

УДК 551.501; 551.510.42; 535.361.2

Определение калибровочных характеристик оптико-электронного измерителя атмосферных осадков

А.А. Азбукин, 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 26.12.2013 г.

Представлены основные характеристики оптических каналов оптико-электронного двухканального измерителя осадков, а также результаты лабораторных экспериментов и предварительных натуральных испытаний. Предложена процедура определения калибровочных характеристик с помощью стальных шаров диаметром 5,01 мм, которая позволяет минимизировать погрешность, связанную с несовершенством оптической системы прибора. Результаты измерений объемов жидкости показали, что погрешность измерений сумм осадков в лабораторных условиях не превышает 5%. Данные предварительных натуральных измерений параметров дождей представлены в виде распределений частиц осадков по размерам, изменения интенсивности и вычисленных значений сумм осадков.

Ключевые слова: оптический осадкомер, калибровка, размер капель; optical precipitation gauge, calibration, drop size.

Введение

Важным этапом создания любого средства измерения является установление зависимости между его показаниями и реальным значением измеряемой физической величины. Процедура определения поправочных коэффициентов для показаний выходных данных измерений с целью достижения согласия между эталонной величиной на входе и результатом измерений на выходе для оптико-электронных приборов, т.е. методика их калибровки, традиционно сопряжена со сложными процедурами юстировки прибора и математической обработки данных, получаемых в результате измерений. Однако применение современных технологий и соответствующих методов обработки информации обеспечивает возможность существенного упрощения методики калибровки измерительного прибора, вплоть до возможности его калибровки в полевых условиях без специальной подготовки.

Калибровка оптического измерителя параметров атмосферных осадков заключается в проведении процедуры получения поправочных коэффициентов, которые необходимо внести в алгоритм расчета измеренных значений размеров частиц осадков, чтобы они соответствовали суммарному объему жидкости, прошедшему через измерительную часть прибора.

Таким образом, точность измерения количества осадков зависит от точности измерения размеров и формы отдельных частиц и их общего количества.

Для определения калибровочных характеристик оптических осадкомеров в лабораторных условиях часто используются калиброванные шары. Например, при калибровке 2D-видеоидсдрометра [1] применялись стальные шары диаметром 10 мм. В [2] для калибровки оптического измерителя осадков были использованы непрозрачные диски различного диаметра, наклеенные на вращающееся с задаваемой скоростью прозрачное основание. В [3] определение калибровочных характеристик осуществлялось измерением искусственно получаемых капель известного размера.

В настоящей статье представлены методика калибровки и результаты предварительных испытаний экспериментального образца осадкомера [4] с помощью шаров различных диаметров (1–11 мм) и эталонных объемов жидкости, пропускаемых в виде капель малого размера через измерительную площадку прибора.

1. Основные характеристики измерительного канала оптического осадкомера

Работа созданного нами оптико-электронного двухканального измерителя осадков (ОДИО) [4] основана на получении и анализе теневых изображений частиц атмосферных осадков. Данная реализация предполагает регистрацию изображений теней

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

от частиц, последовательно пересекающих два горизонтальных оптических канала, каждый из которых сформирован источником светового потока прямоугольного сечения и приемником, выполненным на основе линейного массива светочувствительных элементов (линейный сенсор). В качестве сенсора использована линейная ПЗС-матрица, содержащая 768 светочувствительных элементов, каждый из которых имеет ширину 63,5 мкм. Частота сканирования линейного сенсора составляет 20 кГц. Источник излучения выполнен на основе лазерного диода мощностью 8 мВт с длиной волны 650 нм. Высота вертикального сечения светового потока приблизительно равна 1 мм, но ее эффективная величина определяется вертикальным размером чувствительной области линейного сенсора (рис. 1).

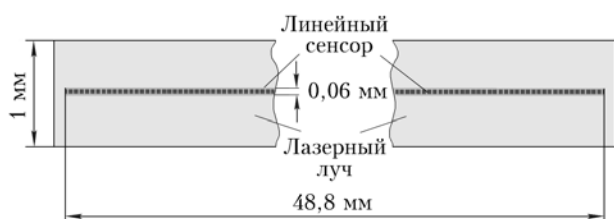


Рис. 1. Схема поперечного сечения оптического канала

Каждая из учитываемых частиц проходит через виртуальную измерительную площадку [5], формирующуюся в области пересечения проекций оптических каналов на горизонтальную плоскость. Размер этой площадки определяется шириной оптических каналов и может изменяться в диапазоне 1–25 см².

2. Особенности определения размеров объектов при лабораторных испытаниях

В качестве эталона использовались калиброванные стальные шары для приборных подшипников. При измерении размеров эталонных шаров, регистрируемых в различных областях оптических каналов, было замечено расхождение результатов измерений диаметров шаров с их заявленным размером.

Определение зависимости измеренного размера от местоположения шара в пределах измерительной площадки осуществлялось сравнением измеренных и реальных диаметров шаров. Эксперименты показали, что измеренные величины размеров не зависят от близости или удаленности шаров от приемника или излучателя в пределах измерительной площадки. Однако наблюдалась явная зависимость результатов измерений от положения частиц относительно края поперечного сечения оптического канала. На поперечном сечении оптического канала (см. рис. 1) случайным образом было выбрано 6 экспериментальных точек, разделивших канал по ширине на 5 участков, в каждом из которых было произведено 100 измерений прозрачных и окрашенных в черный цвет шаров, имеющих диаметр $(10,8 \pm 0,1)$ мм.

По оси абсцисс на рис. 2 отложены порядковые номера оптических элементов сенсора, а по оси ор-

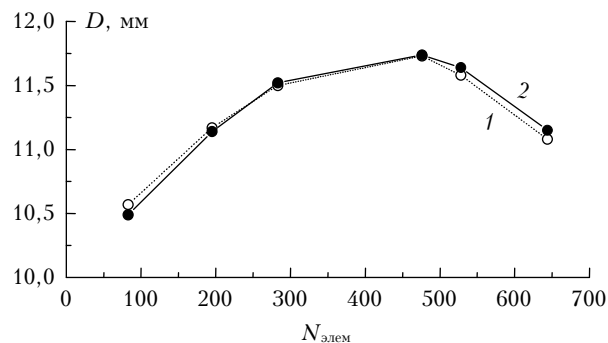


Рис. 2. Результаты измерения диаметров прозрачного (1) и черного (2) шаров

динат — измеренные значения диаметров шаров. Видно, каким образом меняются результаты измерений для различных участков линейного сенсора. Расхождение значений, полученных для прозрачных и окрашенных шаров, не превышает 0,1 мм в каждом участке, что укладывается в погрешность измерения (в данном случае измеряемые объекты не обладают идеальной шарообразной формой и одинаковыми значениями диаметров). При этом среднеквадратическая погрешность измерения не превысила 0,01 мм. Данный эксперимент подтверждает сделанный в [6] вывод о том, что, в силу действия рефракции, отражения, дифракции и поглощения, капли дождя можно считать непрозрачными объектами, а также обоснованность применения в лабораторных испытаниях непрозрачных объектов подходящего размера.

3. Определение калибровочных характеристик измерением эталонных шаров

Анализ результатов обработки измерений показал, что существенный вклад в погрешность измерений вносится несовершенством оптической системы прибора. Оптимальным решением этой проблемы на данном этапе является коррекция измеренных значений размера объекта в зависимости от его положения на измерительной площадке. Каждый из двух оптических каналов был условно разбит по ширине на 8 участков: 7 участков, содержащих по 100 оптических элементов сенсора (1–100, 101–200, ..., 601–700), и один участок, содержащий 68 элементов (701–768). Шары отпускались в свободное падение через измерительную площадку так, чтобы их центры проходили вблизи середины интервалов (± 10 оптических элементов). В каждом интервале проведены измерения 100–120 эталонных шаров диаметром $(5,01 \pm 0,01)$ мм. Зависимость измеренных значений от местоположения на измерительной площадке проиллюстрирована на рис. 3.

Эти зависимости, полученные для шаров диаметром 5,01 мм, несколько отличаются от кривых для шаров 10,8 мм (см. рис. 2). Это объясняется существенным различием в размерах и, соответственно, в положениях шаров относительно края поперечного сечения оптического канала. Однако относительно

небольшой разброс (менее 1 мм) средних значений крупных шаров для различных участков позволяет рассчитывать на приемлемый результат измерения размеров частиц осадков (например, градин) диаметром более 10 мм.

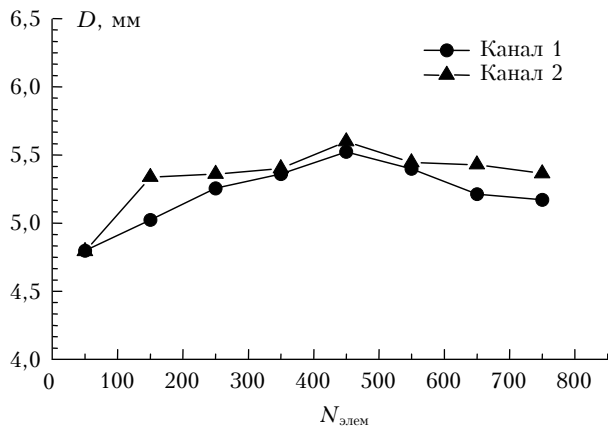


Рис. 3. Результаты измерения диаметров стальных шаров

Поскольку оптические каналы прибора идентичны, а программная и аппаратная обработка результатов измерений проводится однотипно, достаточно рассмотреть калибровку одного из каналов, например канала 1. Расчет поправки величины диаметра ΔD_i для i -го участка линейного сенсора определяется соотношением

$$\Delta D_i = D_i - \bar{D}_i, \quad (1)$$

где D_i – диаметр эталонного шара, \bar{D}_i – среднее значение результатов измерений для участка i , взятое по 100 измерениям. В табл. 1 представлены результаты измерений для эталонного шара диаметром 5,01 мм.

Таблица 1
Поправочные значения для оптического канала 1

i (диапазон элементов)	ΔD_i , мм
1 (1–100)	–0,21
2 (101–200)	0,02
3 (201–300)	0,25
4 (301–400)	0,36
5 (401–500)	0,52
6 (501–600)	0,39
7 (601–700)	0,21
8 (701–768)	0,16

Для проверки эффективности предложенного метода внесения поправок были проведены дополнительные измерения эталонных шаров следующих диа-

метров: 0,99; 1,99; 2,99; 3,99; 5,01; 5,99 и 7,12 мм, имеющих погрешность изготовления 10 мкм. Данные диаметры выбирались исходя из диапазона размеров капель дождя 0,5–8 мм. Результат измерений представлен на рис. 4.

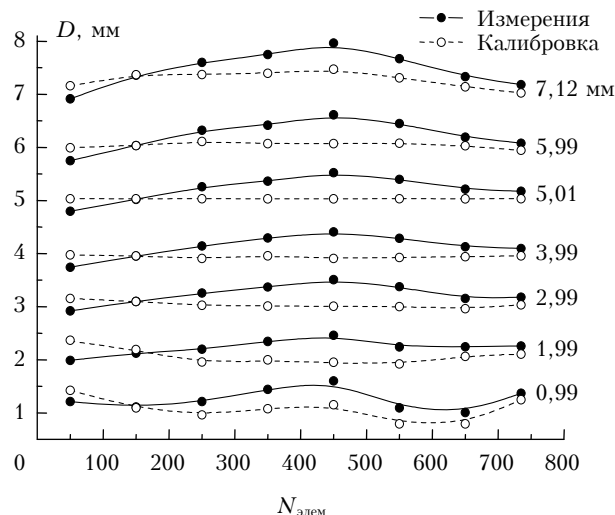


Рис. 4. Результат измерения эталонных шаров до и после калибровки ОДИО











Видно, что для размера 5,01 мм кривая, соединяющая точки калиброванных значений, представляет собой горизонтальную линию, что говорит об успешном завершении калибровки. При этом по характеру кривых, полученных для шаров других размеров, можно судить о влиянии применения поправочных значений на точность измерения шаров в диапазоне 1–7 мм. Ясно, что данная процедура не обеспечивает высокой эффективности для определения размеров малых частиц осадков (до 2 мм) и крупных частиц (7 мм и более). Однако вклад мелких частиц сравнительно мал, как и вероятность регистрации самых крупных частиц. Таким образом, для увеличения точности измерений калибровка должна проводиться с учетом размеров частиц, дающих основной вклад в суммарное значение объема выпадающих осадков.


Средние значения измеренных диаметров \bar{D}_i с учетом калибровочных параметров составили соответственно $(1,10 \pm 0,15)$; $(2,00 \pm 0,11)$; $(3,00 \pm 0,08)$; $(3,92 \pm 0,02)$; $(5,01 \pm 0,01)$; $(6,01 \pm 0,04)$; $(7,24 \pm 0,11)$ мм. Относительная погрешность измерения частиц для отдельных интервалов составляет 5% для средних и крупных (> 2 мм) частиц и возрастает при уменьшении их размеров (1 мм и менее). Поскольку мелкие частицы осадков не вносят существенного вклада в интегральные характеристики жидких осадков, оценка погрешности измерения размеров частиц 5% представляется вполне обоснованной для всего диапазона размеров частиц жидких осадков.

Погрешность изготовления эталонных шаров (1–10 мкм) существенно ниже размера светочувствительных элементов линейного сенсора, поэтому эта составляющая не учитывалась при оценке погрешности определения размера падающих частиц. Средняя

Таблица 2

Результаты визуализации теневых изображений измеряемых частиц

№ частицы									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D, мм									
0,5	0,99	1,99	2,99	3,99	5,01	5,99	7,12	7,85	10,8
									



погрешность определения размера по всем интервалам линейного сенсора определялась по формуле

$$\langle \varepsilon_D \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_i - |\Delta \bar{D}_i|), \quad (2)$$

где n – количество измерений (шаров различного диаметра) для данного участка. Рассчитанное значение средней абсолютной погрешности составило 0,06 мм, что совпадает с разрешающей способностью линейного сенсора. Таким образом, показана эффективность применения разработанной процедуры калибровки ОДИО.

Для наглядности во время измерений проводилась визуализация теневых изображений каждого из регистрируемых объектов. В табл. 2 представлены образцы полученных теневых изображений. Под номером 1 показано изображение частицы размером 0,5 мм. Изображения таких мелких частиц регистрировались при измерении песчинок, проходящих через измерительную площадку. Частицы под номерами 2–8 – эталонные шары, под номером 9 – шары от подшипников неизвестного класса точности, под номером 10 – некалиброванные стеклянные шары. Внизу таблицы показаны теневые изображения зарегистрированных шаров диаметром 1 и 7,85 мм в одном масштабе.

4. Погрешность определения сумм осадков

Для оценки точности измерения сумм осадков были проведены измерения суммарных объемов серий каплей, проходящих через измерительную площадку (рис. 5).

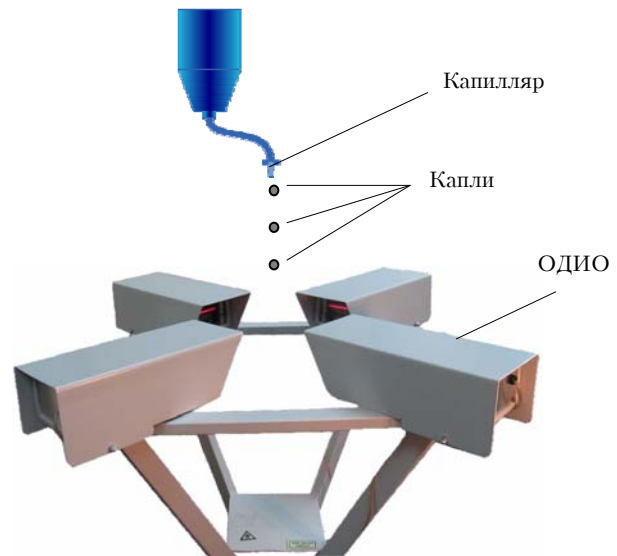


Рис. 5. Схема лабораторного измерения суммарных объемов серий каплей

При проведении данного эксперимента из 1 мл жидкости получалось 18–20 капель со средним диаметром около 4 мм. Капли, образующиеся непосредственно над измерительной площадкой, имеют форму, близкую к шарообразной, поэтому их объем может быть достаточно точно вычислен по формуле для объема шара. Погрешность измерения сумм осадков в лабораторных условиях рассчитывалась с учетом абсолютной погрешности измерений первоначального объема (0,005 мл). Измеренный общий объем серии рассчитывался суммированием объемов всех входящих в нее капель (табл. 3).

Результаты измерения объемов серий падающих капель, получаемых из 1 мл воды

Номер серии	№ капли																		Общий объем, мл
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
	Объем капли, мм ³																		
1	41	56	68	45	68	65	58	68	65	70	60	65	63	58	51	58	73	33	1,080
2	43	53	58	65	76	76	63	70	65	68	73	73	76	68	79	58	34	–	1,010
3	60	43	51	56	47	68	47	60	65	53	79	68	56	49	45	49	53	–	0,950
4	38	49	65	56	53	65	58	60	53	45	60	70	49	47	49	51	58	68	0,990
5	18	60	65	60	70	68	68	70	47	63	70	68	60	65	68	68	65	25	1,080

На основании анализа результатов обработки данных экспериментов установлено, что средняя погрешность измерения объема жидкости в лабораторных условиях не превышает 5%.

5. Результаты предварительных натуральных испытаний

Цель проведения натуральных испытаний заключалась в проверке выполненных оценок характеристик ОДИО для жидких осадков, а также возможности получения распределения частиц по размерам, интенсивностей, сумм осадков и сравнении с показаниями стандартного измерителя осадков. Измерения проводились 3–4 августа 2013 г. в д. Аркашево Томской области (56°26' с.ш., 85°15' в.д., 15 км от г. Томска) (рис. 6).



Рис. 6. Расположение приборов при проведении натуральных испытаний ОДИО

Результаты измерений сравнивались с показаниями стандартного осадкомера Давитая (М-99) с ценой деления шкалы 1 мм. В случае события «дождь 1» осадкомер М-99 не зарегистрировал факта выпадения осадков в течение 33 мин. За это же время из-

мерений ОДИО зарегистрировал около 0,05 мм осадков, выпадающих со средней интенсивностью около 0,1 мм/ч (рис. 7, а, в).

В случае события «дождь 2» измерения с помощью ОДИО проводились в течение 5 мин, при этом было зарегистрировано 0,67 мм осадков при средней интенсивности 9 мм/ч (рис. 7, б, г). Измерения М-99, производимые в течение 45 мин (включая 5 мин измерений совместно с ОДИО), показали интенсивность около 13 мм/ч. Расхождение в показаниях измерителей объясняется изменением интенсивности осадков с течением времени.

При регистрации осадков с помощью ОДИО расчет интенсивности I за время T и сумм осадков Q за время $(T_2 - T_1)$ проводился по формулам:

$$I = \left(\sum_{k=1}^K V_k \right) / ST, \quad (3)$$

$$Q = \left(\sum_{k=1}^K V_k \right) / S, \quad (4)$$

где K – количество капель, прошедшее через измерительную площадь S ; V_k – объем капли.

Заключение

Предложенная методика калибровки оптоэлектронного измерителя атмосферных осадков, основанного на анализе размеров теневых изображений падающих частиц, включала следующие этапы:

- оценку сравнительных результатов измерения прозрачных и непрозрачных шаров известных размеров (погрешности метода);
- оценку погрешностей измерения размеров эталонных металлических шаров в зависимости от местоположения на измерительной площадке прибора (погрешности оптической системы);
- определение систематических поправок к измеренному размеру в зависимости от местоположения падающей частицы;
- определение погрешностей измерения размеров эталонных шаров в диапазоне 1–7 мм (инструментальные и методические погрешности);
- оценку погрешности измерений эталонных объемов осадков (интегральная погрешность измерения объема и интенсивности осадков);
- проведение предварительных натуральных испытаний прибора.

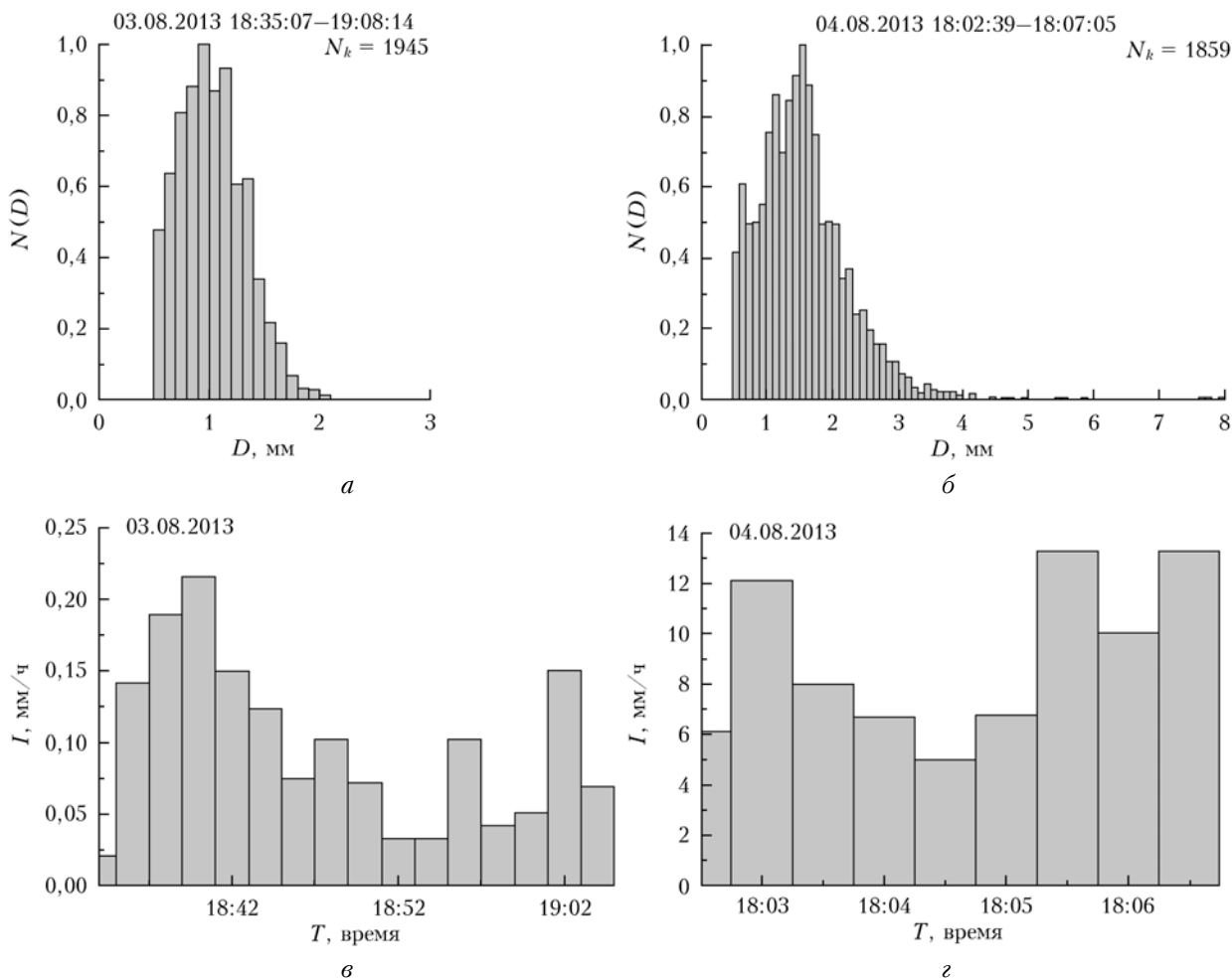


Рис. 7. Результаты натуральных испытаний ОДИО: *a* – распределение по размерам капель дождя малой интенсивности («дождь 1»); *б* – распределение по размерам капель дождя средней интенсивности («дождь 2»); *в* – изменение интенсивности для «дождя 1»; *г* – изменение интенсивности для «дождя 2»

Разработана простая и эффективная методика калибровки нового оптико-электронного двухканального измерителя атмосферных осадков. Основным результатом применения данной процедуры является минимизация погрешности измерений размеров частиц, связанной с несовершенством оптической системы прибора. Лабораторные испытания, выполненные для получения калибровочных параметров, подтвердили теоретические оценки технических характеристик ОДИО, сделанные ранее. Проведены натурные испытания ОДИО, заключающиеся в измерении параметров дождей. Получены результаты измерений в виде распределений частиц осадков по размерам, интенсивностям и сумм. Проведенные натурные испытания образца ОДИО продемонстрировали высокую степень надежности разработанной конструкции (отсутствие сбоев настроек оптической и электронной схем при перевозке прибора на расстоянии), применяемых алгоритмов получения, обработки измерительной информации и расчета параметров осадков. По результатам испытаний выработаны рекомендации по дальнейшей доработке и усовершенствованию прибора.

1. Kruger A., Krajewski W.F. Two-Dimensional Video Disdrometer: A Description // J. Atmos. Ocean. Technol. 2002. V. 19. P. 602–617.
2. Barthazy E., Goke S., Schefold R., Hognl D. An Optical Array Instrument for Shape and Fall Velocity Measurements of Hydrometeors // J. Atmos. Ocean. Technol. 2004. V. 21. P. 1400–1416.
3. Глуценко А.С. Исследование оптических свойств дождевых капель и разработка измерительных средств дистанционного определения микроструктуры осадков: Автореф. дис. ... канд. тех. наук. М.: МГАПИ, 2005. 143 с.
4. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Оптико-электронный двухканальный измеритель осадков // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 11. С. 990–996.
5. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. К выбору размера измерительной площадки двухканального оптического осадкомера // Оптика атмосфер. и океана. 2013. Т. 26, № 2. С. 155–159.
6. Knollenberg R.G. The Optical Array: An Alternative to Scattering or Extinction for Airborne Particle Size Determination // J. Appl. Meteorol. 1970. V. 9. P. 86–103.

A.A. Azbukin, V.V. Kalchikhin, A.A. Kobzev, V.A. Korolkov, A.A. Tikhomirov. **Determination of optoelectronic precipitation gauge calibration characteristics.**

The main characteristics of the optoelectronic dual-channel precipitation gauge optical channels are presented, as well as the results of laboratory experiments and preliminary field tests. The procedure for determining the calibration characteristics using 5 mm steel balls is proposed, it allows minimizing the error due to imperfections in the device optical system. The results of fluid volume measurements show that the precipitation measurement error in the laboratory does not exceed 5%. Preliminary results of field measurements are presented in the form of precipitation particle size distributions, intensity changes, and calculated precipitation sums.