

УДК 551.508.77:535.311:551.501.777

## Определение вида атмосферных осадков по результатам оптических измерений их микроструктурных характеристик

В.В. Кальчихин, А.А. Кобзев, В.А. Корольков, А.А. Тихомиров\*

*Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН  
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3*

Поступила в редакцию 3.06.2016 г.

Изложены принципы измерения характеристик выпадающих атмосферных осадков методом получения и анализа теневых изображений их частиц. Предложен метод определения вида атмосферных осадков, основанный на измерении микроструктурных характеристик с помощью оптического осадкомера. Представлены результаты измерения соотношений размеров и скоростей для частиц дождевых и снеговых осадков.

*Ключевые слова:* оптический осадкомер, вид осадков, размер и скорость частиц осадков; optical precipitation gauge, precipitation type, size and velocity of precipitation particles.

### Введение

Наблюдение за основными характеристиками выпадающих атмосферных осадков (вид осадков, их сумма и интенсивность) является одной из важных задач, решаемых в процессе создания систем климато-экологического мониторинга. Наиболее часто для решения этой задачи используются традиционные осадкомеры О-1 с ветровой защитой Третьякова [1]. Одним из основных недостатков данного измерителя, кроме ошибок, вносимых потерями на смачивание, испарение и ветровой недоучет [2], является невозможность организации наблюдений в автоматическом режиме без участия человека. В последнее время появились новые приборы, основанные на различных физических явлениях, свободные от многих недостатков традиционных осадкомеров и обеспечивающие автоматическое измерение параметров атмосферных осадков [3]. Однако большинство из них, в силу особенностей конструкции и используемых физических принципов, не имеют возможности выполнения такой важной функции, как автоматическое определение вида выпадающих осадков (дождь, град, снег). Практически единственным методом, способным обеспечить решение данной проблемы, является анализ микроструктурных характеристик атмосферных осадков, получаемых с помощью оптических измерений размеров и скоростей падения отдельных частиц. В статье рассматриваются возможности идентификации вида атмосферных осадков по скорости их падения с помощью

метода получения и анализа теневого изображения частиц осадков (теневого метода).

### Определение структурных характеристик осадков тeneвым методом

Для реализации метода большую роль играют характерные размеры и скорости падения частиц осадков. К дождевому диапазону относятся капли диаметром 0,5–6 мм, имеющие конечные скорости падения 2–9 м/с. Снежинки и снежные хлопья, образующие при таянии капли различного диаметра, имеют конечные скорости падения 0,5–1,5 м/с. Наименьший размер выпадающих градин равен 1 мм, такие градины являются остатком от таяния более крупных частиц. В исключительных случаях максимальный размер градин достигает десятков сантиметров, однако наиболее часто выпадающие градины имеют размеры 1–3 см. Скорость падения градин зависит от их размера и может достигать 50 м/с и более.

В основе оптического осадкомера, разработанного в лаборатории экологического приборостроения ИМКЭС СО РАН, лежит метод получения и анализа теневых изображений частиц атмосферных осадков [4]. Суть метода состоит в определении структурных характеристик выпадающих осадков (размеров частиц, их формы и скорости падения) на основе измерения размеров теней для каждой из зарегистрированных частиц, проходящих сквозь измерительную площадку под действием силы тяжести. Для реализации метода плоский горизонтальный коллимированный световой поток от источника попадает на линейный массив из 768 светочувствительных

\* Владимир Викторович Кальчихин (vvk@imces.ru); Алексей Анатольевич Кобзев (kaa@imces.ru); Владимир Александрович Корольков (kor@imces.ru); Александр Алексеевич Тихомиров (tikhomirov@imces.ru).

элементов (линейный сенсор), формируя измерительный канал (рис. 1).

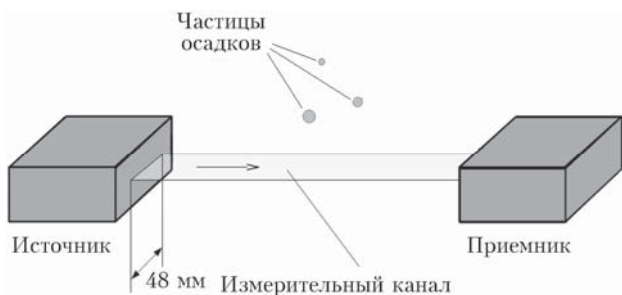


Рис. 1. Схема формирования измерительной площадки оптического осадкомера

Высокая частота сканирования сенсора (порядка 20 кГц) обеспечивает возможность многократного измерения горизонтального сечения тени каждой частицы по мере ее прохождения через измерительную площадку. Количество измерений тени каждой частицы определяется ее вертикальным размером и скоростью падения. Размер измерительной площадки, через которую свободно проходят частицы осадков (см. рис. 1), определяется шириной измерительного канала (48 мм), а также открытым расстоянием между источником и приемником (100 мм). Компоненты источника и приемника закрыты от воздействия окружающей среды защитными оптическими окнами.

На основании данных измерения параметров отдельных частиц происходит определение микроструктурных [5] и расчет интегральных характеристик выпадающих атмосферных осадков.

Горизонтальный размер каждой частицы определяется максимальным количеством затененных светочувствительных элементов известного размера. Вертикальный размер частиц твердых осадков считается равным горизонтальному. Для вычисления общего количества выпавших осадков данное приближение было бы слишком грубым, так как известно, что снежинки и градины, как правило, имеют неправильную форму. Но при решении задачи определения вида осадков данным фактом можно пренебречь.

Для определения вертикального размера капель дождя используются следующие соображения. Поскольку степень деформации капель дождя слабо зависит от атмосферных условий, то для отношения горизонтального  $b$  и вертикального  $a$  размеров капель, а также для отношения горизонтального размера  $b$  и эквивалентного диаметра  $d$  будут справедливы следующие эмпирические выражения [6]:

$$b/a = 0,9 + 0,1d, \quad (1)$$

$$b/d = 0,973 + 0,027d. \quad (2)$$

Решая систему из уравнений (1) и (2), можно получить выражение для вертикального размера через измеренное значение горизонтального размера и эквивалентный диаметр капель дождя.

Скорость падения определяется в соответствии с количеством полученных сечений теневого изображения частицы, которые зарегистрированы за время ее прохождения через измерительную площадку. При таком подходе величина скорости падения частицы  $v$  вычисляется с помощью следующего выражения:

$$v = af/n, \quad (3)$$

где  $f$  — частота сканирования теневых изображений,  $a$  — вертикальный размер частиц осадков,  $n$  — количество сканов данной частицы.

Определение вида осадков осуществляется на основании соотношения их размеров и скоростей падения. Например, в [7] предложена диаграмма для определения вида осадков по известным значениям эквивалентного диаметра и скорости падения частиц.

## Результаты натурных испытаний

Для проведения натурных испытаний экспериментальный образец оптического осадкомера был установлен на метеорологической площадке ИМКЭС СО РАН (рис. 2).



Рис. 2. Оптический осадкомер на метеорологической площадке ИМКЭС СО РАН

Результаты измерения скорости падения капель дождя приведены на рис. 3, а. Большинство зарегистрированных частиц, как и ожидалось, имеют характерные для дождя значения размеров частиц и скорости падения. Скорость падения растет с увеличением размера капель. Пик распределения размеров капель лежит в области 1–3 мм. Частицы размером более 3 мм встречаются значительно реже более мелких частиц. Широкий разброс значений для скоростей падения для крупных капель обусловлен регистрацией брызг от капель, разбивающихся об элементы конструкции прибора.

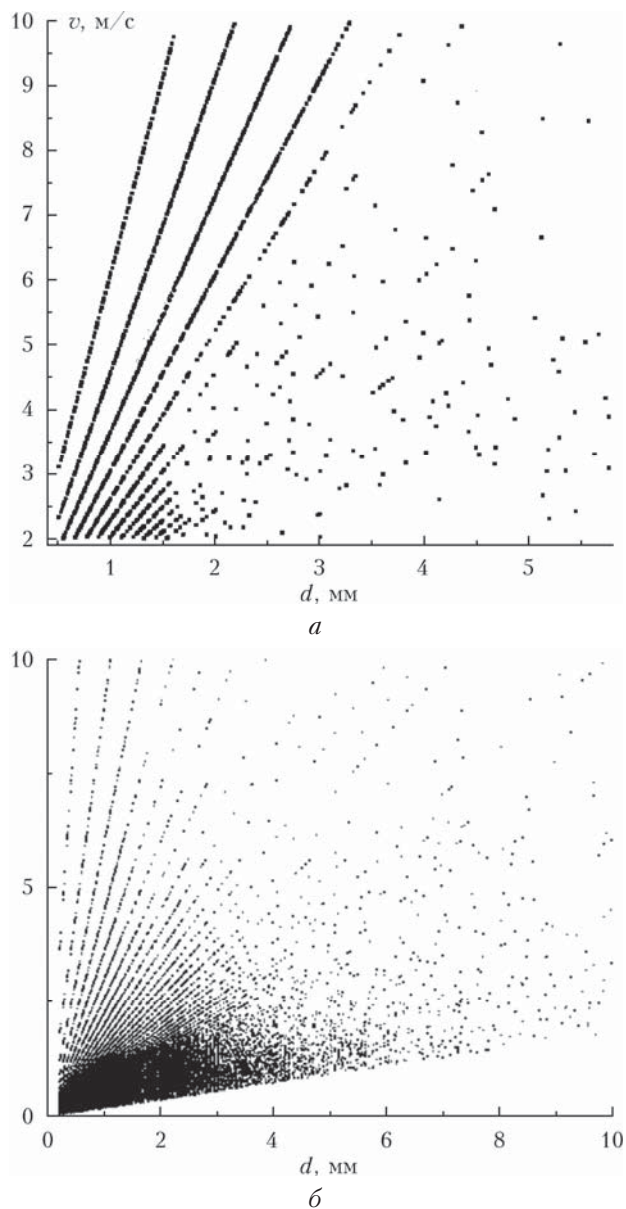


Рис. 3. Результаты измерения зависимости скорости падения от размеров частиц осадков: *а* — для капель дождя; *б* — для снежинок

Результаты измерения снеговых осадков представлены на рис. 3, *б*. Видно, что по сравнению с каплями дождя снежинки имеют больший разброс по размерам, а скорость падения их абсолютного большинства лежит в интервале до 2,5 м/с. Случаи регистрации единичных частиц с высокой скоростью относятся к ошибочным измерениям и требуют фильтрации. Результат применения первичной фильтрации позволяет исключить из рассмотрения крупные частицы с небольшой скоростью.

Соотношение скорости падения частиц и их размера позволяет отличать жидкие осадки от осадков, выпадающих в виде снега. Лучевая структура распределения точек на рис. 3 обусловлена дискретностью измерения скорости падения и размеров частиц осадков.

Поскольку град, как правило, сопровождается жидкими осадками различной интенсивности, то важно иметь возможность определять время начала и окончания выпадения града. Для этого осуществляется контроль размеров частиц и их терминальных скоростей падения, а также положения пика распределения частиц по размерам. Из анализа характерных зависимостей скорости падения частиц от размера для градин [8] и капель дождя следует, что детектирование частиц осадков размером более 7 мм со скоростью падения более 10 м/с можно считать началом выпадения града. В случае выпадения мелких градин с размерами в интервале 1–7 мм признаком наличия града является смещение значения пика в распределении частиц осадков по размерам из области значений 1–2 мм в область 5 мм и более.

### Заключение

Таким образом, разработанный оптический осадкомер позволяет на основе измерений микроструктурных характеристик атмосферных осадков делать вывод об их предполагаемом виде. Для повышения точности определения вида осадков необходимо учитывать значения средней температуры воздуха. Кроме того, в работе [9] предложен метод классификации осадков на основе наилучшего совпадения измеренных распределений частиц по размерам и скоростям с характерными для каждого вида осадков соотношениями, полученными взвешенным методом полных наименьших квадратов (WTLS). Использование данной технологии позволит приблизить точность определения вида осадков к точности визуальных наблюдений, что даст возможность полностью автоматизировать процесс мониторинга параметров осадков. Критерии, по которым работает алгоритм определения, будут уточняться в ходе дальнейших натурных испытаний и анализа данных регистрации частиц осадков различного вида.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП ИР (соглашение № 14.607.21.0030, уникальный идентификатор ПНИ RFMEFI60714X0030).

1. Рейфер А.Б., Алексеенко М.И., Бурцев П.Н., Застенкер А.И., Белогуров Ю.А., Непомнящий С.И. Справочник по гидрометеорологическим приборам и установкам. Л.: Гидрометеиздат, 1971. С. 70–71.
2. Литвинов И.В. Осадки в атмосфере и на поверхности земли. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 208 с.
3. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Приборное обеспечение измерения параметров атмосферных осадков. Современное состояние // Изв. вузов. Физ. Томск, 2009. 11 с. Деп. в ВИНТИ 16.12.09, № 802-B2009.
4. Оптический способ измерения атмосферных осадков: Пат. 2575181 РФ, МПК G 01 W 1/14. А.А. Азбукин, В.В. Кальчихин, А.А. Кобзев, В.А. Корольков. ИМКЭС СО РАН. № 2014129127/28; заявл. 15.07.2014, опубл. 20.02.2016. Бюл. № 5.
5. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Определение микроструктурных характеристик жидких атмосферных осадков с помощью оптиче-

- ского осадкомера // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 7. С. 669–672; *Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korol'kov V.A., Tikhomirov A.A.* Detection of Microstructure Characteristics of Liquid Atmospheric Precipitation with the Optical Rain Gage // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29. N 3. P 304–307.
6. *Beard K.V.* Terminal velocity and shape of cloud and precipitation drops aloft // J. Atmos. Sci. 1976. V. 33. P. 851–864.
7. *Loffler-Mang M., Joss J.* An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors // J. Atmos. Ocean. Technol. 2000. V. 17. P. 130–139.
8. *Женев P.* Град. Л.: Гидрометеоздат, 1966. 106 с.
9. *Jeong-Eun Lee, Sung-Hwa Jung, Hong-Mok Park, Soohyun Kwon, Pay-Liam Lin, GyuWon Lee.* Classification of precipitation types using fall velocity-diameter relationships from 2D-video disdrometer measurements // Adv. Atmos. Sci. 2015. V. 32. P. 1277–1290.

*V.V. Kalchikhin, A.A. Kobzev, V.A. Korol'kov, A.A. Tikhomirov.* **Determination of precipitation type using the results of optical measurements of the precipitation microstructure characteristics.**

The paper presents the principles of measuring the precipitation characteristics imaging and analyzing precipitation particle shadows. The method of precipitation type determination is described. It is based on microstructure characteristics measurements using the optical precipitation gauge. The measurements of the size and velocity ratios for rain and snow precipitation particles are presented.