

ОПТИКА И ФИЗИКА СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД

УДК 551.511.63: 551.508.55; 551.508.77

Экспериментальная оценка воздействия кратковременных ливневых осадков на характеристики турбулентности в приземной атмосфере

А.Я. Богушевич✉, В.В. Кальчихин, А.А. Кобзев,
А.Е. Тельминов, А.А. Тихомиров*

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

Поступила в редакцию 20.01.2025;
после доработки 21.02.2025;
принята к печати 06.03.2025

Атмосферная турбулентность относится к числу наиболее значимых факторов, влияющих на распространение волн различной природы и работу приборов на основе их использования. Представлены результаты экспериментальных исследований воздействия кратковременных ливневых осадков на последующие изменения метеорологического и турбулентного состояний приземного слоя атмосферы на основе обработанных синхронных данных акустических и оптических измерений атмосферных параметров. Выполнена оценка влияния выпадения интенсивных осадков на основные турбулентные характеристики приземной атмосферы, такие как энергия температурных и ветровых флуктуаций, вертикальные потоки тепла и импульса. Показано, что ливневые осадки в значительной степени изменяют эти характеристики. Полученные результаты могут быть использованы при интерпретации данных измерений оптических и акустических приборов, применяемых для исследований атмосфер.

Ключевые слова: ливневые осадки, интенсивность осадков, ультразвуковая метеостанция, оптический измеритель осадков, турбулентные характеристики, приземный слой атмосферы; shower precipitation, rainfall intensity, ultrasonic weather station, optical rain gauge, turbulent characteristics, atmospheric ground layer.

Введение

Случайные изменения показателя преломления воздуха, обусловленные атмосферной турбулентностью [1–5], оказывают сильное, чаще негативное, влияние на распространение различных волн (акустических, оптических или радиоволн) в атмосфере [6, 7]. Атмосферная турбулентность существенно ограничивает возможность технических средств, использующих волны разного типа для обеспечения удаленной связи и навигации, дистанционного мониторинга и локации, астрономических наблюдений и решения других подобных задач [6–9]. Также информация о турбулентных потоках тепла и импульса необходима для математического моделирования климата и численного прогноза погоды [10–12]. Величины этих потоков определяют термодинамическую устойчивость приземного и пограничного слоев атмосферы [5], от которой в значительной

степени зависят осадки и перенос загрязняющих веществ в атмосфере.

Несмотря на значительные успехи в изучении атмосферной турбулентности, достигнутые еще в прошлом веке (см., например, [1–6]), ее теоретические и экспериментальные исследования активно продолжаются. Существует множество внешних факторов, таких как горный рельеф местности [9, 13–15], городская застройка [16–20], неоднородность подстилающей поверхности и границы ее раздела (суша–вода, поле–лес и т.п.) [21–25], значительная изменчивость солнечной радиации и наблюдаемых ветров [26, 27], атмосферных осадков [28–30] и др., которые приводят в атмосфере к турбулентности, характеристики которой не полностью описываются классической теорией. Например, подобные факторы часто нарушают условия стационарности и горизонтальной однородности полей метеорологических величин в приземной атмосфере, что ограничивает применимость популярной теории подобия Монина–Обухова [31].

Цель настоящей работы — экспериментальная оценка влияния кратковременных ливневых осадков на турбулентные характеристики приземной атмосферы.

* Александр Яковлевич Богушевич (bay@imces.ru); Владимир Викторович Кальчихин (vvk@imces.ru); Алексей Анатольевич Кобзев (kaa@imces.ru); Алексей Евгеньевич Тельминов (talexey@imces.ru); Александр Алексеевич Тихомиров (tikhomirov@imces.ru).

Материалы и методы

Измерительное оборудование

Для экспериментальных исследований мы использовали два прибора, разработанных в ИМКЭС СО РАН. Метеорологические и турбулентные характеристики атмосферы измеряли ультразвуковой метеостанцией АМК-03 [32], занесенной в Государственный реестр средств измерений РФ, а количественные параметры осадков — оптическим осадкомером ОПТИОС [33]. Эти приборы установлены на метеорологической площадке Геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН [34] и работают в круглосуточном режиме. Поскольку на метеорологической площадке имеется несколько метеостанций АМК-03, разнесенных по месту установки и высоте над земной поверхностью, то обрабатывались данные АМК-03, размещенной наиболее близко к ОПТИОС (на удалении около 10 м и высоте 2 м). Обработка данных измерений АМК-03 и ОПТИОС была выполнена за последнюю декаду июня 2023 г., когда на протяжении нескольких суток периодически наблюдались кратковременные осадки.

Используемая АМК-03 обеспечивала акустические измерения мгновенных температуры воздуха T и трех ортогональных компонент вектора скорости ветра V_i ($i = x, y, z$) с частотой 80 Гц с предельным разрешением их турбулентных флуктуаций не хуже 0,01 К (для T) и 0,01 м/с (для V_i). Синхронно с этими данными в АМК-03 также фиксировались показания встроенных датчиков атмосферного давления P и относительной влажности воздуха r . С помощью программного обеспечения [35] мгновенные данные измерений автоматически регистрировались на компьютере, где вычислялись их статистические характеристики, в том числе усредненные значения скорости V и направления D горизонтального ветра, скорости вертикального ветра w , а также T , P и r . Все измеренные и вычисленные параметры записывались в файлы.

Принцип действия осадкомера ОПТИОС основан на методе получения и анализа теневых изображений частиц атмосферных осадков [33]. Суть метода — определение характеристик выпадающих осадков на основании измерения размера тени каждой из капель, проходящих сквозь измерительную площадку под действием силы тяжести. Измерительный канал прибора формируется оптическим генератором плоского коллимированного светового потока, направляемого через оптическую систему на массив светочувствительных элементов (линейный сенсор). Размер сечения теневого изображения капли определяется по количеству затененных светочувствительных элементов известного размера. Высокая скорость считывания линейного сенсора обеспечивает многократное измерение горизонтального сечения каждой капли, что позволяет определить ее эквивалентный диаметр, восстановить форму и оценить скорость падения капель. Получаемые микроструктурные характеристики осадков обеспечивают также вычисление интегральных параметров

ров — текущей интенсивности осадков I (мм/ч) и их суммарного количества Q (мм) с момента начала регистрации. В описываемых экспериментах вычисление величин I и Q производилось с временной дискретностью 1 мин.

Методика обработки данных акустических измерений

При анализе данных АМК-03 предварительно выполнялась их синхронизация со временем регистрации значений интенсивности осадков I , получаемых с помощью ОПТИОС. С этой целью, используя разработанное программное обеспечение (см., например, [36]), загруженные из файла АМК-03 мгновенные значения T , V_i , P и r разбивались по односторонним сегментам, содержащим примерно по 4800 их значений отдельно для каждого из указанных метеорологических параметров. Временные границы этих сегментов данных задавались таким образом, чтобы время измерений последней содержащейся в сегменте величины метеорологического параметра максимально совпадало с моментом регистрации сопоставляемого им значения I .

По односторонним сегментам данных вычислялись средние значения метеорологических параметров ($\langle T \rangle$, $\langle D \rangle$, $\langle w \rangle$, $\langle P \rangle$, $\langle r \rangle$), и формировались четыре массива с временными последовательностями пульсаций: температуры $T' = T - \langle T \rangle$, вертикальной $w' = w - \langle w \rangle$, продольной $u' = u - \langle u \rangle$ и поперечной $v' = v - \langle v \rangle$ компонент вектора ветра V (относительно направления $\langle D \rangle$). Здесь и далее угловые скобки обозначают статистическое усреднение за интервал времени, равный длительности обрабатываемого сегмента данных.

Указанные массивы далее использовались для расчетов суточных изменений характеристик температурной и ветровой турбулентности в приземной атмосфере. Из многочисленных параметров, применяемых для описания атмосферной турбулентности (см. [1]), ниже приводятся только те, которые характеризуют ее энергетические свойства и стратификацию приземного слоя атмосферы. К ним относятся энергия температурных флуктуаций $E_T = \langle (T')^2 \rangle / 2$, энергия ветровых флуктуаций $E_V = \langle [(u')^2 + (v')^2 + (w')^2] \rangle / 2$, вертикальные потоки тепла $H = c_p \cdot \rho \cdot \langle T' \cdot w' \rangle$ и продольной компоненты импульса $\tau = -\rho \cdot \langle u' \cdot w' \rangle$, где ρ — плотность воздуха; c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении.

Вычисленные значения H и τ также использовались для оценки масштаба Монины—Обухова [1, 8]:

$$L_* = -\frac{c_p \cdot \langle T \rangle}{\chi \cdot g \cdot \rho^{1/2}} \cdot \frac{\tau^{3/2}}{H},$$

где $\chi = 0,4$ — постоянная Кармана; $g = 9,81$ м/с² — ускорение свободного падения. Значение и знак L_* позволяли определять термодинамическую устойчивость в приземной атмосфере, или тип стратификации. При неустойчивом ее состоянии $H > 0$ и $L_* < 0$,

а при устойчивом $H < 0$ и $L_* > 0$. Когда H стремится к нулю, то особо выделяют промежуточный тип безразличной (нейтральной) стратификации. В этом случае абсолютное значение L_* может неограниченно возрастать, а знак L_* может быть любым. Обычно считают, что стратификация безразличная, если $|L_*| > 100$ [8].

Результаты и обсуждение

На рис. 1–6 представлены результаты обработки измерений метеорологических параметров, характеристик атмосферной турбулентности и интенсивности выпадающих осадков в течение двух суток (28 и 29 июня 2023 г.). Качественная картина суточных изменений погодных условий для каждого дня была схожей. В обоих сутках наблюдалась преимущественно облачная погода и в ночные часы возникала температурная инверсия. Несмотря на облачность, вследствие значительной в летний период солнечной радиации ночная инверсия с восходом солнца быстро распадалась с переходом к конвективной (неустойчивой) стратификации приземной атмосферы, которая после заката (примерно после 23:00) возвращалась обратно к устойчивой стратификации. Ночной и ранний утренний интервалы времени (с 24:00 до 11:00) на рис. 1–6 не показаны, поскольку в рассматриваемые дни осадки наблюдались только в послеобеденное время.

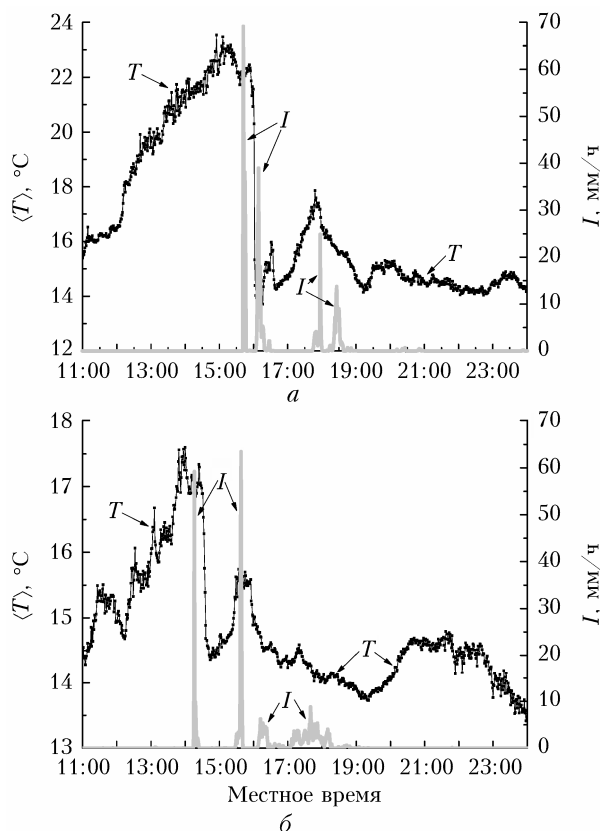


Рис. 1. Усредненная за 1 мин температура воздуха и интенсивность осадков с интервалом измерений в 1 мин: 28 июня 2023 г. (а); 29 июня 2023 г. (б)

Утром 28 июня 2023 г. (рис. 1, а) воздух нагрелся до 23 °С, в 15:45 прошла гроза с двумя кратковременными, порядка 5–10 мин, ливневыми осадками с интервалом между ними ~30 мин. При этом в начале первого ливня с наибольшей интенсивностью $I \approx 70$ мм/ч также наблюдалось выпадение града. За 30 мин до начала ливней произошло слабое понижение температуры $\langle T \rangle$ примерно на 1 °С, связанное с прохождением перед ними холодного воздушного фронта. Во время ливней $\langle T \rangle$ почти не менялась, но после их завершения (с небольшой задержкой во времени) наблюдалось быстрое и значительное ее уменьшение почти на 8 °С. Через час после завершения грозы температура начала вновь подниматься. Однако в период с 17:40 до 19:00 вновь эпизодически выпадали осадки с переменной интенсивностью I от ничтожно малой до умеренной, которые до 19:30 приводили к снижению температуры.

Аналогичное влияние осадков на температуру воздуха можно увидеть и 29 июня 2023 г. (рис. 1, б), когда утреннее прогревание воздуха было заметно слабее. В этот день грозы не было, но в 14:15 и 15:30 наблюдались два очень коротких, ~5 мин, ливневых дождя с $I \approx 60$ мм/ч. Они также после своего окончания приводили к заметному охлаждению воздуха за время, не превышающее 1 ч. Позднее, с 16:00 до 19:00 наблюдались слабые затяжные осадки (аналогично 28 июня 2023 г.).

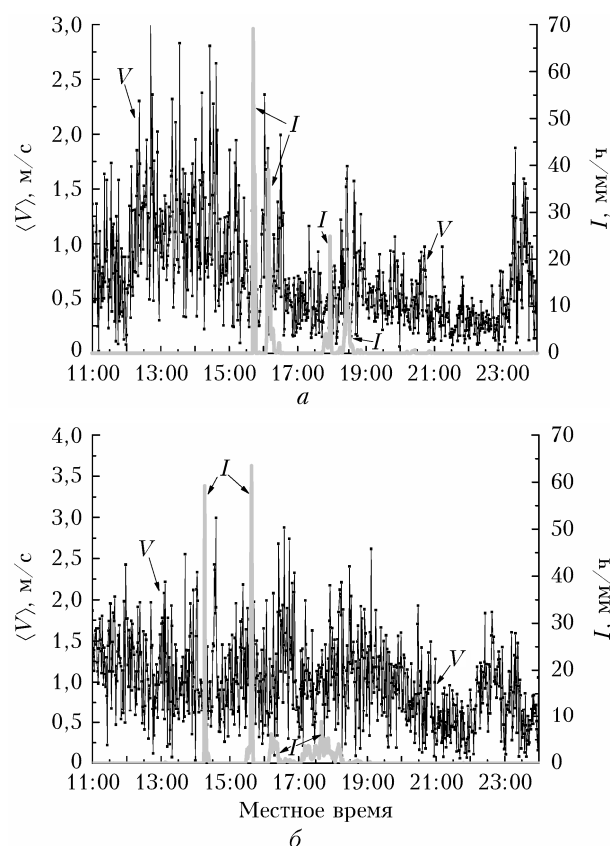


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для скорости горизонтального ветра

Усредненная за 1 мин скорость ветра $\langle V \rangle$ (см. рис. 2), в течение рассматриваемых суток на высоте 2 м была низкой, от 0,5 до 2,5 м/с, и в вечернее время уменьшалась. Наблюдаемые перед выпадением ливневых осадков и в их начале короткие (секундные) порывы ветра почти до 15–17 м/с практически не сказались на вычисленных значениях $\langle V \rangle$.

На рис. 3 показаны суточные изменения энергии температурных флуктуаций E_T . Нетрудно заметить значимую корреляцию этих изменений с вариациями $\langle T \rangle$, происходящими вследствие выпадения дождевых осадков. Наибольшие значения E_T наблюдались в утренние часы, когда нарастала конвективная турбулентность (при неустойчивой стратификации). В этом случае в приземном слое наблюдался максимальный (по абсолютной величине) вертикальный градиент потенциальной температуры $\partial\theta/\partial z$. Дождевые осадки значительно поглощали тепловую энергию воздуха и приводили к более однородному распределению температуры по высоте, что уменьшало значения E_T и $|\partial\theta/\partial z|$. В итоге стратификация в приземном слое атмосферы после выпадения осадков становилась безразличной и в вечернее время сохранялась на длительный период. Возрастание E_T после 23:00 (рис. 3, а) и 22:00 (рис. 3, б) показывает начало образования ночной температурной инверсии (устойчивой стратификации).

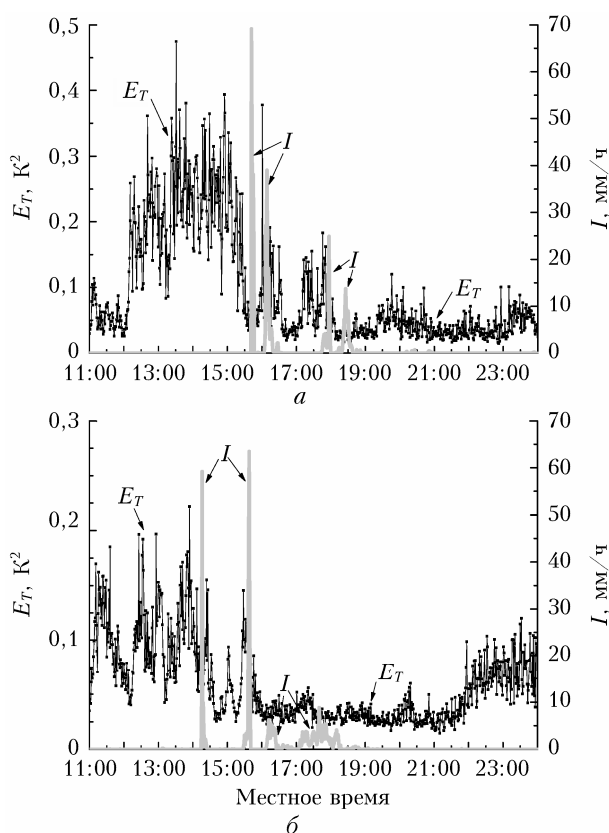


Рис. 3. Энергия температурных флуктуаций и интенсивность осадков с интервалом измерений в 1 мин: 28 июня 2023 г. (а); 29 июня 2023 г. (б)

На рис. 4 отображено изменение энергии ветровых флуктуаций. Поведение E_V до и после выпадения дождевых осадков на качественном уровне оказалось схожим с изменениями E_T , но заметно слабее выраженным. Кроме того, наблюдавшиеся скачки мгновенной скорости ветра перед выпадением ливневых осадков и в их начале обусловили появление отдельных пиков с очень большими значениями E_V . Как и для E_T , минимальные значения E_V наблюдались после выпадения осадков и длительно сохранялись в вечернее время.

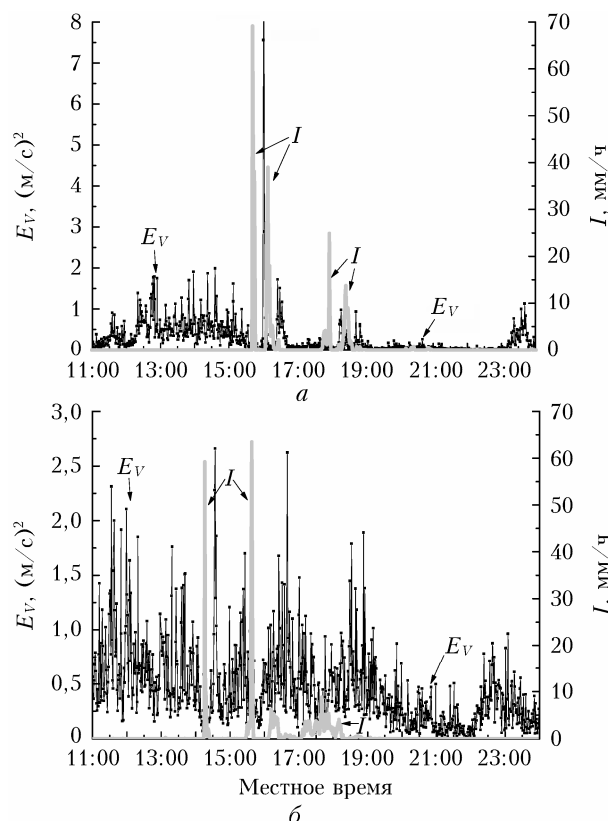


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для энергии ветровых флуктуаций

На рис. 5 приведены вычисленные величины вертикального турбулентного потока тепла. Здесь в утренние часы до выпадения осадков, как и ожидалось для сильно неустойчивой стратификации, получены его максимальные положительные значения. После ливневых осадков абсолютные значения H становились близкими к нулю, что указывает на приближение к безразличной стратификации. На рис. 5 также можно увидеть появление отрицательных значений H около 23:00, непосредственно указывающих на образование температурной инверсии.

На рис. 6 отображены изменения вертикального потока импульса. Поведение τ до и после выпадения дождевых осадков оказалось подобным изменениям H , но заметно более слабым. Скачки мгновенной скорости ветра перед выпадением ливневых осадков и в их начале, так же как для E_V , обусловили появление отдельных пиков с максимальными значениями τ . Минимальные значения τ

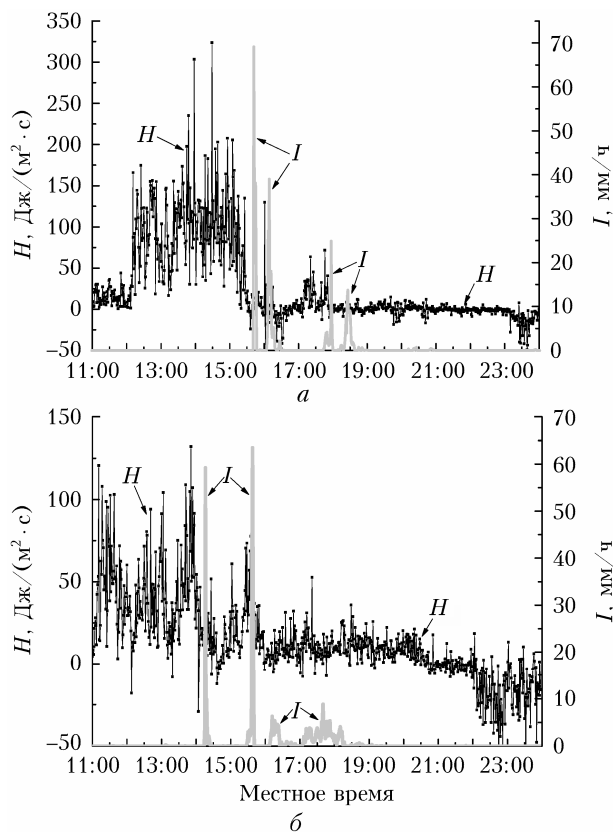


Рис. 5. Вертикальный поток тепла и интенсивность осадков с интервалом измерений в 1 мин: 28 июня 2023 г. (а); 29 июня 2023 г. (б)

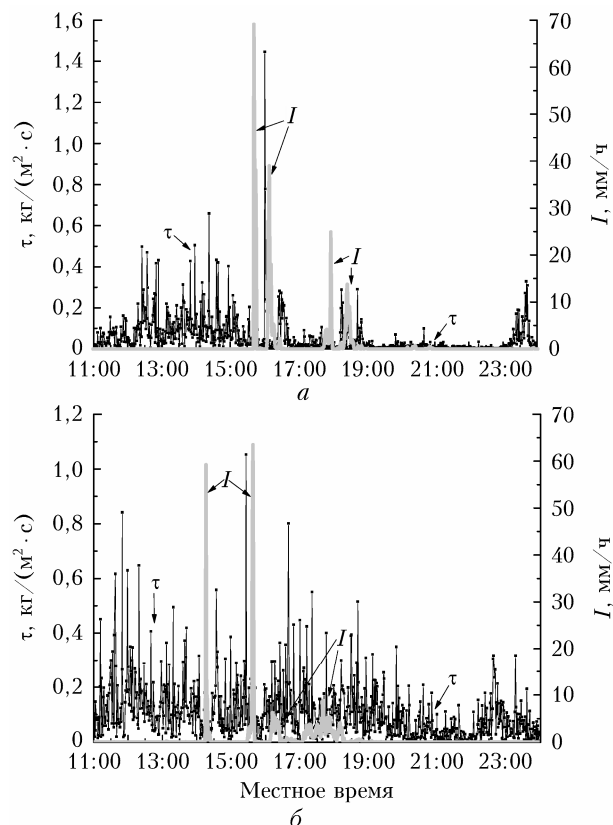


Рис. 6. То же, что и на рис. 5, для вертикального потока импульса

наблюдались в вечернее время до начала образования ночной температурной инверсии.

Заключение

Выпадение кратковременных ливневых осадков в умеренных широтах значительно охлаждает атмосферный воздух и поглощает энергию его температурных флуктуаций E_T . Также охлаждается земная поверхность. Это приводит к разрушению сложившегося до этого вертикального профиля температуры с уменьшением абсолютных значений градиента потенциальной температуры и вертикального потока тепла H . Данные теплообменные процессы имеют инерционность и проявляются с задержкой по времени относительно начала выпадения осадков, уменьшаясь при увеличении их максимальной интенсивности.

Воздействие дождевых осадков на энергию ветровых флуктуаций E_V и вертикальный поток импульса τ подобно воздействию на E_T и H , но проявляется слабее. Дождевые осадки также поглощают энергию ветровых флуктуаций. Однако для них сохраняется первоначальный источник (наличие ветра из-за перепада давления и обтекание движущимся воздухом неоднородностей земной поверхности). Поэтому после выпадения ливневых осадков отношение $|\tau^{3/2}/H|$ в приземном слое заметно нарастает, увеличивая абсолютное значение масштаба Монина—Обухова до величин, соответствующих переходу к безразличной стратификации атмосферы.

Представляет практический интерес установление эмпирических соотношений, описывающих изложенные процессы, а также влияние на них не учитываемых в настоящей работе таких параметров дождевых капель, как их концентрация, геометрические размеры, кинетическая энергия и другие, которые также можно получать из измерений осадкомера ОПТИОС.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке РФФ (грант № 25-27-00376, <https://rscf.ru/project/25-27-00376/>).

Список литературы

1. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Т. 1. М.: Наука, 1967. 696 с.; Т. 2. СПб.: Гидрометеиздат, 1996. 742 с.
2. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
3. Обухов А.М. Турбулентность и динамика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 414 с.
4. Монин А.С. Гидродинамика атмосферы, океана и земных недр. СПб.: Гидрометеиздат, 1999. 524 с.
5. Зилинтиневич С.С. Динамика пограничного слоя атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 292 с.
6. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1967. 548 с.
7. Миронов В.Л. Распространение лазерного пучка в турбулентной атмосфере. Новосибирск: Наука, 1981. 246 с.
8. Атмосфера: Справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 509 с.
9. Носов В.В., Лукин В.П., Ковадло П.Г., Носов Е.В., Торгаев А.В. Оптические свойства турбулентности

- в горном пограничном слое атмосферы. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. 152 с.
10. Володин Е.М., Лыкосов В.Н. Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность — почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 1. Описание и расчеты с использованием локальных данных // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1998. Т. 34, № 4. С. 453–465.
 11. Володин Е.М., Лыкосов В.Н. Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность — почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. 2. Численные эксперименты по воспроизведению климата // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1998. Т. 34, № 5. С. 622–633.
 12. Tolstykh M.A., Shashkin V.V. Vorticity–divergence mass-conserving semi-Lagrangian shallow-water model using the reduced grid on the sphere // J. Comput. Phys. 2012. V. 231, N 11. P. 4205–4233. DOI: 10.1016/j.jcp.2012.02.016.
 13. Носов В.В., Емалеев О.Н., Лукин В.П., Носов Е.В. Полуэмпирические гипотезы теории турбулентности в анизотропном пограничном слое // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 10. С. 845–863.
 14. Носов В.В., Лукин В.П., Ковадло П.Г., Носов Е.В., Торгаев А.В. Переमेжаемость колмогоровской и когерентной турбулентности в горном пограничном слое (обзор) // Оптика атмосфер. и океана. 2021. Т. 34, № 9. С. 726–749. DOI: 10.15372/AOO20210909; Nosov V.V., Lukin V.P., Kovadlo P.G., Nosov E.V., Torgaev A.V. Intermittency of Kolmogorov and coherent turbulence in the mountain atmospheric boundary layer (review) // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35, N 3. P. 266–287. DOI: 10.1134/s1024856022030113.
 15. Shikhovtsev A., Kiselev A., Kovadlo P., Kolobov D., Russkikh I., Tomin V. Turbulent parameters at different heights in the atmosphere. Shack–Hartmann wave-front sensor data // Sol.-Terr. Phys. 2022. V. 8, N 2. P. 20–25. DOI: 10.12737/stp-82202203.
 16. Rotach M.V., Vogt R., Bernhofer C., Batchvarova E., Christen A., Clappier A., Feddersen B., Gryning S.-E., Martucci G., Mayer H., Mitev V., Oke T.R., Parlow E., Richner H., Roth M., Roulet Y.-A., Ruffieux D., Salmond J.A., Schatzmann M., Voogt J.A. BUBBLE — an urban boundary layer meteorology project // Theoretic. Appl. Climatol. 2005. V. 81. P. 231–261. DOI: 10.1007/s00704-004-0117-9.
 17. Glazunov A.V., Stepanenko V.M. Large-eddy simulation of stratified turbulent flows over heterogeneous landscapes // Izv. Atmos. Ocean Phys. 2015. V. 51, N 4. P. 351–361. DOI: 10.1134/S0001433815040027.
 18. Pashkin A.D., Repina I.A., Stepanenko V.M., Bogomolov V.Y., Smirnov S.V., Telminov A.E. An experimental study of atmospheric turbulence characteristics in an urban canyon // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2019. V. 386. P. 012035. DOI: 10.1088/1755-1315/386/1/012035.
 19. Drozd I.D., Repina I.A., Gavrikov A.V., Stepanenko V.M., Artamonov A.Yu., Pashkin A.D., Varentsov A.I. Atmospheric turbulence structure above urban nonhomogeneous surface // Rus. J. Earth Sci. 2022. V. 22, N 5. DOI: 10.2205/2022ES01SI11.
 20. Barskov K., Chechin D., Drozd I., Artamonov A., Pashkin A., Gavrikov A., Varentsov M., Stepanenko V., Repina I. Relationships between second and third moments in the surface layer under different stratification over grassland and urban landscapes // Bound.-Lay. Meteorol. 2023. V. 187, N 1–2. P. 311–338. DOI: 10.1007/s10546-022-00751-4.
 21. Higgins C.W., Pardyjak E., Froidevaux M., Simeonov V., Parlange M.B. Measured and estimated water vapor advection in the atmospheric surface layer // J. Hydrometeorol. 2013. V. 14, N 6. P. 1966–1972. DOI: 10.1175/JHM-D-12-0166.1.
 22. Kenny W.T., Bohrer G., Morin T.H., Vogel C.S., Matheny A.M., Desai A.R. Numerical case study of the implications of secondary circulations to the interpretation of eddy-covariance measurements over small lakes // Bound.-Lay. Meteorol. 2017. V. 165, N 22. P. 311–332. DOI: 10.1007/s10546-017-0268-8.
 23. Баханов В.В., Горячкин Ю.Н., Корчагин Н.Н., Репина И.А. Локальные проявления глубинных процессов на поверхности моря в придном слое атмосферы // Докл. РАН. 2007. Т. 414, № 4. С. 587–591.
 24. Repina I.A., Chukharev A.M., Goryachkin Y.N., Komarova N.Y., Pospelov M.N. Evolution of air–sea interaction parameters during the temperature front passage: The measurements on an oceanographic platform // Atmos. Res. 2009. V. 94, N 1. P. 74–80. DOI: 10.1016/j.atmosres.2008.11.007.
 25. Artamonov A.Yu., Buchnev I.A., Repina I.A., Skirta A.Yu., Smirnov A.S., Tolpygin L.I. Turbulent fluxes of heat and momentum and statistical characteristics of turbulence in the near-surface air in near-shore and deep-water zones of the Black Sea // Oceanology. 2005. V. 45. Suppl. 1. P. S27–S38.
 26. Волков Ю.А., Репина И.А. Влияние структуры подстилающей поверхности в полярных районах на энергообмен атмосферы и океана // Поверхностные и внутренние волны в арктических морях / под ред. И.В. Лавренова, Е.Г. Морозова. СПб.: Гидрометеоздат, 2002. Гл. 11. С. 189–206.
 27. Репина И.А., Смирнов А.С. Обмен теплом и импульсом между атмосферой и льдом по данным наблюдений в районе Земли Франца-Иосифа // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2000. Т. 36, № 5. С. 672–680.
 28. Князев Л.В. Определение микроструктуры и скорости диссипации турбулентности в дождях методом доплеровской радиолокации // Научн. вестн. МГТУ ГА. Сер. Радиофиз. и электроника. 2010. Вып. 158. С. 26–30.
 29. Горелик А.Г., Коломиец С.Ф. Влияние микроструктуры дождя на достоверность и точность определения скорости вертикальных воздушных потоков // Научн. вестн. МГТУ ГА. Сер. Радиофиз. и электроника. 2006. Вып. 136.
 30. Vonnisa M., Shimomai T., Hashiguchi H., Marzuki M. Retrieval of vertical structure of raindrop size distribution from equatorial atmosphere radar and boundary layer radar // Emerging Sci. J. 2022. V. 6. P. 448–459. DOI: 10.28991/ESJ-2022-06-03-02.
 31. Барсков К.В., Глазунов А.В., Репина И.А., Степаненко В.М., Лыкосов В.Н., Маммарелла И. О применимости теории подобия для устойчиво-стратифицированного атмосферного пограничного слоя над поверхностями сложной структуры // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2018. Т. 54, № 5. С. 544–554. DOI: 10.1134/S0002351518050036.
 32. Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Ильичевский В.С., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 // Метеорол. гидрол. 2006. № 11. С. 89–97.
 33. 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.
 34. Тихомиров А.А., Корольков В.А., Смирнов С.В., Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Кураков С.А., Тельминов А.Е., Богомолов В.Ю., Кабанов М.М., Капустин С.Н., Репина И.А.,

Пашкин А.Д., Степаненко В.М. Метеорологические наблюдения и их приборное обеспечение в ИМКЭС СО РАН // Оптика атмосф. и океана. 2022. Т. 35, № 2. С. 122–131. DOI: 10.15372/AOO20220206; Tikhomirov A.A., Korolkov V.A., Smirnov S.V., Azbukin A.A., Bogushevich A.Ya., Kalchikhin V.V., Kobzev A.A., Kurakov S.A., Telminov A.E., Bogomolov V.Yu., Kabanov M.M., Kapustin S.A., Repina I.A., Pashkin A.D., Stepanenko V.M. Meteorological observations and their instrumental support at IMCES SB RAS // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35, N 4. P. 456–466.

35. Ультразвуковая метеостанция, версия 3.0 «МЕТЕО 3.0»): Свид. об офиц. рег. прогн. для ЭВМ. Роспатент. № 2002612038. Заявл. 3.12.2002. Богусевич А.Я.
36. Богусевич А.Я. Кросс-платформенное приложение для исследований атмосферной турбулентности из данных ультразвуковых измерений температуры и компонент скорости ветра // Материалы докл. XXVII Междун. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Москва, июль 2021. Томск: ИОА СО РАН, 2021. С. F15–F18. URL: <https://symp.iao.ru/ru/aoo/27/proceedings> (дата обращения: 13.12.2024).

A.Ya. Bogushevich, V.V. Kalchikhin, A.A. Kobzev, A.E. Telminov, A.A. Tikhomirov. Experimental assessment of the impact of short-term heavy showers on the turbulence characteristics in the ground atmosphere.

Atmospheric turbulence is one of the most significant factors affecting the propagation of waves of various nature and the operation of devices based on their application. The paper presents the results of experimental studies of the impact of short-term heavy rainfall on subsequent changes in the meteorological and turbulent state of the ground atmosphere based on processed synchronous acoustic and optical measurements of atmospheric parameters. An assessment is made of the impact of intense precipitation on the main turbulent characteristics of the surface atmosphere, such as the energy of temperature and wind fluctuations and vertical heat and momentum fluxes. It is shown that heavy rainfall significantly changes these characteristics. The results can be used to interpret optical and acoustic measurements used to study the atmosphere.