

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУШИ С АТМОСФЕРОЙ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

УДК [551.50]/(551.578.1)

ВЛИЯНИЕ МОСКОВСКОГО МЕГАПОЛИСА НА ОСАДКИ ТЕПЛОГО ПЕРИОДА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КРУПНОМАСШТАБНЫХ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЙ¹

© 2023 г. Ю. И. Ярынич^{a, b, c, *}, М. И. Варенцов^{a, c, d}, В. С. Платонов^b,
В. М. Степаненко^{a, b, d}, А. В. Чернокульский^{c, e}, С. Г. Давлетшин^f, Е. А. Дронова^g

^aМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский вычислительный центр, Москва, 119991 Россия

^bМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Географический факультет, Москва, 119991 Россия

^cИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, 119017 Россия

^dМосковский Центр фундаментальной и прикладной математики,
Москва, 119991 Россия

^eИнститут географии РАН, Москва, 119017 Россия

^fВсероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации –
мировой центр данных, Обнинск, 249035 Россия

^gРоссийский государственный аграрный университет МСХА им. К.А. Тимирязева,
Москва, 127434 Россия

*e-mail: julia.yarinich@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.02.2023 г.

После доработки 15.04.2023 г.

Принята к публикации 17.04.2023 г.

Оценено влияние Московского мегаполиса на осадки разной интенсивности в различных физико-синоптических условиях. На основе анализа многолетних стандартных наблюдений на метеорологических станциях Московского региона и данных реанализа высокого разрешения ERA5 за период 1988–2020 гг. показано, что наибольшее влияние города на интенсивные осадки достигается в случаях с повышенной статической неустойчивостью атмосферы в сочетании со слабым крупномасштабным потоком, высоким влагосодержанием атмосферы и отсутствием выраженных фронтальных зон в регионе. В среднем за исследованный период превышение сезонной суммы осадков в Москве относительно фоновых значений по Московскому региону составляет 5.3%, при этом отмечено разнонаправленное влияние города на осадки разной интенсивности: ослабление (статистически незначимое) над городом осадков малой и средней интенсивности, усиление наиболее интенсивных осадков (выше 95 процентиля), повторяемость которых в Москве на 11.6% выше фоновой.

Ключевые слова: влияние города на осадки, городская климатология, крупномасштабные атмосферные процессы, интенсивные осадки, реанализ, ERA5.

DOI: 10.31857/S0321059623600151, **EDN:** NOVOYL

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивные атмосферные осадки формируются в результате сложного взаимодействия крупномасштабных, мезомасштабных и локальных термических и динамических факторов в атмосфере,

что приводит к существенной неоднородности их пространственного и временного распределения. Изменение климата и сопутствующее повышение температуры тропосферы, согласно соотношению Клаузиуса–Клапейрона, приводит к росту влагосодержания атмосферы, что способствует повышению интенсивности и частоты осадков [23], в том числе и в российских регионах [1]. Однако связь температуры и осадков нелинейная, что обусловлено важной ролью крупномасштабной и мезомасштабной циркуляции (динамического фактора) в формировании экстремумов осадков.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Некоммерческого фонда развития науки и образования “Интеллект” (сбор исходной информации); РНФ (проект 18-77-10076, обработка данных реанализа для характеристики фоновых условий атмосферы), Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение 075-15-2021-574, анализ данных).

В средних широтах северного полушария осадки существенно зависят от крупномасштабных процессов в атмосфере [13, 29], в первую очередь – приводящих к конвергенции влаги. В частности, до 90% случаев осадков в средних широтах обусловлено фронтальными процессами [11]. Однако на Европейской территории России в летний период до 40% случаев экстремальных осадков имеют нефронтальную природу [11].

Наиболее сильные осадки свойственны организованной глубокой конвекции, в частности для мезомасштабных конвективных систем: конвективных комплексов и линий шквалов [3]. Их возникновению и усилению способствуют такие факторы, как наличие зон конвергенции, высокое влагосодержание атмосферы, высокая статическая неустойчивость, благоприятные для этого сдвиг ветра и энергия конвективного подавления [14, 21]. Существует множество косвенных предикторов интенсивности конвективных систем, учитывающих эти факторы, основанных на термодинамических и динамических характеристиках атмосферы и их различных сочетаниях [12, 15], которые можно получить в том числе на основе результатов гидродинамического моделирования и реанализа и использовать для прогноза и анализа конвективных осадков.

Дополнительную сложность в условия формирования конвективных процессов и связанных с ними осадков вносят локальные неоднородности подстилающей поверхности, связанные с орографией, наличием крупных водных объектов и урбанизированных территорий. Влияние последних отмечается для большого количества крупных городов практически на всех континентах [16, 20, 26]. Как правило, имеет место увеличение сумм осадков в центре городов и с их подветренной стороны. Среди основных физических механизмов влияния городов на осадки выделяют следующие [22].

1. Влияние на влажность и термодинамические процессы, связанные с особенностями пространственного распределения компонентов радиационного баланса городской поверхности, способствующие формированию острова тепла и связанных с ним циркуляций по типу “городского бриза”. Данные наблюдений и моделирования [16, 25] указывают на то, что подобная циркуляция может модифицировать существующие системы осадков и вызывать новые, особенно в случае значительной статической неустойчивости атмосферы и слабого фонового переноса.

2. Влияние на динамические процессы повышенной шероховатости городской подстилающей поверхности, вызывающей конвергенцию непосредственно над городом и с подветренной стороны. Такая локальная циркуляционная система может служить препятствием для развития

других мезомасштабных циркуляций, влиять на пространственное распределение осадков. Известны также случаи бифуркации конвективных систем над городом [10, 27].

3. Влияние городов на микрофизические процессы. В частности, из-за высокой концентрации городского аэрозоля может изменяться размер облачных капель. Это в свою очередь может изменять процессы формирования, временные интервалы, фазу и продолжительность осадков. Важно, что осадки могут как усиливаться, так и ослабляться в зависимости от типов облаков и влагосодержания атмосферы [19]. Так, осадки из систем глубокой конвекции и кучево-дождевых облаков в более влажном воздухе имеют тенденцию к усилению благодаря городскому аэрозольному эффекту. В то же время осадки из фронтальных систем в более сухом воздухе, а также суперъядеек, континентальных линий шквалов и слоисто-дождевых облаков, напротив, могут подавляться за счет эффекта аэрозолей [19].

Согласно наблюдениям [22], влияние города наиболее выражено в периоды высокой конвективной активности в теплый сезон, когда прогрев подстилающей поверхности вызывает значительные восходящие потоки воздуха. Однако в случае формирования конвективных систем на атмосферных фронтах крупномасштабные процессы могут нивелировать или маскировать влияние города.

Одни и те же эффекты могут по-разному влиять на осадки из облаков разного генезиса, при этом один и тот же эффект может вызывать как увеличение, так и уменьшение интенсивности или общего количества осадков над городом при различных состояниях атмосферы в районе прохождения осадкообразующих систем. Кроме того, орография окружающих город территорий также может изменять или нивелировать влияние города, в частности за счет горно-долинных и береговых циркуляций.

Расположение Московской агломерации вдали от значительных неоднородностей рельефа и крупных водных объектов позволяет с высокой степенью достоверности идентифицировать влияние крупного города на атмосферные процессы, в том числе на режим осадков. В работах [1, 4, 5, 8, 28] отмечено превышение сумм осадков в Москве над суммами осадков окружающей ее территории по данным наблюдений и численного моделирования, однако оценки этого превышения разнятся (от 7 до 15%) вследствие различий методик исследования и выборки данных по времени и пространству. В [4] отмечена также повышенная повторяемость в Москве экстремальных (>50 мм/сут) осадков.

В большинстве работ, посвященных влиянию г. Москвы на осадки [1, 4, 5, 8, 28], оценено влия-

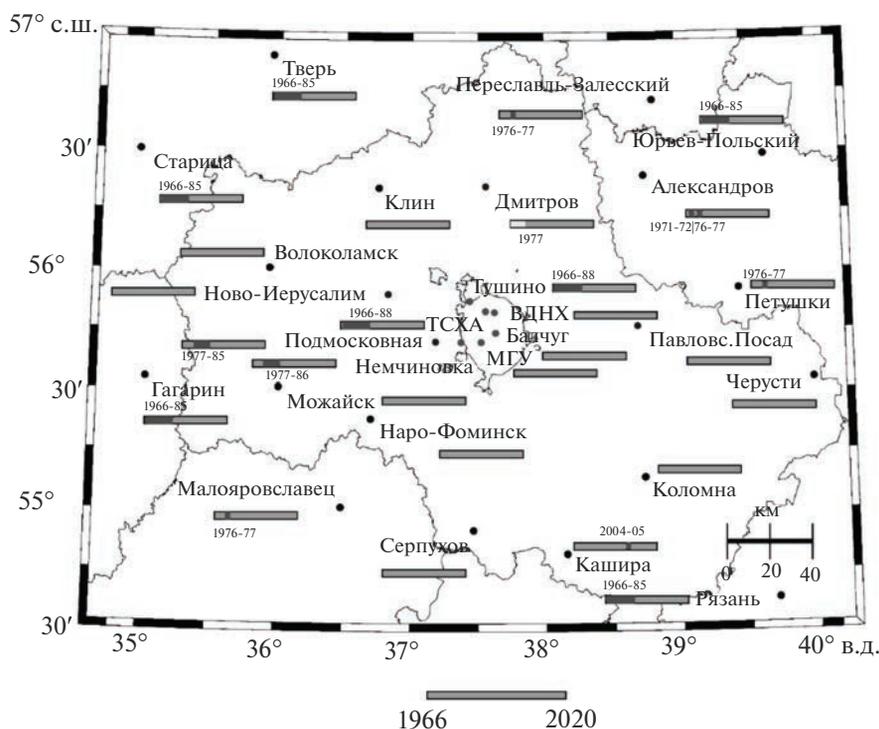


Рис. 1. Картограмма итогового архива данных о суточных суммах осадков по станциям, на которых непрерывный ряд измерений равен 33 годам и более. Названия и пунсоны (серое) – метеостанции Москвы; выборка фоновых метеостанций (черное); выборка фоновых метеостанций Ф2 (черное с названиями серым шрифтом). Линиями условно обозначен ряд измерений с 1966 по 2020 г., серым на линиях показано наличие данных, светло-серым – наличие данных с пропусками более одного месяца, темно-серым – отсутствие данных. Годы пропусков обозначены цифрами под линиями.

ние города на сезонные суммы осадков. Однако, как отмечено выше, влияние города может проявляться в разной степени и с разным знаком в зависимости от состояния атмосферы и генезиса облаков. В данной работе проведена оценка степени влияния Московского мегаполиса на характеристики осадков различного физико-синоптического генезиса и разной интенсивности в теплый период в условиях современного климата, включая проверку гипотезы об усилении конвективных процессов и связанных с ними осадков над урбанизированными территориями.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Данные наблюдений

В настоящей работе для исследования влияния г. Москвы на осадки рассматривались суточные суммы осадков, измеренные на метеорологических станциях Московского региона. Наиболее полные временные ряды суточных сумм осадков собраны по 27 станциям (рис. 1), включая 6 метеостанций в пределах 16-километрового радиуса от центра Москвы. При расчете городской аномалии осадков важно выделить репрезентативный фон [22], однако ввиду неоднородности поля

осадков точное определение фона затруднено. В данной работе при выделении фоновых метеостанций использовалось два подхода: при первом подходе (выборка Ф1, 21 метеостанция) фоновыми метеостанциями считались все станции, находящиеся за 16-километровым радиусом от центра Москвы; при втором подходе (выборка Ф2) в качестве фоновых метеостанций задействованы 4 ближайшие к Москве метеостанции из выборки Ф1 (Дмитров, Ново-Иерусалим, Подмосковная, Павловский Посад).

Для получения статистических характеристик сумм осадков летнего периода в качестве исходных использованы ряды данных из архивов:

Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) [2] (26 станций по Московскому региону за 1966–2020 гг.);

Обсерватории Тимирязевской академии (ТСХА) (1988–2020 гг.);

Метеорологической обсерватории МГУ (1966–2020 гг.).

С учетом продолжительности доступных рядов наблюдений на разных метеостанциях для исследова-

дования выбран период 1988–2020 гг. Для анализа использованы данные за период активной конвекции (с мая по сентябрь). Сформирована база данных суточных сумм осадков с учетом полноты и качества данных. Данные за недостающие периоды восполнялись с помощью архивов данных УГМС и станционных данных из [7] с учетом оценки корреляции общих временных рядов данных об осадках.

Методы анализа данных наблюдений

Для исследования степени влияния Москвы на осадки разной интенсивности рассмотрены следующие градации суточных сумм осадков:

P_{all} – осадки с суточной суммой >1 мм;

P_{mod} – осадки малой и средней интенсивности с суточными суммами от 1 до 12 мм (12 мм – значение среднего по всем станциям 95-го процента суточных сумм осадков за исследуемый период);

P_{int} – случаи интенсивных осадков (>12 мм).

Для каждой градации осадков по интенсивности рассчитаны следующие метрики:

$P_{гер}$ – средняя многолетняя повторяемость таких случаев за сезон (индивидуально для каждой станции);

P_{sum} – средние суточные суммы осадков для каждой станции, когда максимальная суточная сумма осадков в регионе попадает внутрь данной градации.

Основной метод определения степени влияния города на различные характеристики осадков в данной работе – относительная разность средних значений различных показателей осадков по данным городских станций $\overline{P_{город}}$ и фоновых метеостанций $\overline{P_{фон}}$:

$$\Delta P = \frac{\overline{P_{город}} - \overline{P_{фон}}}{\overline{P_{фон}}} \times 100\%. \quad (1)$$

На основе полученных результатов рассчитано относительное превышение осадков в городе (%), количество случаев за сезон (для $P_{гер}$), мм/сут (для P_{sum}), а также оценены уровень значимости и доверительные интервалы. Оценка статистической значимости (на уровне 95%) разности средних значений показателей (суммы и повторяемости) осадков в городе и области проведена на основе t -критерия Стьюдента.

Данные реанализа и производные индексы

Для характеристики фоновых атмосферных условий, сопровождающих выпадение осадков в Московском регионе, использованы данные реанализа ERA5 [17]. Используются как исходные

данные реанализа (модуль скорости ветра на высоте 10 м, V_{10}), так и рассчитанные на их основе производные параметры: потенциальная энергия конвекции $MLCAPE$ [24], интегральное влагосохранение атмосферы PW , фронтальный параметр TFP [18] и индекс влажности HIX [18]:

$$MLCAPE \approx g \int_{p(LFC)}^{p(EL)} \frac{T'_v}{\overline{T}_v} dp = g \int_{p(LFC)}^{p(EL)} \frac{T_{v,p} - T_{v,e}}{\overline{T}_{v,e}} dp, \quad (2)$$

где T_v – виртуальная температура, К; EL – уровень конвекции, м; LFC – нижняя граница конвективно-неустойчивого слоя, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; dp – приращение давления, гПа;

$$PW = \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} q(p) dp, \quad (3)$$

где q – абсолютная влажность на изобарических уровнях, кг/м³;

$$TFP = \nabla |\nabla ZTE| \bar{n}_{ZTE}, \quad (4)$$

где

$$\bar{n}_{ZTE} = \frac{\nabla ZTE}{|\nabla ZTE|}, \quad (5)$$

ZTE – эквивалентная толщина слоя 850–500 гПа с промежуточными верхним p_u и нижним p_l слоем, рассчитанная на основе данных об эквивалентной температуре \overline{T}_e с учетом абсолютной влажности воздуха [18]:

$$ZTE = - \sum_{850}^{500} \frac{R}{g} \overline{T}_e \ln \left(\frac{p_u}{p_l} \right), \quad (6)$$

$$HIX = \frac{ZTE - ZT}{ZTES - ZT}, \quad (7)$$

где $ZTES$ – эквивалентная толщина слоя 850–500 гПа, м; рассчитанная на основе данных об эквивалентной температуре с учетом данных о давлении насыщенного водяного пара; ZT – разность высот изобарических поверхностей, м.

Для каждых конкретных суток брались максимальные значения индексов на площади, ограниченной приближительными координатами крайних точек Москвы (55.5°–56° с.ш., 37.25°–38° в.д.), и максимальное (для $MLCAPE$, PW , TFP , HIX) или среднее (для V_{10}) значение параметра за сутки.

Параметры TFP и HIX использованы для разделения фронтальных и внутримассовых осадков. Стоит отметить, что хотя задача определения положений атмосферных фронтов в пространстве и не нова, общепринятой методики автоматического фронтального анализа не существует в первую очередь из-за отсутствия согласованного набора параметров для выявления фронта. Авто-

рами настоящей статьи использован критерий фронтальной зоны из работы [18], согласно которому фронт идентифицируется при условии $TFP > 2.5$ и $HIX < 0.7$. Такой подход позволяет идентифицировать атмосферные условия, характерные для выраженных бароклинных зон. В дальнейшем “фронтальной” зоной будут называться условия в атмосфере, выделенные с помощью данных индексов.

Для проверки применимости приведенного критерия фронтальной зоны выполнен сравнительный анализ результатов, полученных на его основе, и результатов синоптического анализа, выполненного в Центральном УГМС России. Для этого отобраны 73 случая, когда хотя бы на одной станции Москвы (ВДНХ, ТСХА, МГУ, Балчуг, Тушино или Немчиновка) суточная сумма осадков превышала 1 мм, и проведен анализ архива синоптических карт по данной выборке. Сравнение выполнено для периода 2018–2019 гг., что обусловлено доступностью архива синоптических карт. Показано, что методика определения фронтальных зон с помощью индексов TFP и HIX по данным реанализа ERA5 в 58% случаев показала результат (наличие фронта), совпадающий с результатом синоптического анализа. В 29% случаев, большая часть которых приходилась на ситуации прохождения размытых теплых, холодных фронтов или фронтов окклюзии в малогradientных барических гребнях или на периферии антициклонов, методика на основе данных реанализа не позволяла выделить фронт в том же месте, где он определялся на основе синоптического анализа (фронтальная зона оказывалась “сдвинута” в пространстве). В 4% случаев фронт был ошибочно идентифицирован там, где его прохождение в течение суток по данным синоптических карт не наблюдалось, 9% случаев составляли дискуссионные ситуации.

Методика формирования выборок случаев интенсивных осадков различного физико-синоптического генезиса

Принцип группировки дней с осадками (включая интенсивные) по физико-синоптическим условиям разработан с учетом теоретических представлений об основных факторах влияния города на конвективные процессы и связанные с ними осадки. На основе данных [22] предложено выделять следующие типы крупномасштабных условий, более (либо менее) благоприятных для каждого из трех факторов влияния города:

для термодинамических факторов благоприятно состояние атмосферы с высокой статической неустойчивостью ($MLCAPE$) и слабым фоновым потоком ($V10$);

Таблица 1. Значения отобранных для дальнейшего анализа индексов неустойчивости, соответствующих квантилю 0.75 эмпирического распределения

Квантиль	Индекс		
	$MLCAPE$, Дж/кг	PW , кг/м ²	$V10$, м/с
0.75	328	31	4.2

для динамических эффектов благоприятен сильный крупномасштабный фоновый поток ($V10$);

для микрофизических эффектов благоприятны условия атмосферы с высоким интегральным влагосодержанием (PW).

Дополнительно рассмотрены условия, соответствующие либо наличию выраженного атмосферного фронта, либо его отсутствию (условия слабовыраженного фронта, вторичного фронта или внутримассовой конвекции), на основе индексов TFP и HIX .

Таким образом, рассмотрено 8 типов состояния атмосферы, идентифицируемых на основе набора вышеперечисленных индексов. В качестве пороговых значений индексов $MLCAPE$, PW и $V10$ использованы квантили уровня 0.75 по выборке данных за весь исследуемый период (табл. 1). Для индексов TFP и HIX пороговые значения взяты из [18]. Информация о рассматриваемых типах условий атмосферы приведена в табл. 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние города на осадки различных градаций интенсивности

Средняя сезонная сумма осадков за период с мая по сентябрь 1988–2020 гг. в Москве выше на 5.3% (18.1 мм) (статистически незначимо) по сравнению с метеостанциями Московского региона. В более ранних работах о влиянии Москвы на осадки по данным наблюдений проводились сравнения, как правило, сезонных или месячных сумм осадков на метеостанциях. Так, шлейф повышенных (на 15%) относительно фона сумм осадков за июль–август, ориентированный от центра города на восток, был обнаружен А.А. Дмитриевым и Н.П. Бессоновым [5] в данных за период 1955–1964 гг. В работе [1] показано превышение суммы осадков на городских станциях в среднем на 10% за июль–август за период 2008–2017 гг. Анализ более длинного временного ряда данных показан в работе [6]: в теплый период с апреля по октябрь с 1966 по 2015 г. средняя сезонная сумма осадков в Москве выше на 7% относительно фоновых метеостанций. Таким образом, оценки влияния Москвы на осадки имеют один порядок, но несколько разные значения, что, вероятно,

Таблица 2. Классификация состояний атмосферы на основе пороговых значений показателей, рассчитанных по данным реанализа ERA5 (ОТ – остров тепла)

Синоптическая ситуация	Характерные значения рассчитанных переменных по данным ERA5	Предположительное влияние на осадки из [22]
Условия усиления осадков над городом за счет термодинамических эффектов		
Значительная неустойчивость и слабый крупномасштабный поток	$MLCAPE \geq 328$ Дж/кг $V_{10} < 4.2$ м/с	ОТ → → конвергенция → усиление осадков
Слабая неустойчивость/значительный крупномасштабный поток	$MLCAPE < 328$ Дж/кг $V_{10} \geq 4.2$ м/с	Отсутствие ОТ → отсутствие влияния на осадки
Условия усиления осадков над городом за счет динамических эффектов		
Значительный крупномасштабный поток	$V_{10} \geq 4.2$ м/с	Бифуркация конвективных систем над городом → уменьшение осадков
Слабый крупномасштабный поток	$V_{10} < 4.2$ м/с	Конвергенция над городом вследствие шероховатости → → усиление осадков
Условия усиления осадков над городом за счет микрофизических эффектов		
Значительное интегральное влагосодержание	$PW \geq 31$ кг/м ²	Усиление конвективных систем и увеличение интенсивности осадков
Малое интегральное влагосодержание	$PW < 31$ кг/м ²	Уменьшение облачных капель → → ослабление осадков над городом
Условия для влияния/отсутствия влияния комплексного эффекта города		
Выраженные фронтальные зоны	$TFP > 2.5$ $HIX < 0.7$	ОТ → конвергенция → → усиление осадков
Размытые/вторичные фронты, внутримассовая конвекция	$TFP \leq 2.5$ $HIX \geq 0.7$	Отсутствие ОТ → отсутствие влияния на осадки

Таблица 3. Разность город–фон значений P_{rep} в зависимости от градаций интенсивности и количества фоновых станций, участвовавших в расчете (ни одна из величин разности не значима на уровне 0.05 по t -критерию Стьюдента; доверительные интервалы рассчитаны для уровня 0.05)

Характеристики осадков для оценки влияния города	Диапазоны суточных сумм осадков, мм					
	1–120 (P_{all})		1–12 (P_{mod})		12–120 (P_{int})	
	количество фоновых станций (выборка)					
	21 ($\Phi 1$)	4 ($\Phi 2$)	21 ($\Phi 1$)	4 ($\Phi 2$)	21 ($\Phi 1$)	4 ($\Phi 2$)
Повторяемость в городе, случаи за сезон	46.05		37.70		8.35	
Повторяемость в фоне, случаи за сезон	45.43	45.61	37.94	38.05	7.48	7.55
Разность, случаев за сезон	0.62	0.44	–0.24	–0.35	0.87	0.8
Относительная разность ΔP , %	1.4	1.0	–0.6	–0.9	11.6	10.5
Уровень значимости	0.75	0.83	0.88	0.84	0.24	0.32
Доверительные интервалы, случаи за сезон	± 3.92	± 4.03	± 3.28	± 3.37	± 1.46	± 1.59

обусловлено разными выборками станций и анализом разных временных периодов.

Повторяемость осадков P_{all} в городе в период с мая по сентябрь увеличена на 1.4% относительно выборки фоновых метеостанций $\Phi 1$ (табл. 3); при

этом превышение средней суточной суммы осадков в Москве для выборки случаев, когда хотя бы на одной станции Московского региона наблюдались осадки > 1 мм за сутки, составляет 6.2% (табл. 4). Обе оценки статистически незначимы

Таблица 4. Разность город–фон значений P_{sum} в зависимости от градаций интенсивности и количества фоновых станций, участвовавших в расчете (полужирный шрифт – статистически значимые значения на уровне 0.05 по t -критерию Стьюдента; доверительные интервалы рассчитаны для уровня 0.05)

Характеристики осадков для оценки влияния города	Диапазоны суточных сумм осадков, мм					
	1–120 (P_{all})		1–12 (P_{mod})		12–120 (P_{int})	
	количество фоновых станций (выборка)					
	21 (Ф1)	4 (Ф2)	21 (Ф1)	4 (Ф2)	21(Ф1)	4 (Ф2)
Средняя сумма осадков в городе, мм	3.15	4.61	0.85	1.94	6.07	10.66
Средняя сумма осадков в фоне, мм	2.96	4.35	1.02	2.04	5.45	9.55
Разность, мм	0.18	0.27	–0.17	–0.1	0.62	1.11
Относительная разность ΔP , %	6.16	6.15	–16.72	–5.06	11.35	11.62
Уровень значимости	0.23	0.22	0.0004	0.19	0.01	0.02
Доверительные интервалы, мм	± 0.30	± 0.43	± 0.09	± 0.16	± 0.49	± 1.11
Общее количество случаев	3741	2549	2103	1767	1638	782

согласно t -критерию Стьюдента. Уменьшение количества фоновых станций (выборка Ф2) значительно не меняет оценки влияния города как на повторяемость (табл. 3), так и на среднюю сумму осадков (табл. 4).

Осадки малой и средней интенсивности P_{mod} над Москвой имеют тенденцию к ослаблению. В среднем они выпадают в Москве реже на 0.6% (статистически незначимо), тогда как средняя сумма осадков по выборке случаев осадков малой интенсивности статистически значимо ниже в городе, чем в среднем на фоновых станциях (выборка Ф1), на 16.7% (табл. 4). Такое большое различие может быть связано не только с физическими эффектами, но и с особенностью метода определения превышения осадков в городе: ведь в выборку случаев P_{mod} могли попадать и те случаи, когда система осадков не достигала метеостанций Москвы, т. е. проходила только по краю региона. За счет того, что повторяемость случаев осадков малой интенсивности относительно велика (в среднем 37.8 случаев за сезон), влияние этого фактора может быть довольно значительно. При использовании в качестве фона только ближайших к Москве метеостанций (выборка Ф2) влияние города слабее и статистически незначимо, но также отрицательно и составляет –5.1% (табл. 4).

Интенсивные осадки P_{int} выпадают в Москве чаще на 11.6% относительно фона (статистически незначимо). Среди метеостанций Москвы наибольшая повторяемость таких осадков приходится на метеостанции Балчуг и ВДНХ (8.64 и 8.67 случаев за сезон), наименьшая – на метеостанции Немчиновка (8.27 случаев за сезон). В среднем по фоновым станциям повторяемость интенсивных осадков заметно ниже и составляет 7.64 случая за сезон. Результаты согласуются с оценками из работы [5], где показано, что отно-

сительно станций ближнего пригорода в центре Москвы наблюдается увеличение повторяемости интенсивных ливневых осадков >10 мм с 6 до 8 случаев за летний сезон (июнь–август). Оценка влияния города на среднюю сумму осадков по выборке случаев интенсивных осадков в Московском регионе очень близка к оценке влияния города на повторяемость (11.35 и 11.58% соответственно) (табл. 3, 4).

Наиболее характерное состояние атмосферы для случаев влияния города в масштабе суток

Оценки влияния города на P_{rep} приведены для набора из 27 метеостанций: 6 городских и 21 фоновой (выборка Ф1). Влияние города на P_{sum} оценивалось по десяти метеостанциям: шести городским и четырем фоновым (выборка Ф2). Полные результаты оценок влияния города на характеристики осадков по двум указанным выборкам приведены на рис. 2.

Показано, что влияние г. Москвы на суточные суммы осадков (по выборке P_{all}) колеблется в пределах 0.7–14.8% в зависимости от типа состояния атмосферы (статистически незначимо). Относительное превышение повторяемости по выборке P_{all} составляет –1.5–9% и не является статистически значимым для всех рассмотренных типов состояния атмосферы (рис. 2).

При этом в среднем влияние города на повторяемость осадков P_{rep} выше при условиях в атмосфере, благоприятных для этого (повышенная неустойчивость атмосферы в сочетании со слабым фоновым потоком, высокое влагосодержание), в иных случаях влияние на повторяемость стремится к нулю. Наибольшее (8.8%, статистически незначимо) влияние города на повторяемость осадков >1 мм/сут наблюдается в неустой-

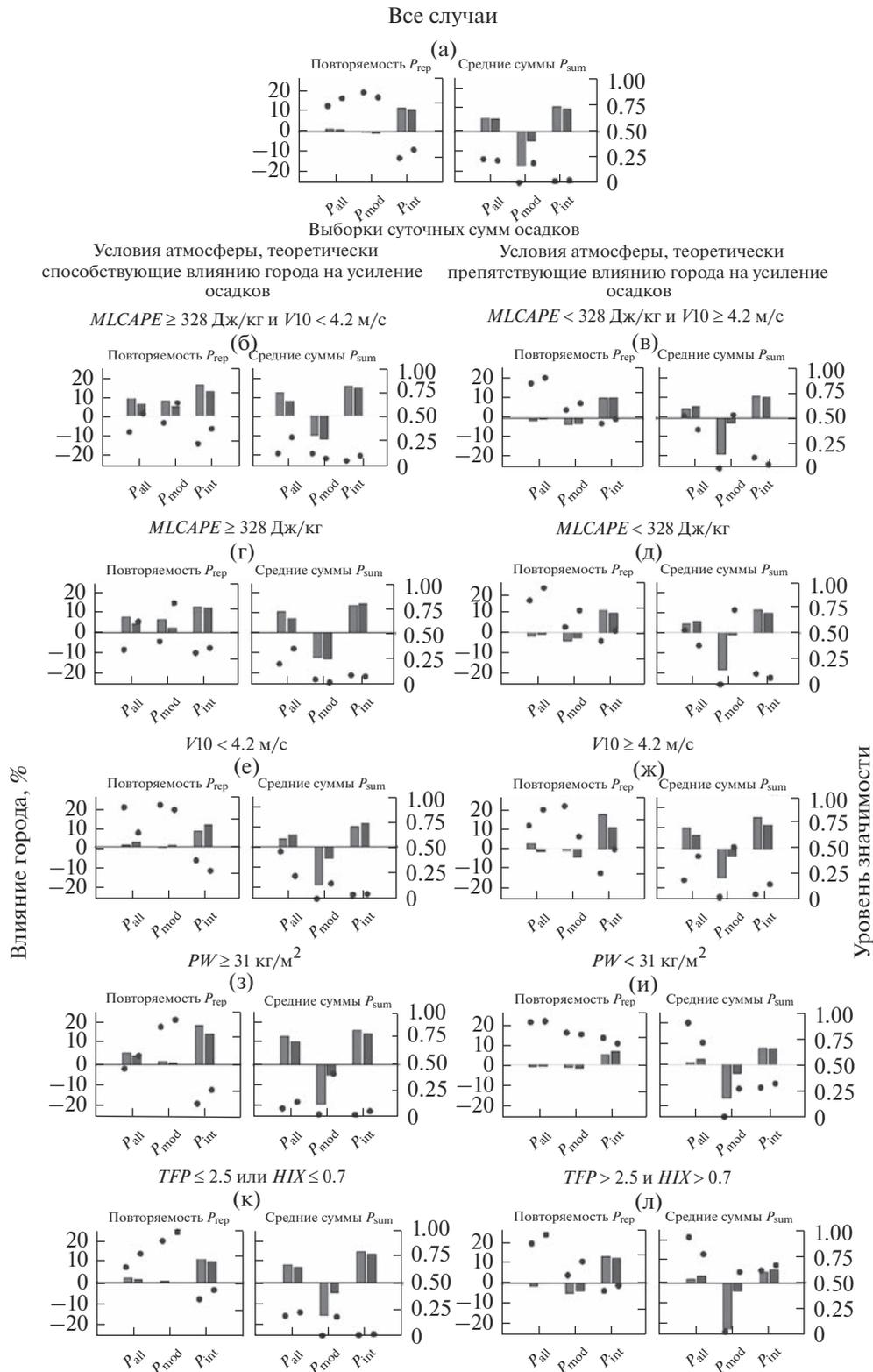


Рис. 2. Превышение повторяемости P_{rep} и средней суммы осадков P_{sum} в Москве относительно фоновых метеостанций (оценки с использованием выборки $\Phi 1$ (21 фоновая метеостанция) – светло-серые гистограммы; выборки $\Phi 2$ (4 фоновых метеостанции) – темно-серые гистограммы) в зависимости от состояния атмосферы, левая ось значений, %. Уровень значимости показан серыми маркерами, правая ось значений.

чиво стратифицированной атмосфере со слабыми фоновыми ветрами ($MCAPE \geq 328$ Дж/кг, $V_{10} < 4.2$ м/с) (рис. 2б).

Наибольшее влияние Москвы на суточную сумму осадков P_{sum} для случаев P_{all} на территории Московского региона составляет 11.7% (статистически незначимо) и достигается при высоком влагосодержании атмосферы — $PW \geq 31$ кг/м² (рис. 2з).

Превышение повторяемости P_{rep} в городе относительно фона для случаев осадков малой и средней интенсивности P_{mod} лежит в интервале $-0.5-7\%$ для условий атмосферы, способствующих влиянию города (рис. 2б, 2г, 2е, 2з, 2к) и $-5...-0.8\%$ для состояния атмосферы, подавляющего городские эффекты (рис. 2в, 2д, 2ж, 2и, 2л). Следовательно, оценки подтверждают, что такие факторы, как значительная статическая неустойчивость атмосферы в сочетании со слабым крупномасштабным потоком, высокое влагосодержание атмосферы, а также удаленность от фронтальных зон, способствуют усилению осадков над городом. Наибольшее превышение повторяемости осадков от 1 до 12 мм в городе, составляющее 7.2% (рис. 2б), наблюдается в случаях с сильной неустойчивостью атмосферы и слабым крупномасштабным потоком. Наибольшее уменьшение повторяемости осадков (-5%) в указанных градациях в Москве — в случаях выраженных фронтов (рис. 2л). Однако ни одна из оценок относительной повторяемости не является статистически значимой для данного интервала осадков.

Средняя сумма осадков P_{sum} в случаях осадков малой интенсивности имеет статистически незначимую тенденцию к превышению фоновых значений над городскими на величину от 2 до 13.3% (рис. 2). Наибольшее отрицательное статистически значимое влияние города на среднюю сумму осадков (-13.3%) проявляется при значительной неустойчивости атмосферы (рис. 2г). Оценки, приведенные по данным шести городских и 21 фоновой станций (рис. 2), как указано выше, заметно занижены вследствие вклада систем осадков, не достигавших Москвы, и не могут быть репрезентативными и рассматриваться в качестве вероятного влияния города.

Интенсивные осадки P_{int} в городе усиливаются при всех рассмотренных типах состояния атмосферы.

Превышение повторяемости интенсивных осадков в городе над фоном — в пределах 7.5–18.7% для условий, теоретически способствующих влиянию города, и в пределах 4.7–16.7% для условий, препятствующих ему. Наиболее статистически значимо (на уровне 0.12) влияние города — на повторяемость интенсивных осадков в случаях с высоким влагосодержанием атмосферы ($PW \geq$

≥ 31 кг/м²) — превышение повторяемости таких осадков в Москве составляет 18.7% (рис. 2з). Для ближнего круга фоновых метеостанций (выборка Ф2) превышение повторяемости становится незначимым (рис. 2з). Наименьший эффект города достигается при невысоком влагосодержании атмосферы (рис. 2и) — увеличение повторяемости осадков в Москве по сравнению с фоновыми станциями составляет всего 4.7% и не является статистически значимым. Интересно также отметить повышенную на 16.7% повторяемость осадков >12 мм в городе при интенсивном крупномасштабном потоке (рис. 2ж) по сравнению с выборкой при слабых фоновых ветрах — 7.5% (рис. 2е). Однако этот эффект статистически незначим и нивелируется уже при изменении состава фоновых станций (рис. 2е–2ж).

Статистически значимое на уровне 0.1 увеличение суммы осадков на 10.1–16.0% наблюдается в условиях атмосферы, способствующих влиянию города. Максимальное влияние города достигается при повышенной статической неустойчивости атмосферы в сочетании со слабым крупномасштабным потоком — 16.0% (рис. 2б), высоким влагосодержанием атмосферы — 16.1% (рис. 2з) и отсутствием выраженных зон атмосферных фронтов в регионе — 13.4% (рис. 2к).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценено влияние Московского мегаполиса на осадки разной интенсивности по данным стационарных наблюдений в Москве и Московском регионе, а также при разных состояниях атмосферы, определенных с помощью реанализа ERA5. Анализ проведен для суточных сумм осадков теплого времени года (май–сентябрь) для периода 1988–2020 гг., при этом впервые оценки влияния г. Москвы на осадки дополнены оценками статистической значимости. Также впервые для Москвы разработан и применен оригинальный подход, включающий в себя классификацию состояний атмосферы. Для учета чувствительности результатов расчетов к набору фоновых станций оценка влияния города проведена при разном количестве фоновых станций: для 21 фоновой станции Московского региона и отдельно для четырех метеостанций “ближнего круга”. В обоих случаях использованы данные об осадках в Москве с шести метеорологических станций в черте города.

Отмечено увеличение в Москве повторяемости дней с осадками (на 1.4%) и средних сумм осадков при условии их выпадения где-либо в Московском регионе (6.2%), однако это увеличение статистически незначимо. В целом, низкий уровень значимости обусловлен высокой межгодовой изменчивостью анализируемых характеристик. Наибольшее (статистически незначимое) увеличение повторяемости (8.8%) дней с осадка-

ми в Москве достигается в условиях значительной статической неустойчивости атмосферы в сочетании со слабым крупномасштабным потоком. Наиболее заметное (также незначимое) увеличение суточных сумм всех осадков (14.8%) выявлено в случаях высокого влагосодержания атмосферы.

Для осадков малой и средней интенсивности (<95 процентиля) характерно снижение в Москве их повторяемости (–0.6%), наиболее заметное при высокой статической неустойчивости атмосферы (–13.3%, статистически значимое), а также в случаях прохождения атмосферных фронтов (–5%), и средних сумм (–6.2%) – статистически незначимое. Выявлена заметная зависимость полученных оценок от состава метеостанций и удаленности их от города.

Интенсивные осадки (≥95 процентиля) в городе усиливаются при всех рассмотренных состояниях атмосферы для обеих выборок фоновых станций. Повторяемость интенсивных осадков в городе в среднем выше на 11.6%, чем на фоновых метеостанциях, и наиболее усиливается в условиях высокого влагосодержания атмосферы (18.7%), однако полученные результаты статистически незначимы. Значимое влияние отмечено на средние суммы осадков по выборкам случаев интенсивных осадков в Московском регионе в условиях атмосферы, способствующих влиянию города. Максимальное влияние города достигается в случаях с повышенной статической неустойчивостью атмосферы в сочетании со слабым крупномасштабным потоком (16.0%), высоким влагосодержанием атмосферы (16.1%) и отсутствием выраженных зон атмосферных фронтов в регионе (13.4%).

Авторы выражают благодарность А.Ю. Мельничуку и В.Е. Викулину (Центральное УГМС) за предоставление данных об осадках по метеостанциям Московского региона и доступа к архиву синоптического анализа Центрального УГМС России; коллективу метеорологической обсерватории МГУ им. М.В. Ломоносова за предоставление данных об осадках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брусова Н.Е., Кузнецова И.Н., Нахаев М.И. Особенности режима осадков в Московском регионе в 2008–2017 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 1. С. 127–142.
2. Бульгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России // Свидетельство о гос. регистрации базы данных. 2014. № 2014620549.
3. Вельтищев Н.Ф. Мезометеорология и краткосрочное прогнозирование // ВМО № 701. Л.: Гидрометеороиздат, 1988. Вып. 701. 136 с.
4. Григорова Е.С. О мезоклимате московского мегаполиса // Метеорология и гидрология. 2004. № 10. С. 36–45.
5. Дмитриев А.А., Бессонов Н.П. Климат Москвы (Особенности климата большого города). Л.: Гидрометеороиздат, 1969. 320 с.
6. Литвиненко Л.Н., Калинина А.А. Распределение осадков на территории Московской области при наличии и отсутствии крупного антропогенного образования // Экология урбанизированных территорий. 2018. № 2. С. 66–71.
7. Погода и климат: <http://www.pogodaiklimat.ru/>
8. Стулов Е.А. Влияние города Москвы на усиление летних осадков // Метеорология и гидрология. 1993. № 11. С. 34–41.
9. Aleshina M.A., Semenov V.A., Chernokulsky A.V. A link between surface air temperature and extreme precipitation over Russia from station and reanalysis data // Environ. Res. Lett. 2021. V. 16. P. 105004.
10. Bornstein R., LeRoy M. Urban barrier effects on convective and frontal thunderstorms // Extended Abstracts, Fourth Conf. Mesoscale Processes. 1990. P. 120–121.
11. Catto J.L., Pfahl S. The importance of fronts for extreme precipitation // J. Geophys. Res. Atmos. 2013. V. 118. № 19. P. 10791–10801.
12. Chernokulsky A., Shikhov A., Yarinich Y., Sprygin A. An Empirical Relationship Among Characteristics of Severe Convective Storms, Their Cloud Top Properties and Environmental Parameters in Northern Eurasia // Atmosphere. 2023. V. 14. № 1. P. 174.
13. Conticello F., Cioffi F., Merz B., Lall U. An event synchronization method to link heavy rainfall events and large-scale atmospheric circulation features // Int. J. Climatol. 2018. V. 38. № 3. P. 1421–1437.
14. Doswell C.A., Brooks H.E., Maddox R.A. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology // Weather and forecasting. 1996. V. 11. № 4. P. 560–581.
15. Grieser J. Convection parameters // Selbstverl. 2012. 22 p.
16. Han J.Y., Baik J.J., Lee H. Urban impacts on precipitation // Asia-Pacific J. Atmospheric Sci. 2014. V. 50. № 1. P. 17–30.
17. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly J. Royal Meteorol. Soci. 2020. V. 146. № 730. P. 1999–2049.
18. Huber-Pock F., Kress C. An operational model of objective frontal analysis based on ECMWF products // Meteorol. Atmospheric Phys. 1989. V. 40. № 4. P. 170–180.
19. Khain A.P. Notes on state-of-the-art investigations of aerosol effects on precipitation: a critical review // Environ. Res. Lett. 2009. V. 4. № 1. P. 015004.
20. Liu J., Niyogi D. Meta-analysis of urbanization impact on rainfall modification // Sci. Rep. 2019. V. 9. № 1. P. 1–14.
21. Markowski P., Richardson Y. Mesoscale meteorology in midlatitudes. Ghichester: Wiley-Blackwell, 2010. 407 p.
22. Oke T.R., Mills G., Christen A., Voogt J.A. Urban climates. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2017. 509 p.
23. Pendergrass A.G., Hartmann D.L. Changes in the distribution of rain frequency and intensity in response to

- global warming // *J. Climate*. 2014. V. 27. № 22. P. 8372–8383.
24. *Riemann-Campe K., Fraedrich K., Lunkeit F.* Global climatology of convective available potential energy (CAPE) and convective inhibition (CIN) in ERA-40 reanalysis // *Atmospheric Res.* 2009. V. 93. № 1–3. P. 534–545.
25. *Rozoff C.M., Cotton W.R., Adegoke J.O.* Simulation of St. Louis, Missouri, land use impacts on thunderstorms // *J. Applied Meteorol.* 2003. V. 42. № 6. P. 716–738.
26. *Shepherd J.M., Stallins J.A., Jin M.L., Mote T.L.* Urbanization: Impacts on clouds, precipitation, and lightning // *Urban Ecosystem Ecol.* 2010. V. 55. P. 1–28.
27. *Tumanov S., Stan-Sion A., Lupu A., Soci C., Oprea C.* Influences of the city of Bucharest on weather and climate parameters // *Atmospheric Environ.* 1999. V. 33. № 24–25. P. 4173–4183.
28. *Varentsov M., Wouters H., Platonov V., Konstantinov P.* Megacity-Induced Mesoclimatic Effects in the Lower Atmosphere: A Modeling Study for Multiple Summers over Moscow, Russia // *Atmosphere*. 2018. V. 9. № 2. P. 50.
29. *Woollings T., Hannachi A., Hoskins B.* Variability of the North Atlantic eddy-driven jet stream // *Quarterly J. the Royal Meteorol. Soc.* 2010. V. 136. № 649. P. 856–868.