

## АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 535.311:551.508.77

# Оптимизация процедуры калибровки оптико-электронного измерителя атмосферных осадков

**В.В. Кальчихин, А.А. Кобзев, А.А. Тихомиров, Д.Е. Филатов\***

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

Поступила в редакцию 23.04.2021 г.

Проанализирована зависимость результатов калибровки оптического осадкомера от размеров используемых эталонных объектов. Предложены пути оптимизации процедуры калибровки, среди которых: уменьшение количества калибровочных зон; применение калибровочных коэффициентов вместо поправочных параметров; введение дополнительной калибровки шарами диаметром 1 мм; использование для частиц размером менее 2 мм коэффициентов, зависящих от величины измеренного диаметра. Сделан вывод об эффективности использования предложенной процедуры для калибровки оптико-электронных приборов, предназначенных для определения размеров малых частиц, например измерителя параметров метелей.

*Ключевые слова:* оптический осадкомер, калибровка, размер капель, измеритель параметров метелей; optical precipitation gauge, calibration, drop size, snowstorm parameter gauge.

Для обеспечения минимальной разницы между показаниями измерительного прибора и реальными значениями измеряемой величины осуществляется процедура калибровки, часто связанная со сложным анализом результатов измерений и их математической обработкой. Современная элементная база и новые методы обработки данных позволяют применять все более сложные методики калибровки для повышения точности измерений при снижении трудозатрат.

Поскольку нет общепринятого стандарта калибровки оптических измерителей осадков, на практике используется целый ряд различных способов. Например, при калибровке 2D-видеоисдрометра на основе линейно-сканирующих камер [1] и дисдрометра на основе инфракрасного фотодетектора [2] использовались металлические шары различного диаметра (до 10 мм). Оптический дисдрометр калибровался с помощью стеклянных сфер и капель этанола и воды, генерируемых с помощью уникального стенда [3], размерами от 0,28 до 4,29 мм. Для калибровки оптического измерителя осадков [4] применялся вращающийся с заданной скоростью прозрачный диск, на который были наклеены непрозрачные круги диаметрами от 0,50 до 4,75 мм.

Калибровка, применявшаяся для первых образцов разработанного в ИМКЭС СО РАН оптико-электронного измерителя осадков (ОПТИОС) [5], была основана на использовании эталонных сталь-

ных шаров диаметром 5,01 мм. Существенный вклад в погрешность измерений вносит несовершенство оптической системы прибора, а именно неоднородность светового потока в измерительном канале и разность размеров светочувствительных элементов применяемого линейного сенсора. Чтобы компенсировать влияние этих факторов, шары отпускались в свободное падение через измерительную площадку прибора, которая условно была разбита по ширине на восемь участков. Для каждого участка рассчитывался калибровочный параметр в виде разности реального диаметра эталонного шара и среднего значения ста результатов измерений шаров, прошедших через этот участок измерительной площадки. Относительная погрешность диаметров, полученных после добавления рассчитанных поправок к измеренным значениям, для средних и крупных (более 2 мм) шаров составила 5%. Однако для шаров меньших диаметров на некоторых участках она достигала 30%. И хотя совсем мелкие частицы осадков не вносят существенного вклада в интегральные характеристики жидких осадков, известно [6], что размер большей части капель дождя — от 0,5 до 1,5 мм. В связи с этим представляется актуальной задача оптимизации процедуры калибровки ОПТИОС с целью уменьшения погрешности измерений диаметров мелких частиц. Опыт разработки нового образца измерителя осадков и результаты анализа измерений за 2014–2020 гг. [7] позволили сформулировать основные идеи такой оптимизации.

Во-первых, с целью уменьшения трудоемкости калибровки были увеличена ширина и установлен единый размер участков, на которые условно разбивается измерительная площадка, что привело к уменьшению числа калибровочных зон до шести

\* Владимир Викторович Кальчихин (vvk@imces.ru); Алексей Анатольевич Кобзев (kaa@imces.ru); Александр Алексеевич Тихомиров (tikhomirov@imces.ru); Дмитрий Евгеньевич Филатов (dmitrii.04101995@gmail.com).

и облегчило попадание эталонных шаров в требуемую зону. Кроме того, для более точного попадания шаров небольшого диаметра в требуемый участок измерительной площадки было изготовлено специальное прицельное приспособление, состоящее из воронки, соединенной с направляющей трубкой малого диаметра и закрепленной над измерительной площадкой на подвижном основании.

Учитывая геометрию оптической схемы прибора, в основе которой – формирование коллимированного светового потока и регистрация происходящих в нем изменений, можно предположить, что возникающие погрешности измерений частично могут быть обусловлены возможным несовершенством коллимации, приводящим к небольшому расхождению (или схождению) луча. В этом случае логичным представляется вместо калибровочных поправок  $\Delta D_i$  (где  $i$  – номер зоны), добавляемых к измеренным значениям согласно [5], использовать калибровочные коэффициенты  $K_i$ , на которые измеренные значения должны умножаться:

$$K_i = D_{cp\ i} / D_{эт}, \quad (1)$$

где  $D_{cp\ i}$  – среднее значение результатов измерений для эталонных шаров, попавших в калибровочную зону под номером  $i$ ;  $D_{эт}$  – диаметр эталонного шара.

С целью более точного определения размеров мелких гидрометеоров в модифицированном варианте процедуры калибровки решено использовать эталонные шары диаметром 2,99 мм. Применение объектов меньшего размера сильно усложнило бы калибровку и потребовало бы изготовления дополнительных приспособлений для манипуляций с ними.

Результаты измерения шаров диаметрами 0,99; 1,99; 2,99; 3,99 и 5,01 мм, полученные до и после калибровки ОПТИОС по модифицированной процедуре, приведены на рис. 1. Как и ожидалось, максимальная точность измерений достигнута для объектов, размеры которых близки к диаметру эталонных шаров, использованных для калибровки.

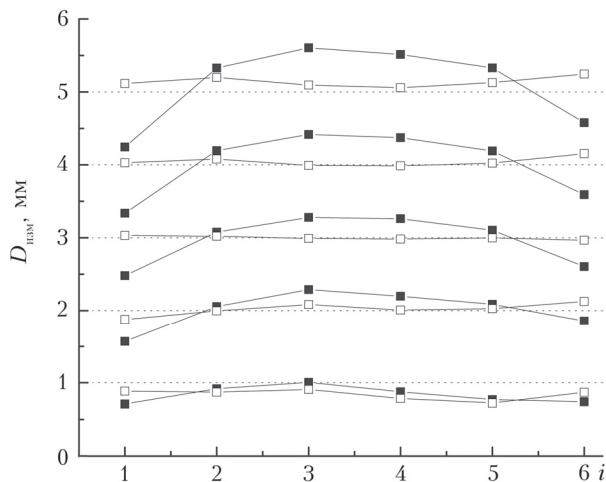


Рис. 1. Результаты измерений шаров диаметрами 0,99; 1,99; 2,99; 3,99 и 5,01 мм до (черные квадраты) и после (белые квадраты) калибровки ОПТИОС с использованием эталонных шаров диаметром 2,99 мм

При этом погрешность определяемых значений растет тем сильнее, чем больше отличаются размеры объектов от диаметра эталонных шаров.

Для более точной оценки эффективности калибровки необходимо рассчитать относительную погрешность измерения шаров разного диаметра в каждой зоне и среднюю по зонам относительную погрешность измерения для каждого диаметра.

Относительная погрешность измерения эталонного шара диаметром  $D_{эт}$  в  $i$ -й зоне рассчитывается по формуле

$$\delta_i = |(D_{изм\ i} - D_{эт}) / D_{эт}| \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $D_{изм\ i}$  – измеренное значение диаметра в  $i$ -й зоне.

Средняя по всем зонам относительная погрешность измерения для шара каждого диаметра рассчитывается по формуле

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^N \delta_i}{N}, \quad (3)$$

где  $N$  – количество зон (в данном случае  $N = 6$ ).

Результаты расчета относительных погрешностей измерений для шаров различных диаметров до и после применения калибровочных коэффициентов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Относительная погрешность (%) измерения шаров разного диаметра в каждой зоне и средняя по зонам относительная погрешность измерения (%) для каждого диаметра

$D_{эт}$ , мм	Зона						Средняя по зонам
	1	2	3	4	5	6	
<i>До калибровки</i>							
0,99	28,30	7,19	1,45	11,29	22,30	25,64	16,03
1,99	23,05	3,30	15,14	10,65	4,85	6,73	10,62
2,99	18,18	2,89	9,78	7,07	3,82	14,19	9,32
3,99	18,12	5,16	8,82	9,02	5,02	10,48	9,44
5,01	15,52	6,33	10,75	10,06	6,36	8,66	9,61
<i>После калибровки</i>							
0,99	12,37	9,80	7,59	17,15	25,17	13,35	14,24
1,99	5,95	0,40	4,89	3,34	0,99	8,69	4,04
2,99	0	0	0	0	0	0	0
3,99	0,07	2,21	0,87	1,82	1,16	4,32	1,74
5,01	3,25	3,34	0,88	2,79	2,44	6,44	3,19

Анализ данных таблицы показывает, что калибровка шарами диаметром 2,99 мм достаточно эффективна для измерения объектов размером от 2 до 5 мм. В указанном диапазоне размеров средняя относительная погрешность не превышает 5%, а максимальная относительная погрешность во всех калибровочных зонах ниже 10%. Для более мелких объектов калибровка трехмиллиметровыми шарами не привела к повышению точности измерений. Видно, что для миллиметровых шаров после применения калибровочных коэффициентов относительная погрешность для большинства зон даже повысилась, а средняя по всем зонам осталась почти без изменений.

Для оценки степени влияния размеров эталонных шаров на калибровочные коэффициенты была дополнительно проведена калибровка с использова-

нием шаров диаметрами 0,99; 1,99; 3,99 и 5,01 мм. Полученные при этом  $K_i$  для каждого  $D_{эт}$  и для каждой зоны показаны на рис. 2. Для большей наглядности коэффициенты, рассчитанные по формуле (1) для разных  $D_{эт}$ , но относящиеся к одной зоне, соединены сплошными линиями.

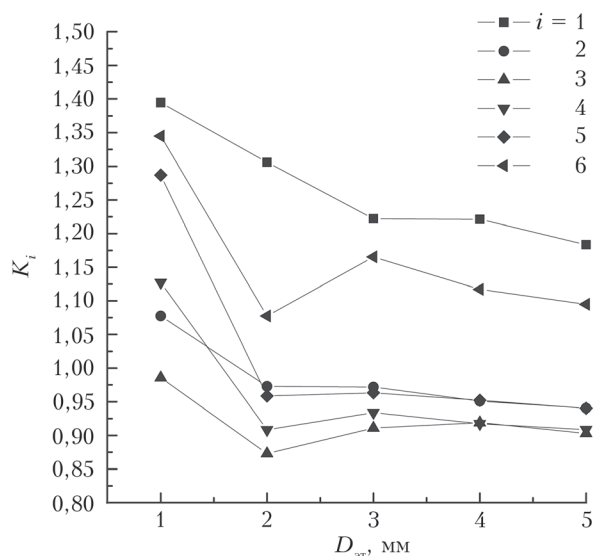


Рис. 2. Калибровочные коэффициенты, полученные при калибровке эталонными шарами разного диаметра, для всех калибровочных зон

Видно, что диаметр эталонных шаров сильно влияет на калибровочные коэффициенты, полученные с их использованием. Так как оптическая система ОПТИОС симметрична относительно центральной осевой линии измерительного канала, следует ожидать, что и величины искажений в зонах, расположенных симметрично этой линии, будут близки. Следовательно, для их коррекции потребуются близкие по величине калибровочные коэффициенты. Это хорошо видно на рис. 2. Наборы калибровочных коэффициентов для 1-й и 6-й, 2-й и 5-й, 3-й и 4-й зон расположены попарно ближе всего друг к другу. Как и ожидалось, калибровочные коэффициенты растут от центра измерительного канала (3-я и 4-я зоны), где искажения минимальны, к краям (1-я и 6-я зоны), где они максимальны. Для эталонных шаров диаметром 2 мм и больше калибровочные коэффициенты отличаются незначительно, особенно для центральных зон. Следовательно, для измерения объектов размерами более 2 мм можно использовать предложенный ранее набор коэффициентов, полученных при калибровке эталонными шарами диаметром 2,99 мм.

На рис. 2 видно, что размеры более мелких объектов требуют наибольшей коррекции в сторону увеличения. Можно предположить, что размеры те же в данном случае занижаются за счет того, что для таких мелких объектов становятся существенными эффекты, вносимые дифракцией. В связи с этим для объектов размерами менее 2 мм предлагается использовать калибровочные коэффициенты,

рассчитываемые с помощью линейной интерполяции между коэффициентами, используемыми для двухмиллиметровых объектов, и коэффициентами, получаемыми при дополнительной калибровке миллиметровыми эталонными шарами. График, отображающий зависимость  $K_i$  для  $i$ -й зоны от размера зарегистрированного в этой зоне объекта  $D_{изм}$ , приведен на рис. 3. На графике  $K_{1i}$  и  $K_{3i}$  обозначают коэффициенты для зоны с номером  $i$ , полученные при калибровке шарами диаметрами 0,99 и 2,99 соответственно.

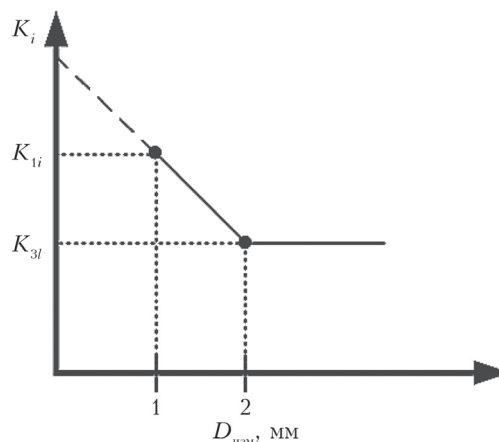


Рис. 3. Зависимость калибровочных коэффициентов от размеров регистрируемых объектов при применении оптимизированной процедуры калибровки

Для оценки эффективности оптимизированной процедуры калибровки были проведены лабораторные испытания, результаты которых представлены на рис. 4. Хорошо видно, что новая процедура калибровки хотя и не дала заметного повышения точности измерения для двухмиллиметровых объектов по сравнению с обычной калибровкой трехмиллиметровыми эталонными шарами, но существенно повысила точность измерения миллиметровых объектов.

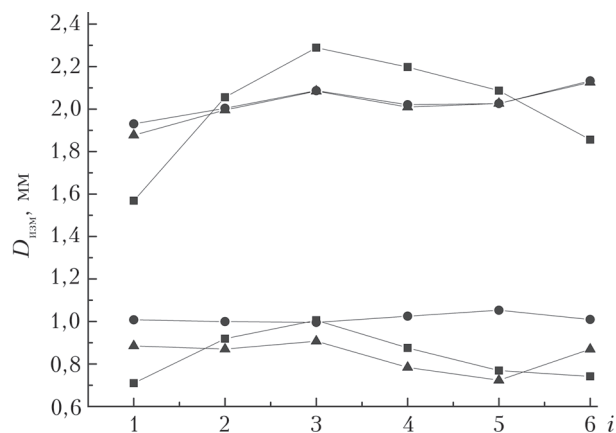


Рис. 4. Результаты измерений шаров диаметрами 0,99 и 1,99 мм до (квадраты) и после калибровки ОПТИОС с использованием эталонных шаров диаметром 2,99 мм (треугольники) и после оптимизированной калибровки с использованием линейной интерполяции (кружки)

Этот вывод количественно подтверждают данные табл. 2, в которой приведены результаты расчетов по формулам (2) и (3) относительных погрешностей измерений шаров диаметрами 0,99 и 1,99 мм для каждой калибровочной зоны и средних по всем зонам значений относительной погрешности. Расчеты погрешностей проводились для результатов измерений до и после применения оптимизированной калибровки с использованием линейной интерполяции для коэффициентов. Видно, что для малых объектов относительные погрешности измерений после калибровки сократились с десятков до единиц процентов.

Таблица 2

**Относительная погрешность (%) измерения шаров диаметрами 0,99 и 1,99 в каждой зоне и средняя по всем зонам относительная погрешность (%)**

$D_{эт}$ , мм	Зона						Средняя по зонам
	1	2	3	4	5	6	
<i>До калибровки</i>							
0,99	24,58	10,63	17,89	27,53	26,67	26,34	22,27
1,99	21,17	3,30	15,02	10,45	4,85	6,73	10,25
<i>После калибровки</i>							
0,99	0,53	2,26	5,59	9,13	6,88	0,79	4,20
1,99	3,01	0,69	4,87	1,52	1,80	1,17	3,18

Таким образом, проведенный анализ зависимости результатов калибровки оптического осадкомера от размеров применяемых эталонных объектов позволил предложить пути оптимизации процедуры калибровки. Ключевыми моментами такой оптимизации стали введение дополнительной калибровки шарами диаметром 1 мм, а также использование для частиц размером менее 2 мм коэффициентов, зависящих от величины измеренного диаметра. Подтвержденная лабораторными испытаниями и расчетами эффективность предложенной процедуры позволяет рекомендовать ее для калибровки опти-

ко-электронных приборов, предназначенных для определения размеров малых частиц, например разрабатываемого в ИМКЭС СО РАН измерителя параметров метелей [8].

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН.

1. Kruger A., Krajewski W.F. Two-dimensional video disdrometer: A description // J. Atmos. Ocean. Technol. 2002. V. 19, N 5. P. 602–617.
2. Mocholi Belenguer F., Martinez-Millana A., Mocholi Salcedo A., Milián Sánchez V., Josefa Palomo Anaya M. Disdrometer performance optimization for use in urban settings based on the parameters that affect the measurements // Symmetry. 2020. V. 12, N 2. P. 303. DOI: 10.3390/sym12020303.
3. Löffler-Mang M., Joss J. An optical disdrometer for measuring size and velocity of hydrometeors // J. Atmos. Ocean. Technol. 2000. V. 17, N 2. P. 130–139.
4. Barthazy E., Goke S., Schefold R., Hogg D. An optical array instrument for shape and fall velocity measurements of hydrometeors // J. Atmos. Ocean. Technol. 2004. V. 21, N 9. P. 1400–1416.
5. 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; Azbukin A.A., Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolov V.A., Tikhomirov A.A. Determination of calibration parameters of an optoelectronic precipitation gauge // Atmos. Ocean. Opt. 2014. V. 27, N 4. P. 432–437.
6. Литвинов И.В. Структура атмосферных осадков. Л.: Гидрометеониздат, 1974. 154 с.
7. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Тихомиров А.А., Филатов Д.Е. Измерение количества осадков с помощью оптического осадкомера в течение летнего периода 2020 г. // Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 2. С. 152–155. DOI: 10.15372/AOO202102.
8. Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Filatov D.E. Features of measuring parameters of snow accompanied by wind // Proc. SPIE. 2020. V. 11560. P. 115605B-1–5. DOI: 10.1117/12.2575976.

**V.V. Kalchikhin, A.A. Kobzev, A.A. Tikhomirov, D.E. Filatov. Optimization of the calibration procedure for the optoelectronic precipitation gauge.**

The dependence of the optical precipitation gauge calibration results on the dimensions of the reference objects is analyzed. The ways to optimize the calibration procedure are suggested, including: reducing the number of calibration zones; use of calibration factors instead of correction parameters; additional calibration with balls with a diameter of 1 mm; use of the coefficients depending on the measured diameter for particles smaller than 2 mm. The conclusion is made about the effectiveness of the calibration procedure suggested for the optoelectronic devices designed to measure the size of small particles, for example, a snowstorm parameter gauge.