

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 551.508.77:535.311:551.501.777

Определение энергетических характеристик дождевых осадков с помощью оптического осадкомера

В.В. Кальчихин[✉], А.А. Кобзев, А.А. Тихомиров*

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

Поступила в редакцию 08.09.2023;

после доработки 17.10.2023;

принята к печати 18.10.2023

Представлен краткий обзор задач, для решения которых требуется информация об энергетических характеристиках атмосферных осадков, выпадающих в виде дождя, а также методов ее получения. Предложена методика определения кинетической энергии, переносимой гидрометеорами, на основе микроструктурных характеристик осадков, получаемых с помощью оптического осадкомера ОПТИОС. Методика апробирована на примере сильного ливня, прошедшего в Томске 22.07.2023 г. Проанализировано влияние различных микроструктурных параметров на кинетическую энергию, приносимую каплями дождя на подстилающую поверхность. Проведено сравнение с величинами, получаемыми по упрощенным методикам. Возможности оптического осадкомера позволяют успешно применять его при решении задач, требующих точной оценки энергетических параметров дождей.

Ключевые слова: осадки, интенсивность осадков, кинетическая энергия осадков, измеритель осадков, дисдrometer, эрозия почвы; precipitation, rainfall intensity, rainfall kinetic energy, rain gage, disdrometer, soil erosion.

Введение

Информация о потоках энергии, переносимых выпадающими в виде дождя атмосферными осадками, имеет важное значение при решении целого ряда научно-практических и хозяйственных задач. Например, точная оценка кинетической энергии осадков важна для понимания механизмов эрозии передней кромки (LEE — Leading-Edge Erosion) лопастей ветряных электрогенераторов и смягчения ее последствий [1]. Эрозионные повреждения снижают аэродинамические характеристики лопастей, что приводит к снижению годовой выработки электроэнергии и увеличению времени простоя турбин в ремонте [2]. Хотя LEE происходит под влиянием целого ряда атмосферных явлений, скорость удара капель и общее количество осадков признаются одними из наиболее значимых внешних факторов эрозии [3]. Для количественной оценки LEE лопастей в ветряных турбинах важно как можно более точно определять кинетическую энергию осадков, особенно для регионов, в которых сезоны дождей длятся большую часть года [1].

В работе [4] установлено, что высокая кинетическая энергия, приносимая выпадающими жидкими атмосферными осадками, наряду с их интенсив-

ностью и продолжительностью, может спровоцировать возникновение оползней. Преимущество прогнозирования оползневой опасности на основе контроля потоков энергии состоит в том, что оползень может возникнуть до окончания выпадения осадков высокой интенсивности, так как пороговое значение кинетической энергии, передаваемой почве каплями, может быть превышено за интервал времени, меньший, чем продолжительность дождя [5].

Информация о кинетической энергии, приносимой атмосферными осадками на подстилающую поверхность, играет важную роль при прогнозировании ливневой эрозии почв [6]. Чем больше масса и скорость дождевой капли, т.е. чем больше ее кинетическая энергия, тем сильнее она разрушает почву. И хотя продолжительность дождево-капельной эрозии обычно измеряется минутами или часами, количество смываемой почвы может достигать десятков тонн на гектар [7]. Эрозия является одной из основных причин деградации земель во всем мире, особенно сельскохозяйственных почв. Она истощает почву, вымывая питательные вещества, существенно влияет на ее плодородие, способность к фильтрации и хранению углерода и азота, ставит под угрозу сохранение мест обитания животных. Антропогенная деятельность, такая как урбанизация, сельское хозяйство, расчистка и вырубка лесных массивов, обнажает и делает подвижными почвы, что приводит к ускоренной эрозии, потере продуктивности и изменению ландшафта [8]. Кроме

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

того, эрозионный перенос почвы может спровоцировать наводнения из-за заиления речных русел [1]. Поэтому эрозия почвы является очень серьезной глобальной проблемой. Например, в США из-за последствий, вызванных бесконтрольным освоением и возделыванием новых сельскохозяйственных угодий в XIX и начале XX вв., в 1930 г. она была объявлена национальной угрозой [9].

Более глубокое понимание механизмов, вызывающих ливневую эрозию почвы, жизненно важно для уменьшения ее воздействия на сельское хозяйство и окружающую среду [10], а также для разработки методов устойчивого сохранения и планирования землепользования [8]. Для успешной работы в данных направлениях решающее значение имеет надежная количественная оценка скорости эрозии и факторов, ее определяющих, к числу которых относится кинетическая энергия осадков. Решению этой задачи посвящено большое количество исследований, проводимых по всему миру в регионах с различными климатическими условиями и режимами выпадения осадков [10–25].

Цели работы — разработка и апробация методики определения кинетической энергии, приносимой гидрометеорами на подстилающую поверхность, на основе измеряемых с помощью оптического осадкомера микроструктурных характеристик осадков; анализ влияния различных параметров дождей на кинетическую энергию; сравнение полученных значений с величинами, рассчитанными по упрощенным методикам.

1. Материалы и методы

1.1. Расчет кинетической энергии по результатам измерения интенсивности дождя

Кинетическая энергия дождя является суммой энергий отдельных капель. Энергия (E_k), переносимая каждой каплей, легко вычисляется через ее характеристики по известной формуле

$$E_k = \frac{m_k v^2}{2} = \frac{\pi \rho D_k^3 v_k^2}{12}, \quad (1)$$

где ρ — плотность воды; D_k — эквивалентный диаметр сферической капли; v_k — терминальная скорость, с которой она падает на подстилающую поверхность.

В силу того что эти характеристики, как правило, при исследованиях не измеряются, приходится ориентироваться на более доступные параметры дождя. В частности, в ряде работ применяются эмпирические зависимости между кинетической энергией (E , Дж·м⁻²) осадков и их интенсивностью (I , мм·ч⁻¹) [1, 21–25]. Следует отметить, что кинетическая энергия дождя может быть представлена в двух формах: кинетическая энергия, приносимая на единицу поверхности почвы при выпадении 1 мм осадков ($E_{\text{мм}}$, Дж·м⁻²·мм⁻¹); кинетическая энергия, доставляемая каплями на единицу подсти-

лающей поверхности за единицу времени ($E_{\text{вр}}$, Дж·м⁻²·мин⁻¹) [26]. Эти величины связаны друг другом следующим образом:

$$E_{\text{вр}} = c I E_{\text{мм}}, \quad (2)$$

где c — константа, которая зависит от используемых единиц времени.

Соотношение, оценивающее E как функцию интенсивности дождя и наиболее часто используемое из-за его простоты, было предложено в [27]. Согласно этому соотношению

$$E = (11,9 + 8,73 \lg I) I \Delta t. \quad (3)$$

Если предположить, что временной интервал $\Delta t = 1$ мин, то, разделив значение, получаемое по формуле (3), на 60, получим:

$$E_{\text{вр}} = E / 60. \quad (4)$$

В работах [26, 28] проведен обзор многих эмпирических соотношений E и I . Было обнаружено, что результаты расчетов E , произведенных по формулам, предложенным различными авторами, значительно расходятся между собой. Возможными причинами этого являются методологические различия в процедурах измерения I и последующих расчетах; использование данных, которые охватывают лишь небольшой диапазон I , а также различия между географическим расположением или погодными системами регионов, в которых производился подбор параметров для конкретных эмпирических соотношений.

1.2. Расчет кинетической энергии с использованием распределения капель по размерам

Существует ряд методик вычисления кинетической энергии осадков на основе эмпирических выражений, связывающих интенсивность дождя со статистическими характеристиками распределения капель по размеру (DSD — Drop Size Distribution), среди которых выделяются две классические [12]. Первая методика заключается в том, чтобы подобрать соотношение между медианным объемным диаметром капель дождя (D_{50}) и их интенсивностью I . Медианный диаметр D_{50} соответствует такому диаметру, по которому объем всех частиц делится на две равные части. Объем всех частиц, диаметр которых менее D_{50} , составляет 50% от общего объема частиц. Медианный диаметр находят с помощью интегральной кривой распределения [29]. Предполагается, что D_{50} является эффективным диаметром, способным воспроизвести свойства всего набора дождевых капель. Поэтому оценка кинетической энергии осадков не требует знания всего распределения капель по размерам и скоростям падения [30]. Требуется лишь знание терминальной скорости падения капли с D_{50} , которую можно оценить по эмпирическим соотношениям и таблицам, связывающим v и D [12].

Вторая методика вычисления кинетической энергии дождя на основе DSD состоит в использовании полного спектра распределения частиц по размерам и скоростям. По этой причине формулы, основанные на полном DSD, ранее использовались реже, чем основанные на D_{50} . Тем не менее существует ряд исследований, где применялась данная методика [17, 19, 20].

Методы получения DSD начали разрабатываться еще в конце XIX — начале XX вв. [12] в виде так называемых классических «метода фильтровальной бумаги» и «метода гранул муки». Оба они основаны на измерении количества и размеров пятен, оставленных упавшими на измерительную поверхность каплями, сопоставлении размеров пятен с реальными диаметрами капель, их оставивших, и нахождении табличных значений скоростей падения, соответствующих данным диаметрам. Несмотря на давность разработки, эти методы еще продолжают иногда использоваться в современных исследованиях. Например, в [17] DSD для каждого дождя определялось экспозицией около 370 листов фильтровальной бумаги, обработанной небольшим количеством порошкообразного красителя. Время экспозиции ограничивалось моментом начала перекрытия отдельных пятен и составляло от 1 до 10 с, после чего пятна, оставленные каплями, немедленно фотографировались.

В настоящее время появились приборы, позволяющие определять DSD на основе автоматической и непрерывной регистрации размера и скорости падения капель, — дисдрометры. Существует целый ряд таких приборов, основанных на разных физических принципах. Например, дисдрометр типа JWD (Joss-Waldvogel Disdrometer) [12] является электромеханическим устройством, определяющим размер дождевой капли путем измерения силы удара, который падающая капля производит по поверхности датчика. Дисдрометр JWD дает хорошие результаты для интенсивности от легкой до умеренной, но недооценивает количество капель небольшого размера во время сильных дождей и не может обнаруживать дождевые капли диаметром $< 0,2$ мм [31].

В исследовании [19] применялся относительно недорогой прибор, в котором используется пьезоэлектрический преобразователь. Устройство непрерывно и автоматически регистрирует электрический отклик преобразователя, возникающий в результате передачи преобразователю вертикального импульса капель дождя, ударяющихся о его поверхность. Каждый из зарегистрированных электрических сигналов представляет собой каплю, а его амплитуда соответствует размеру капли, импульсу и кинетической энергии. Спектр распределения капель по размерам и общая кинетическая энергетическая нагрузка дождя рассчитываются путем анализа общего количества зарегистрированных сигналов, их пиковых амплитуд, количества осадков и калибровочных кривых.

Современные дисдрометры, основанные на оптических принципах, измеряют либо ослабление

лазерного луча при прохождении частицы дождя между излучателем и приемником, либо светорассеяние от частиц, проходящих через световой пучок. Оба типа используют излучатель и приемник лазерного сигнала, как правило, располагаемые в горизонтальной плоскости. Излучатель и приемник могут быть как одиночными, так и состоять из массива элементов. Оптические дисдрометры обеспечивают полные измерения DSD по амплитуде и длительности изменения светового потока в измерительном канале при прохождении частиц через луч. Лазерные дисдрометры не лишены проблем, связанных с эффектами неравномерного распределения мощности лазерного луча, одновременным появлением нескольких капель в измерительном объеме (двойное обнаружение) и краевыми событиями (частичные обнаружения) [31].

В двумерном видеодисдрометре 2DVD (2-D Video Disdrometer) компании Joanneum Research, улучшенном по сравнению с лазерными осадкомерами, используются две ортогонально направленные высокоскоростные камеры линейного сканирования, каждая с отдельным источником света. Прибор обеспечивает надежные измерения скорости, размера и формы падающих частиц [32]. В настоящее время дисдрометр 2DVD считается надежным эталоном для частиц размером $> 0,3$ мм, хотя его использование ограничивается в основном отдельными экспериментами из-за высокой стоимости прибора и сложностей, связанных с его настройкой и обработкой измерительных данных [31].

Современные оптические дисдрометры относительно недороги и могут быть приобретены не только крупными научными центрами, но и небольшими исследовательскими коллективами, они уже откалиброваны производителем и готовы к работе в полевых условиях. Эти приборы измеряют размер и скорость дождевых капель, по которым можно определить DSD и кинетическую энергию. В работе [33] сделан вывод о том, что, когда это возможно, кинетическую энергию следует измерять, а не оценивать на основе эмпирических отношений, представляющих E как функцию интенсивности дождя. Аналогичные выводы были сделаны авторами исследований [15, 21].

1.3. Методика измерения кинетической энергии с использованием осадкомера ОПТИОС

Разработанный в ИМКЭС СО РАН оптический осадкомер ОПТИОС по принципу своей работы является лазерным дисдрометром, так как интегральные характеристики осадков (общее количество выпавших осадков Q и их интенсивность I) он определяет на основе непосредственного измерения микроструктурных характеристик (D и v) [34]. Измерительный канал прибора формируется излучателем, состоящим из лазерного генератора линии, который с помощью цилиндрической линзы-коллиматора выдает плоскопараллельный горизонтальный

пучок света шириной около 50 мм, и приемником. Основным элементом приемника является линейная ПЗС-матрица, состоящая из 768 высокочувствительных элементов размером 63 мкм, позволяющая регистрировать теневые изображения дождевых капель, проходящих через измерительную площадку размером 48 см², с частотой около 20 кГц. Высокая частота обработки сигнала делает возможным измерение характеристики даже самых мелких гидрометеоров, падающих с максимально возможной для них скоростью. Так как в состав приемника входит массив светочувствительных элементов, настроенных не на регистрацию степени освещенности, а на пороговое срабатывание свет–тень, прибор лишен недостатка лазерных дисдрометров, связанного с эффектами неравномерного распределения мощности лазерного луча [31].

В работах [15, 22] точность результатов измерений дисдрометров предлагается оценивать путем сравнения величины Q с показателями стандартных измерителей осадков. Осадкомер ОПТИОС установлен на метеоплощадке Геофизической обсерватории (ГО) ИМКЭС СО РАН в непосредственной близости от стандартного осадкомера Третьякова О-1 и челночного измерителя осадков Davis Rain Collector (RC), как это показано на рис. 1. Результаты многолетних испытаний подтвердили хорошее согласие измерительных данных всех трех приборов и высокую точность измерений интегральных характеристик выпадающих атмосферных осадков ОПТИОС [35].



Рис. 1. Осадкомеры (слева направо) ОПТИОС, RC и О-1 на метеоплощадке ГО ИМКЭС

В настоящей работе рассчитывалась величина кинетической энергии осадков на основе измерительных данных ОПТИОС с помощью трех методик.

1. По формуле (1) рассчитывалась энергия, приносимая на подстилающую поверхность каждой каплей, суммированием которой по всем гидрометеорам, зарегистрированным за минуту, получалось значение $E_{вр}$, а суммированием по всем частицам, зарегистрированным при накоплении количества осадков 1 мм, высчитывалась величина $E_{мм}$.

2. Для оценки изменений получаемых величин при использовании упрощенной процедуры, состоящей в использовании в формуле (1) средних за минуту значений D и v , также выдаваемых в соста-

ве измерительных данных ОПТИОС, с последующим умножением результата вычисления на число зарегистрированных за минуту капель N высчитывалась $E_{вр, ср}$.

3. С целью сравнения значений, полученных по предыдущим двум методикам, проведена оценка кинетической энергии с помощью эмпирической зависимости E от I (3), далее обозначаемая E_I . Используемые в расчетах значения интенсивности осадков за минуту также были измерены ОПТИОС.

2. Результаты и обсуждение

Возможности осадкомера ОПТИОС в решении задачи измерения микроструктурных характеристик осадков и получения на их основе параметров переносимых при выпадении дождей энергетических потоков демонстрируются в настоящей работе на примере ливня с грозами, прошедшего в Томске с 13:41 до 14:04 22.06.2023 г. За это время общее количество выпавших осадков, зафиксированных ОПТИОС, RC и О-1, составило 12,96; 12,10 и 11,00 мм соответственно. Хотя в журнале метеонаблюдений ГО данный ливень отмечен как «ливневый дождь умеренный», что соответствует критериям Росгидромета, пиковая интенсивность осадка по данным ОПТИОС и RC доходила до 90 мм/ч. В [27] ливневый дождь с общим количеством осадков не менее 12,7 мм (0,5 дюйма) или с максимальной 15-минутной интенсивностью, превышающей 25,4 мм/ч (1 дюйм/ч), определяется как эрозионный шторм. В рассматриваемом событии средняя интенсивность составила 33,5 мм/ч, а максимальная 15-минутная интенсивность — 37,3 мм/ч. Следовательно, выбор данного метеоявления в качестве объекта исследования в настоящей работе вполне обоснован с точки зрения эрозионной активности осадков, определяемой их кинетической энергией.

На рис. 2 показаны изменения энергетических, интегральных и микроструктурных характеристик исследуемого ливня в течение всего времени его выпадения. На графике, отражающем изменение среднего диаметра (D) выпавших за минуту капель (N), хорошо заметен эффект так называемой сортировки капель, вызванной тенденцией крупных капель двигаться быстрее мелких [28]. Это приводит к тому, что в начале ливневого дождя относительно небольшое количество крупных капель опережает большинство капель обычного размера, а затем, по мере развития явления, средний размер капель уменьшается. В [18] был сделан вывод о том, что более высокая эрозионная активность дождя связана с большими размерами капель, а не с высокой интенсивностью дождя. Графики наших измерений не подтверждают данный вывод. Наоборот, хорошо просматривается сильная корреляция изменений кинетической энергии и интенсивности. Кинетическая энергия и интенсивность, в свою очередь, гораздо теснее связаны с изменениями N , чем D . Например, если сравнивать величины, измеренные за минуту в 13:49, с полученными в 13:51, видно, что в первом случае значения N , I и, следовательно,

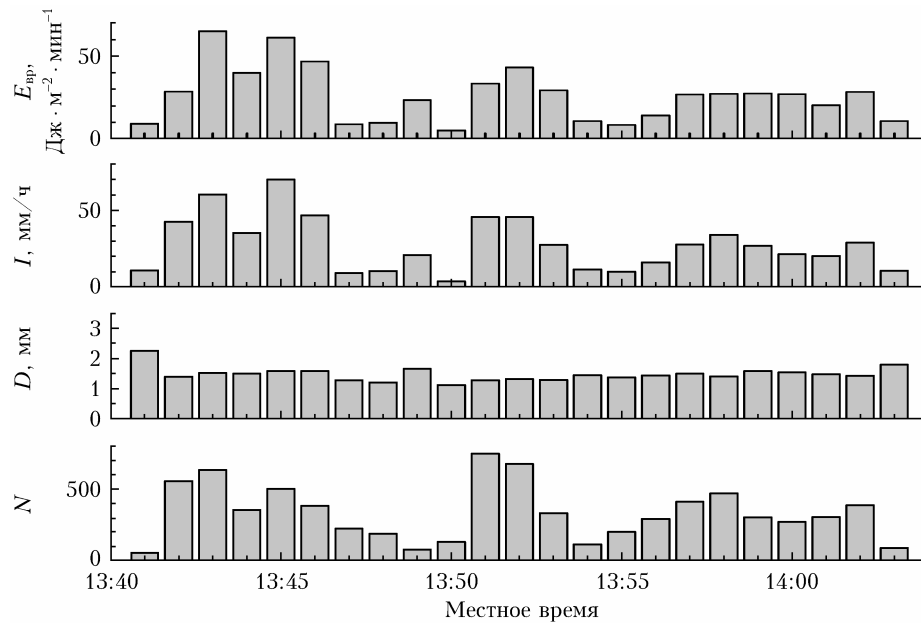


Рис. 2. Результаты измерения кинетической энергии, интегральных и микроструктурных характеристик ливня, выпавшего в Томске 22.06.2023 г.

$E_{вр}$ существенно меньше, чем во втором случае, тогда как с параметром D все наоборот.

Не подтверждается также сделанное в [19] предположение о том, что большее значение D капель соответствует большей интенсивности осадков. Сравнение соответствующих измерительных данных в 13:49 и 13:51 явно иллюстрирует обратную зависимость.

Таким образом, интенсивность дождя определяется в основном числом капель в единицу времени, а не их размерами. Лишь в диапазоне низких интенсивностей при проявлении эффекта сортировки

капель может проявляться обратная тенденция, как это отмечается в [22], что в нашем случае демонстрирует сравнение показателей в 13:49 с величинами, полученными в 13:50. Данный факт является результатом временного повышения концентрации крупных капель, несущих иногда во много раз большую энергию по сравнению с гораздо более многочисленными средними и мелкими каплями.

На рис. 3 представлены результаты расчета кинетической энергии исследуемого ливня на основе измерительных данных ОПТИОС по трем различным методикам (см. разд. 1.3).

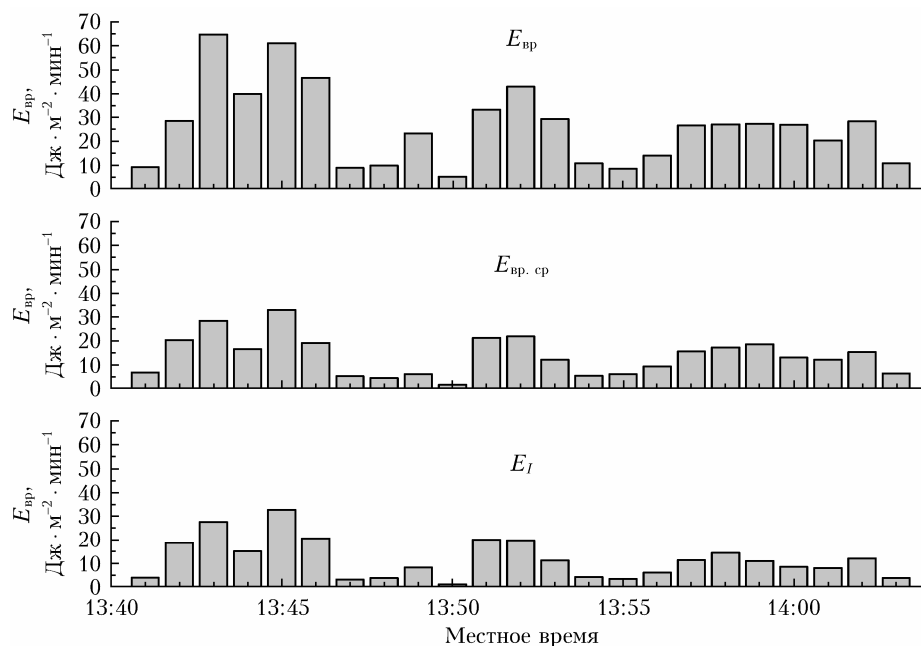


Рис. 3. Результаты расчетов энергии ливня по трем методикам

Видно, что корреляция изменений кинетической энергии на протяжении всего ливня для всех трех графиков вполне удовлетворительная. Однако стоит отметить, что полученные с использованием эмпирической зависимости (3) значения E_I гораздо лучше согласуются как по поведению, так и по абсолютным величинам с рассчитанными по упрощенной методике $E_{вр. ср.}$, чем с полученными из непосредственно измеренных параметров каждой капли значениями $E_{вр.}$. Это говорит о том, что использование для облегчения расчета кинетической энергии каких бы то ни было упрощающих процедур может сводить к уровню эмпирических оценок даже расчеты, выполненные на основе реальных измерений.

В нашем случае это дало как минимум двукратное занижение абсолютных значений ключевого параметра, определяющего эрозионную активность осадков. Расчеты кинетической энергии на основе дисдрометрических данных не всегда дают большие величины по сравнению с модельными расчетами на основе эмпирических зависимостей E от I . Например, в исследовании [33] расчеты по соотношениям E и I постоянно давали завышенные результаты, так как эти соотношения во многом определяются тем, в каком регионе и по каким методикам калибровались их параметры. Кроме того, важно, насколько точны показания применяемого в работе дисдрометра, что должно проверяться, как было сказано выше, во время натурных испытаний совместно со стандартными измерителями осадков.

Кинетическая энергия, принесенная ливнем на единицу поверхности почвы при выпадении 1 мм осадков, представлена на рис. 4. Для лучшего понимания механизма формирования данной величины также приведены число капель, зарегистрированных прибором при накоплении соответствующего количества осадков, и длительность интервала времени Δt , в течение которого это накопление произошло.

Видно, что значения $E_{мм}$ гораздо менее изменчивы, чем $E_{вр.}$. Изменения в основном определяются текущим характером осадков. Например, сравнивая накопление 2-го и 3-го мм осадков, можно заметить, что при меньшем времени накопления 2-го мм, что говорит о более высокой интенсивности ливня, 3-й мм был накоплен с участием меньшего количества капель. Это значит, что капли были в среднем крупнее частиц, сформировавших 2-й мм. На графике $E_{мм}$ видно, что небольшой сдвиг DSD в сторону увеличения привел к заметному росту энергии, принесенной на подстилающую поверхность 3-м мм ливня.

Аналогично, при сравнении числа капель, сформировавших 6-й и 7-й мм, мы приходим к выводу, что при переходе от 6-го к 7-му мм произошло уменьшение среднего размера частиц, приведшее к ожидаемому снижению $E_{мм}$, несмотря на то что изменение Δt указывает на повышение интенсивности в несколько раз. Иными словами, зависимость энергетических характеристик осадков от определяющих их параметров имеет достаточно сложную форму и требует дальнейшего всестороннего изучения.

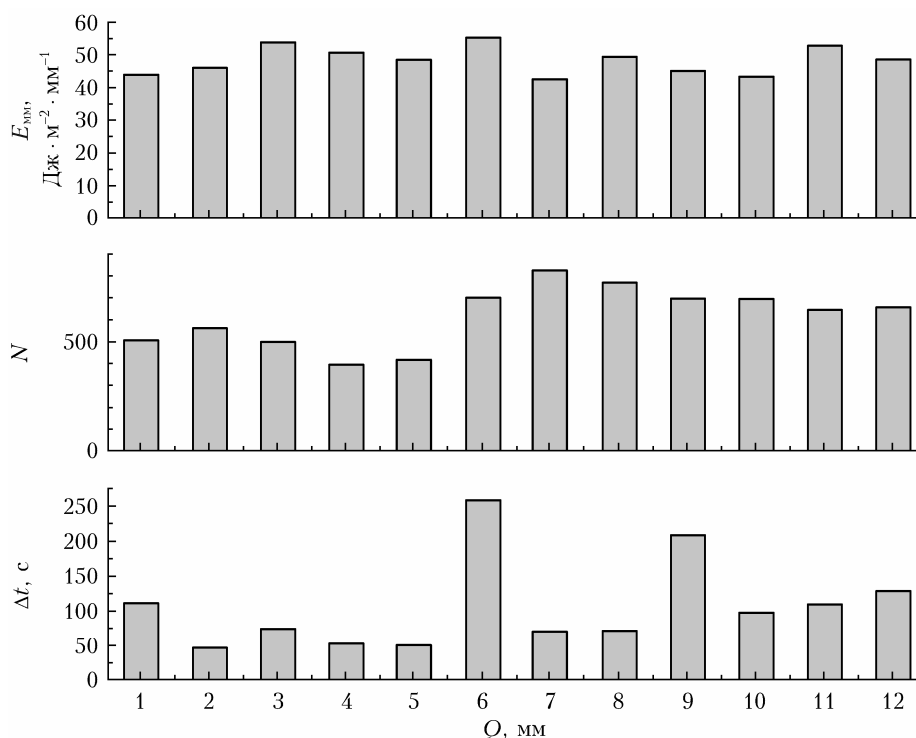


Рис. 4. Динамика изменений рассчитанных значений $E_{мм}$ и некоторых дополнительных параметров ливня по данным ОПТИОС 22.06.2023 г.

Заключение

В настоящей работе обоснована перспективность применения оптического осадкомера ОПТИОС в качестве основного инструментального средства при решении любых задач, связанных с количественным определением энергетических потоков, переносимых при выпадении жидких атмосферных осадков.

На примере измерения в натурных условиях интегральных и микроструктурных характеристик сильного ливня и расчета на их основе ряда энергетических параметров осуществлена апробация разработанной методики определения кинетической энергии гидрометеоров на основе измерительных данных оптического осадкомера, показаны недостатки использования в расчетах упрощенных методик, проведен анализ влияния различных параметров осадков на результаты расчетов. Продемонстрированы технические и вычислительные возможности, а также общий потенциал прибора ОПТИОС в решении данного класса задач как на теоретическом, так и на практическом уровнях.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИМКЭС СО РАН.

Список литературы

1. Jose J., Gires A., Tchiguirinskaia I., Roustan Y., Schertzer D. Scale invariant relationship between rainfall kinetic energy and intensity in Paris region: An evaluation using universal multifractal framework // J. Hydrol. 2022. V. 609, N 6. 127715. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127715.
2. Keegan M.H., Nash D.H., Stack M.M. On erosion issues associated with the leading edge of wind turbine blades // J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. V. 46, N 38. P. 383001. DOI: 10.1088/0022-3727/46/38/383001.
3. Herring R., Dyer K., Martin F., Ward C. The increasing importance of leading edge erosion and a review of existing protection solutions // Renew. Sustain. Energy Rev. 2019. V. 115, N 11. P. 109382. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109382.
4. Chang J.-M., Chena H., Jou B.J.-D., Tsou N.-Ch., Lin G.-W. Characteristics of rainfall intensity, duration, and kinetic energy for landslide triggering in Taiwan // Eng. Geol. 2017. V. 231. P. 81–87. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.10.006.
5. Ferro V., Carollo F.G., Serio M.A. Establishing a threshold for rainfall-induced landslides by a kinetic energy–duration relationship // Hydrol. Process. 2020. V. 34, N 16. P. 3571–3581. DOI: 10.1002/hyp.13821.
6. Щенащенко Г.Л. Ливневая эрозия почв и методы борьбы с ней. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 1991. 178 с.
7. Щеглов Д.И., Горбунова Н.С. Эрозия и охрана почв: учеб.-метод. пособие для вузов. Воронеж: Изд.-полиграф. центр Воронеж. гос. ун-та, 2011. 34 с.
8. Angulo-Martinez M., Barros A. Measurement uncertainty in rainfall kinetic energy and intensity relationships for soil erosion studies: An evaluation using PARSIVEL disdrometers in the Southern Appalachian Mountains // Geomorphology. 2015. V. 228. P. 28–40. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.07.036.
9. Yin S., Nearing M.A., Borrelli P., Xue X. Rainfall erosivity: An overview of methodologies and applications // Vadose Zone J. 2017. V. 16, N 12. P. 1–16. DOI: 10.2136/vzj2017.06.0131.
10. Angel J.R., Palecki M.A., Hollinger S.E. Storm precipitation in the United States. Part II: Soil erosion characteristics // J. Appl. Meteorol. 2005. V. 44, N 6. P. 947–959. DOI: 10.1175/JAM2242.1.
11. Luo L., Wang L., Huo T., Chen M., Ma J., Li S., Wu J. Raindrop size distribution and rain characteristics of the 2017 Great Hunan Flood observed with a Parsivel² disdrometer // Atmosphere. 2021. V. 12, N 12. P. 1556. DOI: 10.3390/atmos12121556.
12. Torres D.S., Salles C., Creutin J.D., Delrieu G. Quantification of soil detachment by raindrop impact: Performance of classical formulae of kinetic energy in Mediterranean storms // Proc. of the Oslo Symposium "Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins", Oslo, August, 1992. IAHS Publ. 1992. N 210. P. 115–124.
13. Lim Y.S., Kim J.K., Kim J.W., Park B.I., Kim M.S. Analysis of the relationship between the kinetic energy and intensity of rainfall in Daejeon, Korea // Quatern. Int. 2015. V. 384. P. 107–117. DOI: 10.1016/j.quaint.2015.03.021.
14. Kinnell P.I.A. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: A review // Hydrol. Process. 2005. V. 19, N 14. P. 2815–2844. DOI: 10.1002/hyp.5788.
15. Johannsen L.L., Zambon N., Strauss P., Dostal T., Neumann M., Zumb D., Cochrane T.A., Bloschl G., Klik A. Comparison of three types of laser optical disdrometers under natural rainfall conditions // Hydrolog. Sci. J. 2020. V. 65, N 4. P. 524–535. DOI: 10.1080/02626667.2019.1709641.
16. Catari G., Latron J., Gallart F. Assessing the sources of uncertainty associated with the calculation of rainfall kinetic energy and erosivity – application to the Upper Llobregat Basin, NE Spain // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2011. V. 15, N 3. P. 679–688. DOI: 10.5194/hess-15-679-2011.
17. Meshesha D.T., Tsunekawa A., Tsubo M., Haregeweyn N., Adgo E. Drop size distribution and kinetic energy load of rainfall events in the highlands of the Central Rift Valley, Ethiopia // Hydrol. Sci. J. 2014. V. 59, N 12. P. 2203–2215. DOI: 10.1080/02626667.2013.865030.
18. Nyssen J., Vandenreyken H., Poesen J., Moeyersons J., Deckers J., Haile M., Salles C., Govers G. Rainfall erosivity and variability in the Northern Ethiopian Highlands // J. Hydrol. 2005. V. 311, N 1–4. P. 172–187. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.12.016.
19. Jayawardena A.W., Rezaur R.B. Drop size distribution and kinetic energy load of rainstorms in Hong Kong // Hydrol. Process. 2000. V. 14, N 6. P. 1069–1082.
20. Assouline S. Drop size distributions and kinetic energy rates in variable intensity rainfall // Water Resour. Res. 2009. V. 45, N 11. P. W11501. DOI: 10.1029/2009WR007927.
21. Ramon R., Minella J.P.G., Merten G.H., Barros C.A.P., Canale T. Kinetic energy estimation by rainfall intensity and its usefulness in predicting hydrosedimentological variables in a small rural catchment in southern Brazil // Catena. 2017. V. 148, part 2. P. 176–184. DOI: 10.1016/j.catena.2016.07.015.
22. Fornis R.L., Vermeulen H.R., Nieuwenhuis J.D. Kinetic energy–rainfall intensity relationship for Central Cebu, Philippines for soil erosion studies // J. Hydrol. 2005. V. 300, N 1–4. P. 20–32. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.04.027.
23. Mikos M., Jost D., Petkovsek G. Rainfall and runoff erosivity in the alpine climate of north Slovenia:

- A comparison of different estimation methods // *Hydrolog. Sci. J.* 2006. V. 51, N 1. P. 115–126. DOI: 10.1623/hysj.51.1.115.
24. Lobo G.P., Bonilla C.A. Sensitivity analysis of kinetic energy-intensity relationships and maximum rainfall intensities on rainfall erosivity using a long-term precipitation dataset // *J. Hydrol.* 2015. V. 527, N 8. P. 788–793. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.05.045.
 25. Sanchez-Moreno J.F., Mannaerts C.M., Jetten V., Lofler-Mang M. Rainfall kinetic energy–intensity and rainfall momentum–intensity relationships for Cape Verde // *J. Hydrol.* 2012. V. 454–455. P. 131–140. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.06.007.
 26. Salles Ch., Poesen J., Torres D.S. Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity // *J. Hydrol.* 2002. V. 257, N 1–4. P. 256–270. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00555-8.
 27. Wischmeier W.H., Smith D.D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. Handbook 537. US Department of Agriculture, Washington DC, 1978. 60 p.
 28. Van Dijk A., Bruijnzeel L.A., Rosewell C.J. Rainfall intensity-kinetic energy relationships: A critical literature appraisal // *J. Hydrol.* 2002. V. 261, N 1–4. P. 1–23. DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00020-3.
 29. Комарова Л.Ф., Кормина Л.А. Инженерные методы защиты окружающей среды. Техника защиты атмосферы и гидросферы от промышленных загрязнений: учеб. пособие. Барнаул: Алтай, 2000. 395 с.
 30. Carollo F.G., Serio M.A., Ferro V., Cerda A. Characterizing rainfall erosivity by kinetic power – median volume diameter relationship // *Catena*. 2018. V. 165. P. 12–21. DOI: 10.1016/j.catena.2018.01.024.
 31. Angulo-Martinez M., Begueria S., Latorre B., Fernandez-Raga M. Comparison of precipitation measurements by OTT Parsivel² and Thies LPM optical disdrometers // *Hydrol. Earth Syst. Sc.* 2018. V. 22, N 5. P. 2811–2837. DOI: 10.5194/hess-22-2811-2018.
 32. Kruger A., Krajewski W.F. Two-dimensional video disdrometer: A description // *J. Atmos. Ocean. Tech.* 2002. V. 19, N 5. P. 602–617. DOI: 10.1175/1520-0426(2002)019<0602:TDVDAD>2.0.CO;2.
 33. Angulo-Martinez M., Begueria S., Kysely J. Use of disdrometer data to evaluate the relationship of rainfall kinetic energy and intensity (KE-I) // *Sci. Total Environ.* 2016. V. 568. P. 83–94. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.223.
 34. 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 // *Meas. Tech.* 2017. V. 59, N 11. P. 1175–1180. DOI: 10.1007/s11018-017-1111-9.
 35. 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; Kal'chikhin V.V., Kobzev A.A., Tikhomirov A.A., Filatov D.E. Rainfall measurements during summer 2020 with the optical precipitation gauge // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N 3. P. 278–281. DOI: 10.1134/S1024856021030052.

V.V. Kal'chikhin, A.A. Kobzev, A.A. Tikhomirov. Determination of the energy characteristics of rainfall using the optical precipitation gauge.

A brief overview of tasks that require information about the energy characteristics of rains, as well as methods for obtaining this information, is given. A technique is described for determining the kinetic energy transferred by hydrometeors based on the microstructural characteristics of precipitation obtained using the optical precipitation gauge OPTIOS. The methodology usage is illustrated with measurement data of the heavy rainfall that fell in Tomsk on July 22, 2023. The influence of various microstructural parameters on the amount of kinetic energy brought by raindrops to the underlying surface is analyzed. The comparison is made with the values obtained by simplified methods. It is concluded that the capabilities of the optical precipitation gauge allow it to be successfully used in solving tasks that require an accurate assessment of the energy characteristics of rainfall.