

ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 535.311, 551.508.77, 621.317.79
ГРНТИ 29.31.29, 37.21.03
ВАК 05.11.07, 05.11.13

Лазерный измеритель интегральных и микроструктурных характеристик атмосферных осадков ОПТИОС

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

*Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения
Российской академии наук*

email: vvk@imces.ru, alexey-kobzev@mail.ru, tikhomirov@imces.ru, * dmitrii.04101995@gmail.com

Представлено описание особенностей измерительной схемы, результаты лабораторных и натуральных испытаний опытного образца лазерного измерителя атмосферных осадков ОПТИОС, в котором использован метод получения и последующего анализа теневых изображений падающих частиц атмосферных осадков. Приведены схемные и программные решения, обеспечивающие автономность работы прибора и снижающие погрешность измерений параметров осадков. Показана эффективность применения ОПТИОС для измерения интегральных и микроструктурных характеристик дождя, снега и града на примере анализа результатов сравнительных натуральных испытаний со стандартным осадкомером О-1 и измерителем осадков челночного типа Davis Rain Collector. Диапазон размеров измеряемых частиц осадков: от 0,5 до 10 мм; чувствительность по количеству выпавших осадков не хуже 0,0001 мм; диапазон измеряемой интенсивности дождя – от 0 до 2000 мм/час; диапазон оцениваемых скоростей падения частиц осадков – от 0,2 до 20 м/с.

Ключевые слова: лазерный измеритель, получение и анализ теневых изображений, атмосферные осадки, интегральные и микроструктурные характеристики

Введение

Информация о количестве выпадающих атмосферных осадков и их интенсивности имеет существенное значение для ряда отраслей экономики, а также для климатических исследований [1]. В некоторых задачах прикладных исследований [2–4] также необходимы данные о микроструктурных характеристиках осадков – размерах, форме и скоростях падения отдельных частиц. Среди средств измерений, предназначенных для определения характеристик атмосферных осадков, наиболее перспективными являются приборы, основанные на оптических методах [5, 6]. Они обеспечивают возможность автоматического получения наиболее полной информации о характеристиках атмосферных осадков: времени начала и продолжительности выпадения, их виде (дождь, снег, град), интенсивности и количестве, а также об их микроструктуре. Кроме того, такие приборы должны легко интегрироваться в состав автоматических метеорологических комплексов для расширения их измерительных возможностей. В статье представлено описание созданного опытного образца лазерного осадкомера ОПТИОС, принцип действия которого основан на получении и последующем анализе теневых изображений отдельных частиц осадков; приведены результаты лабораторных испытаний созданного прибора и натуральных измерений характеристик дождевых и снеговых осадков в сравнении с традиционными осадкомерами.

Получение и анализ теневых изображений падающих частиц

Поскольку традиционные осадкомеры, широко применяемые для метеорологических наблюдений,

не позволяют получать информацию о микроструктурных характеристиках осадков, для определения этих характеристик используются специальные приборы – дисдрометры (disdrometer – *distribution of drop meter*) [5, 6]. Среди оптических дисдрометров выделяется группа приборов [7–9], в основе работы которых лежит метод получения и анализа теневых изображений частиц осадков. Данный метод, предложенный Нолленбергом [10], основан на том, что падающие частицы осадков пересекают световой поток, формируя при этом тень. Многоэлементный приемник оптического излучения регистрирует изменение освещенности отдельных светочувствительных элементов. Обработка и анализ полученных сигналов позволяет восстановить форму частиц, определить их размеры и скорости падения. Высокая точность измерения микроструктурных характеристик осадков обеспечивает возможность вычисления интегральных характеристик жидких осадков – их интенсивности и количества [6]. Подход, основанный на получении функции распределения частиц осадков по эквивалентным диаметрам, обеспечивает определение и других характеристик осадков: концентрации частиц, м^{-3} , водности $\text{г}\cdot\text{м}^{-3}$, удельной энергии, $\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}$, удельного сечения, км^{-1} , радиолокационной отражаемости, $\text{мм}^6\cdot\text{м}^{-3}$, [11].

Следует отметить, что рассмотренный метод, предоставляя информацию о размерах и скоростях падения частиц осадков, позволяет определять вид осадков путем сравнения этих параметров с величинами, характерными для данного вида. Известно, что размеры и скорости падения капель дождя имеют взаимно-однозначное соответствие [11], тогда как размеры снежинок и снежных хлопьев варьируются в широких пределах при скоростях падения до 1,5 м/с. Для идентификации града можно воспользоваться функцией распределения частиц по размерам. Несмотря на довольно большой диапазон возможных размеров градин (от одного до нескольких десятков миллиметров), в большинстве случаев распределение градин по размерам может быть описано одновершинной кривой с максимумом в диапазоне диаметров 5...10 мм [11]. Кроме того, градовые частицы, как правило, имеют существенно большую по сравнению с каплями и снежинками терминальную скорость падения, что также учитывается при определении вида осадков с помощью метода получения и анализа теневых изображений частиц.

Анализ работ [7–10] и собственных разработок двухканального осадкомера [12–14] позволил создать опытный образец одноканального лазерного осадкомера ОПТИОС, схема которого представлена на рис. 1. Для реализации используемого метода плоский горизонтальный световой поток (толщиной ~ 1 мм) от лазерного источника излучения 1, коллимированный с помощью цилиндрической линзы 2, направляется на приемник 5 (линейный оптический сенсор, содержащий 768 светочувствительных элементов размером $63,5\times 63,5$ мкм каждый). При этом формируется измерительная площадка прибора. Размеры последней определяются длиной линейного сенсора и размером открытой части измерительного канала, через которую проходят частицы осадков. Пересекая световой поток от источника излучения, падающие частицы вызывают затенение элементов линейного сенсора.

Высокая частота считывания информации (порядка 20 кГц) о количестве затененных элементов обеспечивает возможность многократного измерения горизонтальных сечений тени каждой падающей частицы по мере ее прохождения через измерительную площадку. Сигнал с выходов линейного сенсора поступает в блок формирования измерительной информации 6, работающий под управлением встроенного микроконтроллера. После предварительной обработки измерительная информация через выходной интерфейс 7 поступает во внешнее обрабатывающее устройство (персональный компьютер – ПК) для дальнейшей обработки, визуализации и хранения. Число измеренных сечений каждой частицы зависит от скорости ее падения, вертикального размера и частоты сканирования линейного сенсора. На основании анализа размеров сечений каждой частицы восстанавливаются её эквивалентный диаметр и высота, форма, скорость падения, содержащийся в ней объём жидкости и другие параметры. Прибор точно определяет количество частиц, прошедших через измерительную площадку в единицу времени, что позволяет оценивать интенсивность осадков любого вида.

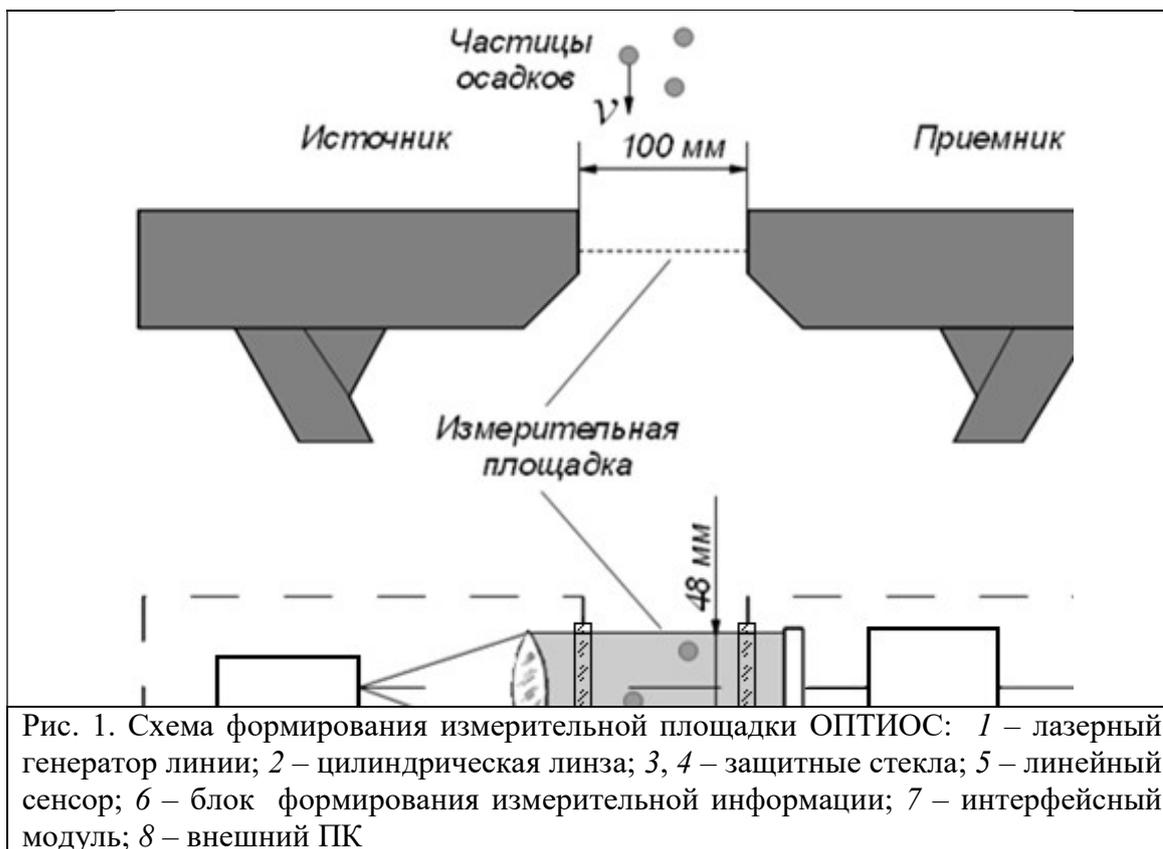


Рис. 1. Схема формирования измерительной площадки ОПТИОС: 1 – лазерный генератор линии; 2 – цилиндрическая линза; 3, 4 – защитные стекла; 5 – линейный сенсор; 6 – блок формирования измерительной информации; 7 – интерфейсный модуль; 8 – внешний ПК

Уменьшение числа измерительных каналов в ОПТИОС с двух до одного позволило в значительной степени упростить систему обработки измеряемых сигналов, процедуру настройки и калибровки, а также повысить надежность работы прибора без существенного снижения точности измерений.

Погрешность измерений, производимых с помощью ОПТИОС, практически не зависит от количества, продолжительности и интенсивности зарегистрированных осадков, а чувствительность по количеству выпавших осадков у него существенно выше, чем у традиционных осадкомеров. Поэтому измерительная площадка такого прибора может иметь меньший размер, чем приемное отверстие стандартного осадкомера. Основными критериями выбора этой величины, определяющими эффективность измерения, являются чувствительность прибора и объем формируемой измерительной информации. Результаты проведенных оценок [13] показали приемлемость выбранного размера площадки – 48 см².

Заметное влияние на точность измерений параметров атмосферных осадков оказывает ветровой недоучет осадков (эффект Джевонса), проявляющийся в том, что при ветре количество собранной традиционным осадкомером влаги оказывается заниженным. Это происходит вследствие увеличения скорости воздушного потока непосредственно над приемным отверстием, поскольку при наличии ветра массивный корпус осадкомера существенно влияет на поток воздуха вблизи него. Оптимальным решением проблемы ветрового недоучета является применение конструкции прибора, обеспечивающей формирование виртуальной измерительной площадки на определенном расстоянии от основных элементов конструкции прибора [13, 14]. Результаты численного моделирования показали [15], что конструкция ОПТИОС и пропорции ее элементов обеспечивают ветровую прозрачность, достаточную для уменьшения погрешности, связанной с ветровым недоучетом.

При эксплуатации прибора может происходить регистрация объектов, не являющихся падающими частицами осадков: брызги осадков, запотевание и изморозь на защитных стеклах, а также насекомые, листья и т.д. Эти помехи приводят к ошибочным результатам, а в некоторых случаях – к сбоям в работе прибора.

Созданная система устранения внешних помех [16], использующая ряд технических и программных решений, обеспечивает повышение автономности работы прибора и увеличение временного интервала между его техническим обслуживанием. Для устранения помех, вызванных погодными явлениями с образованием влаги и ледяного покрытия на поверхности защитных стекол, примене-

на система обогрева. Она включается и отключается автоматически при получении соответствующей информации. Программные решения исключают из анализа объекты, не относящиеся к падающим частицам осадков, путем применения фильтрации. Основными критериями для этого являются размеры объектов и время их нахождения в пределах измерительной площадки [16]. Разработанное программное обеспечение (ПО), кроме фильтрации измерительных данных, обеспечивает решение ряда других задач, направленных на автоматизацию процесса измерений. ПО состоит из двух программ. Первая программа выполняется в блоке формирования измерительной информации ОПТИОС и осуществляет преобразование сигналов с выходов линейного сенсора в измерительную информацию, первичную фильтрацию данных и их передачу в выходной интерфейс. Вторая программа работает на ПК и осуществляет обработку, корректировку и фильтрацию данных, вычисление параметров отдельных частиц (диаметр, объем, скорость), расчет интегральных характеристик осадков на основе разработанных алгоритмов, визуализацию, а также выдачу измерительной информации и формирование файлов данных.

Калибровка и лабораторные испытания ОПТИОС

Важным этапом создания любого средства измерения является установление зависимости между его показаниями и реальным значением измеряемой физической величины. Калибровка ОПТИОС заключалась в проведении процедуры получения значений поправочных коэффициентов, которые вводились в алгоритм расчета суммарного объема жидкости, прошедшей через измерительную площадку.

На первом этапе проведения лабораторных испытаний ОПТИОС [17] измерялись диаметры падающих калиброванных стальных шаров (приборных подшипников), выполненных с высокой точностью, в диапазоне диаметров 1...7 мм. Определение зависимости измеренного размера от местоположения шара в пределах измерительной площадки осуществлялось посредством сравнения измеренных и реальных диаметров шаров. Было выявлено, что погрешность измерения зависит от местоположения шара в поперечном сечении площадки и что существенный вклад в эту погрешность вносится несовершенством оптической системы прибора. Предложенная методика калибровки [17] позволила определить значения поправочных коэффициентов, применение которых обеспечивает относительную однородность результатов измерения диаметров эталонных шаров в разных местах поперечного сечения измерительной площадки. Использование такой процедуры позволяет достичь погрешности измерения размеров частиц, не превышающей 0,1 мм. В дальнейшем была предложена процедура калибровки, усовершенствованная за счет использования вместо шаров непрозрачного стержня, который в вертикальном положении вносится в измерительную площадку и перемещается в горизонтальной плоскости перпендикулярно к направлению светового потока, при этом значения поправочных коэффициентов рассчитываются автоматически с помощью специально разработанного алгоритма [18].

Кроме того, была оценена погрешность определения количества осадков путем измерения суммарных объемов серий капель, выпускаемых из шприца объемом 1 мл и проходящих через измерительную площадку [17]. Капли, получаемые непосредственно над измерительной плоскостью, имели форму, близкую к шарообразной, поэтому их объем достаточно точно вычислялся по формуле для объема шара. Погрешность измерения суммарного объема всех капель рассчитывалась с учетом абсолютной погрешности первоначального объема шприца. На основании анализа полученных результатов обработки данных, установлено, что погрешность измерения объема выпускаемой жидкости в лабораторных условиях не превышала 5 %.

Таким образом, проведенные лабораторные испытания ОПТИОС позволили уточнить систематические погрешности опытного образца прибора и ввести соответствующие поправочные коэффициенты в программу обработки результатов измерений.

По результатам расчетов и испытаний получены следующие технические характеристики ОПТИОС: диапазон размеров регистрируемых частиц 0,5...10 мм; погрешность измерения размеров (D , мм) частиц не более $0,033(10 + D)$; диапазон оцениваемых скоростей падения гидрометеоров 0,2...20 м/с; погрешность измерения количества осадков (без учета пространственных вариаций и погрешности, создаваемой ветром) – не более 5 %; диапазон измеряемой интенсивности дождя 0...2000 мм/ч; чувствительность по количеству выпавших осадков - не хуже 0,0001 мм; измери-

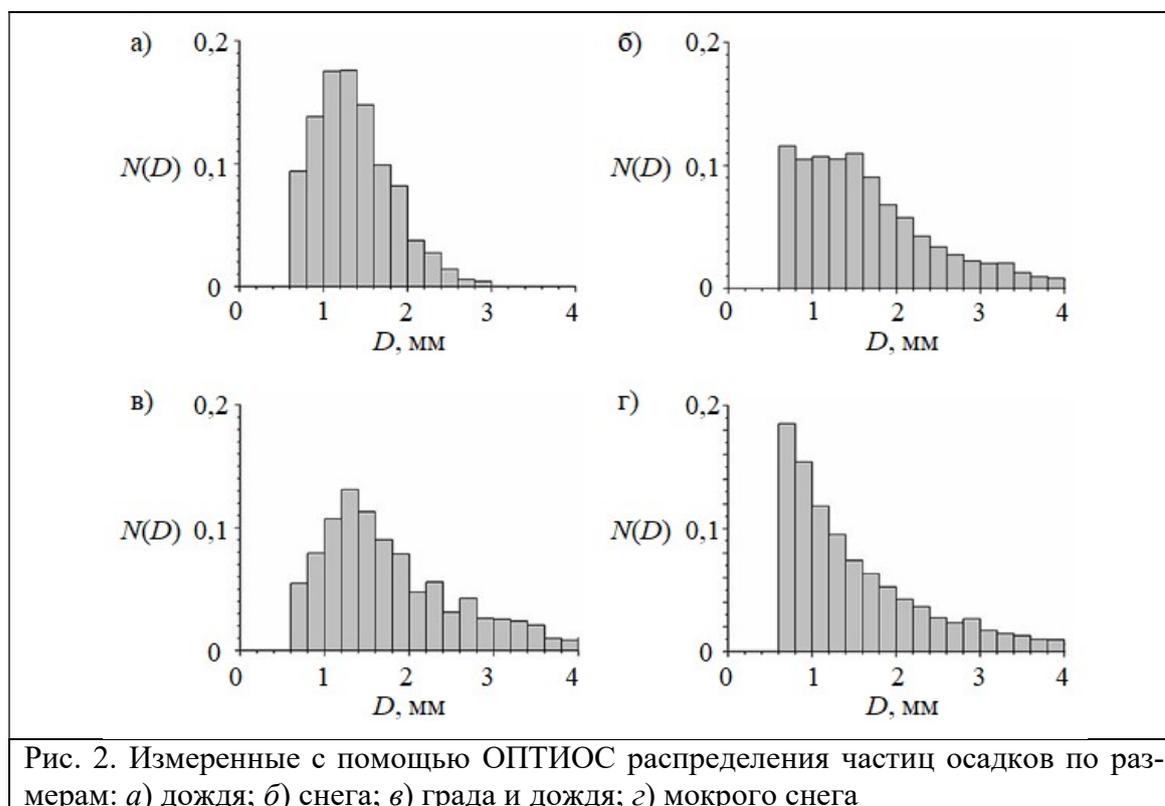
тельная площадка – 48 см²; масса прибора 8 кг; потребляемая мощность (без системы обогрева) – 0,5 Вт; рабочий диапазон температур от –20 до +60 °С; регистрация дождя, снега, града и смешанных осадков.

Некоторые результаты натуральных испытаний

Натурные испытания опытного образца ОПТИОС выполнялись в течение летне-осеннего сезона 2016 г. на метеорологической площадке ИМКЭС СО РАН (восточная окраина г. Томска). В летний период проводились также сравнительные испытания ОПТИОС со стандартным осадкомером О-1 (с ветровой защитой Третьякова) и челночным осадкомером Davis Rain Collector (RC). Все три прибора были установлены в непосредственной близости друг относительно друга (2...3 м), чтобы уменьшить погрешность, связанную с пространственными вариациями распределения осадков.

Ниже представлены наиболее характерные результаты измерений микроструктурных характеристик (распределение частиц по размерам $N(D)$) осадков различных видов, полученные в летне-осенний период 2016 г. и показывающие возможности ОПТИОС. Рис. 2а иллюстрирует распределение $N(D)$ капель ливневого дождя, выпавшего 15 июня в период 18:45-19:20 местного времени, когда было зарегистрировано 6612 капель, прошедших через измерительную площадку прибора. Среднее значение интенсивности дождя составляло 20 мм/ч при максимальной интенсивности порядка 50 мм/ч. Данное распределение описывается одновершинной кривой с максимумом в области размера частиц 1...1,5 мм.

На рис. 2б показано распределение $N(D)$ для снега, выпавшего 11 октября 2016 г. в период 17:10-19:16 (3637 снежинок). Особенностью данного распределения является большое количество снежных частиц в области до 2 мм. Более подробно результаты измерения характеристик снеговых осадков с помощью ОПТИОС описаны в [19].



На рис. 2в представлено распределение $N(D)$ при осадках в виде дождя, сопровождающегося градом. Данные получены 9 июля 2016 г. в период 18:49-18:52 (зарегистрировано 1267 частиц). Кривая распределения частиц сохранила форму, характерную для крупных капель дождя с максимумом в области 1,5 мм, при этом она имеет пологое продолжение в область более крупных частиц и не ограничивается диапазоном размеров частиц жидких осадков. Таким образом, ОПТИОС успешно регистрирует осадки, выпадающие в виде града, что хорошо согласуется с оценками, вы-

полненными ранее [20].

На рис. 2г представлено распределение $N(D)$ для явления (так называемого мокрого снега), которое считается наиболее сложным для автоматического распознавания. Этот вид осадков наблюдается при положительной и близкой к нулевой температуре окружающего воздуха и характеризуется одновременным выпадением снежинок и капель дождя. Результаты получены 10 октября 2016 г. в период 10:00-12:10 (11534 частицы). Гистограмма представляет собой типичное экспоненциальное распределение с большим количеством мелких частиц и относительно малым – крупных. Распределение $N(D)$ для мокрого снега трудноотличимо от некоторых случаев выпадения ледяных кристаллов и снежных хлопьев. Для повышения достоверности определения вида выпадающих атмосферных осадков необходимо учитывать скорость падения частиц и температуру воздуха. Подробно вопросы, касающиеся оценки скоростей падения частиц осадков рассмотрены в [21].

Пример сравнительного синхронного измерения интенсивности осадков I с помощью осадкомеров ОПТИОС и РС представлен на рис. 3. Результаты получены 15 июня 2016 г. в период 18:45-19:20. Видно, что временная динамика I у измерителей показывает хорошее совпадение. Отклонение значений, полученных ОПТИОС и РС в различных временных интервалах, может быть объяснено меньшим разрешением челночного осадкомера по количеству осадков (0,22 мм), что не позволяет производить с помощью РС точные измерения интенсивности осадков. Поэтому результаты измерений значений I для РС и ОПТИОС могут различаться на 25 процентов и более, в зависимости от выбранного временного интервала. Некоторое несовпадение моментов резкого изменения значений I объясняется особенностями алгоритмов осреднения данных, получаемых ОПТИОС, что может приводить к временному сдвигу результатов измерения на величину порядка 10 с.

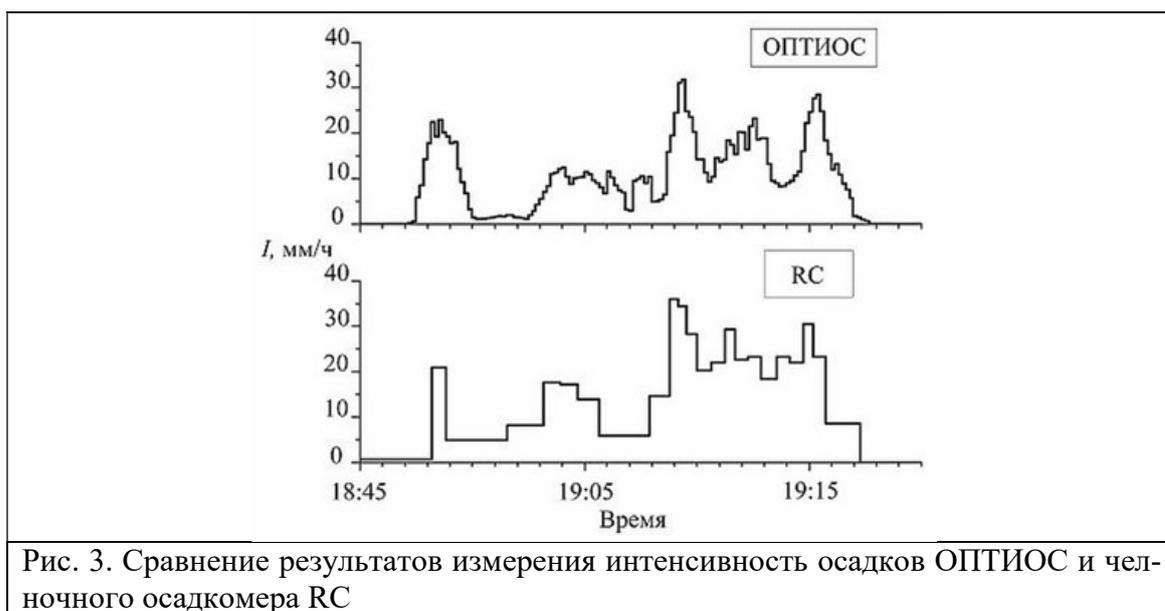
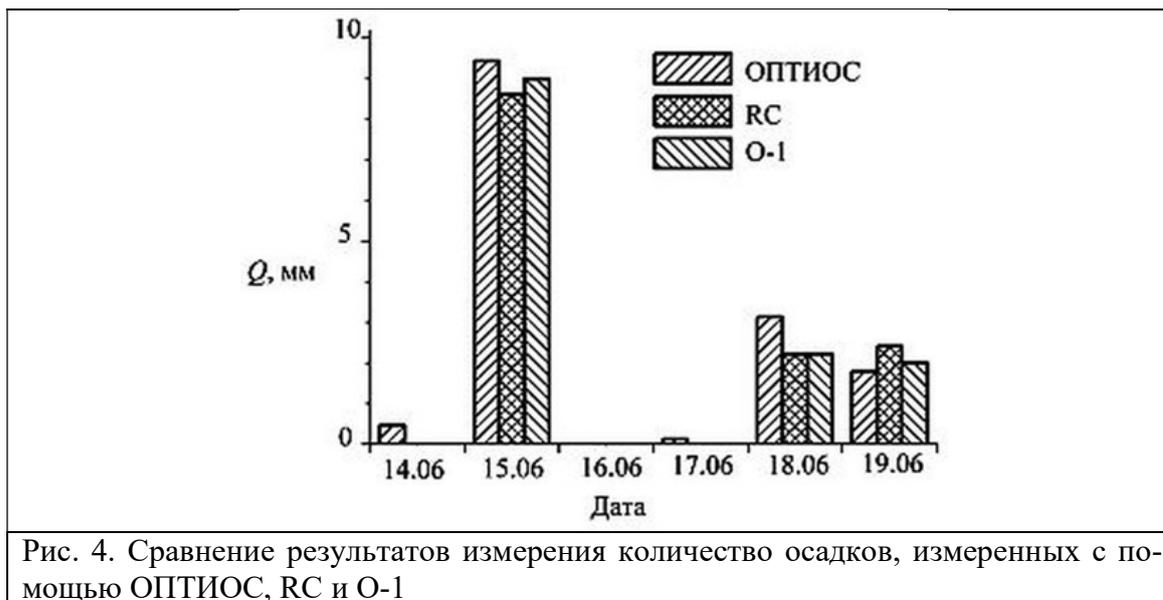


Рис. 3. Сравнение результатов измерения интенсивность осадков ОПТИОС и челночного осадкомера РС

Проведено также синхронное измерение количества собранных за сутки осадков Q с помощью ОПТИОС, РС и О-1 (рис. 4). Показания О-1 снимались 2 раза в сутки (10:00 и 19:00 местного времени), показания РС и ОПТИОС снимались автоматически при регистрации выпадения осадков. За начало измерений в каждых сутках выбрано время 10:00.

Данные измерений ОПТИОС в целом хорошо согласуются с данными РС и О-1. Анализ данных измерений за 14 июня показал, что за эти сутки осадкомеры РС и О-1 не зарегистрировали осадков. В то же время количество выпавших осадков по данным ОПТИОС составило величину порядка 0,5 мм, что превышает заявленный порог чувствительности стандартных приборов. Возможно, такое малое количество осадков не было зафиксировано из-за погрешностей, связанных со смачиванием и испарением жидкости, поскольку 14 июня температура воздуха установилась в области 25 °С. С помощью ОПТИОС были зарегистрированы также совсем незначительные осадки 17 июня. За весь выбранный период количество измеренных осадкомером ОПТИОС осадков составило 14,46 мм, челночным осадкомером РС – 13,86 мм, а стандартным О-1 с ветровой защитой Третьякова – 13,2 мм.



Измеритель ОПТИОС (под названием блок измерения осадков) был включен в состав экспериментального образца автоматической метеостанции АрктикМетео, которая предназначена для работы на удаленных и труднодоступных территориях со сложными климатическими условиями [22]. Некоторые результаты измерений метеорологических величин, в т. ч, интенсивности жидких осадков, выполненных с помощью этой метеостанции, проведенные в 2020 г. представлены в [23].

Заключение

Разработанный опытный образец ОПТИОС обеспечивает выполнение долговременных автоматических измерений микроструктурных и интегральных характеристик атмосферных осадков, которые необходимы для решения различных научных и прикладных задач. Применение новых алгоритмов существенно упрощает процедуру калибровки прибора и создает возможность ее автоматизации.

Анализ результатов сравнительных натурных испытаний ОПТИОС совместно с традиционными измерителями O-1 и RC показал их достаточно хорошее совпадение. Полученная погрешность измерения количества жидких осадков, не превышающая 10 % по сравнению со стандартными приборами, и совпадение хода измеренной интенсивности выпадения дождя показывают, что разработанный подход обеспечивает минимизацию случайных ошибок измерений. Вместе с тем, принципиальные различия в применяемых методах измерения не дают возможности для корректного сравнения целого ряда измеряемых параметров (например, для снеговых осадков), что требует применения дополнительных средств измерения.

Проверена работоспособность ОПТИОС в составе автоматизированной метеорологической станции.

Созданный лазерный измеритель типа атмосферных осадков, а также их микрофизических и интегральных характеристик может представлять интерес в качестве замены дорогостоящих импортных аналогов при решении научных и прикладных задач.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список литературы

1. Безрукова Н.А., Чернокульский А.В. Российские исследования облаков и осадков в 2011-2014 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 5. С. 577–589. doi: 10.7868/S0002351516050023.
2. Воеводина Л.А. Структура почвы и факторы, изменяющие ее при орошении // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2016. № 1 (21). С. 134–154.
3. Киселев В.Н., Кузенов А.Д. Методы зондирования окружающей среды (атмосферы). СПб.: Изд-во РГГМУ, 2004. 429 с.
4. Pustovalov K.N., Kobzev A.A., Nagorskiy P.M. Study of atmospheric surface layer electrical processes in case of varying intensity rain // Proc. SPIE. 2015 V. 9680. P. 96806L-1. doi: 10.1117/12.2205719.
5. Michaelides S.C. Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg. 2008. 552 p.
6. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Приборное обеспечение измерения параметров атмосферных осадков. Современное состояние // Изв. вузов. Физика. 2009. № 12. С. 92 (деп. в ВИНТИ 16.12.09, № 802-B2009).
7. Солдаткин Н.П. Оптические приборы и методы контроля микрофизических параметров атмосферных осадков // Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений. Томск: ИОА СО РАН. 1997. С. 217–232.
8. Barthazy E., Goke S., Schefold R., Hognl D. An Optical Array Instrument for Shape and Fall Velocity Measurements of Hydrometeors // J. Atmos. Oceanic Technol. 2004. V. 21. P. 1400–1416.
9. Schönhuber M., Lammer G., Randeu W.L. Ch. 1. The 2D-Video-Disdrometer // Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction / Ed. by Silas Michaelides. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, p. 3–32.
10. Knollenberg R. G. The optical array and alternative to scattering or extinction for airborne particle size determination // J. Appl. Meteor. 1970. V. 9. No. 2. P. 86–103.
11. Литвинов И.В. Структура атмосферных осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 154 с.
12. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Оптико-электронный двухканальный измеритель осадков // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 11. С. 990–996.
13. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. К выбору размеров измерительной площади двухканального оптического осадкомера // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 2. С. 155–159.
14. Азбукина А.А., Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. Оптико-электронный блок измерения параметров осадков // ПТЭ. 2013. № 4. С. 140–141. doi: 10.7868/S0032816213040186.
15. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Тельминов А.Е. Решение проблемы ветрового недоучета с помощью оптического осадкомера // Высокие технологии в современной науке и технике: сб. научн. тр. II Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием. (г. Томск, 27-29 марта 2013 г.). Томск, ТПУ. 2013. Т. 1. С. 328–332.
16. Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Краснолобов И.М., Тихомиров А.А. Система устранения внешних естественных помех в измерительном канале оптического осадкомера // Доклады ТУСУР. 2016. Т. 19. № 2. С. 45–47. doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-2-35-37.
17. Azbukin A.A., Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Determination of Calibration Parameters of an Optoelectronic Precipitation Gauge // Atmospheric and Oceanic Optics. 2014. V. 27. No. 5. P. 432–437. doi: 10.1134/S1024856014050066.
18. Пат. 2617033 РФ. МПК G 01 W 1/14. Способ калибровки оптического измерителя осадков / А.А. Азбукин, В.В. Кальчихин, А.А. Кобзев, В.А. Корольков, А.А. Тихомиров; заявитель и патентообладатель ИМКЭС СО РАН и ООО «Сибаналитприбор». Заявл. 09.03.2016; опубл. 19.04.2017. Бюл. № 11.
19. Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Measurement of snow characteristics using optical precipitation gauge // Proc. SPIE. 2016. V. 10035. P. 100352W-1. doi: 10.1117/12.2243139.
20. Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Specifics of the hail parameter measurements using the optical precipitation gauge // Proc. SPIE. 2015. V. 9680. P. 968038-1; doi 10.1117/12.2205285.

21. Kal'chikhin V.V., Kobzev A.A., Korol'kov V.A., Tikhomirov A.A. Determination of the Rate of Fall of Rain Drops in Measurements of Their Parameters by an Optical Rain Gauge // *Measurement Techniques*. 2017. V. 59. No. 11. P. 1175–1180. doi: 10.1007/s11018-017-1111-9.
22. Korolkov V.A., Bogushevich A.Ya., Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Kurakov S.A., Pustovalov K.N., Telminov A.E., Tikhomirov A.A., Petrov D.V.. Experimental prototype of automatic weather station ArcticMeteo // *Proc. of SPIE*. 2020. V. 11560. P. 1156058. doi: 10.1117/12.2575822.
23. Korolkov V.A., Kobzev A.A., Tikhomirov A.A., Telminov A.E., Pustovalov K.N., Bogushevich A.Ya., Kalchikhin V.V. and Kurakov S.A. Automatic weather station ArcticMeteo – the first field test results // *ENVIROMIS2020 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2020. V. 611 P. 012053. doi: 10.1088/1755-1315/611/1/012053.

Laser Meter for Integral and Microstructural Characteristics of Atmospheric Precipitation OPTIOS

Kalchikhin V. V., Kobzev A. A., Tikhomirov A. A., Filatov D. E.*

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
10/3, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russia

email: vvk@imces.ru, alexey-kobzev@mail.ru, tikhomirov@imces.ru, dmi-trii.04101995@gmail.com*

A description of the measuring scheme features, the results of laboratory and field tests of the prototype of atmospheric precipitation laser meter OPTIOS based on the method of obtaining and analyzing of shadow images of falling precipitation particles are presented. Schematic and software solutions are presented that ensure the autonomy of the device and reduce the error in measuring precipitation parameters. The efficiency of using OPTIOS for measuring the integral and microstructural characteristics of rain, snow and hail is shown on the example of analyzing the results of comparative field tests with a standard O-1 rain gauge and a tipping-bucket rain gauge Davis Rain Collector. Size range of measured precipitation particles – from 0.5 to 10 mm, sensitivity to the amount of precipitation – not worse than 0.0001 mm, range of measured rain intensity – from 0 to 2000 mm/h, particle fall velocity range of – from 0.2 to 20 m/s.

Keywords: laser meter, obtaining and analyzing of shadow images, atmospheric precipitation, integral and microstructural characteristics

References

1. Bezrukova N.A., Chernokulsky A.V. Russian studies on clouds and precipitation in in 2011-2014 // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. V. 52. No 5. P. 512–523.
2. Voevodina L.A. Soil structure and the factors changing it irrigation // *Russian Research Institute of Land Improvement Problems*. 2016. No 1 (21). P. 134–154 (in Russian).
3. Kiselev V.N., Kuznetzova A.D. Sounding methods of the environment (of the atmosphere). A textbook. St. Petersburg Publishers. 2004. 429 p. (in Russian).
4. Pustovalov K.N., Kobzev A.A., Nagorskiy P.M. Study of atmospheric surface layer electrical processes in case of varying intensity rain // *Proc. SPIE*. 2015 V. 9680. P. 96806L-1.
5. Michaelides S.C. *Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction*. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg. 2008. 552 p.
6. Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Instrumentation for measurement of the parameters of atmospheric precipitation. Current state // *Russian Physics Journal*. 2009. V. 52. No 12. P. 92 (dep. In VINITI. 16.12.09, № 802-B2009) (in Russian).

7. Soldatkin N.P. Optical devices and control methods of precipitation microphysical characteristics // Regional atmospheric monitoring. Part 2. New devices and methods' measurements. Tomsk. IAO SB RAS. 1997. P. 217–232 (in Russian).
8. Barthazy E., Goke S., Schefold R., Hogg D. An Optical Array Instrument for Shape and Fall Velocity Measurements of Hydrometeors // J. Atmos. Oceanic Technol. 2004. V. 21. P. 1400–1416.
9. Schönhuber M., Lammer G., Randeu W.L. Ch. 1. The 2D-Video-Disdrometer // Precipitation: Advances in Measurement, Estimation and Prediction / Ed. by Silas Michaelides. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, p. 3–32.
10. Knollenberg R. G. The optical array and alternative to scattering or extinction for airborne particle size determination // J. Appl. Meteor. 1970. V. 9. No. 2. P. 86–103.
11. Litvinov I.V. Atmospheric precipitation structure. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1974. 154 p. (in Russian).
12. Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Optoelectronic dual-channel precipitation gauge // Opt. Atm. Okeana. 2011. V. 24. No 11. P. 990–996 (in Russian).
13. Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. On the choice of the measuring area for dual-channel optical rain gauge // Opt. Atm. Okeana. 2013. V. 26. No 2. P. 155–159 (in Russian).
14. Azbukin A.A., Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Optoelectronic unit for precipitation measurement // Prib. Tech. Exp. 2013. No 4. P. 140–141 (in Russian).
15. Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Telminov A.E. The solution to the problem of underestimation of the wind through optical rain gauge // Vy'sokie tekhnologii v sovremennoi` nauke i tekhnike: sb. nauchn. tr. II Vseros. nauch.-tekhn. konf. molody`kh ucheny`kh, aspirantov i studentov s mezhdunarodny`m uchastiem. (g. Tomsk, 27-29 marta 2013 g.). Tomsk, TPU. 2013. V. 1. P. 328–332 (in Russian).
16. Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Krasnolobov I.M. Краснолобов И.М., Тихомиров А.А. System for elimination of external natural noise in the measuring channel of the optical precipitation gauge // Doklady` TUSUR. 2016. V. 19. No 2. P. 45–47 (in Russian).
17. Azbukin A.A., Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Determination of Calibration Parameters of an Optoelectronic Precipitation Gage // Atmospheric and Oceanic Optics. 2014. V. 27. No 5. P. 432–437.
18. Pat. 2617033 RF. MPK G 01 W 1/14. Method of calibration of the optical precipitation gauge / A.A. Azbukin, V.V. Kal`chihin, A.A. Kobzev, V.A. Korol`kov, A.A. Tihomirov; zaiavitel` i patentoobladatel` IMKE`S SO RAN i OOO «Sibanalitpribor». Zaiavl. 09.03.2016; opubl. 19.04.2017. Biul. № 11. [in Russian].
19. Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Measurement of snow characteristics using optical precipitation gauge // Proc. SPIE. 2016. V. 10035. P. 100352W-1.
20. Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Korolkov V.A., Tikhomirov A.A. Specifics of the hail parameter measurements using the optical precipitation gauge // Proc. SPIE. 2015. V. 9680.
21. Kal`chikhin V.V., Kobzev A.A., Korol`kov V.A., Tikhomirov A.A. Determination of the Rate of Fall of Rain Drops in Measurements of Their Parameters by an Optical Rain Gauge // Measurement Techniques. 2017. V. 59. No. 11. P. 1175–1180.
22. Korolkov V.A., Bogushevich A.Ya., Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Kurakov S.A., Pustovalov K.N., Telminov A.E., Tikhomirov A.A., Petrov D.V.. Experimental prototype of automatic weather station ArcticMeteo // Proc. of SPIE. 2020. V. 11560. P. 1156058.
23. Korolkov V.A., Kobzev A.A., Tikhomirov A.A., Telminov A.E., Pustovalov K.N., Bogushevich A.Ya., Kalchikhin V.V. and Kurakov S.A. Automatic weather station ArcticMeteo – the first field test results // ENVIROMIS2020 IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 611 P. 012053.