

УДК 551.508.77:535.311:551.501.777

Определение микроструктурных характеристик жидких атмосферных осадков с помощью оптического осадкомера

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 27.02.2015 г.

Представлено описание оптического осадкомера, работа которого базируется на получении и анализе теневых изображений частиц осадков. В качестве примера продемонстрирована возможность использования этого прибора для изучения микроструктуры жидких атмосферных осадков, выпавших в г. Томске 26–27 августа 2014 г.

Ключевые слова: оптический осадкомер, микроструктура осадков, распределение капель по размерам, интенсивность дождя; optical rain gauge, precipitation microstructure, drop size distribution, intensity of rain.

Введение

Наличие детальной информации о выпадающих атмосферных осадках имеет большое значение во многих областях человеческой деятельности. Помимо интегральных характеристик: общего количества (суммы) осадков, интенсивности и длительности выпадения, в ряде случаев важно знать микроструктурные параметры дождя – размеры и форму отдельных частиц, распределение капель по размерам и скоростям. Без анализа микроструктуры невозможно достигнуть понимания механизмов формирования осадков в атмосфере. Информация о микроструктуре осадков необходима при исследованиях в области атмосферной оптики, атмосферного электричества, распространения радиоволн в атмосфере. Эта информация используется при прогнозировании эрозии почвы в агрометеорологии, а также при осуществлении экологического мониторинга загрязнений почвы и атмосферы. Данные о микроструктуре необходимы для решения некоторых прикладных задач, в число которых входят, например, организация стабильной наземной и спутниковой связи, обеспечение безопасности движения наземных и воздушных транспортных средств.

Стандартные осадкомеры, широко применяемые для метеорологических наблюдений, не позволяют определять микроструктурные параметры жидких осадков. Для решения данной задачи используются дисдрометры – сложные и, как правило, дорогостоящие приборы для измерения распределения частиц осадков по размерам и скоростям падения.

Принципы работы дисдрометров определяются физическими явлениями, лежащими в основе метода регистрации капель дождя. Среди прочих подходов, имеющих свои достоинства и недостатки, выгодно выделяется оптический метод получения и анализа изображений (теней) частиц осадков [1, с. 13]. Именно на его основе предложено техническое решение для разработанного в лаборатории экологического приборостроения ИМКЭС СО РАН оптического осадкомера [2, 3], способного проводить оценку размеров и формы падающих частиц, анализировать спектр частиц, определять тип осадков.

В настоящей статье продемонстрирована возможность измерения микроструктурных параметров жидких атмосферных осадков с помощью одноканального варианта данного прибора, в котором преимущества предыдущей версии сочетаются с повышенной надежностью, простотой изготовления, настройки и эксплуатации.

1. Описание прибора

В основе работы экспериментального образца оптического осадкомера (рис. 1) лежит метод получения и анализа теневых изображений падающих частиц атмосферных осадков, например капель дождя. Для реализации данного метода плоский горизонтальный коллимированный световой поток от источника попадает на линейный массив светочувствительных элементов (линейный сенсор), формируя измерительный канал. Размер измерительной площадки определяется размером открытой части измерительного канала, через которую проходят частицы осадков, и составляет 48×100 мм. Капли пересекают световой поток, вызывая затенение элементов линейного сенсора. Высокая частота сканирования сенсора обеспечивает возможность многократного измерения горизонтального сечения тени

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

каждой капли по мере ее прохождения сквозь измерительную площадку. Количество измерений тени (сканов) каждой капли зависит от скорости ее падения и диаметра D и достигает минимума в диапазоне размеров капель 0,5–1,0 мм. Капли дождя малого размера ($D < 1$ мм) имеют форму, близкую к сферической, для восстановления которой не требуется большого количества измерений. Капли размером 1 мм и более под действием различных сил приобретают более сложную форму [1, с. 31], но точность определения их геометрических характеристик повышается за счет увеличения количества измеряемых сечений.



Рис. 1. Оптический осадкомер на метеоплощадке ИМКЭС СО РАН (лето 2014 г.)

Хотя разрешение прибора позволяет регистрировать гидрометеоры размером от 0,1 мм, при проведении измерений учитываются только частицы выпадающих осадков, к которым в случае дождя относятся капли диаметром от 0,5 до 7,0 мм [4]. Это ограничение дает возможность существенно сократить объем обрабатываемой информации. Капли меньшего размера не дают существенного вклада в основные характеристики осадков.

Оптический осадкомер позволяет точно зарегистрировать время начала и окончания осадков, количество частиц осадков, которые пересекли измерительную площадку, определить их форму и размер. Это обеспечивает возможность получения как характеристик микроструктуры, так и интегральных параметров осадков.

2. Распределение капель дождя по размерам при осадках различной интенсивности

Распределение частиц осадков по размерам $N(D)$ является одной из характеристик микро-

структуры осадков. Как было отмечено выше, капли дождя размером более 1 мм имеют форму, отличающуюся от сферической, поэтому размер капель обычно характеризуется их эквивалентным диаметром, т.е. диаметром сферической капли, содержащей тот же объем воды. Для определения величины эквивалентного диаметра используют соотношения, полученные эмпирическим путем. Например, по измерениям капель воды в аэродинамических трубах [5] установлено, что соотношение вертикального размера a к горизонтальному b с высокой точностью описывается следующим соотношением $(a/b) = 1,03 - 0,62d$ при $d > 1$ мм, где d – эквивалентный диаметр капли.

Представление о каплях дождя как об эллипсоидах вращения с осями a и b является достаточно грубым приближением, которое тем не менее позволяет решить большинство задач, связанных с определением параметров микроструктуры осадков. В то же время измерение интегральных характеристик с помощью оптического осадкомера требует более точного определения формы капель или внесения поправок, получаемых в результате проведения долговременных сравнительных испытаний [6]. Решение подобных задач для представленного в настоящей статье измерителя осадков включено в планы дальнейших исследований.

Скорости падения мелких капель дождя также могут быть определены с использованием экспериментально полученной зависимости установившейся скорости падения от эквивалентного диаметра [7].

Для иллюстрации возможностей применения созданного образца оптического осадкомера при изучении микроструктурных параметров осадков был проведен анализ измерения дождей, прошедших в г. Томске 26–27 августа 2014 г. В период времени с 10:21 26 августа до 16:21 27 августа (здесь и далее указано местное время) дождь шел практически непрерывно. При этом сумма осадков превысила 40 мм, что составило величину порядка 10% от среднегодового количества для региона [8]. Оптический измеритель осадков был установлен на метеорологической площадке ИМКЭС СО РАН. Контроль сумм осадков осуществлялся с помощью стандартного осадкомера О-1 с ветровой защитой Третьякова, а интенсивность осадков определялась по данным, получаемым с челночного осадкомера Davis Rain Collector (RC). Все три прибора были установлены в непосредственной близости друг от друга (в пределах 3 м), что позволило исключить погрешность, вызванную неоднородностью распределения осадков в пространстве.

Результаты измерений интенсивности осадков I , полученные с помощью созданного прибора и осадкомера RC, представлены на рис. 2, который показывает хорошее качественное совпадение временного распределения I в процессе измерений. Некоторое превышение значений I , полученных оптическим осадкомером в различных временных интервалах, может быть объяснено большей величиной дискретизации измерений RC, составляющей 0,22 мм.

Для анализа микроструктуры выпавших осадков были выбраны периоды времени, в которые интенсивность выпадения и концентрации частиц осадков сохраняли свое значение в относительно узком диапазоне. По данным, приведенным в [1, с. 57], для интенсивности I в диапазоне 3–10 мм/ч среднее время сохранения постоянной интенсивности t_{cp} составляет 2,5 мин; для I от 1 до 3 мм/ч $t_{cp} = 4,0$ мин; для I от 0,3 до 1 мм/ч $t_{cp} = 5,5$ мин.

Согласно данным, полученным от осадкомера RC, максимальная интенсивность осадков 13,7 мм/ч была зарегистрирована 27 августа с 02 ч 31 мин до 02 ч 33 мин по местному времени. При этом средняя интенсивность дождя I_{cp} составила 9,7 мм/ч, а сумма выпавших за указанный период осадков $Q = 0,4$ мм. Кроме этого периода, для анализа были также выбраны результаты измерений, проведенных во время дождя средней интенсивности ($I_{cp} = 5$ мм/ч) и двух слабых дождей ($I_{cp} = 2,2$ и 0,7 мм/ч соответственно). В таблице приведены характеристики всех четырех выбранных для анализа периодов.

Для каждого выбранного периода была построена гистограмма распределения капель по размерам (рис. 3).

Видно, что распределения капель дождя по размерам, полученные с помощью оптического осадкомера, полностью соответствуют результатам более ранних исследований, проведенных другими методами (см., например, [1, с. 42]). В частности, все графики представляют собой одновершинные кривые, имеющие максимум в области значений диаметров 1,0–1,5 мм. Причем с увеличением интенсивности дождя положение данного максимума смещается в сторону увеличения размеров частиц. Косвенным подтверждением достоверности полученных микроструктурных характеристик является также тот факт, что график изменения интенсивности осадков за более чем суточный период времени, построенный по данным измерений каждой капли дождя, зарегистрированной оптическим осадкомером, качественно воспроизводит аналогичный результат, полученный с помощью калиброванного чешночного осадкомера RC (см. рис. 2).

Заключение

Технические возможности созданного экспериментального образца оптического осадкомера, использующего метод получения и анализа теневых изображений частиц, позволяют не только осуществлять

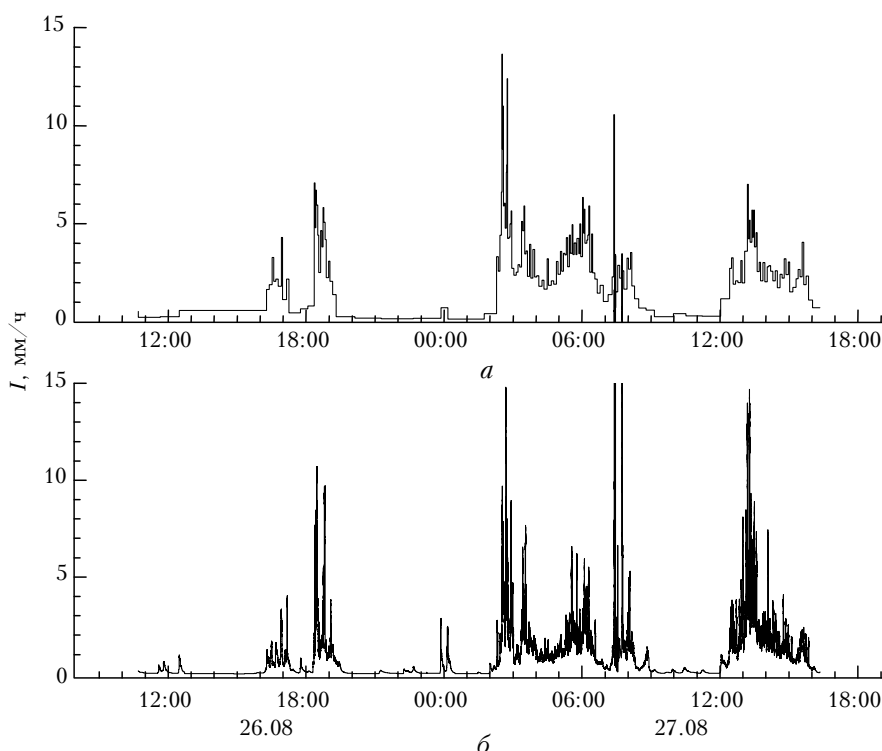


Рис. 2. Интенсивность осадков 26–27 августа 2014 г.: *a* – RC; *б* – оптический осадкомер

Характеристики анализируемых периодов выпадения осадков

№ периода	Начало периода, дата ч:мин	Длительность, мин	Средняя интенсивность, мм/ч	Общее количество осадков, мм	Количество зарегистрированных частиц
1	27.08 02:31	2	9,7	0,4	784
2	26.08 18:46	3	5,0	0,2	448
3	27.08 15:24	5	2,2	0,2	314
4	27.08 08:28	19	0,7	0,2	571

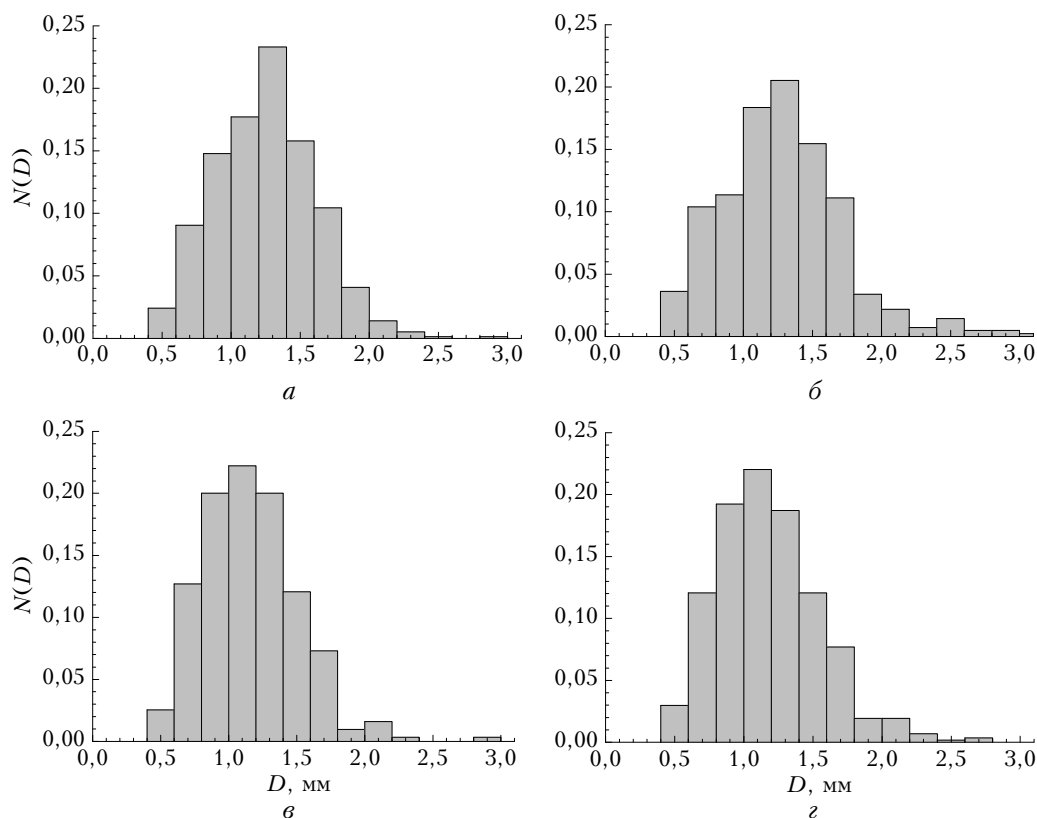


Рис. 3. Распределение капель дождя по размерам для: *a* – слабого ливня (период 1); *б* – дождя средней интенсивности (2); *в, г* – дождей низкой интенсивности (3 и 4)

длительное и непрерывное измерение интегральных параметров жидких осадков, но и проводить детальные исследования их микроструктурных характеристик. Достоверность полученных микроструктурных характеристик капель дождя подтверждается тем, что динамика измеренной интенсивности осадков с помощью оптического осадкомера совпадает с данными измерений осадкомером РС.

Дополнительно необходимо провести уточняющие калибровочные испытания созданного прибора и усовершенствование программного обеспечения для учета неидеальной формы дождевых капель.

Исследования по определению потенциальных возможностей созданного прибора поддержаны грантом Президента Российской Федерации (МК-3298.2015.5).

1. Литвинов И.В. Структура атмосферных осадков. Л.: Гидрометеониздат, 1974. 154 с.
2. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Оптико-электронный двухканальный

измеритель осадков // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 11. С. 990–996.

3. Азбукин А.А., Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Определение калибровочных характеристик оптико-электронного измерителя атмосферных осадков // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 5. С. 449–455.
4. Моргунов В.К. Основы метеорологии, климатологии. Метеорологические приборы и методы наблюдений. Ростов/Д.: Феникс; Новосиб.: Сиб. соглашение, 2005. С. 52.
5. Pruppacher H.R., Beard K. A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 1970. V. 96, N 408. P. 247–256.
6. Raupach T.H., Berne A. Correction of raindrop size distributions measured by Parsivel disdrometers, using a two-dimensional video disdrometer as a reference // Atmos. Meas. Technol. 2015. V. 8. P. 343–365.
7. Gunn R., Kinzer G.D. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air // J. Meteorol. 1949. V. 6. P. 243–248.
8. Швер Ц.А. Атмосферные осадки на территории СССР. Л.: Гидрометеониздат, 1976. 304 с.

V.V. Kalchikhin, A.A. Kobzev, V.A. Korolkov, A.A. Tikhomirov. Determination of microstructural characteristics of liquid precipitation using the optical rain gauge.

The optical rain gauge description is presented. This device operates for obtaining and analyzing shadow images of precipitation particles. The possibility was demonstrated of using this device to study the microstructure of liquid atmospheric precipitation. Analysis of precipitation occurred for more than a day in the city of Tomsk on August 26–27, 2014 was taken as an example.