

Оптико-электронный двухканальный измеритель осадков

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

*Учреждение Российской академии наук
Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634021, Томск, пр. Академический, 10/3*

Поступила в редакцию 27.07.2011 г.

Приведены краткий обзор и сравнительный анализ существующих схемных решений по оптико-электронным измерителям параметров осадков. Сформулированы основные требования, и обоснованы преимущества нового двухканального измерителя осадков на современной оптико-электронной элементной базе. Проведены оценки его основных характеристик, и показано, что относительная погрешность измерения размеров и скоростей частиц осадков не превысит 5%. Создан макет испытательного стенда для отработки основных конструктивных решений прибора и тестирования методов обработки данных измерений.

Ключевые слова: осадки, параметры, оптико-электронный измеритель, двухканальный; precipitation, parameters, optoelectronic gauge, dual-channel.

Введение

Измерение количества, интенсивности и распределения частиц осадков по размерам имеет большое значение не только для агрометеорологии, но и для задач атмосферной оптики. Эти параметры существенным образом влияют на условия распространения и рассеяния лазерного излучения на приземных трассах. Например, флуктуационные характеристики лазерного пучка при распространении в атмосфере подвержены влиянию оптических свойств частиц осадков. Эти свойства, в свою очередь, определяются структурой частиц осадков, их размером и скоростью падения. Несмотря на несомненную актуальность, задача измерений этих параметров с требуемой точностью еще далека от окончательного решения.

В работах [1–3] проведен сравнительный анализ различных методов измерения характеристик осадков, конструктивных особенностей реализованных на их основе осадкомеров, их достоинств и недостатков. В [4] сделан вывод о том, что наиболее перспективным направлением развития таких средств измерений являются оптико-электронные приборы (ОЭП), позволяющие определять параметры отдельных частиц осадков (размеры, конечные скорости падения, количество капель дождя, градин или снежинок) и на основе этих данных получать интегральные характеристики (тип осадков, интенсивность их выпадения, показатель водности, радиолокационной отражательной способности и т.д.). Проблемы, требующими решения при дальнейшем развитии данных приборов, являются: определение необходимых размеров измерительных областей (плоскостей или объ-

емов) ОЭП, в которых производится определение структурных параметров атмосферных осадков; разработка и оптимизация конструкции и алгоритмов обработки получаемых данных с целью обеспечения максимальной точности измерений; проведение сравнительных испытаний с традиционными осадкомерами для уточнения интегральных показателей ОЭП и методик их пересчета в обычные показатели количества и интенсивности выпадающих осадков.

Как отмечено в [5], на сегодняшний день из-за слабого государственного финансирования темпы исследований и разработки нового оборудования в РФ очень невысоки. Причем это происходит на фоне постоянного возрастания требований к точности и своевременности получения метеорологических данных. Возникает ситуация, для выхода из которой есть два пути: первый — закупка специализированного, как правило очень дорогостоящего, оборудования за рубежом, ведущая к возникновению потенциально опасной зависимости наших служб от иностранных фирм-поставщиков; второй — разработка и производство отечественных приборов.

В статье представлены предварительные результаты разработки недорогого малогабаритного отечественного оптико-электронного измерителя осадков на основе современных электронных компонентов и достижений информационных технологий.

1. Краткий обзор существующих решений

Оптические измерители параметров (размеров, скоростей падения и количества частиц) осадков могут быть разделены на несколько групп, исходя из используемых в них оптических явлений и конструктивных особенностей. Характеристики некоторых из этих приборов представлены в табл. 1.

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

Сравнительные характеристики оптических измерителей осадков

Группа	Измеритель / год разработки, источник	Измерительная площадь, см ²	Диапазон и погрешность измерения параметров частиц	
			Размер	Скорость
1	Оптический спектропловиметр OSP (Франция) / 1977 [8]	100	(0,31 ÷ 5 ± 0,31) мм	(0 ÷ 10 ± 0,1) м/с
	Оптический измеритель осадков (МГАПИ) / 2004 [5]	15	0,35 ÷ 7 мм, погрешность не более 10%	0,25 ÷ 10 м/с, вычисляется по зарегистрированному размеру частицы
	Оптический измеритель дождя ORG-815 (США) / после 2005 [7]	Неизвестна	Измеряет капли дождя с погрешностью 5%	Неизвестна
2	Оптический дисдрометр (Германия) / 1998 [9]	48	(1,4 ÷ 8 ± 5) мм	(0,1 ÷ 20 ± 0,1) м/с Погрешность 25% для капель < 5 мм, 10% для капель > 5 мм
	Лазерный дисдрометр Parsivel (Германия) / после 2005 [10]	48	Капли 0,2 ÷ 5 мм, снег 0,2 ÷ 25 мм	0,2 ÷ 20 м/с
	Лазерный дисдрометр Thies Clima (Германия) / после 2005 [11]	46	(0,16 ÷ 8 ± 0,18) мм	(0,2 ÷ 20 ± 0,5) м/с
3	ИКДАН (СССР) / 1987 [16]	5,7	(0,3 ÷ 7,5 ± 0,1) мм	(1 ÷ 13 ± 0,5) м/с
	Голографическая система регистрации капель и частиц аэрозоля (Германия) / 1989 [12]	Неизвестна	3 ÷ 10 мкм	0,05 ÷ 0,5 м/с, погрешность менее 10%
	2D-видеодисдрометр 2DVD (Германия) / 1992 [14]	100	(0,3 ÷ 7,5 ± 0,2) мм	(0 ÷ 10 ± 2,5) м/с
	Измеритель формы и скорости частиц осадков (Швейцария) / 2003 [17]	80	Капли > 1 мм, погрешность 6%; снег > 2 мм, погрешность 8%	0,5 ÷ 9 м/с, погрешность менее 10%

Первая группа оптических осадкомеров основана на использовании явления прямого рассеяния оптического излучения [5]. К ОЭП, в основе которых лежит измерение прямого рассеяния, относятся приборы зарубежных фирм, например датчики видимости Vaisala FD12 и FD12P [6], а также оптический измеритель дождя ORG-815 [7].

Вторая группа, достаточно широко представленная современными измерителями структуры осадков (дисдрометрами), основана на принципе затенения. Они измеряют ослабление светового пучка при прохождении через него частиц осадков. Диаметр частицы определяется по амплитуде импульса сигнала, снимаемого с фотоприемника, а скорость частицы определяется в соответствии с ее диаметром и временем прохождения через световой пучок, измеряемым по длительности этого импульса. Одним из таких устройств является разработанный в начале 80-х гг. во Франции оптический спектропловиметр (OSP) [8]. Существует модификация данного прибора, последовательно регистрирующая импульсы затенения двух лучей, что позволяет, определяя время между этими двумя импульсами, более точно измерять скорость падения частицы.

Еще один прибор — оптический дисдрометр [9]. Он имеет два варианта конструкции — для измерения капель дождя (закрытого типа) и снежинок (открытого типа). Данный прибор явился прототипом коммерческого лазерного дисдрометра OTT Parsivel®

[10]. Коммерческий осадкомер Laser Precipitation Monitor [11], выпускаемый компанией Thies Clima, также основан на измерении затенения светового луча частицами осадков.

Третья группа оптических приборов, измеряющих параметры осадков, базируется на непосредственном получении и анализе изображений капель. Примерами таких приборов являются голографическая система регистрации капель и частиц аэрозоля [12], пловиспектрометр [13], 2D-видеодисдрометр [14], использующий для создания изображения две линейно-сканирующие видеокамеры.

Приборы данной группы, как правило, сложны, массивны и дороги. Это ограничивает их применение решением чисто научных задач. Интерес в этом отношении представляет использование для построения изображения капли линейного массива оптических элементов. Если в измерительной плоскости нет частиц, лучи беспрепятственно проходят до фотодетекторов. Когда в плоскости появляется частица, происходит изменение освещенности, являющееся результатом рефракции, отражения, дифракции и поглощения. Это приводит к изменению напряжения на выходе затененного фотодетектора. Размер частицы определяется количеством затененных оптических элементов известного размера.

В одном из первых подобных приборов [15] использовался массив светочувствительных элементов, составленный из оптических волокон, соединенных

с фотоэлементами. Если в измерительной плоскости нет частиц, лучи беспрепятственно проходят до фотодетекторов. Когда в плоскости появляется частица, происходит изменение освещенности. Это приводит к изменению напряжения на выходе затененного фотодетектора. Размер частицы определяется количеством затененных оптоволокон известного диаметра.

По такой же схеме был построен и разработанный в 80-х гг. XX в. в СКБ НП «Оптика» СО АН СССР (ныне ИМКЭС СО РАН) измеритель капель дождя ИКДАН [16]. Однако в нем в качестве фотоприемного устройства уже использовалась фотодиодная линейка. При этом прибор все равно получился громоздким, дорогим и недостаточно надежным.

Гораздо более современный прибор [17] одновременно измеряет форму и скорость частиц осадков путем построения образа падающей частицы с использованием двух массивов оптических элементов.

Идея восстановления формы частицы из последовательности поперечных сечений, измеренных с помощью двух взаимно перпендикулярных фотодиодных линеек, была применена для разработки высокоскоростного измерителя характеристик частиц в облаках, предназначенного для установки на самолетах-лабораториях [18].

Сложность реализации подобных приборов и их малая измерительная площадь долгое время были тормозом в разработках данного направления. Современный уровень технологий и методов обработки данных позволяет рассчитывать на успешное создание недорогого оптического измерителя параметров осадков, основанного на аналогичных принципах и обеспечивающего достаточную точность измерений.

2. Проблемы, решаемые при создании нового прибора

Основные идеи, закладываемые в основу разрабатываемого прибора, определяются требованиями к уровню задач, для решения которых он предназначается. Среди них можно выделить следующее.

Максимально точное измерение размера и формы частиц осадков. Достигается использованием современных высокоскоростных линеек фотоэлементов с высоким разрешением, прямым измерением скорости падения частиц (двухканальная схема с разнесением каналов по высоте), учетом информации о направлении и скорости ветра (при работе в составе автоматизированного метеоконтекста), применением специализированного программного обеспечения для обработки результатов измерений.

Минимизация ошибок измерения интегральных характеристик осадков. Достигается применением открытой схемы прибора (уменьшает ветровой недоучет [4] и помехи от разбрызгивания капель, попадающих на корпус прибора) и учетом информации о направлении и скорости ветра (возможность внесения поправок на изменение эффективной измерительной площади).

Возможность измерения характеристик твердых осадков. Обеспечивается применением открытой схемы прибора и двух взаимно перпендикулярных

измерительных каналов (измерение несимметричных частиц сложной формы).

Небольшие размеры и масса прибора. Достигаются применением современных малогабаритных оптических и электронных компонентов с малыми массой и энергопотреблением.

Легкость обслуживания. Обеспечивается отсутствием в конструкции движущихся элементов, требующих регулярного обслуживания. Это в сочетании с низким энергопотреблением дает возможность длительной автономной работы.

Невысокая цена. Достигается использованием в конструкции прибора недорогих компонентов, выпускаемых серийно.

Основные принципы конструкции оптико-электронного двухканального измерителя осадков (ОДИО) можно определить следующим образом. Два горизонтальных плоскостопараллельных пучка света от источников излучения попадают на два сенсора, представляющих собой линейные массивы светочувствительных элементов. Эти оптические каналы удалены друг от друга по вертикали на расстояние 5 мм. Их проекции образуют прямой угол в горизонтальной плоскости, формируя в области пересечения виртуальную измерительную площадку (рис. 1). Размеры этой площадки, при реализации открытой конструкции, определяются шириной оптических каналов.

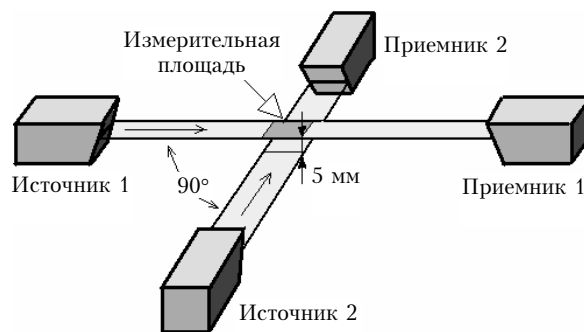


Рис. 1. Схема оптико-электронного двухканального измерителя осадков

Каждая учитываемая частица осадков проходит сначала сквозь верхнюю измерительную плоскость, затем сквозь нижнюю. Изменения размеров тени падающей частицы фиксируются сначала одним сенсором, затем другим. Специальное программное обеспечение обрабатывает сигналы с сенсоров, измеряет время, требующееся частице на преодоление расстояния 5 мм, формирует изображение частицы в двух ортогональных проекциях, вычисляет объем частицы и ее скорость. Затем на основе этих данных рассчитываются интегральные характеристики осадков (их тип, интенсивность выпадения, показатель влажности и радиолокационной отражательной способности и т. д.).

3. Новизна и преимущества

По сравнению с оптическими дисдрометрами [8–11], измеряющими ослабление освещенности при прохождении частицы через луч, в системах с ана-

лизом изображения частиц нет жестких требований к равномерности освещения (величина тени измеряется непосредственно по числу затененных светочувствительных элементов). Это позволяет увеличивать размер измерительной плоскости, не заботясь об обеспечении равномерности освещения. Основными недостатками приборов этой группы являются ограниченность измеряемого диапазона частиц, обусловленная затрудненной регистрацией теневого импульса от частиц малого размера [5], и невозможность учета одновременного нахождения в измерительном объеме нескольких частиц осадков. При увеличении измерительной области увеличивается вероятность того, что более одной частицы одновременно попадут в область измерения. В новой схеме легко распознать такую ситуацию и провести корректное измерение, тогда как схема, основанная на ослаблении освещенности, даст ошибочный результат.

Два взаимно перпендикулярных канала формируют виртуальную измерительную площадку, что позволит отказаться от задающих входное отверстие экранов, порождающих проблемы, связанные с разбрызгиванием капель, попадающих на детали прибора. Данная конструкция минимизирует влияние этих факторов на результаты измерений.

Наличие второго канала повышает отказоустойчивость всего прибора в целом. При выходе из строя одного канала можно с меньшей точностью продолжать измерения в одном канале, исходя из эмпирических данных о распределении капель по скоростям, размерам и форме. В принципе, при выборе альтернативного способа формирования измерительной области (например, установка защитного экрана, задающего измерительную площадь, или фильтрация частиц, не попадающих в область заданной резкости изображения) данная конструкция позволяет прибору работать в качестве двух независимых измерителей с возможностью взаимного контроля и уточнения получаемых результатов измерений.

Имея информацию о направлении и скорости ветра (работа в составе автоматических метеостанций), можно ввести поправки на возможный ветровой недоучет, а также оптимизировать алгоритмы обработки данных (предсказывать траектории частиц, придавать измерениям по одному из направленных больший или меньший вес и т.д.).

Формируемая двумя взаимно перпендикулярными каналами виртуальная измерительная область может прямо в процессе измерений адаптироваться в соответствии с текущей интенсивностью осадков, оптимизируя объем поступающей на обработку информации за счет изменения ширины одного или обоих каналов (а следовательно, размеров измерительной площадки). Кроме того, использование в конструкции прибора ряда выпускаемых современной промышленностью линейных сенсоров позволит, не прерывая процесса получения данных, адаптировать точность измерения геометрических характеристик частиц в соответствии с их средними текущими размерами и типом, оставляя измерительную площадку неизменной.

Двухканальная система была реализована в 2D-видеодисдрометре [14], основанном на скоростной

видеосъемке частиц осадков в двух проекциях. Но это очень громоздкий дорогой прибор. Кроме того, наличие экранов и близость корпуса прибора могут служить причиной изменения скорости ветра над площадкой и, как следствие, приводить к ветровому недоучету [4] осадков. Отличием данного прибора от оптического спектроплювиометра [8] и измерителя осадков [17] является перпендикулярное расположение второго канала. Это дает возможность получения второй проекции частицы, что также повысит точность определения ее формы. Точное определение формы является преимуществом рассматриваемого прибора по отношению к дисдрометру прямого рассеяния [5], в котором форма капли рассчитывается теоретически или по эмпирическим формулам.

Применение новейших оптико-электронных компонентов позволит увеличить разрешение, точность и скорость обработки по сравнению с другими современными ОЭП. Например, оптическое разрешение 2D-видеодисдрометра [14] составляет всего 0,2 мм. Измеритель формы и скорости гидрометеоров (частиц осадков) [17] также дает разрешение ниже 0,15 мм. Это приводит к большим ошибкам определения интегральных характеристик осадков в важном диапазоне размеров частиц 0,7–1,5 мм [14], тогда как разрабатываемый нами прибор сможет измерить практически все частицы с точностью, достаточной для получения не только качественных, но и количественных характеристик реальных осадков.

4. Выбор измерительной площади

Классификация измерителей осадков по площади приемных отверстий (размеру измерительных площадок) приведена в работе [2]. Осадкомеры предлагается разделить на три группы: приборы с большой (10^3 см² и более), средней (от 10^2 до 10^3 см²) и малой (менее 10^2 см²) площадью приемного отверстия. Причем отмечается, что осадкомеры с большой и средней площадью приемных отверстий применяются для измерения как твердых, так и жидких осадков, а приборы с малой площадью используются для измерения только жидких осадков. Это обусловлено тем фактом, что твердые осадки, как правило, менее интенсивны, поэтому для уверенной регистрации их характеристик традиционными осадкомерами необходим сбор информации с достаточно большой площади.

Однако для современных оптико-электронных приборов, особенно тех из них, которые выполнены по открытой схеме, даже для регистрации твердых осадков считается приемлемым гораздо меньший размер измерительной площадки. Измерительная площадка оптического дисдрометра [9], имеющего модификацию для измерения параметров снеговых осадков, составляет 48 см², а в оптическом измерителе осадков [5] она равна 15 см².

Следует отметить, что, хотя выбранная схема разрабатываемого прибора дает возможность корректно обрабатывать одновременное пересечение измерительной площадки двумя и более частицами, такая ситуация существенно усложняет процесс измерения

и обработки полученных данных, что повышает вероятность ошибок. Для обычных осадков со средними параметрами (концентрация порядка 10^3 частиц в 1 м^3) вероятность одновременного появления более одной частицы в области измерений пренебрежимо мала [15]. Тем не менее оценки, сделанные для проливного дождя высокой интенсивности (100 мм/ч) и для морозящего дождя с максимальной концентрацией мелких капель, показали, что для измерительной площадки 48 см^2 вероятность таких ситуаций может достигать до 10% [9]. Подобные результаты были получены и для снеговых осадков.

Кроме того, следует принять во внимание, что относительно небольшие размеры измерительной площадки позволят производить измерения с более высоким разрешением, что положительно скажется на точности измерения малых капель.

В связи с вышеизложенным выбор величины измерительной площадки порядка 25 см^2 ($5 \times 5 \text{ см}$) представляется вполне обоснованным.

5. Выбор сенсора

Используемый в приборе сенсор должен обеспечивать измерение характеристик частиц осадков в максимально широком диапазоне реально возможных размеров и скоростей падения с достаточно высоким разрешением.

График зависимости конечной скорости падения капель от их эквивалентного диаметра, полученный на основе экспериментальных данных [19], представлен на рис. 2.

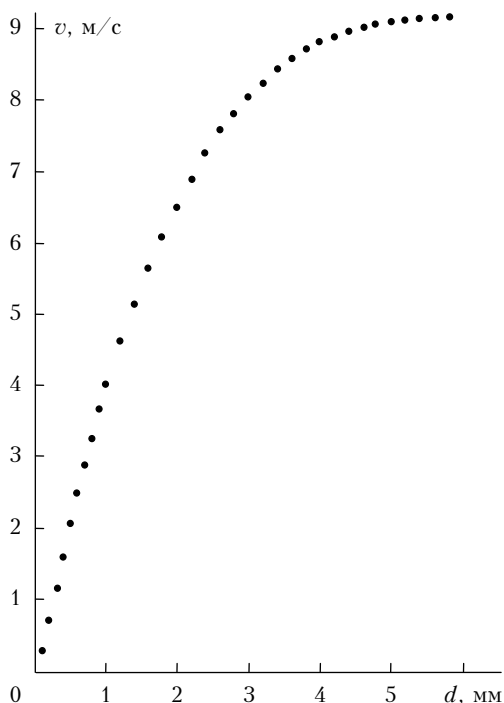


Рис. 2. Зависимость скорости падения капель от их диаметра

Из этих данных следует, что отношение скорости частицы к ее диаметру максимально в диапазоне

не размеров до 1 мм. В этом диапазоне можно приближенно считать, что скорость линейно зависит от диаметра и может быть рассчитана по формуле

$$v(d) = Ad, \quad (1)$$

где коэффициент A равен $4 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$.

Используя данное соотношение, можно оценить минимальное время прохождения капли диаметром d со скоростью v через измерительную плоскость прибора:

$$T_{\text{мин}} = d/v = d/(Ad) = A^{-1} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}. \quad (2)$$

В работе [20] подобные экспериментальные данные, полученные для искусственных капель, сравнивались с данными, полученными для капель реальных дождей. Было показано, что скорости падения дождевых капель несколько ниже скоростей падения искусственных капель того же диаметра, что объяснялось влиянием воздушных потоков в реальной атмосфере во время дождя.

Таким образом, оценка минимального времени прохождения капли дождя через измерительную плоскость ($T_{\text{мин}} = 0,2 \text{ мс}$) представляется вполне обоснованной. То есть прибор, обеспечивающий минимальную частоту считывания линии проекции измерительной плоскости 5 кГц, должен гарантированно фиксировать прохождение тени от капли, характеризующейся практически любым значением скорости и диаметра.

Для определения диаметра с максимальной погрешностью 14% достаточно произвести как минимум два измерения падающей частицы [15]. Следовательно, частота обработки всего линейного массива фоточувствительных элементов должна иметь величину не менее 10 кГц. Вывод о том, что такая частота достаточна для хорошего описания даже самых быстрых капель, был сделан также в работе [22], посвященной усовершенствованию и полевым испытаниям оптического спектроплювиометра [8].

В качестве приемников оптического излучения в разрабатываемом приборе предполагается использовать высокопроизводительные линейные сенсоры, имеющие 1024 чувствительных элемента и обеспечивающие частоту сканирования 30 кГц. Они выпускаются серийно, доступны, недороги, обладают хорошими электрооптическими характеристиками и могут быть легко интегрированы в предложенную схему ОДИО.

6. Выбор источника излучения

Для того чтобы максимально использовать возможности, предоставляемые выбранным приемником, источник излучения должен, в первую очередь, иметь мощность, достаточную для обеспечения экспозиции насыщения при максимальных частотах сканирования.

Энергия кванта излучения (фотона) вычисляется по известной формуле [23]:

$$Q = (hc)/\lambda, \quad (3)$$

где c – скорость света в вакууме ($2,998 \cdot 10^8$ м/с); h – постоянная Планка ($6,6262 \cdot 10^{-34}$ Дж·с); λ – длина волны излучения.

Исходя из (3), для излучения с $\lambda = 635$ нм энергия фотона составляет $Q(\lambda) = 3,13 \cdot 10^{-19}$ Дж. Из этого значения можно определить необходимую мощность источника излучения прибора. Энергия насыщения ячейки выбранного сенсора (заявленная величина Full Well для пикселя равна $8 \cdot 10^5$ электрон) с учетом средней квантовой эффективности линейки в красной области спектра (Relative QE около 0,9) и определенной выше энергии фотона составляет $E_{\text{яч}} = 2,8 \cdot 10^{-13}$ Дж.

При максимальной частоте считывания линии 30 кГц, обеспечиваемой сенсором, время экспонирования составит около 33 мкс. Отсюда мощность излучения, необходимая для насыщения одной ячейки, должна составлять $P_{\text{яч}} = 8,5 \cdot 10^{-9}$ Вт.

Суммарная площадь линейного массива из 1024 чувствительных элементов (при размере элементарной ячейки $7,8 \times 125$ мкм) составляет $S_{\text{лин}} = 10^{-6}$ м². Тогда мощность излучения $P_{\text{лин}}$, приходящая на данный линейный массив, равна $P_{\text{яч}} \cdot 1024 = 8,7 \cdot 10^{-6}$ Вт ≈ 10 мкВт.

Предполагаемая площадь сечения луча, падающего на линейный сенсор, не должна превышать 10×1 мм = 10^{-6} м², т.е. отношение площади пучка ($S_{\text{пуч}}$) к фоточувствительной площади сенсора ($S_{\text{лин}}$) будет равно 10.

Оптическая система прибора в минимальной конфигурации будет состоять из двух линз и двух защитных стекол (четыре преломляющие поверхности $N_{\text{пр}} = 4$ и четыре отражающие плоскости $N_{\text{отр}} = 4$). Тогда, считая оптические элементы бесконечно тонкими, коэффициент пропускания света для оптической системы прибора можно приближенно подсчитать по известной формуле $\tau_{\text{пр}} = 0,95^{N_{\text{пр}}} \cdot 0,9^{N_{\text{отр}}} \approx 0,5$ [24, с. 54].

Таким образом, устанавливаемый в прибор источник излучения должен обеспечивать мощность не менее $P_{\text{ист}} = P_{\text{лин}}(S_{\text{пуч}}/S_{\text{лин}})/\tau_{\text{пр}} = 2 \cdot 10^{-4}$ Вт.

7. Основные характеристики прибора

Предложенная схема и выбранные электронные компоненты позволяют рассчитывать на получение вполне определенных характеристик разрабатываемого прибора.

Исходя из ширины измерительного канала 50 мкм и выбранного линейного сенсора, содержащего 1024 фоточувствительных элемента, можно определить горизонтальное разрешение прибора. В нашем случае эта величина, определяющая точность измерения размеров частиц, составляет 0,05 мм. Многочислен-

ные эксперименты по изучению распределения капель в дождях по величине показали, что это распределение может быть описано одновершинной кривой, имеющей максимум в области значений диаметров 0,5 × 1,5 мм (см., например, [1, с. 45]). Следовательно, принимая средний характерный размер дождевой капли равным 1 мм, можно считать, что относительная погрешность измерения линейных размеров частицы не превышает 5%. Соответственно погрешность определения объема частицы, пропорционального третьей степени диаметра, не должна превышать 15%. Однако известно [1, с. 45], что интенсивность осадков в основном определяется каплями диаметром более 1 мм, для которых погрешность измерения размеров будет ниже. К тому же при вычислении интегральных характеристик осадков погрешность будет существенно меньше за счет усреднения ошибок в определении размеров отдельных частиц [5]. Кроме того, сравнение работы 2D-видеоидрометра (обеспечивающего точность измерения размеров частиц всего 0,2 мм) и стандартного осадкомера [14] в условиях 90-минутного шторма также показало всего 3%-е расхождение результатов по количеству выпавших осадков (9,6 и 9,9 мм соответственно).

Конечная скорость падения капель в реальных условиях не превышает 10 м/с [19]. А для капель, имеющих размер в диапазоне 0,5–1,5 мм, максимальную скорость можно считать равной 5 м/с. Падающая с такой скоростью частица преодолет расстояние 5 мм между измерительными плоскостями за 1 мс. При максимальной частоте считывания линии 30 кГц, обеспечиваемой выбранным сенсором, за это время будет произведено не менее 30 измерений. Это означает, что средняя относительная погрешность определения времени прохождения капли через измерительный объем, а значит, и измерения конечной скорости падения, составляет около 3%.

Для оценки чувствительности по количеству выпадающих осадков воспользуемся тем фактом, что прибор обеспечивает регистрацию даже единичной капли дождя любого, даже самого малого размера. Предполагая средний диаметр дождевых капель равным 1 мм и принимая во внимание однородность их пространственного распределения, можно условно считать нижним порогом чувствительности прибора выпадение капли диаметром 1 мм ($\approx 0,5236$ мм³) на измерительную площадь 25 см² (2500 мм²), что соответствует количеству выпавших осадков $2 \cdot 10^{-4}$ мм.

На основании оценочных расчетов и предварительного макетирования отдельных блоков прибора проведены оценки его основных характеристик, которые представлены в табл. 2.

Таблица 2

Основные характеристики ОДИО

Характеристика	Значение
1	2
Измерительная площадь (изменяемая)	25 см ² и менее
Ширина оптического канала (изменяемая)	от 50 мкм и менее
Вертикальное расстояние между каналами	5 мм
Частота сканирования измерительной площадки	до 30 кГц

1	2
Точность измерения размеров частиц (горизонтальное разрешение)	не менее 0,05 мм
Относительная погрешность измерения размеров частиц	не более 5%
Диапазон размеров измеряемых частиц	от 0,3 до 10 мм (и более)
Относительная погрешность измерения скорости частиц	не более 3%
Точность измерения количества осадков (предполагаемая)	±3%
Чувствительность по количеству выпавших осадков	не менее $2 \cdot 10^{-4}$ мм
Возможность регистрации снега	есть
Рабочий диапазон температур	от -20 до +60 °С

Данные характеристики являются оценочными и, безусловно, будут уточнены в процессе дальнейшей разработки, макетирования и конечной реализации измерителя осадков.

Заключение

Проведенный анализ оптико-электронных измерителей параметров атмосферных осадков (количества, интенсивности, распределения по размерам) позволил разделить их по принципу действия на три основные группы, а также сформулировать основные требования к новой технической реализации двухканального измерителя осадков, основанной на современной элементной базе. Создан макет испытательного стенда для отработки основных конструктивных решений прибора и тестирования методов обработки данных измерений. Реализована оптическая схема формирования плоскопараллельного пучка света. Проведенные оценочные расчеты и результаты макетирования позволили определить технические параметры прибора, которые не уступают лучшим зарубежным аналогам.

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

1. *Литвинов И.В.* Структура атмосферных осадков. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 154 с.
2. *Литвинов И.В.* Осадки в атмосфере и на поверхности земли. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 208 с.
3. *Vuerich E., Monesi C., Lanza L.G., Stagi L., Lanzinger E.* Field Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges // WMO. 2009. N 99. 286 p.
4. *Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А.* Приборное обеспечение измерения параметров атмосферных осадков. Современное состояние // Ред. ж. Изв. вузов. Физ. Томск, 2009. 11 с. Деп. в ВИНТИ 16.12.09, № 802-В2009.
5. *Глуценко А.С.* Исследование оптических свойств дождевых капель и разработка измерительных средств дистанционного определения микроструктуры осадков: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МГАПИ, 2005. 143 с.
6. URL: <http://www.vaisala.ru/> (дата обращения: 01.06.2011).
7. URL: <http://www.opticalscientific.com/> (дата обращения: 01.06.2011).
8. *Hauser D., Amayenc P., Nutten B., Waldteufel P.* A New Optical Instrument for Simultaneous Measurement of

- Raindrop Diameter and Fall Speed Distributions // J. Atmos. Ocean. Technol. 1984. V. 1. P. 256–269.
9. *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.
 10. URL: <http://www.ott.com> (дата обращения: 01.06.2011).
 11. URL: <http://www.thiesclima.com> (дата обращения: 01.06.2011).
 12. *Borrmann S., Jaenicke R.* Application of microholography for ground-based *in situ* measurements in stratus cloud layers: A case study // J. Atmos. Ocean. Technol. 1993. V. 10. P. 277–293.
 13. *Frank G., Hartl T., Tschiersch J.* The pluviospectrometer: Classification of falling hydrometeors via digital image processing // Atmos. Res. 1994. N 34. P. 367–378.
 14. *Kruger A., Krajewski W.F.* Two-dimensional video disdrometer: a description // J. Atmos. Ocean. Technol. 2002. V. 19. P. 602–617.
 15. *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.
 16. *Солдаткин Н.П.* Оптические приборы и методы контроля микрофизических параметров атмосферных осадков // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений. Томск: Изд-во «Спектр», 1997. С. 217–232.
 17. *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.
 18. *Lawson R.P., O'Conner D., Zmarzly P., Weaver K., Baker B., Mo Q., Jonsson H.* The 2D-S (stereo) probe: design and preliminary tests of a new airborne, high-speed, high-resolution particle imaging probe // J. Atmos. Ocean. Technol. 2006. V. 23. P. 1462–1477.
 19. *Gunn R., Kinzer G.D.* The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air // J. Atmos. Ocean. Technol. 1949. V. 6. P. 243–248.
 20. *Atlas D., Srivastava R.C., Sekhon R.S.* Doppler characteristics of precipitation at vertical incidence // Rev. Geophys. Space Phys. 1973. N 11. P. 1–35.
 21. *Шуляцкий А.Б.* Форма и скорость падения водяных и дождевых капель // Изв. АН СССР. 1959. № 5. С. 798–800.
 22. *Salles C., Creutin J.-D., Sempere-Torres D.* The optical spectropluviometer revisited // J. Atmos. Ocean. Technol. 1998. V. 15. P. 1215–1222.
 23. URL: http://st.ess.ru/publications/5_2002/krutik/krutik.htm (дата обращения: 25.05.2011).
 24. *Бегунов Б.Н.* Геометрическая оптика. М.: Изд-во МГУ, 1966. 211 с.

V.V. Kalchikhin, A.A. Kobzev, V.A. Korolkov, A.A. Tikhomirov. **Optoelectronic dual-channel precipitation gauge.**

A concise overview and comparative analysis of the existing circuit designs for optoelectronic precipitation gauges are presented. The main requirements are formulated and advantages are substantiated for the new dual-channel precipitation gauge based on the modern optoelectronic components. The main characteristics of the device are estimated. It is shown that in measurements of particle size and velocity the relative errors do not exceed 5%. The test bench prototype is made for finalizing the device design and data processing methods.