

А.И. Гришин, А.Е. Зильберман, Г.Г. Матвиенко

ЛИДАРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ

Представлены результаты экспериментального исследования характеристик атмосферных осадков при помощи корреляционного лидара. Обнаружено, что по отраженным от осадков лидарным сигналам возможно определять полные характеристики зоны осадков и проследивать их пространственно-временную эволюцию. Показано также, что осадки слабой интенсивности существенно увеличивают эффективность лидарных измерений скорости ветра.

Погода и климат различных регионов во многом определяются характеристиками атмосферных осадков, поэтому их изучение является актуальной задачей атмосферной оптики.

Влиянию осадков на оптические характеристики атмосферы посвящено значительное количество как теоретических, так и экспериментальных работ. Так, в [1, 2] рассмотрены вопросы взаимодействия электромагнитного излучения со сферическими частицами. В [3] приведены расчетные данные о коэффициентах ослабления излучения видимого и ИК-диапазонов на каплях дождя. Авторы [4, 5, 6] провели обширный цикл экспериментальных исследований жидкокапельных осадков и получили эмпирические зависимости, связывающие интенсивность осадков со светорассеивающими характеристиками атмосферы.

Экспериментальные исследования осадков, базирующиеся на применении лазеров, начаты сравнительно недавно и представлены в [7, 8]. Авторы данных работ исследуют в основном эффекты распространения лазерного излучения в условиях осадков различной интенсивности и практически не уделяют внимания изучению характеристик осадков. Что касается лидарных измерений, то осадки чаще всего рассматриваются как фактор, ограничивающий дальность и точность измерений, а в некоторых случаях делающий их невозможными. Так как в ряде регионов вероятность выпадения осадков достаточно велика, то это обстоятельство накладывает серьезные ограничения на возможность практического использования лидаров.

Однако в процессе обработки экспериментальных данных было обнаружено, что при определенных условиях осадки увеличивают эффективность лидарного зондирования, повышая дальность и точность измерений. Прежде всего это относится к жидким осадкам, являющимся по характеру выпадения морозящими и обложными, интенсивностью не более 1,5 мм/ч. Такого рода осадки реализуются в природе достаточно часто. Кроме того, при помощи лидара оказалось возможным проводить измерения основных характеристик жидкокапельных осадков, наблюдения за динамикой их развития, а также осуществлять сверхкраткосрочный прогноз выпадения дождя (3–5 мин).

Целью данной работы является экспериментальное исследование основных характеристик осадков с помощью ветрового корреляционного лидара, разработанного и эксплуатируемого в ИОА с 1990 г. Представленные здесь данные относятся к измерениям, проводимым в ИОА в летне-осенний период 1993 г. вблизи г. Томска. Зондирование начиналось, как правило, в условиях сильной кучево-дождевой облачности, когда вероятность выпадения осадков была достаточно велика. Ситуации, при которых дождь во время эксперимента не начинался, в дальнейшем из обработки исключались. Одновременно с параметрами дождя измерялись характеристики скорости и направления ветра в слое от 100 м до нижней границы слоя облаков.

Аппаратура и методика измерений

Для измерений использовался трехтрассовый лидар <ЛИСА-1> с вертикальной схемой локации, поэтому в данном случае анализировались ситуации, когда зона осадков находилась на начальной стадии своего развития и капли дождя еще не достигли поверхности земли.

Лидар, используемый в натурных измерениях, осуществлял зондирование атмосферы по образующей конуса вокруг вертикальной оси. Запуск лазера производился в трех фиксиро-

ванных положениях одного периода сканирования, что позволяло получать информацию из пространственно разнесенных рассеивающих объемов.

Основные характеристики лидара:

Энергия в импульсе, Дж	0,1
Длина волны, нм	532
Угловая расходимость, мрад.	0,5
Приемная апертура, м	0,3
Число зондируемых уровней	128
Пространственное разрешение, м	10–20
Разрядность АЦП	8
Время набора данных, мин	20–30

Обработка лидарных сигналов базировалась на корреляционно-спектральной методике [9]. В процессе предварительной обработки временных рядов сигналов проводились процедуры высокочастотной фильтрации и удаления тренда. Далее, на основе быстрого преобразования Фурье рассчитывались взаимно корреляционные и фазовые функции. Скорость ветра определялась двумя методами: по сдвигу максимумов взаимно корреляционных функций и по углу наклона фазовых спектров.

Предварительный анализ пространственных и временных рядов лидарных сигналов, полученных в условиях дождя, показал, что существует возможность измерения параметров зоны осадков, т.е. области атмосферы, охваченной осадками. В метеорологии зоны осадков принято характеризовать такими параметрами, как форма, вертикальные и горизонтальные размеры и границы, фаза развития, скорость перемещения, структура. В практике исследований структура зон осадков описывается соответствующими интегральными параметрами: интенсивностью, мм/ч, водностью, г/м³, концентрацией частиц осадков, м⁻³. Интегральные характеристики вычисляются по измеренным микроструктурным данным осадков, т.е. по распределению частиц осадков по размерам и скоростям выпадения.

Микроструктурные характеристики дождя оценивались на основе того факта, что в процессе оседания капель дождя происходит их гравитационная сепарация. Так как лидар позволял делать вертикальные разрезы зоны осадков, то по пространственным рядам оптических сигналов удавалось проследить, как перемещаются передний и задний фронты зоны, в которых присутствуют соответственно капли дождя с максимальным и минимальным радиусом. Из сравнения положений переднего и заднего фронтов в различные моменты времени оценивалась скорость оседания различных фракций дождя и далее, на основе кривой Ганна–Кинцера [10], определялся максимальный и минимальный размер дождевых капель присутствующих в зоне.

Для описания распределения капель по размерам использовалось то обстоятельство, что, поскольку величина рассеивающего объема лидара невелика (доли и единицы кубических метров), то в нем в любой момент времени находится, в зависимости от размера, сравнительно небольшое число капель (от единиц до сотен). Так как размер капель в пределах небольшого (относительно всей зоны дождя) диапазона высот вследствие гравитационной сепарации приблизительно одинаков, то вклады всех капель в отраженный сигнал в пределах данного диапазона высот примерно равны. Отсюда следует, что дисперсия отраженного от данного слоя сигнала будет определяться только числом капель N и, следовательно, коэффициент вариаций W_H для слоя на высоте H будет определяться как [9]

$$W_H = N_H^{-1/2}.$$

Таким образом, измеряя значения коэффициента вариаций для данного слоя, можно определять число капель N_H в единице объема. Находя величину N_H последовательно для всех слоев зоны дождя, можно определить функцию распределения капель по размерам $f(a)$. Знание микроструктурных параметров зоны осадков позволяет вычислить ее интегральные характеристики. Концентрация N , т.е. полное число частиц в единице объема вычисляется по формуле

$$N = \sum_{i=1}^k n_i(a_i), \tag{1}$$

где $n_i(a_i)$ – число частиц размера a_i в единице объема.

Интенсивность дождя I , относящаяся к моменту зондирования и выраженная в мм/ч, определяется из выражения:

$$I = 4/3 \pi \sum_i a_i^3 n_i V(a_i), \quad (2)$$

где $V(a_i)$ – скорость падения капель.

Аналогично вычисляется водность осадков, т.е. количество воды в граммах в кубическом метре пространства при выпадении дождя

$$W = 4/3 \pi \sum_i a_i^3 n_i. \quad (3)$$

В [5] получена корреляционная зависимость прозрачности от интенсивности дождя с коэффициентом корреляции, равным 0,95, и сделан вывод, что интенсивность осадков является основным фактором, определяющим прозрачность в зоне дождей. Корреляционная зависимость между коэффициентом ослабления оптического излучения (α , км⁻¹) и интенсивностью (I , мм/ч) выражена эмпирической формулой

$$\alpha = 0,21 I^{-0,74}. \quad (4)$$

В [5] была определена также связь между интенсивностью и водностью в виде

$$W = 0,065 I^{0,88}. \quad (5)$$

Вертикальные размеры и границы зоны осадков могут быть оценены из анализа пространственных рядов лидарных сигналов, однако более точно данные характеристики зоны можно получить, анализируя корреляционную матрицу, построенную по временным рядам сигналов. Скорость перемещения зоны может быть оценена по измеренной скорости ветра.

Анализ и результаты измерений

Анализ отраженных от осадков оптических сигналов показал, что увеличение эффективности ветрового зондирования обеспечивается, прежде всего, за счет усиления флуктуирующей компоненты сигнала. Как показано в [11], для систем, использующих корреляционную методику обработки, увеличение коэффициента вариации сигнала приводит к улучшению отношения сигнал-шум и, как следствие, к увеличению дальности зондирования. Таким образом, капли дождя выступают в качестве природных трассеров, по которым можно судить о направлении и скорости движения воздушной массы, в которой они находятся. Ограничения на интенсивность осадков, при которых работает данный механизм, обусловлены тем обстоятельством, что для сильных дождей максимум функции распределения по размерам смещен в сторону больших величин. Проведенные расчеты показывают, что для частиц диаметром меньше 0,25 мм скорость ветрового переноса в 7–10 раз больше скорости оседания в гравитационном поле Земли и, следовательно, они способны выступать в качестве трассеров. Кроме того, с увеличением интенсивности осадков одновременно повышается нижняя предельная высота, начиная с которой возможно измерение скорости ветра. Это связано с эффектами горизонтальной и вертикальной сепарации капель дождя.

На рис. 1 и 2 приведены корреляционные и фазовые функции, соответствующие дальности 1,6 км. Из анализа рис. 1 видно, что взаимно корреляционная функция отличается высоким уровнем корреляции в области максимума (около 0,9), что обеспечивает высокую точность проводимых измерений.

Анализ фазовых функций (кривая 1) и функций когерентности (2) (рис. 2) показывает, что в зоне осадков существенно увеличивается область информативных частот. Как видно из рис. 2, степень когерентности во всем диапазоне исследуемых частот находится на уровне 0,8 – 0,95, что говорит о высокой информативности измерений, а фазовая функция имеет вид, близкий к классическому. В то же время вне зоны осадков наблюдается быстрое уменьшение уровня когерентности и, соответственно, сокращение области информативных частот.

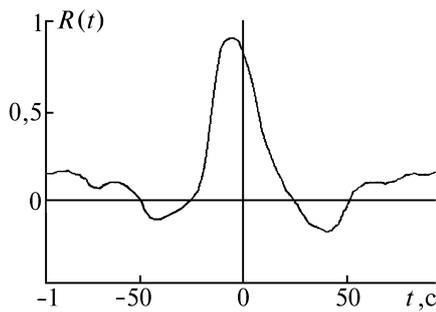


Рис. 1. Временная взаимно корреляционная функция в зоне осадков, полученная 25 августа 1993 г.

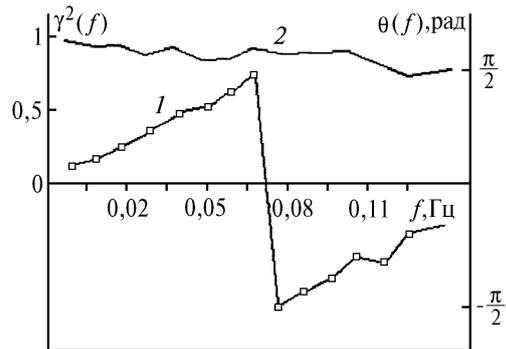


Рис. 2. Фазовый спектр $\theta(f)$ и спектр когерентности $\gamma^2(f)$ в зоне осадков. Время измерений то же, что и на рис. 1

На рис. 3 приведены высотные профили скорости и направления ветра, измеренные в условиях дождя 25 августа 1993 г. Горизонтальные отрезки ограничивают доверительный интервал для доверительной вероятности 0,95. Контроль полученных данных осуществлялся при помощи теодолита, которым измерялась скорость перемещения облаков (обозначена звездочками), при этом расстояние до облаков определялось из лидарных сигналов. Как видно из рисунка, данные на высоте нижней кромки облачности хорошо согласованы между собой. В [12] показано, что сдвиг ветра в зоне осадков в среднем увеличивается. Такую тенденцию можно проследить на представленном рисунке.

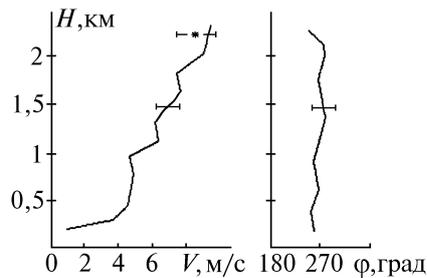


Рис. 3. Профиль скорости и направления ветра в условиях дождя

По описанной выше методике были определены параметры микро-структуры осадков. На рис. 4 приведена гистограмма, построенная по данным, осредненным за 6-секундный интервал и показывающая сколько частиц n_i находится в каждом классе размеров a_i . В качестве аппроксимационного выражения для функции распределения частиц осадков по размерам была выбрана формула Хргиана–Мазина [3], являющаяся частным случаем гамма-распределения

$$f(a) = A a^2 e^{-\beta a}, \quad (6)$$

где a – радиус капли; A – нормирующий множитель; β – параметр.

Параметры распределения (6) вычислялись по методике, предложенной в [6]. Сравнение полученного экспериментального распределения с теоретической кривой, проведенное по критерию согласия χ^2 , показало, что полученное в эксперименте распределение не противоречит гипотезе о его соответствии кривой, вычисленной по формуле (6), для доверительной вероятности 0,95.

По количеству капель, приходящихся на различные участки спектра, по формуле (1) вычислялась общая концентрация частиц осадков. Другие интегральные характеристики зоны осадков вычислялись из выражений (2)–(5).

Измеренные микроструктурные данные и найденные по ним интегральные параметры представлены в табл. 1.

Таблица 1

Дата	Время	I , мм/ч	W , г/м ³	α , км ⁻¹	N , м ⁻³	r_{\max} , мм	r_{\min} , мм
25.08	18:25	7,7	0,39	0,9	388	1,3	0,1

Лидарное зондирование атмосферных осадков

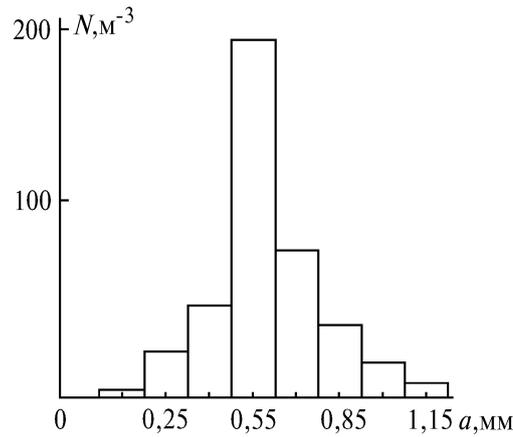


Рис. 4. Гистограмма распределения капель дождя по размерам

Пространственные границы зоны осадков определялись из корреляционных матриц, пример которой приведен в табл. 2. Анализируя значения компонент матрицы, можно заметить, что корреляционные связи терпят разрывы на уровнях, соответствующих положениям переднего и заднего фронтов зоны осадков, что имеет простое физическое объяснение. Кроме того, видно, что зона представляет собой разрывную по вертикали структуру. Данный факт можно объяснить эффектом сепарации частиц. Нижняя граница зоны соответствует высоте 1300, верхняя – 1700 м. Вертикальный размер зоны, таким образом, за время измерений составлял в среднем 400 м. Так как относительные погрешности в определении линейных размеров зон осадков за счет размытости переходной зоны приняты в метеорологии на уровне 30 %, то полученный результат можно считать вполне приемлемым.

Таблица 2

$H, м$	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100
	1,00	0,99	0,95	0,52	0,49	0,55	0,27	0,48	0,52	0,49	0,42	0,39
		1,00	0,97	0,52	0,53	0,59	0,28	0,54	0,57	0,54	0,47	0,44
			1,00	0,54	0,60	0,63	0,30	0,62	0,66	0,64	0,58	0,52
				1,00	0,24	0,29	0,42	0,21	0,28	0,26	0,21	0,15
					1,00	0,51	0,33	0,61	0,64	0,69	0,69	0,60
						1,00	0,66	0,59	0,61	0,57	0,50	0,43
							1,00	0,54	0,39	0,34	0,29	0,28
								1,00	0,93	0,85	0,78	0,74
									1,00	0,94	0,87	0,79
										1,00	0,97	0,88
											1,00	0,93
												1,00

По пространственным рядам лидарных сигналов в разные моменты времени оказалось возможным проследить пространственно-временную эволюцию зоны осадков с момента ее зарождения (рис. 5) и определить время начала дождя, которое принято оценивать по падению первых капель на Землю. Кроме того, дождь во время измерений удалось спрогнозировать за 1,5–2 мин до его начала. Подводя итог, можно отметить, что осадки, выступая в роли природных трассеров, существенно увеличивают эффективность лидарных измерений скорости ветра, что подтверждают результаты эксперимента, однако существует ограничение на интенсивность осадков. В то же время, по пространственным и временным рядам лидарных сигналов имеется возможность определять полные характеристики зоны осадков и проследивать ее пространственно-временную эволюцию. В целом методика определения параметров зоны осадков еще не до конца отработана и поэтому необходимы дальнейшие исследования в этой области.

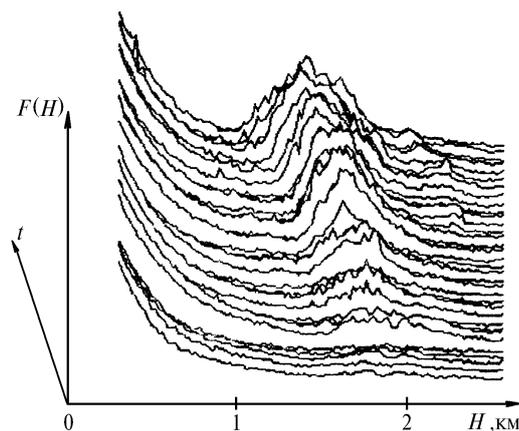


Рис. 5. Лидарные сигналы из зоны осадков, полученные с интервалом 2 с

1. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 165 с.
2. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. М.: Иностранная литература, 1961. 536 с.
3. Зуев В.Е. Прозрачность атмосферы для видимых и инфракрасных лучей. М.: Сов. Радио, 1966. 318 с.
4. Полякова Е.А. // Труды ГГО. 1957. Вып.68. С.92.
5. Полякова Е.А. // Труды ГГО. 1960. Вып.100. С.45.
6. Полякова Е.А., Шифрин К.С. // Труды ГГО. 1953. Вып.42. С.84.
7. Рогачевский А.Г. // Распространение оптических волн в случайно-неоднородной атмосфере. Новосибирск: Наука, 1979. С. 75–82
8. Горячев Б.В., Могильницкий С.Б. // Распространение оптических волн в случайно-неоднородной атмосфере. Новосибирск: Наука, 1979. С. 83–89.
9. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989, 540 с.
10. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. М.: Мир, 1981. Т.1. 280 с.
11. Гришин А.И., Матвиенко Г.Г. // Изв.АН СССР. Сер.ФАО. 1981. Т.17. N 11. С.1148–1154.
12. Литвинов И.В. Осадки в атмосфере и на поверхности земли. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 208 с.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
28 декабря 1994 г.

A.I. Crishin, A.E. Zilberman, G.G. Matvienko. **Lidar Sounding of Atmospheric Precipitation.**

Experimental results are presented on investigation of precipitation characteristics using correlating lidar. It occurred possible to determine full characteristics of the precipitations and trace their spatial-temporal evolution by lidar returns. Weak precipitations are also shown to increase significantly the efficiency of the lidar measurements of wind velocity.