рассмотрим ее подробнее по другим данным.

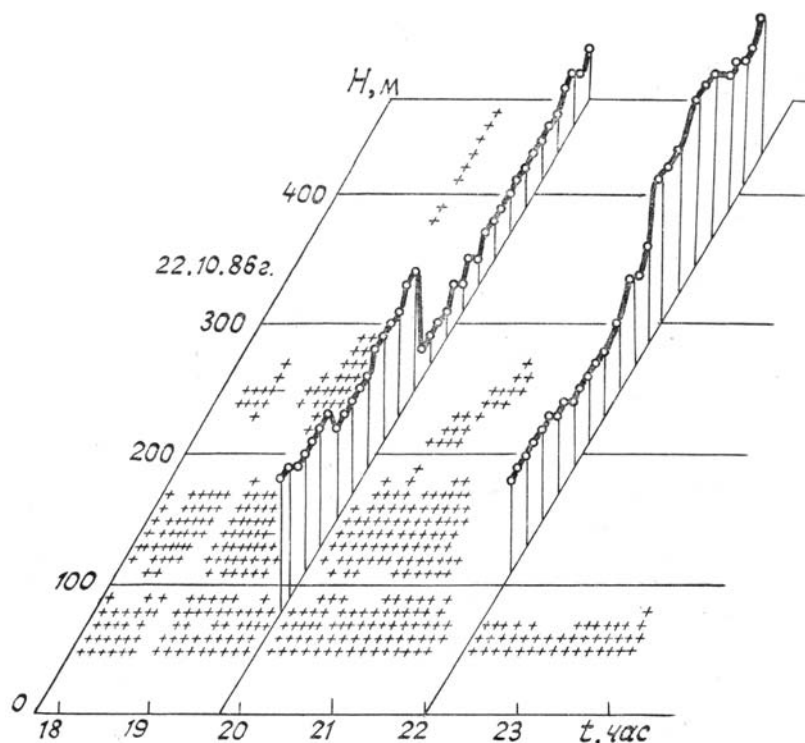


Рис. 2. Результаты лазерно-акустического зондирования ПСА. Факсимильная запись сигнала акустического локатора и профили коэффициента обратного аэрозольного рассеяния

Характерной особенностью вертикального распределения метеовеличин в ПСА зимой над Западной Сибирью является перманентно существующая инверсия температуры в слое 0–500 м. Это соз-

дает исключительно плохие условия для рассеяния загрязнений, особенно в городах, так как на границе слоя инверсии турбулентность подавлена, вертикальные движения, как правило, нисходящие. Совокупность действия отрицательных факторов способствует накоплению загрязнений в нижнем слое.

При длительном существовании инверсии, процессы накопления аэрозоля происходят значительно сложнее. Начинает развиваться совершенно иной процесс, отличающийся от такого же при явно выраженном суточном ходе.

Проанализируем особенности такого процесса по данным рис. 3, построенного по результатам зондирования температуры, влажности и аэрозоля СКР-лидаром. На рис. 3 приведены сведения о так называемой знаковой корреляции, по следующему принципу: «+» — положительная корреляция ($0,5 < K \leq 1$), «0» — неустойчивая взаимосвязь ($-0,5 \leq K \leq 0,5$), «-» — отрицательная корреляция ($-1 \leq K < -0,5$).

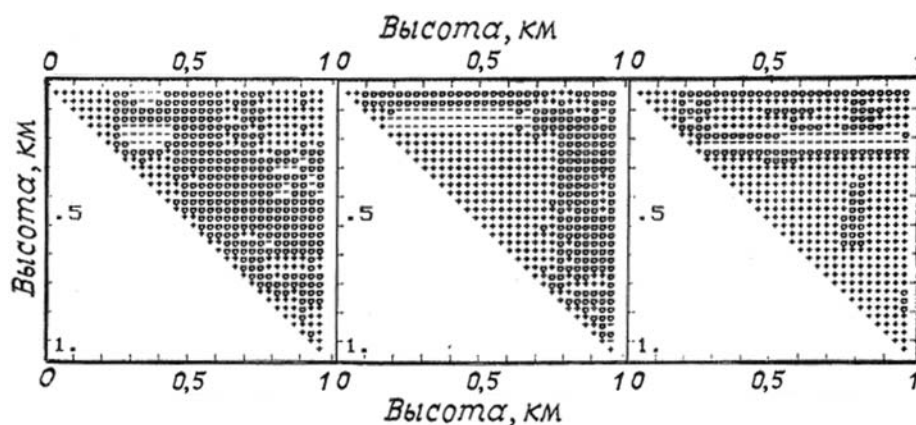


Рис. 3. Матрицы межуровневой корреляции: а — температуры; б — влажности; в — коэффициента обратного аэрозольного рассеяния, полученные с помощью СКР-лидара. Время измерения 2 ч.

Из рис. 3 видно, что наличие инверсии в нижнем 200-метровом слое атмосферы приводит к нарушению взаимосвязи изменения каждого из параметров по высоте. Так, для температуры воздуха и аэрозоля наблюдается устойчивая положительная корреляция в нижнем 200-метровом слое. Выше 200 метров автокорреляция нарушается. Восстанавливается она для влажности в слое выше инверсии, вблизи 200 м, а для аэрозоля еще выше — на 300 м. Поведение влажности имеет свои особенности. В слое инверсии наблюдается устойчивая отрицательная взаимосвязь с изменением ее в вышележащих слоях. Выше инверсии, в слое 300–800 м, выявляется устойчивая положительная автокорреляция по высоте.

Матрица межуровневой корреляции счетной концентрации аэрозоля в декабре над Западной Сибирью

H, км	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
0,0	1	0,70	0,62	0,43	0,46	0,39	0,37	0,26	0,24	0,24	0,24	0,36
0,2		1	0,75	0,46	0,45	0,37	0,38	0,32	0,28	0,26	0,27	0,35
0,4			1	0,60	0,62	0,51	0,53	0,47	0,46	0,45	0,44	0,51
0,6				1	0,81	0,73	0,68	0,71	0,68	0,71	0,71	0,78
0,8					1	0,82	0,77	0,74	0,71	0,75	0,73	0,86
1,0						1	0,82	0,78	0,77	0,74	0,74	0,74
1,2							1	0,95	0,90	0,87	0,85	0,88
1,4								1	0,98	0,97	0,98	0,99
1,6									1	0,96	0,96	0,97
1,8										1	0,98	0,98
2,0											1	0,99
2,2												1

Подобные результаты наблюдаются и при осреднении самолетных данных за длительный период (171 профиль), которые собраны в таблице. Полученные данные показывают, что для территории Западной Сибири инверсия температуры в зимнее время располагается в среднем в слое до $0,4 \div 0,6$ км, что приводит к разрыву в связях изменений концентрации аэрозоля на разных высотах. Выше 0,6 км наблюдается устойчивая корреляция до высоты измерений 2,2 км.

Приведенные результаты измерений позволяют не только определять вертикальное распределение метеорологических величин в ПСА, но и исследовать взаимосвязь изменений каждого из них по высоте.

Не менее интересным представляется исследование взаимосвязи между отдельными величинами в ПСА.

На рис. 4 приведено вертикальное распределение коэффициентов взаимной корреляции между метеовеличинами, рассчитанных по данным СКР-лидара для того же дня, что и на рис. 3.

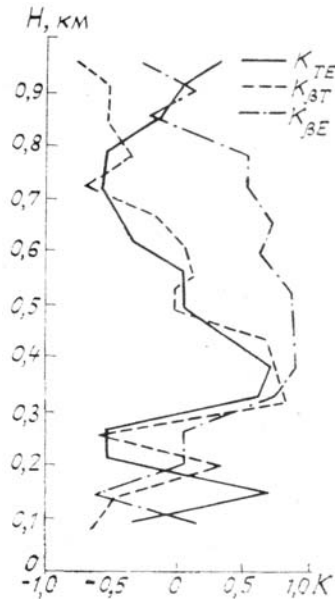


Рис. 4. Вертикальное распределение коэффициентов корреляции: K_{TE} — температуры и влажности; K_{BT} — коэффициента обратного рассеяния и температуры; K_{BE} — коэффициента обратного рассеяния и влажности. E — абсолютная влажность

Видно, что в слое приземной инверсии взаимосвязь между величинами неустойчивая и может менять свой знак. Выше слоя инверсии между тремя величинами наблюдается высокая положительная корреляция, которая с высотой уменьшается. Исключение составляет лишь взаимосвязь между абсолютной влажностью и коэффициентом обратного рассеяния.

Подобные результаты можно получить и по данным самолетного зондирования. Из рис. 5 видно, что для весенних условий наблюдается устойчивая отрицательная связь между изменением температуры и влажности во всем слое ПСА. Для корреляции температуры и счетной концентрации аэрозоля, наоборот, наблюдается устойчивая или слабая связь в этом слое, которая изменяется год от года. Взаимосвязь между счетной концентрацией аэрозоля и относительной влажностью во всем ПСА неустойчивая.

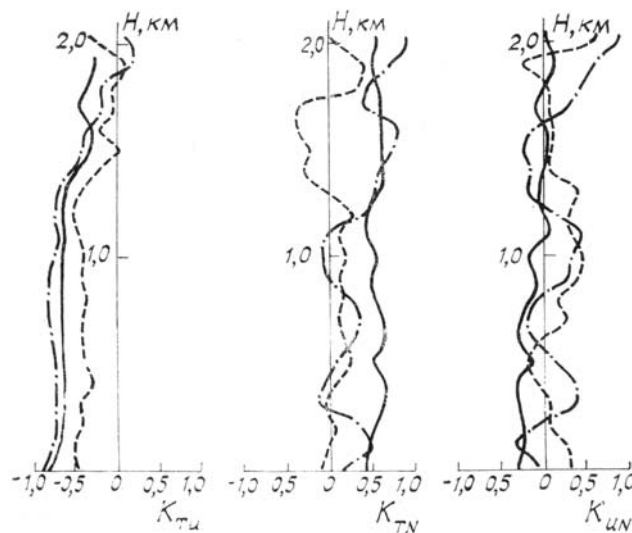


Рис. 5. Вертикальное распределение коэффициентов корреляции в мае: K_{TU} — температуры и влажности; K_{TN} — температуры и счетной концентрации аэрозоля; K_{UN} — влажности и счетной концентрации аэрозоля. Сплошная — 1984 г., штриховая — 1985 г.; штрихпунктирная линия — 1986 г. U — относительная влажность

Подводя итог работе в целом, отметим, что приведенные результаты иллюстрируют возможности аппаратных средств дистанционного зондирования и комплексного подхода к исследованию метеорологических и оптических параметров ПСА, что позволяет в дальнейшем перейти к исследованию ПСА с существенно большим пространственным и временным разрешением, чем это возможно по данным обычных метеорологических измерений.

1. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 639 с.
2. Зуев В. Е. //Оптико-механическая промышленность. 1986. № 3. С. 45.
3. Красненко Н. П. Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, 1986. 167 с.
4. Белан Б. Д. //Аппаратура дистанционного зондирования параметров атмосферы. Томск: ТФ СО АН СССР, 1987. С. 34.
5. Аршинов Ю. Ф., Бобровников С. М., Зуев В. Е., Митев В. М. // Спектроскопические методы зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука 1985 С. 99.
6. Балин Ю. С., Байрашин Г. С., Бурков В. В. и др. //Проблемно-ориентированные измерительно-вычислительные комплексы. Новосибирск: Наука, 1986 С. 65.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
Томск

Поступила в редакцию
22 марта 1989 г.

Yu. F. Arshinov, B. D. Belan, S. M. Bobrovnikov, N. P. Krasnenko,
I. A. Razenkov, M. G. Fursov. **Complex Study of the Boundary Atmospheric Layer.**

The paper presents some results of a complex experimental study of the boundary atmospheric layer, carried out using a Raman lidar, aerosol scattering lidar and a sodar accompanied by airborne measurements. Certain relationships between the temperature, humidity and aerosol profiles revealed in the study are analyzed. The auto and crosscorrelation coefficients characterizing these relationships are determined for the atmospheric situations occurred in the study. The results obtained clearly demonstrate the usefulness of the approach to atmospheric studies based on the use of different experimental techniques simultaneously.