

ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

doi: 10.51639/2713-0568_2024_4_1_4
УДК 535.311, 551.508.77, 621.317.79
ГРНТИ 29.31.29, 37.21.03
ВАК 2.2.6, 2.2.8

Возможности лазерного дисдрометра для определения кинетической энергии дождевых осадков

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

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

email: yvk@imces.ru, kaa@imces.ru, *tikhomirov@imces.ru

Рассмотрены методики измерения кинетической энергии (КЭ) интенсивных дождевых осадков, которые наносят ущерб сельскому хозяйству, провоцируют возникновение оползней, а также вызывают эрозию поверхности различных технических средств. Представлена методика определения КЭ на основе измерения микроструктурных характеристик осадков (размеров, количества частиц и скоростей их падения), получаемых с помощью лазерного дисдрометра. Возможности использования методики подтверждены результатами измерения характеристик сильного ливня, прошедшего в Томске летом 2023 г. Проанализировано влияние микроструктурных характеристик капель дождя на величину КЭ, приносимой на подстилающую поверхность. Проведено сравнение результатов определения КЭ с величинами, получаемыми по упрощенным методикам.

Ключевые слова: лазерный дисдрометр, дождевые осадки, кинетическая энергия, микроструктурные характеристики осадков, измерения

Введение

Измерители атмосферных осадков можно разделить на три группы [1]: а) измерители количества (суммы) выпавших осадков, Q (мм) (стандартный осадкомер О-1 [2]); б) измерители интенсивности осадков, I ($\text{мм}\cdot\text{ч}^{-1}$) (пример – измеритель челночного типа – QMR 370 фирмы Vaisala [2]); в) измерители микроструктурных характеристик осадков: вид (дождь, снег, град), форма, эффективный диаметр D (мм) и скорость падения v ($\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$) отдельных частиц [3–6].

В зарубежной литературе измерители последней группы получили наименование дисдрометры (**disdrometer** – **distribution of drop meter**). Высокая точность измерения микроструктурных характеристик осадков обеспечивает возможность на их основе вычислять интегральные характеристики жидких осадков – их интенсивность I и количество Q [4–6].

Измерение микроструктурных характеристик осадков позволяет определять их кинетическую энергию (КЭ). Высокие значения КЭ, приносимой выпадающими жидкими атмосферными осадками, наряду с их интенсивностью и продолжительностью могут спровоцировать возникновение оползней. Преимущество прогнозирования оползневой

опасности на основе контроля потоков энергии состоит в том, что вероятность оползня может возникать до окончания выпадения осадков высокой интенсивности, так как пороговое значение КЭ, передаваемой почве каплями, может быть превышено за интервал времени, меньший, чем продолжительность дождя [7]. Кроме того, интенсивные осадки вызывают эрозию почвы. Понимание механизмов, вызывающих ливневую эрозию почвы, имеет значение для уменьшения ее воздействия на сельское хозяйство и окружающую среду [8], а также для разработки методов устойчивого сохранения и планирования землепользования [9]. При этом решающее значение имеет надежная количественная оценка скорости эрозии и факторов, ее определяющих, к числу которых относится КЭ осадков. Точная оценка КЭ осадков также важна для понимания механизмов и смягчения последствий эрозии передней кромки (leading-edge erosion – LEE) лопастей ветряных электрогенераторов [10]. Эрозионные повреждения ухудшают аэродинамические характеристики лопастей, что приводит к снижению годовой выработки электроэнергии и увеличению времени простоя этих генераторов для ремонта [11]. Хотя на LEE оказывает влияние целый ряд атмосферных явлений, скорость удара капель и общее количество осадков признаются одними из основных внешних факторов эрозии [12]. В настоящей статье представлена апробация методики определения КЭ, приносимой каплями дождя на подстилающую поверхность, на основе микроструктурных характеристик осадков, которые измеряются с помощью лазерного дисдрометра [4, 5]. Также проведены оценка влияния различных параметров дождей на величину КЭ и сравнение получаемых значений КЭ с величинами, рассчитанными по упрощенным методикам.

1. Расчётные соотношения для вычисления кинетической энергии жидких осадков

КЭ дождя является суммой энергий его отдельных капель. Энергия (E_{ki}), переносимая каждой i -той каплей, вычисляется через её параметры по известной формуле:

$$E_{ki} = m_i v_i^2 / 2 = \pi \rho D_i^3 v_i^2 / 12, \quad (1)$$

где m_i – масса капли; v_i – терминальная скорость, с которой капля падает на подстилающую поверхность; ρ – плотность воды, D_i – эквивалентный диаметр сферической капли. КЭ общего числа капель (N), зарегистрированных за 1 мин, определится как сумма кинетических энергий отдельных капель:

$$E_{вр.} = \sum_i^N E_{ki}. \quad (2)$$

Поскольку микроструктурные характеристики капель, как правило, при обычных измерениях осадков не определяются [2], ранее ориентировались на более доступные параметры дождя. В частности, в ряде работ применялись эмпирические зависимости между КЭ ($E_{вр.}$) осадков и их интенсивностью (I) [10, 13–16]. Следует отметить, что КЭ дождя может быть представлена в двух формах:

- 1) КЭ, приносимая на единицу поверхности почвы при выпадении 1 мм осадков – $E_{мм}$, которая измеряется в Дж·м⁻²·мм⁻¹;
- 2) КЭ, доставляемая каплями на единицу подстилающей поверхности за единицу времени – $E_{вр.}$, измеряемая в Дж·м⁻²·мин⁻¹ [17].

Эти величины связаны друг другом следующим образом:

$$E_{вр.} = k I E_{мм}, \quad (3)$$

где k – константа, зависящая от используемых единиц времени.

Соотношение (3), оценивающее КЭ как функцию интенсивности дождя I , наиболее часто

используемое из-за его простоты, было предложено в [18]. Согласно этому соотношению, КЭ (в Дж·м⁻²) дождя интенсивностью I (в мм·ч⁻¹), падающего на единицу поверхности за временной интервал Δt (в ч), равна

$$E_I = (11,9 + 8,73 \lg I) I \Delta t. \quad (4)$$

Если предположить, что интервал Δt равен 1 мин, то, разделив значение, получаемое по формуле (3), на 60, получим $E_{вр.}$ в Дж·м⁻²·мин⁻¹:

$$E_{вр.} = E_I / 60. \quad (5)$$

В [17, 19] представлен обзор ряда эмпирических соотношений, связывающих КЭ и I . Обнаружено, что результаты расчётов КЭ, проведённых по формулам, предложенным различными авторами, значительно расходятся. Возможными причинами этого являются методологические различия в процедурах измерения I и последующих расчётах, использование данных, которые охватывают лишь небольшой диапазон интенсивности осадков, а также различия между географическими местоположениями или погодными системами регионов, в которых производился подбор параметров для конкретных эмпирических соотношений.

Существует ряд методик вычисления КЭ осадков на основе эмпирических выражений, связывающих интенсивность дождя со статистическими характеристиками распределения капель по размеру (Drop Size Distribution – DSD), среди которых выделяются две классические методики [20]. В связи с развитием в последнее время оптических дисдрометров, обеспечивающих автоматическую и непрерывную регистрацию размеров и скоростей падения капель, остановимся на второй методике работы [20], которая использует результаты измерений, получаемые с помощью этих приборов.

Как отмечено выше, дисдрометры измеряют D_i и v_i дождевых капель, по которым можно определить DSD и, соответственно, КЭ. Исходя из этого, в работе [21] сделан вывод о том, что, когда это возможно, КЭ жидких осадков следует не оценивать на основе эмпирических отношений, представляющих КЭ как функцию интенсивности дождя I , а измерять КЭ, используя соотношения (1) и (2) после измерения D_i и v_i отдельных капель.

2. Измерение КЭ с использованием дисдрометра

Разработанный в ИМКЭС СО РАН оптический измеритель характеристик осадков по принципу своей работы является лазерным дисдрометром, так как интегральные характеристики осадков (Q и L) он определяет на основе непосредственного измерения микроструктурных характеристик каждой капли). Работа прибора подробно описана в [4, 5, 22]. 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 приёмником, основным элементом которого является линейная ПЗС-матрица, состоящая из 768 высокочувствительных элементов размером 63×63 мкм, позволяющая регистрировать с частотой около 20 кГц теневые изображения дождевых капель, проходящих через измерительную площадку размером 48 см². Высокая частота обработки сигнала позволяет измерять характеристики даже самых мелких капель, падающих с максимально возможной для них скоростью. Поскольку в состав приёмника входит массив светочувствительных элементов, настроенных не на регистрацию степени освещённости, а на пороговое срабатывание свет–тень, прибор свободен от недостатка других дисдрометров, который связан с эффектами неравномерного распределения мощности лазерного луча [6]. Характеристики нашего лазерного дисдрометра представлены в таблице.

Характеристики лазерного дисдрометра

Характеристики	Значение
Микроструктурные	
Диапазон размеров регистрируемых частиц (D_i), мм	0,5 ... 10
Погрешность измерения размеров частиц, мм	$\pm 0,033(10 + D_i)$
Диапазон оцениваемых скоростей падения гидрометеоров (v_i), м·с ⁻¹	0,2 ... 20
Погрешность измерения скоростей частиц, м·с ⁻¹	$\pm 0,25(1 + v_i)$
Интегральные	
Погрешность измерения суточного количества жидких осадков (Q) в диапазоне от 0 до 500 мм (без учёта пространственных вариаций и погрешности, создаваемой ветром), мм	$\pm 0,1(1 + Q)$
Диапазон измеряемой интенсивности дождя, мм·ч ⁻¹	0 ... 2000
Чувствительность по количеству выпавших осадков, мм	не хуже 0,0001
Общие	
Возможность регистрации снега и града	Есть
Измерительная площадка, см ²	48
Погрешность определения начала и окончания выпадения осадков, с	± 10
Масса, кг	8

Точность измерений, производимых с помощью дисдрометров, в [13, 23] предлагалось оценивать путём сравнения выдаваемой ими величины Q с показателями стандартных измерителей осадков. Лазерный дисдрометр был установлен на метеоплощадке Геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН в непосредственной близости от стандартного осадкомера Третьякова О-1 и челночного измерителя осадков Davis Rain Collector (RC). Результаты многолетних совместных испытаний показали хорошее согласие измерительных данных всех трёх приборов и подтвердили высокую точность измерений интегральных характеристик выпадающих атмосферных осадков, выполняемых с помощью дисдрометра [24].

Оцениваемые величины КЭ осадков на основе измерительных данных дисдрометра определялись нами в трёх вариантах [26]:

1) По соотношению (1) рассчитывалась энергия, приносимая на подстилающую поверхность каждой каплей. Суммированием по всем каплям, зарегистрированным за 1 мин по формуле (2), получалось значение $E_{вр.}$, а суммированием по всем частицам N , зарегистрированным при накоплении количества осадков 1 мм, вычислялась величина $E_{мм.}$

2) С использованием упрощённой процедуры для оценки изменений получаемых значений КЭ, состоящей в применении в формуле (1) средних за минуту значений \bar{D} и \bar{v} , также выдаваемых в составе измерительных данных дисдрометра, с последующим умножением результата вычисления на число зарегистрированных за минуту капель N , вычислялась величина $E_{вр.ср.}$, определяемая как

$$E_{вр.ср.} = \pi \rho N \bar{D}^3 \bar{v}^2 / 12. \quad (6)$$

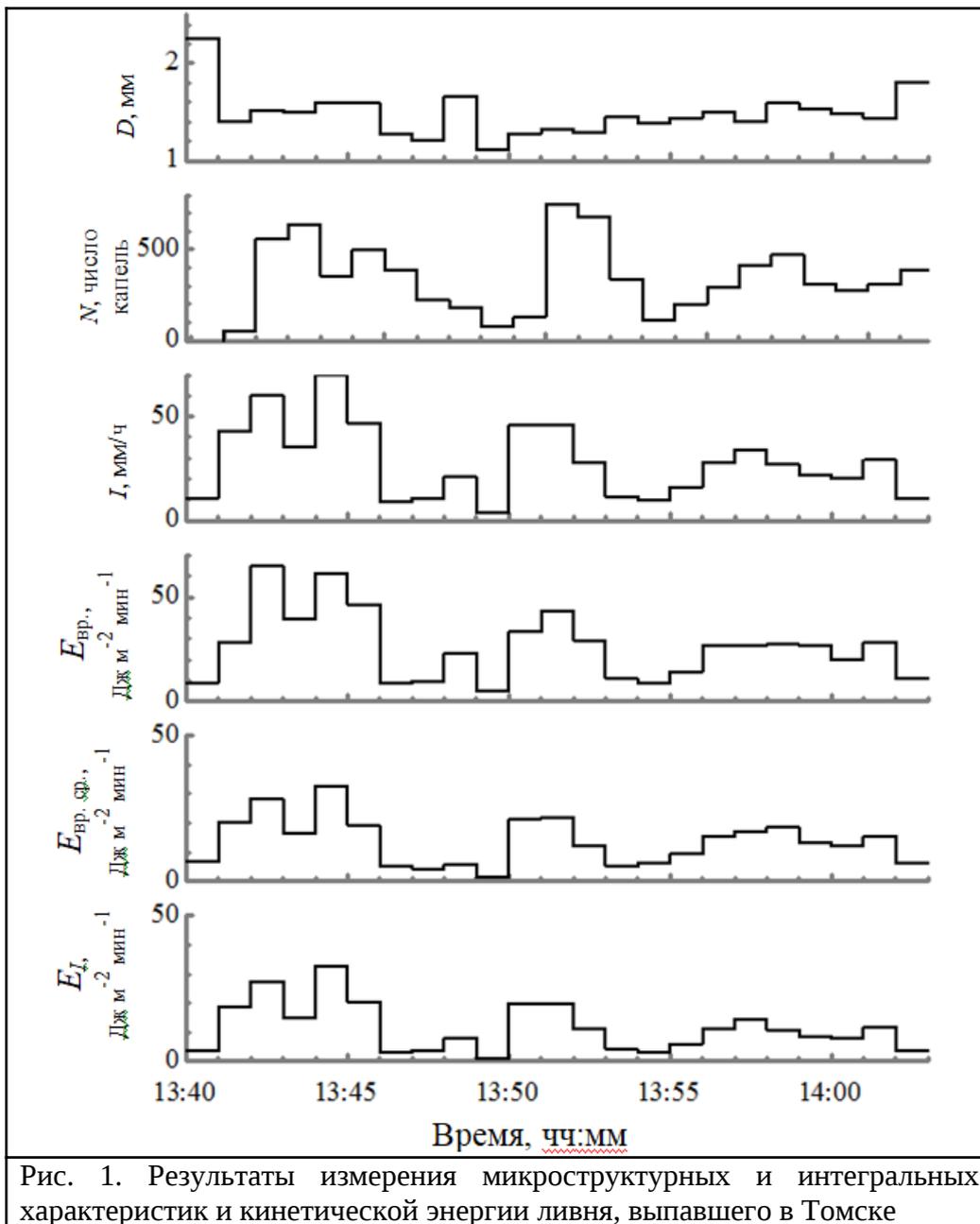
3) Применяемые при расчётах значения I за 1 мин также были измерены с помощью лазерного дисдрометра. При этом была проведена оценка КЭ с использованием эмпирической зависимости от I по формуле (4).

3. Полученные результаты и их обсуждение

Возможности лазерного дисдрометра при измерении характеристик осадков и определении на их основе параметров переносимой при выпадении дождей КЭ демонстрируются на примере ливня, прошедшего в Томске 22 июня 2023 года с 13 ч 41 мин до 14 ч 04 мин и сопровождавшегося грозовыми явлениями. За это время общее количество выпавших осадков Q , зафиксированных дисдрометром, РС и О-1, составило 12,96, 12,10 и 11,00 мм, соответственно (расхождение по результатам измерений Q не превышает 10 %). Пиковое значение I по данным ОПТИОС и РС доходило до $90 \text{ мм}\cdot\text{ч}^{-1}$. В [18] ливневый дождь с общим количеством осадков не менее 0,5 дюйма (12,7 мм) или с максимальной 15-минутной интенсивностью, превышающей 1 дюйм $\cdot\text{ч}^{-1}$ ($25,4 \text{ мм}\cdot\text{ч}^{-1}$), определяется в качестве эрозионного шторма. В анализируемом нами ливне средняя интенсивность составила $33,5 \text{ мм}\cdot\text{ч}^{-1}$, а максимальная 15-минутная – $37,3 \text{ мм}\cdot\text{ч}^{-1}$. Следовательно, выбор данного метеоявления в качестве объекта исследования с точки зрения эрозионной активности осадков, определяемой по их КЭ, представляется обоснованным.

На рис. 1 для всего периода выпадения ливня показаны рассчитанные для 1-минутных интервалов величины следующих параметров (сверху-вниз): среднего диаметра D , количества капель N , интенсивности I , и значений КЭ, рассчитанных по соотношениям (2), (6) и (4). На графике, отражающем изменение среднего диаметра выпавших за минуту капель, хорошо заметен эффект так называемой сортировки капель, вызванной тенденцией более крупных капель двигаться быстрее более мелких [19]. Это приводит к тому, что в начале ливневого дождя относительно небольшое количество крупных капель опережают большинство капель обычного размера, а затем, по мере развития явления, средний размер капель уменьшается. В [25] 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 наилучшая корреляция изменений КЭ с изменениями интенсивности, которые, в свою очередь, гораздо лучше коррелируют с изменениями N , чем D . Например, если сравнивать величины, измеренные за 1 минуту в 13 ч 49 мин, с измеренными в 13 ч 51 мин, видно, что в первом случае значения N , I и, соответственно, $E_{\text{вр}}$, существенно меньше полученных во втором, тогда как с диаметром D всё наоборот.

При сравнении КЭ, вычисленных по различным методикам: $E_{\text{вр}}$, $E_{\text{вр.ср}}$ и E_I (три нижних графика на рис. 1), видно, что корреляция изменений КЭ в продолжение всего ливня для всех трёх зависимостей вполне удовлетворительная.



Следует отметить, что значения E_I , полученные по соотношению (4) гораздо лучше согласуются как по ходу изменений, так и по абсолютным величинам с рассчитанными по упрощённой методике $E_{вр.ср.}$, чем с полученными из непосредственно измеренных параметров каждой капли значениями $E_{вр.}$. Это говорит о том, что использование для расчёта КЭ каких бы то ни было упрощающих процедур может сводить к уровню эмпирических оценок даже расчёты, выполненные на основе реальных измерений микроструктурных характеристик каждой капли. В нашем случае это дало практически двукратное занижение абсолютных значений $E_{вр.ср.}$ и E_I , определяющих эрозионную активность осадков. Следует отметить, что расчёты КЭ на основе дисдрометрических данных не всегда дают большие значения по сравнению с модельными расчётами на основе эмпирических зависимостей E от I . Например, в [21] расчёты по соотношению (4) постоянно давали завышенные результаты, так как это соотношение во многом определяется тем, в каком регионе и по каким методикам калибровались параметры

дисдрометров. Кроме того, важно, насколько точны показания используемого в работе дисдрометра, что должно проверяться, как было отмечено выше, во время натурных испытаний совместно со стандартными измерителями осадков.

Рассчитанные значения КЭ, принесённые исследуемым ливнем на единицу поверхности почвы ($E_{\text{мм}}$) при выпадении 1 мм осадков Q , представлены на рис. 2. Там же показано количество капель N , зарегистрированных дисдрометром при накоплении соответствующего миллиметра Q , и длительность интервала времени Δt , в течение которого это накопление произошло.

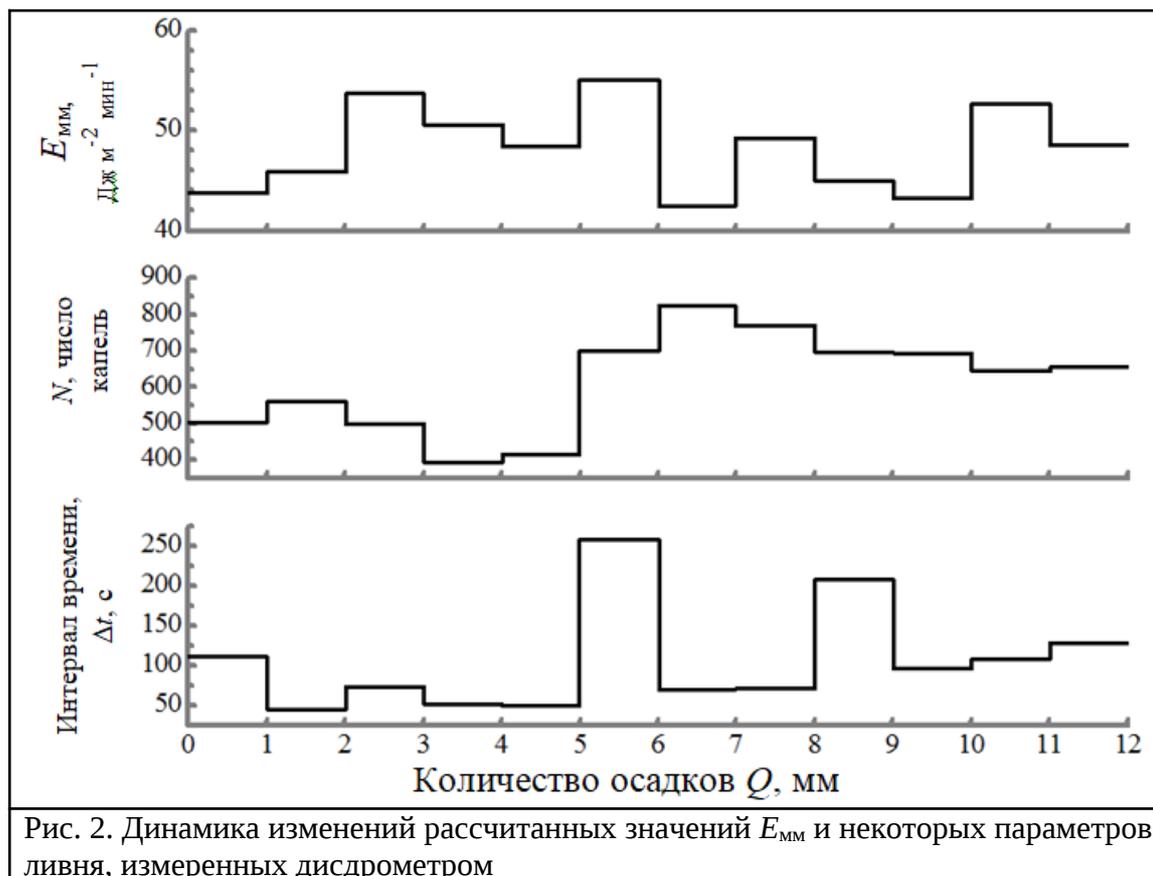


Рис. 2. Динамика изменений рассчитанных значений $E_{\text{мм}}$ и некоторых параметров ливня, измеренных дисдрометром

Из представленных на рис. 2 результатов видно, что значения $E_{\text{мм}}$ обладают гораздо меньшей изменчивостью, чем $E_{\text{вр}}$. (см. рис 1). Изменения, в основном, определяются текущим характером осадков. Например, сравнивая накопление 2-го и 3-го миллиметра Q , можно заметить, что при меньшем времени накопления 2-го миллиметра Q , (что говорит о более высокой интенсивности ливня в этот период), 3-й миллиметр был накоплен с участием меньшего количества капель. Это значит, что капли были в среднем крупнее частиц, сформировавших 2-й миллиметр Q . На графике $E_{\text{мм}}$ видно, что этот небольшой сдвиг микроструктурных характеристик в сторону увеличения привёл к заметному увеличению КЭ, принесённой на подстилающую поверхность 3-м миллиметром ливня.

Аналогично, при сравнении числа капель, сформировавших 6-й и 7-й миллиметры Q , можно прийти к выводу, что при переходе от 6-го к 7-му миллиметрам Q происходило смещение среднего размера частиц в сторону уменьшения, приведшее к ожидаемому снижению величины $E_{\text{мм}}$, несмотря на то, что уменьшение временного интервала Δt (для 7-го миллиметра) указывает на повышение интенсивности I в несколько раз. Таким образом, зависимость энергетических характеристик осадков от определяющих их

параметров достаточно сложна и должна стать предметом будущих исследований микроструктурных характеристик жидких осадков с применением дисдрометрических измерений.

Заключение

В выполненной работе представлен ряд существующих методик оценки кинетической энергии интенсивных дождевых осадков. Показана перспективность применения лазерного дисдрометра при решении задач, связанных с количественным определением энергетических характеристик жидких атмосферных осадков. При измерениях в натуральных условиях микроструктурных и интегральных характеристик сильного ливня и расчета на их основе ряда энергетических параметров продемонстрированы технические и вычислительные возможности прибора и использованных расчетных методик. На теоретическом и практическом уровнях оценён общий потенциал лазерного дисдрометра в решении данного класса 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.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН (проект FWRG-2021-0006).

Список литературы

1. Кальчихин В. В., Кобзев А. А., Корольков В. А., Тихомиров А. А. Приборное обеспечение измерения параметров атмосферных осадков. Современное состояние // Известия высших учебных заведений. Физика. 2009. № 12. С. 92 (деп. в ВИНТИ 16.12.09, № 802-B2009).
2. Восканян К. Л., Кузнецов А. Д., Сероухова О. С. Автоматические метеорологические станции. Ч. 1. Тактико-технические характеристики: учебное пособие, СПб.: РГГМУ, 2016. 170 с.
3. 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.
4. 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. DOI: 10.1134/S1024856014050066.
5. Кальчихин В. В., Кобзев А. А., Корольков В. А., Тихомиров А. А., Филатов Д. Е. Лазерный измеритель интегральных и микроструктурных характеристик атмосферных осадков ОПТИОС // Лазеры. Измерения. Информация. 2021. Т. 1. № 1. С. 23-32.
6. 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, iss. 5. P.2811–2837. DOI: 10.5194/hess-22-2811-2018.
7. 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, iss. 16. P. 3571–3581.

DOI: 10.1002/hyp.13821.

8. 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, No 6. P. 947–959. DOI: 10.1175/JAM2242.1.
9. 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.
10. 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. No 6. 127715. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127715.
11. 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, No 38. P. 383001. DOI: 10.1088/0022-3727/46/38/383001.
12. 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, No 11. P. 109382. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109382.
13. 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, iss. 1–4. P. 20–32. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.04.027.
14. 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, iss. 1. P. 115–126. DOI: 10.1623/hysj.51.1.115.
15. 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, No 8. P. 788–793. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.05.045.
16. Sanchez-Moreno J. F., Mannaerts C. M., Jetten V., Loffler-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.
17. Salles Ch., Poesen J., Torres D. S. Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity // *J. Hydrol.* 2002. V. 257, iss. 1–4. P. 256–270. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00555-8.
18. Wischmeier W. H., Smith D. D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. US Department of Agriculture Handbook, No 537, Washington DC, 1978. 60 p.
19. van Dijk A., Bruijnzeel L. A., Rosewell C. J. Rainfall intensity-kinetic energy relationships: A critical literature appraisal // *J. Hydrology.* 2002. V. 261, iss. 1–4. P. 1–23. DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00020-3.
20. 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: Proceedings of the Oslo Symposium // *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins.* Oslo, August, 1992. IAHS Publ. no. 210, 1992. P. 115–124.
21. 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.
22. 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, No 11. P. 1175–1180. DOI 10.1007/s11018-017-1111-9.

23. Johannsen L. L., Zambon N., Strauss P., Dostal T., Neumann M., Zurn 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, No 4. P. 524–535. DOI: 10.1080/02626667.2019.1709641.
24. Kalchikhin V. V., Kobzev A. A., Tikhomirov A. A., Filatov D. E. Rainfall Measurements during Summer 2020 with the Optical Precipitation Gage // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, No 3. P. 278–281. DOI: 10.1134/S1024856021030052.
25. 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, iss. 1–4. P. 172–187. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.12.016.
26. Кальчихин В. В., Кобзев А. А., Тихомиров А. А. Определение энергетических характеристик дождевых осадков с помощью оптического осадкомера // *Оптика атмосферы и океана.* 2024. Т. 37. № 3. С. 262–269. DOI: 10.15372/AOO20240310.

The laser disdrometer capabilities for determining the kinetic energy of rainfall

Kalchikhin V. V., Kobzev A. A., *Tikhomirov A. A.

Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

10/3, Akademicheskoy Avenue, Tomsk, 634055, Russia

email: vyk@imces.ru, kaa@imces.ru, *tikhomirov@imces.ru

The methods of measuring the kinetic energy (KE) of intense rainfall, which damage agriculture, provoke landslides, and also cause erosion of the surface of various technical devices, are considered. The method for determining the KE based on measuring the microstructural characteristics of rainfall (size, number of particles and their falling velocities) were obtained using the laser disdrometer is presented. The possibilities of method used are justified by the results of measuring the characteristics of a heavy shower at Tomsk in the summer of 2023. The influence of the microstructural characteristics of raindrops on the amount of KE brought to the underlying surface is analyzed. The results of the KE determination are compared with the values obtained using simplified methods.

Keywords: laser disdrometer, rainfall, kinetic energy, microstructural characteristics of precipitation, measurements

Funding

The work was carried out within the framework of the state task of IMCES SB RAS (project FWRG-2021-0006).

References

1. 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)].
2. Voskanyan K. L., Kuznetsov A. D., Serouhova O. S. Automatic weather stations. Part 1: Performance characteristics. Tutorial. — St. Petersburg, RSHU Publishers, 2016. 170 p. (in Russian).
3. Schönhuber M., Lammer G., Radeu 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.

4. 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. DOI: 10.1134/S1024856014050066.

5. Kalchikhin V. V., Kobzev A. A., Korolkov V. A., Tikhomirov A. A., Filatov D. E. Laser Meter for Integral and Microstructural Characteristics of Atmospheric Precipitation OPTIOS // Lasers. Measurements. Information. 2021. V. 1. No 1. p. 23–32. (in Russian).

6. 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, iss. 5. p. 2811–2837. DOI: 10.5194/hess-22-2811-2018.

7. 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, iss. 16. p. 3571–3581. DOI: 10.1002/hyp.13821.

8. 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, No 6. p. 947–959. DOI: 10.1175/JAM2242.1.

9. 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.

10. 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. No 6. 127715. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127715.

11. 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, No 38. P. 383001. DOI: 10.1088/0022-3727/46/38/383001.

12. 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, No 11. p. 109382. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109382.

13. 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, iss. 1–4. p. 20–32. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.04.027.

14. 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, iss. 1. p. 115–126. DOI: 10.1623/hysj.51.1.115.

15. 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, No 8. p. 788–793. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.05.045.

16. Sanchez-Moreno J. F., Mannaerts C. M., Jetten V., Loffler-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.

17. Salles Ch., Poesen J., Torres D. S. Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity // J. Hydrol. 2002. V. 257, iss. 1–4. p. 256–270. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00555-8.

18. Wischmeier W. H., Smith D. D. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. US Department of Agriculture Handbook, No 537, Washington DC, 1978. 60 p.

19. van Dijk A., Bruijnzeel L. A., Rosewell C. J. Rainfall intensity-kinetic energy relationships:

- A critical literature appraisal // *J. Hydrology*. 2002. V. 261, iss. 1–4. p. 1–23. DOI: 10.1016/S0022-1694(02)00020-3.
20. 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: Proceedings of the Oslo Symposium // *Erosion and Sediment Transport Monitoring Programmes in River Basins*. Oslo, August, 1992. IAHS Publ. no. 210, 1992. p. 115–124.
21. 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.
22. 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, No 11. p. 1175–1180. DOI 10.1007/s11018-017-1111-9.
23. Johannsen L. L., Zambon N., Strauss P., Dostal T., Neumann M., Zumr D., Cochrane T. A., Blöschl G., Klik A. Comparison of three types of laser optical disdrometers under natural rainfall conditions // *Hydrolog. Sci. J.* 2020. V. 65, No 4. p. 524–535. DOI: 10.1080/02626667.2019.1709641.
24. Kalchikhin V. V., Kobzev A. A., Tikhomirov A. A., Filatov D. E. Rainfall Measurements during Summer 2020 with the Optical Precipitation Gage // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, No 3. p. 278–281. DOI: 10.1134/S1024856021030052.
25. 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, iss. 1–4. p. 172–187. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.12.016.
26. Kalchikhin V. V., Kobzev A. A., Tikhomirov A. A. Determination of the energy characteristics of rainfall using the optical precipitation gauge // *Opt. Atm. Okeana.* 2024. V. 37. No 3. P. 262–269. DOI: 10.15372/AOO20240310.