

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.508.77:681.785.4

К выбору размера измерительной площадки двухканального 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 24.07.2012 г.

Представлены описание виртуальной измерительной площадки оптического осадкомера и критерии выбора ее размера. Проведен расчет вероятности одновременной регистрации нескольких частиц осадков. Показано, что создаваемый прибор должен обеспечивать одновременную регистрацию как минимум двух капель дождя. Проведены оценки объема передаваемых данных и расчет чувствительности прибора. Сделан вывод о более широких возможностях и связанных с этим перспективах применения разрабатываемого оптического измерителя осадков по сравнению с традиционно применяемыми осадкомерами.

Ключевые слова: частицы осадков, оптический осадкомер, измерительная площадка; precipitation particles, optical rain gauge, measuring area.

Введение

Измерение количества, интенсивности и распределения частиц осадков по размерам остается до настоящего времени недостаточно автоматизированным процессом в метеорологических приборах, используемых в сети Росгидромета. Важной характеристикой любого измерителя осадков является размер площади, через которую проходит каждая из учитываемых частиц осадков. Для традиционного осадкомера это площадь приемного отверстия воронки или осадкомерного ведра [1]. В оптических осадкомерах размер площади задается параметрами и взаимным расположением источников и приемников излучения [2, 3]. Следует отметить, что для измерения осадков оптическими методами не требуется накопления измеряемых частиц в приборе. Поэтому

данную характеристику оптических осадкомеров целесообразно называть не приемной площадью, а измерительной. В статье рассматриваются критерии, определяющие диапазон приемлемых размеров измерительной площади оптического осадкомера.

1. Критерии выбора размеров измерительной площади оптического осадкомера

Измерительная площадка создаваемого оптоэлектронного двухканального измерителя осадков (ОДИО) [3] формируется пересечением двух взаимно перпендикулярных оптических каналов (рисунки), т.е. является виртуальной.

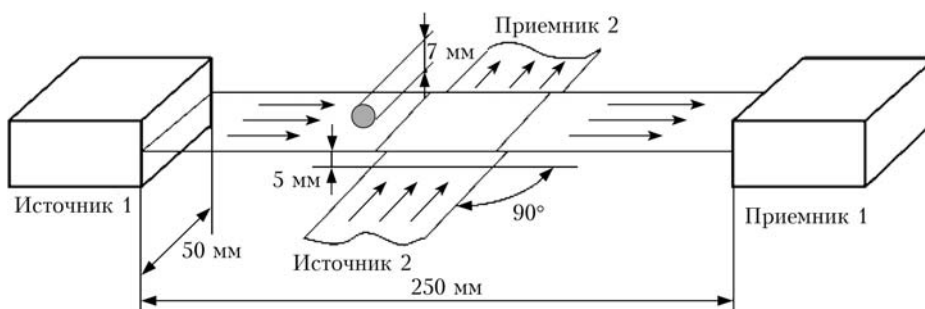


Схема формирования виртуальной измерительной площадки ОДИО

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

Известно, что суммарное количество осадков, измеренных традиционными измерителями, не зависит от площади приемного сечения [4], однако при малых значениях площади входного отверстия (менее 80 см²) наблюдается снижение точности

и чувствительности в силу малого количества собираемых осадков. Оптические осадкомеры лишены подобного недостатка, и их измерительная площадь имеет размеры в пределах 10–100 см² [3]. В оптических измерителях осадков помимо величины измерительной площади на эффективность измерений влияют и другие факторы (выбранный метод, применяемые стандарты, аппаратные характеристики), поэтому решающую роль в оценке приемлемости той или иной величины измерительной площади играют значения критериев эффективности измерений, индивидуальные для конкретного решения.

Исходя из общих принципов работы ОДИО, можно сформулировать ряд критериев, определяющих эффективность измерения частиц атмосферных осадков и зависящих от размеров измерительной площади. Среди них можно выделить следующие.

Вероятность одновременной регистрации нескольких частиц осадков. Параллельно с увеличением измерительной площади, повышающим чувствительность осадкомера, растет и вероятность одновременного нахождения в области измерений двух и более частиц. Хотя предложенная в [3] конструкция ОДИО и позволяет корректно распознать подобную ситуацию и произвести измерение, определенные аппаратные ограничения, связанные со скоростью обработки сигнала, получаемого с оптического сенсора, выдвигают задачу уменьшения вероятности одновременного измерения нескольких частиц за счет разумного ограничения величины измерительной площади. Однако следствием этого может являться увеличение времени, необходимого как для простого детектирования наличия или отсутствия осадков, так и для надежного измерения ряда важных параметров, одним из которых, например, является текущая интенсивность осадков.

Объем передаваемых измерительных данных. Он является важным критерием при проектировании схемы прибора. Увеличение измерительной площади пропорционально увеличивает объем измерительных данных, что накладывает жесткие ограничения на характеристики пропускной способности интерфейса между блоком измерения и блоком обработки и вычисления прибора.

Чувствительность прибора. Рассматриваемая схема позволяет за счет изменения ширины одного или обоих каналов непосредственно в процессе измерений адаптировать величину измерительной площади в соответствии с текущей интенсивностью осадков и оптимизировать объем поступающей на обработку информации. При этом, решая задачу сокращения количества передаваемых и обрабатываемых данных, не следует упускать из виду тот факт, что уменьшение измерительной площади сопровождается общим снижением чувствительности прибора. Минимальный размер измерительной площади должен обеспечивать для каждого типа осадков время срабатывания (детектирования наличия даже слабых осадков данного типа), как минимум, не превышающее время срабатывания стандартного измерителя осадков.

Таким образом, при оценке приемлемости выбранных параметров измерительной площади и определении их оптимальных значений следует учитывать степень влияния всех вышеперечисленных факторов на процесс измерения, осуществляемый с использованием ОДИО.

2. Расчет вероятности одновременного нахождения нескольких частиц в регистрационном объеме ОДИО

Измерительная площадка ОДИО формируется пересечением двух горизонтальных плоскопараллельных лучей (измерительных каналов), каждый из которых имеет ширину 50 мм и длину 250 мм.

Горизонтальные размеры области, в которой падающая частица может быть зарегистрирована фотоприемником (регистрационного объема), превышают размеры измерительной площадки. Измерительная площадь прибора равна 25 см², тогда как площадь горизонтального сечения регистрационного объема каждого канала составляет 125 см² (см. рисунок). Вертикальный размер луча приблизительно равен 1 мм, но его эффективная величина определяется высотой чувствительной области линейного фотоприемника. Она располагается в максимуме интенсивности развертки лазерного луча и составляет 0,0635 мм, что позволяет без потери точности дальнейших оценок считать измерительные каналы бесконечно тонкими.

Следуя [5], можно считать, что основное количество дождевых капель при осадках любой интенсивности составляют частицы диаметром до 7 мм. Капли большего размера присутствуют в относительно малых количествах, так как в потоке воздуха они становятся неустойчивыми и начинают распадаться на более мелкие [6]. Исходя из таких максимальных размеров капли, пересекающей луч одного канала, можно принять эту величину за вертикальный размер регистрационного объема ОДИО, используемого при оценке вероятности нахождения в нем нескольких частиц. Таким образом, можно рассчитать величину этого объема, которая в нашем случае составит $V = 8,75 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$.

Среднее число капель n в этом объеме определяется его величиной V и концентрацией дождевых капель N :

$$n = NV. \quad (1)$$

Вероятность P одновременного нахождения k капель в объеме V подчиняется распределению Пуассона [7]:

$$P(k) = n^k e^{-n} / (k!) = (NV)^k e^{-NV} / (k!). \quad (2)$$

Вероятность нахождения в объеме хотя бы одной частицы $P(1)$ составляет NVe^{-NV} , а вероятность одновременного нахождения двух частиц $P(2)$

равна $(NV)^2 e^{-NV}/2$. Следовательно, отношение числа одновременных измерений двух капель $P(2)$ к общему числу измерений $P(1)$ определяется выражением

$$P(2)/P(1) = NV/2. \quad (3)$$

Аналогично получается выражение для вычисления отношения числа одновременных измерений трех капель $P(3)$ к общему числу измерений $P(1)$:

$$P(3)/P(1) = (NV)^2/6. \quad (4)$$

Концентрация капель N зависит от интенсивности осадков и может быть оценена, например, с использованием функции распределения капель по величине, предложенной J.S. Marshall, W.M. Palmer [8]. Параметры данного распределения, соответствующие разным интенсивностям дождя, определены на основе экспериментальных измерений. По стандартам ВМО для интенсивности дождя установлены следующие определения: слабая — до 2,5 мм/ч, умеренная — от 2,5 до 10 мм/ч, сильная — от 10 мм/ч [9]. В работе [7] приведены рассчитанные с использованием распределения Маршала–Пальмера значения концентрации капель, соответствующие дождю различной интенсивности (1, 10 и 100 мм/ч). Эти значения дают возможность вычислить величины $P(2)/P(1)$ и $P(3)/P(1)$ для регистрационного объема одного канала ОДИО, величина которого согласно сделанной выше оценке составляет $8,75 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$. Результаты вычислений представлены в таблице.

Вероятности нахождения нескольких частиц в регистрационном объеме одного канала ОДИО и их соотношения в зависимости от концентрации дождевых капель, рассчитанной с использованием распределения Маршала–Пальмера [7]

Интенсивность дождя, мм/ч	1	10	100
Концентрация капель N , м^{-3}	570	1482	3009
Вероятность $P(1)$ нахождения капли в регистрационном объеме, %	4,74	11,39	20,23
Доля одновременных измерений двух капель $P(2)/P(1)$, %	2,49	6,48	13,16
Доля одновременных измерений трех капель $P(3)/P(1)$, %	0,04	0,28	1,16

Из таблицы видно, что доля измерений, при которых в регистрационном объеме одновременно находятся две капли, при дожде высокой интенсивности может превышать 5% от общего числа измерений. Следовательно, конструкция создаваемого осадкомера должна обеспечивать надежное одновременное измерение двух частиц. Доля возможного одновременного присутствия трех частиц даже при дожде экстремально высокой интенсивности составляет около 1%, что, в принципе, позволяет вообще исключить такую ситуацию из рассмотрения, избегая этим чрезмерного усложнения конструкции прибора и алгоритмов обработки получаемых данных.

3. Оценка объема передаваемых данных и расчет максимальной интенсивности дождя, регистрируемого ОДИО

Пользуясь таблицей, оценим объем данных, передаваемых измерительным блоком ОДИО в блок обработки и вычисления. Это позволит установить максимальную интенсивность дождя, регистрируемого с помощью ОДИО, т.е. верхнюю границу диапазона измерения интенсивности.

Если при прохождении частицы через измерительную площадку передавать только номера пикселей, на которых происходит переход от освещенного участка линейного фотоприемника к затененному и наоборот, то на каждый кадр, содержащий информацию о регистрируемой капле, придется 6 байт передаваемых данных (два двухбайтных номера пикселя, предваряемые двумя синхронизационными байтами). Это означает, что при частоте кадров 20 кГц, обеспечиваемой выбранным фотоприемником, максимальный объем передаваемых данных составит примерно 120 кбайт/с. А с учетом вероятности нахождения хотя бы одной капли в регистрационном объеме ОДИО (вероятность $P(1)$ в таблице) получаются величины порядка 5, 15 и 25 кбайт/с для пиковых объемов данных при дожде с интенсивностью 1, 10 и 100 мм/ч соответственно.

Самый интенсивный дождь за всю историю метеорологических наблюдений (38,1 мм/мин) отмечен 26 ноября 1970 г. в Гваделупе [10]. То есть максимально возможная интенсивность реального дождя составляет примерно 2000 мм/ч, что можно считать верхней границей диапазона измерения интенсивности, регистрацию которой должен обеспечить разрабатываемый осадкомер. Эта же величина приведена и в требованиях, предъявляемых ВМО к приборам, измеряющим параметры осадков [11]. Необходимым условием для осуществления регистрации осадков максимальной интенсивности является возможность передачи без потерь всех измерительных данных в блок обработки и вычисления.

Для расчета концентрации капель N , которая соответствует интенсивности 2000 мм/ч, необходимо проинтегрировать функцию распределения капель по диаметру $\rho(D)$. В качестве зависимости $\rho(D)$ воспользуемся, аналогично [7], функцией распределения Маршала–Пальмера [8]:

$$\rho(D) = N_0 e^{-\lambda D}. \quad (5)$$

Здесь $N_0 = 0,08 \text{ см}^{-4}$ при любой интенсивности; $\lambda = 41R^{-0,21} \text{ см}^{-1}$ (R — интенсивность дождя, мм/ч).

Хотя, как уже отмечалось, к дождю относятся капли, эквивалентный диаметр которых лежит в диапазоне от $D_{\min} = 0,05$ до $D_{\max} = 0,7 \text{ см}$ [5], имеет смысл уменьшить нижний предел интегрирования D_{\min} до 0,03 см, как это было сделано в [7]. Мелкие капли мороси не относятся к дождю и не вносят существенного вклада в интенсивность и общее количество осадков. Однако, попадая в регистрационную

область прибора, они будут вносить заметный вклад в поток передаваемых и обрабатываемых данных (хотя этот вклад после обработки и будет отброшен), что должно быть учтено при оценке общего объема данных, генерируемых измерительным блоком.

С учетом (5) расчет концентрации капель (в см^{-3}) будет выглядеть следующим образом:

$$N = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \rho(D) dD = \int_{0,03}^{0,7} 0,08 \exp(-41 \cdot 2000^{-0,2} D) dD \approx 0,0075 \text{ см}^{-3}. \quad (6)$$

Это означает, что при интенсивности дождя 2000 мм/ч в 1 м^3 находится приблизительно $0,0075 \times 10^6 = 7500$ капель. Для такой концентрации частиц вероятности $P(1)$, $P(2)$ и $P(3)$ (см. выше) будут равны 34, 33 и 7% соответственно. То есть при частоте считывания кадров с фотоприемника, равной 20 кГц, поток данных будет содержать $20000 \times 0,34 = 6800$ пакетов. При этом 33% этих пакетов ($6800 \times 0,33 = 2244$) будут нести информацию о двух одновременно находящихся в регистрационной области частицах, т.е. будут не шести-, а десятибайтными. Если принять во внимание, что лишь очень незначительное количество пакетов ($2244 \cdot 0,07 = 157$) может нести информацию о трех и более одновременно регистрируемых частицах и, соответственно, иметь чуть большую длину, то максимальный поток данных для верхней границы диапазона измерения интенсивности можно оценить величиной $6800 \cdot 0,67 \cdot 6 + 6800 \cdot 0,33 \cdot 10 = 49776$ байт/с ~ 50 кбайт/с.

Таким образом, линия связи измерительного блока и блока обработки и вычисления ОДИО, имея гарантированную пропускную способность около 200 кбайт/с, с большим запасом обеспечит передачу всех измерительных данных в случае реальных дождей любой интенсивности.

4. Расчет чувствительности ОДИО при заданном размере измерительной площади

Согласно требованиям ВМО осадкомер должен обеспечивать регистрацию наличия жидких осадков с минимальной интенсивностью 0,02 мм/ч за время, не превышающее 30 с [11]. Расчет концентрации капель с использованием распределения Маршала—Пальмера по формуле (6) показывает, что при интенсивности дождя 0,02 мм/ч в 1 м^3 находится около 50 капель. Создаваемый прибор способен зарегистрировать даже единичную частицу. Принимая во внимание однородность распределения капель в пространстве, можно предположить, что для того чтобы через измерительную площадь, равную 25 см^2 , прошла хотя бы одна частица, достаточно, чтобы на 1 м^2 поверхности выпало 400 частиц.

Это условие эквивалентно требованию достижения этой поверхности всеми каплями, содержащимися при дожде интенсивностью 0,02 мм/ч в 8 м^3 . То есть поверхности должны достигнуть даже самые медленные капли, падающие с высоты 8 м. Известно, что самыми медленными частицами осадков являются самые маленькие, размер которых при дожде составляет 0,5 мм [5]. Как следует из работы [7], установившаяся скорость падения таких частиц приблизительно равна 2 м/с. Таким образом, требуемое количество капель гарантированно достигнет измерительной площади прибора, обеспечив регистрацию начала осадков, менее чем через 5 с после начала дождя, что полностью удовлетворяет требованиям ВМО.

Количество воды, которое выпадет с каплями, содержащимися в этих 8 м^3 , используя формулу (6), можно рассчитать следующим образом:

$$A = 8 \cdot 10^6 \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} V(D) \rho(D) dD = 8 \cdot 10^6 \int_{0,03}^{0,7} 0,524 D^3 \cdot 0,08 \exp(-41 \cdot 0,02^{-0,21} D) dD \approx 0,02 \text{ см}^3. \quad (7)$$

Здесь $V(D)$ — объем капли диаметром D , см^3 .

При выпадении $0,02 \text{ см}^3$ воды на 1 м^2 поверхности образуется слой осадков $2 \cdot 10^{-5}$ мм.

Заключение

Проведенные оценки объема передаваемых данных и вероятностей одновременной регистрации нескольких частиц осадков показали приемлемость выбранного размера измерительной площади. Представленный расчет показывает чувствительность ОДИО по количеству выпавших осадков, которая на порядок превышает величину, полученную в [9] на основе гораздо более простых и, соответственно, грубых предположений. Сравнение рассчитанной чувствительности с разрешением стандартного осадкомера Третьякова О-1 (0,1 мм) с чувствительностью челночных датчиков осадков RG13 и QMR102 (0,2 мм [12]), входящих в комплект автоматических метеостанций *Vaisala*, которыми в настоящее время переоснащается гидрометеорологическая сеть России [13], подтверждает более широкие возможности и связанные с этим перспективы применения разрабатываемого оптического измерителя осадков.

Работа выполняется в рамках базового проекта СО РАН VII.66.1.2.

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.: Гидрометеоиздат, 1971. 372 с.
2. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Приборное обеспечение измерения па-

- раметров атмосферных осадков. Современное состояние // Изв. вузов. Физика. Томск, 2009. 11 с. Деп. в ВИНТИ 16.12.09, № 802-B2009.
3. *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.
 4. *Kurtyka J.C.* Precipitation Measurement Study. State of Illinois, Illinois State Water Survey, Urbana, 1953. Report of Investigation N 20. P. 5.
 5. *Моргунов В.К.* Основы метеорологии, климатологии. Метеорологические приборы и методы наблюдений. Ростов/Д.: Феникс; Новосибирск: Сиб. соглашение, 2005. С. 52.
 6. *Литвинов И.В.* Структура атмосферных осадков. Л.: Гидрометеонздат, 1974. С. 34.
 7. *Illingworth A.J., Stevens C.J.* An Optical Disdrometer for the Measurement of Raindrop Size Spectra in Windy Conditions // J. Atmos. and Ocean. Technol. 1987. V. 4. September. P. 411–421.
 8. *Marshall J.S., Palmer W.M.* The distribution of raindrops with size // J. Meteorol. 1948. V. 5, N 2. P. 165–166.
 9. *Руководство по автоматическим системам метеорологического наблюдения на аэродромах (Doc 9837).* Международная организация гражданской авиации (ICAO). Изд. 2-е. 2011. 111 с.
 10. *Krause P.F., Flood K.L.* Weather and climate extremes. Alexandria, Virginia, 1997. P. 25.
 11. *WMO Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation.* WMO-No. 8. Seventh edition, 2008. P. 1.1–22.
 12. *Датчики дождя и осадков Vaisala* [Электронный ресурс]: RG13/RG13H. URL: <http://www.vaisala.ru/ru/products/rainandprecipitationsensors/Pages/RG13RG13H.aspx> (дата обращения 12.06.2012).
 13. *Иттолитов И.И., Кабанов М.В., Смирнов С.В.* Концепция сетевого мониторинга природно-климатических процессов в Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 1. С. 7–14.

V.V. Kalchikhin, A.A. Kobzev, V.A. Korolkov, A.A. Tikhomirov. **On the choice of the measuring area for dual-channel optical rain gauge.**

The paper presents description of the optical rain gauge, virtual measuring area, and criteria of the measuring area defining. The probability calculation for simultaneous registration of multiple precipitation particles is performed. It is shown that the developed device should provide simultaneous recording of two raindrops at least. Estimations of the transmitted data traffic and calculation of the instrument sensitivity have been made. It was concluded that this gauge has wider possibilities and related prospects in comparison with traditional rain gauges.