

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.576.11 (532)

Характеристики конвективных облаков Северо-Запада России, формирующих интенсивные осадки

А.А. Синькевич, Ю.П. Михайловский, А.Б. Куров, И.А. Тарабукин,
Н.Е. Веремей, О.А. Дмитриева, Р.Е. Торгунаков, М.Л. Торопова^{✉*}

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

Поступила в редакцию 2.05.2023 г.;
после доработки 7.06.2023 г.;
принята к печати 15.06.2023 г.

Рассмотрены характеристики облаков, сформировавших очень интенсивные осадки в Санкт-Петербурге и Ленинградской области 18 июня 2020 г. Рассматривались данные измерений радиолокатора ДМРЛ-С, весовых осадкомеров Pluvio² 200 и грозопеленгационной системы Blitzortung. Оценена возможность применения различных значений коэффициентов в $Z-R$ -соотношении Маршалла–Пальмера для измерения таких осадков. Показано, что целесообразно использовать удельную дифференциальную фазу для расчета интенсивности осадков в случае, когда она превышает 30 мм/ч и осадки состоят из дождевых капель и града.

Верхняя граница облаков была выше 12 км, максимальная отражаемость была больше 52 дБZ, максимальная интенсивность осадков могла превышать 160 мм/ч. Значительный объем облака занимали частицы града, которые фиксировались от земной поверхности вплоть до высоты 10 км. Наибольшая отражаемость регистрировалась в зоне осадков, а также в области таяния гидрометеоров. Все исследованные облака были грозовыми. Отмечено наличие достаточно высокой корреляции между частотой молний и интенсивностью осадков. Коэффициент корреляции Спирмена превысил 0,7.

Ключевые слова: радиолокация, осадки, гроза, микрофизика; radar, precipitation, thunder, microphysics.

Введение

Осадки очень высокой интенсивности достаточно редки и обладают сильной пространственной и временной неоднородностью. Они могут приводить к наводнениям со значительными материальными потерями и даже человеческими жертвами [1–6].

Отметим важность радиолокационных измерений, позволяющих оценивать интенсивность осадков в реальном времени [7]. Обычно данные радиолокационных измерений сопоставляют с результатами наземных измерений осадков, которые осуществляют с помощью осадкомеров и дисдрометров [1]. В подавляющем большинстве случаев для расчета интенсивности осадков используются $Z-R$ -соотношения Маршалла–Пальмера, которые могут приводить к значительным погрешностям при измерениях осадков высокой интенсивности. В этой связи необхо-

димо разрабатывать новые методы измерений, в частности с использованием поляризационных радиолокаторов.

Исследования, выполненные в крупных промышленных агломерациях, показали, что интенсивность опасных явлений над ними выше, чем над внегородскими территориями [8]. Видимо, подобные выводы применимы и к Санкт-Петербургу. Сильные осадки в некоторых случаях приводят к затоплению улиц. Исследование изменений повторяемости и характеристик опасных явлений конвективного характера на территории РФ [9] показало, что увеличение (в целом) количества выпадающих осадков связано со значительным ростом доли ливневых осадков, в том числе экстремальных, в то время как доля обложных осадков уменьшается. Характеристики облаков, из которых выпадают очень интенсивные осадки, в основном изучены лишь для районов, расположенных в низких широтах [1, 2, 5, 6]. Практически полностью отсутствуют сведения о развитии и характеристиках таких облаков над Санкт-Петербургом.

В Санкт-Петербурге в окрестностях 18 июня 2020 г. наблюдались развитие кучево-дождевых облаков, выпадение града, интенсивные осадки, шквал, гроза. Не устояло перед порывами ветра и множество деревьев, упавших на дороги, рухнул башенный кран, были затоплены улицы, погибло два человека.

* Андрей Александрович Синькевич (sinkevich51@mail.ru); Юрий Павлович Михайловский (yupalych@yandex.ru); Александр Борисович Куров (remotesensing@mail.ru); Иван Алексеевич Тарабукин (tarabukin@mail.ru); Николай Евгеньевич Веремей (veremey@gmail.com); Ольга Александровна Дмитриева (olgad.20@mail.ru); Роман Евгеньевич Торгунаков (roman.torgunakov@gmail.com); Марина Леонидовна Торопова (marina-toropova@mail.ru).

По данным автоматизированной измерительной системы «Осадки», входящей в государственную наблюдательную сеть, всего лишь за два часа в городе выпала почти половина нормы осадков за июнь.

Целью настоящей работы является получение и анализ радиолокационных, микрофизических и электрических характеристик облаков, из которых в Санкт-Петербурге и Ленинградской области выпали ливневые осадки. Значительное внимание уделено проблеме измерений интенсивности выпадения осадков.

1. Состояние атмосферы

Днем 18 июня 2020 г. Ленинградская область и Санкт-Петербург оказались в теплом секторе слабовыраженного циклона со слабым ветром (около 5 м/с) юго-восточного направления. В тропосфере до высоты тропопаузы исследуемая территория находилась на западной периферии высокого стационарного антициклона, центр которого располагался над Московской областью.

По данным аэрологического зондирования, проведенного в 12:00 ВСВ (ст. 26075 Воейково), в атмосфере наблюдалась сильная конвективная неустойчивость — запас энергии неустойчивости (CAPE) в слое развития конвекции был равен 3421 Дж/кг, указывая на то, что в анализируемый день могли развиваться мощные конвективные и кучево-дождевые облака.

Высота нулевой изотермы составляла 3,7 км. Уровень конденсации располагался на высоте 1,5 км при температуре на уровне конденсации $\approx 14,5^\circ\text{C}$. Нижняя граница облаков, определенная визуально на метеостанции Санкт-Петербург, находилась в диапазоне 1,0–1,5 км. Уровень свободной конвекции располагался на достаточно большой для рассматриваемого региона высоте — 12,6 км ($-60,0^\circ\text{C}$). При этом высота тропопаузы составляла 12,2 км ($-62,5^\circ\text{C}$). Минимальная радиационная температура на верхней границе облаков по данным измерений радиометра SEVIRI, установленного на спутнике Meteosat-11, составила $-64,5^\circ\text{C}$, наиболее мощные облака проникали в тропопаузу.

В приземном слое атмосферы наблюдался значительный сдвиг ветра: у земли ветер был юго-восточный, начиная с высоты 190 м — южный, а выше 1450 м — юго-западный и сохранял это направление до высоты 14 км.

2. Данные для анализа

Использованы данные, полученные с помощью метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С, работающего на длине волны 5,3 см. Он установлен в пос. Воейково в 10 км от Санкт-Петербурга [10]. Основные технические характеристики радиолокатора следующие: мощность в сжатом импульсе как на вертикальной, так и на горизонтальной поляризации — не менее 450 кВт, ширина диаграммы направленности — 1° , период между радиолокационными обзорами — 10 мин. Расстояние от радиолокатора до исследуемых облаков не превосходило 51,5 км.

Для обработки и визуализации данных ДМРЛ-С применялось программное обеспечение вторичной обработки радиолокационной информации «ГИ-МЕТ-2010» [11], обеспечивающее получение метеорологических радиолокационных продуктов с пространственным разрешением 1 км.

В качестве входных данных для расчета интенсивности осадков использовались максимальное значение отражаемости на уровне 600 м Z_{m600} , максимальное значение (по модулю) удельной дифференциальной фазы K_{DP} и максимальное значение дифференциальной отражаемости (линейное значение на высоте 1 км) Z_{dr} .

Интенсивность атмосферных осадков оценивалась также по измерениям весовых осадкомеров Pluvio² 200. На территории Санкт-Петербурга и ближайших пригородов функционирует сеть таких осадкомеров, включающая 34 прибора, которые измеряют количество осадков с периодом 5 мин. Осадкомеры расположены неравномерно в разных районах города и пригородах. Расстояние между ними меняется в широких пределах — от 2 до 10 км.

В настоящем исследовании использовалась интенсивность осадков, осредненная за 10 мин для каждого осадкомера, что было сделано с целью синхронизации с радиолокационными измерениями.

Для измерения частоты электрических разрядов (молний) f (мин^{-1}) применяли данные системы Blitzortung (под частотой молний понимается их количество за одну минуту). Разряды относились к исследуемому облаку в том случае, если они попадали в область, ограниченную контуром отражаемости 50 дБZ + 3 км. Выбор такой методики связан с тем, что при сопоставлении грозопеленгационных и радиолокационных измерений часть разрядов располагается вне контура облака. С одной стороны, это может объясняться погрешностями грозопеленгаторов. С другой — протяженность молний составляет обычно несколько километров, и они могут регистрироваться вне контуров облака.

Для анализа выбирались облака, из которых выпадали осадки, зафиксированные осадкомерами. При этом рассматривались характеристики только тех облаков, из которых выпало не менее 5 мм осадков за 10 мин, т.е. осредненная за 10 мин интенсивность осадков составляла более 30 мм/ч. Общее количество облаков, из которых выпало указанное количество осадков, составило 19. Они располагались либо непосредственно над осадкомерами, либо очень близко, за время обзора радиолокатора проходя над ними. Случаи, когда из выбранных облаков выпадали столь интенсивные осадки на два и более осадкомеров, не наблюдались.

3. Радиолокационные измерения осадков высокой интенсивности

Радиолокаторы широко используются для измерений осадков. В радиолокационной метеорологии для оценки обычно применяется Z–R-соотношение Маршалла–Пальмера [12, 13]:

$$Z = A \cdot R^b, \quad (1)$$

где Z – отражаемость частиц осадков, мм⁶/м³; R – интенсивность осадков, мм/ч.

Коэффициенты (A и b) в данной формуле меняются в зависимости от метеорологических, климатических и физико-географических условий измерений. Был выполнен ряд исследований с целью получения этих коэффициентов для облаков с большими значениями радиолокационной отражаемости, т.е. для случаев с интенсивными осадками. Некоторые из полученных комбинаций указанных коэффициентов приведены в табл. 1; $R1$ – $R10$ – обозначения, указывающие на способ расчета интенсивности.

Таблица 1
Значения коэффициентов A и b в соотношении (1)

Обозначение	A	b	Источник
$R1$	200	1,6	«ГИМЕТ-2010», РФ [11]
$R2$	300	1,4	WSR-88D, США [14]
$R3$	31	1,71	[4, 15]
$R4$	655	1,4	[16]
$R5$	844	1,06	[17]
$R6$	1750	1	[8]
$R7$	1540	1	[18]
$R8$	853	1	[18]
$R9$	425	1,28	[3]
$R10$	432	1,52	[1]

Наибольшие проблемы возникают при попытке использовать соотношения (1) для оценки осадков из кучево-дождевых облаков с большими значениями отражаемости, связанными, как правило, с наличием частиц града. В ряде исследований предлагается ограничивать максимальное значение интенсивности осадков. В программе «ГИМЕТ-2010» измерение интенсивности осадков $R1$ ограничивается значением 100 мм/ч. В случае, если интенсивность осадков превосходит этот порог, то указывается, что $R1 > 100$ мм/ч. Аналогичное ограничение вводится и для WSR-88D (США). Для конвективных осадков национальной метеорологической сетью радиолокаторов (WSR-88D) верхний предел отражаемости ограничен значением 53 dBZ [14], что эквивалентно 104 мм/ч в соответствии с формулой (1) с коэффициентами из табл. 1.

Применение радиолокаторов, имеющих поляризационные каналы измерений, расширяет возможности получения информации об осадках высокой интенсивности. По данным С.Ю. Матросова [19] и с учетом работы [20] для расчета R в С-диапазоне радиоволн целесообразно использовать удельную дифференциальную фазу K_{DP} (град/км):

$$R11 = 24,5K_{DP}^{0,85}. \quad (2)$$

Формула (2) предпочтительнее, когда осадки состоят из града и капель. Для случая жидкокапельных осадков предлагается использовать соотношение [21]:

$$R12 = 0,0142Z^{0,77}Z_{dr}^{-1,67}. \quad (3)$$

Приведенные выше формулы использованы при расчете интенсивности осадков ($R1$ – $R12$) для 18 июня 2020 г.

4. Сопоставление интенсивности осадков по радиолокационным данным и измерениям осадкомерной сети

В связи с тем, что интенсивность осадков по измерениям осадкомеров осреднялась за период 10 мин, мгновенная интенсивность осадков могла превосходить анализируемую. Период сканирования радиолокатора составлял 10 мин, таким образом, измерение характеристик облаков выполнялось лишь один раз за этот период. Следовательно, характеристики облаков (максимальная отражаемость, высота верхней границы и др.) могли быть больше анализируемых в настоящей работе.

Результаты расчетов интенсивности осадков по приведенным выше формулам представлены на диаграмме размаха (рис. 1). Показаны распределения рассчитанной максимальной интенсивности осадков ($R1$ – $R12$), а также распределение значений, осредненных за 10 мин по измерениям осадкомеров для тех случаев, когда над приборами проходило дающее осадки облако ($R13$). Из приведенных данных следует, что в большинстве случаев рассчитанные интенсивности осадков значительно превосходят те, которые были получены по измерениям осадкомеров. Значения $R1$ – $R10$ (см. табл. 1), для которых исходной величиной является максимальное значение отражаемости на высоте 600 м, менялись в пределах от десятков до тысяч мм/ч. Исключением является распределение $R12$, здесь получены меньшие по сравнению с осадкомерными наблюдениями интенсивности осадков. Это подтверждает, что формула (3) непригодна для оценки осадков высокой интенсивности, в которых присутствуют ледяные частицы. Из диаграммы также следует, что для распределений $R2$, $R3$, $R5$ – $R9$ большая часть полученных значений интенсивности осадков превосходит

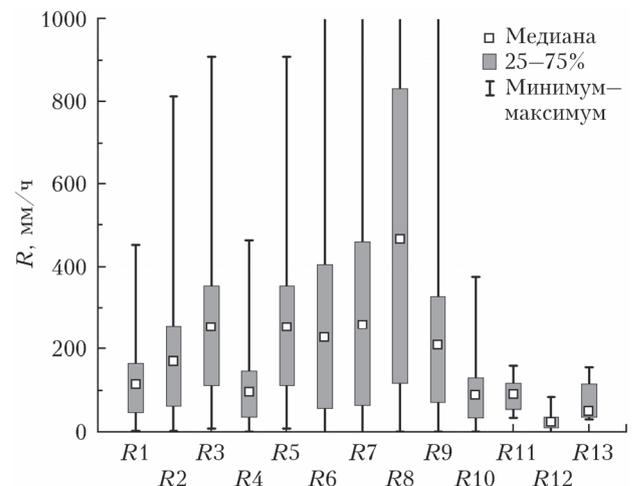


Рис. 1. Распределения рассчитанных интенсивностей осадков $R1$ – $R12$ и интенсивности осадков $R13$ по измерениям осадкомеров

ходит 200–300 мм/ч, что, видимо, является верхним пределом для рассматриваемого дня. В этой связи соотношения (1) и (3) также нельзя рекомендовать для расчета таких осадков, так как в случае их применения интенсивность осадков является завышенной.

Среднеквадратическое отклонение для распределений $R1–R10$ менялось в широких пределах: от 86 ($R10$) до 936 ($R8$), указывая на большой разброс значений. Среднеквадратическое отклонение для $R11$ и $R13$ составило 34 и 43. Максимальное значение интенсивности осадков по формуле (2) было равно 160 мм/ч, а по измерениям осадкомеров – 156 мм/ч.

Был определен коэффициент корреляции между измеренной интенсивностью осадков ($R13$) и рассчитанными значениями ($R1–R12$). Выбран ранговый коэффициент корреляции Спирмена в связи с тем, что анализируемые выборки не подчинялись нормальному закону распределения.

Результаты расчетов показали отсутствие корреляции между рассматриваемыми величинами $R1–R10$ и $R13$. Обнаружены корреляционные связи $R13$ с $R11$ и $R12$. Коэффициенты корреляции значимы ($p < 0,05$, p – уровень значимости) и равны 0,74, и 0,56 соответственно. Выше было показано, что расчеты с использованием формулы (3) существенно занижают интенсивность осадков, поэтому эти данные далее не рассматриваются.

Наибольший коэффициент корреляции (0,74) был получен для $R11$, которая вычислялась с использованием измерений $K_{ДР}$. Эта методика расчета рекомендована при наличии града [22].

Столь большой коэффициент корреляции оказался несколько неожиданным, учитывая тот факт, что область наибольшей интенсивности осадков из конвективных облаков имеет весьма ограниченные горизонтальные размеры. Это уменьшает вероятность ее попадания на осадкомер.

Рассмотрим отношение $R11/R13$, которое характеризует расхождения между измерениями осадков по формуле (2) и данными осадкомеров. В 73% случаев оно находится в пределах 0,8–1,8, что указывает на достаточно хорошее соответствие данных. В 10% случаев оно лежит в пределах 0,4–0,8, и в 17% – в пределах 1,8–2,8. Отсюда следует достаточно важный вывод о том, что в случае вычисления интенсивности осадков по формуле (2) максимальные значения на отдельных участках выбранной территории могут существенно отличаться от измеряемых осадкомерами по причинам, отмеченным выше.

Таким образом, полученные данные указывают на то, что столь интенсивные осадки целесообразно рассчитывать, используя $K_{ДР}$ в качестве измеряемой радиолокационной характеристики.

5. Микрофизическая структура облаков

Рассмотрим строение облаков в период, когда наблюдались наиболее интенсивные осадки по измерениям осадкомеров. В качестве примера на

рис. 2 (цв. вкладка) представлены вертикальные сечения двух кучево-дождевых облаков, располагавшихся над осадкомерами вблизи г. Ломоносова. Сечения сделаны перпендикулярно направлению движения облаков. Данные о микрофизическом строении облаков получены по результатам поляризационных измерений по методике, изложенной в [23]. За время одного радиолокационного обзора количество осадков из облака № 1 (рис. 2, а), измеренное осадкомером, составило 21,1 мм, т.е. $R = 126$ мм/ч. На рис. 2, б представлено строение облака № 2; количество осадков, зафиксированное осадкомером, было равно 19,6 мм, т.е. $R = 117$ мм/ч.

Из рис. 2 следует, что в верхней части облаков располагались ледяные частицы различной формы и плотности. Значительный объем облака занимали частицы града, их верхняя граница располагалась на высоте ~ 10 км. Град фиксировался ниже по всему облаку вплоть до земной поверхности (рис. 2, б). Таким образом, осадки включали и градовые частицы, что также регистрировалось многочисленными наземными наблюдениями. Частицы крупы располагались в основном выше нулевой изотермы, занимая значительный объем облака. Ниже нулевой изотермы регистрировалась зона осадков, с горизонтальной протяженностью, превосходящей 10 км. Можно предположить, что интенсивность осадков была наибольшей в центральной части облака, при этом осадки состояли из дождевых капель и града. По-видимому, жидкокапельные осадки в значительной степени были связаны с таянием и выпадением частиц крупы и града. Этот вывод подтверждается результатами китайских ученых [24], которые при исследовании кучево-дождевого облака, формирующего экстремальные осадки, также выделяют особую роль крупы и града.

6. Статистические характеристики облаков

Анализ результатов радиолокационных измерений высоты верхней границы облаков показал, что она менялась в широких пределах, превышая в некоторых случаях 20 км. Эти измерения (при большой отражаемости) являются ненадежными из-за влияния боковых лепестков диаграммы направленности [11]. Как было указано ранее, верхняя граница облаков, по данным радиозондовых и спутниковых наблюдений, располагалась на высоте 12,5–12,8 км, что для рассматриваемой территории является достаточно редким явлением.

Данные об основных характеристиках облаков представлены в табл. 2 и на рис. 3. Отражаемость облаков превышала 52 дБZ, максимальное значение составило 65,5 дБZ, медиана – 62,5 дБZ. В работах [25–28] показано, что при $Z > 40$ дБZ наблюдается переход облаков в грозовую стадию. В то же время считается, что при граде максимальная отражаемость превосходит 55 дБZ [29, 30]. Исходя из вышеуказанного можно полагать, что все исследованные облака были грозовыми и почти все из них содержали частицы града (рис. 3, а).

Таблица 2

Основные статистические характеристики облаков

Характеристика	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение
Максимальная радиолокационная отражаемость (Z_m , дБZ)	60,6	62,5	52,5	65,5	3,9
Высота области максимальной отражаемости (H_{Z_m} , км)	2,8	2,4	1,1	5,8	1,5
$R11$, мм/ч	85	91	34	160	34
$R13$, мм/ч	74	51	31	156	43
Объем переохлажденной части облака (V_{50} , км ³)	244	174	0,34	718	233
Площадь облака (S , км ²)	92	62	1,1	290	85
Отношение объемов облака с градом и крупой (V_H/V_{GR})	0,21	0,15	0	0,93	0,24
f , мин ⁻¹	2,2	1,9	0,10	7,0	2,2

Медиана высоты максимальной отражаемости H_{Z_m} равна 2,4 км (рис. 3, б), что соответствует температуре 8,0 °С. В 72% случаев высота области максимальной отражаемости была меньше высоты нулевой изотермы. Таким образом, наибольшая отражаемость регистрировалась в зоне осадков, а также в области таяния гидрометеоров, где ледяные частицы покрывались водяной пленкой, следовательно, возрастала диэлектрическая проницаемость частиц, что приводило к увеличению отражаемости [7].

Расчеты с использованием соотношения $R11$ показали, что максимальная интенсивность осадков находилась в пределах 34–160 мм/ч (рис. 3, д; табл. 2). Медиана составила 91 мм/ч. Согласно измерениям осадкомеров ($R13$) интенсивность осадков находилась в пределах 31–156 мм/ч, а медиана распределения была равна 51 мм/ч. При этом значения $R13$ осреднялись за период 10 мин. Учитывая особенности измерений осадкомерами, можно

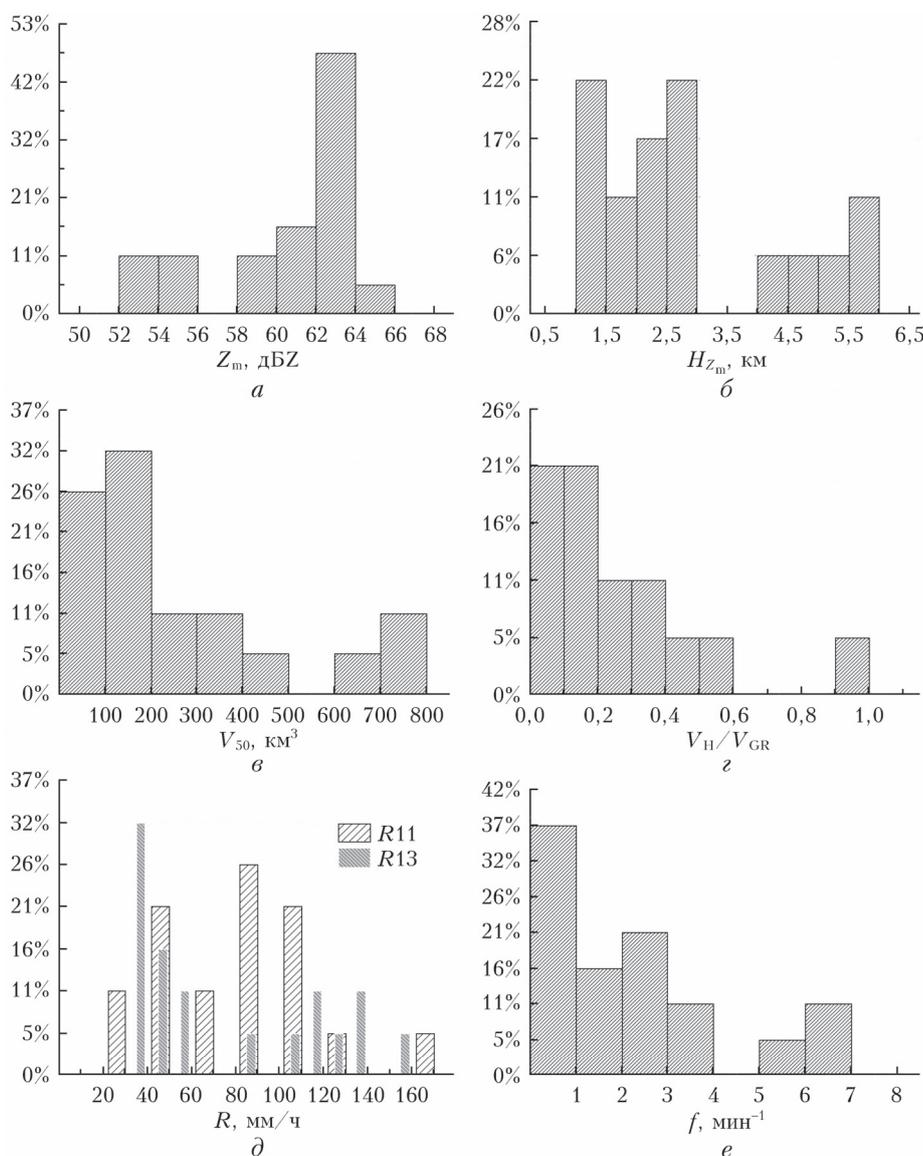


Рис. 3. Гистограммы распределения основных характеристик облаков и осадков: а – Z_m ; б – H_{Z_m} ; в – V_{50} ; г – V_H/V_{GR} ; д – R ; е – f

полагать, что при столь интенсивном развитии облаков максимальная интенсивность осадков в исследуемом регионе может быть больше, чем 160 мм/ч.

Радиолокационный объем области с отражаемостью более 50 дБZ не превышал 718 км³, медиана распределения была равна 174 км³. Площадь облака по указанному значению отражаемости не превышала 290 км², медиана составила 62 км². Необходимо отметить, что как площадь, так и объем облаков весьма значительны (см. рис. 3, в).

По методике [23] рассчитывались микрофизические характеристики облака. На рис. 3, г приведено отношение объема облака, занятого градом, к объему, занятому крупой V_H/V_{GR} . Медиана распределения равна 0,15 (см. рис. 3, з).

Диапазон частот молний составил 0,1–7,0 мин⁻¹; медиана – 1,9 мин⁻¹ (табл. 2, рис. 3, е). Наши более ранние работы по исследованию частоты молний в рассматриваемом регионе показали, что медиана распределения равна 1,4 мин⁻¹ [26]. Таким образом, результаты измерений в данной работе соответствуют тем, которые были получены ранее.

Были выполнены расчеты коэффициента корреляции (Спирмена) между частотой разрядов и остальными характеристиками. Коэффициенты корреляции оказались значимы ($p > 0,05$) для следующих характеристик: R_{11} (0,72), R_{13} (0,71) и объема облака выше нулевой изотермы, содержащего крупу (0,53). Достаточно сильная корреляционная связь между частотой электрических разрядов и объемом облака с крупой фиксировалась ранее [21]. Большие коэффициенты корреляции между частотой разрядов и интенсивностью осадков фиксируются нами впервые для данного региона, хотя связь между этими характеристиками отмечалась в ряде зарубежных исследований [31]. Возможно, столь высокий коэффициент корреляции является следствием того, что рассматриваются лишь интенсивные осадки, которые сформировались в значительной степени за счет таяния ледяных частиц, в том числе града. Вероятно, ледяные частицы играют важную роль в электризации облаков в исследуемом районе.

Заключение

Исследованы характеристики 19 облаков, из которых выпадали очень интенсивные осадки, зафиксированные осадкомерами в Санкт-Петербурге и окрестностях 18 июня 2020 г. Использовались данные измерений радиолокатора ДМРЛ-С, весовых осадкомеров Pluvio² 200 и грозопеленгационной системы Blitzortung.

Проанализирована обоснованность использования формул для расчета интенсивности осадков,

применяемых при радиолокационных измерениях. Сравнение с данными осадкомеров показало, что интенсивность осадков, определенная по формулам, использующим разные модификации соотношения Маршалла–Пальмера, не коррелирует с измерениями осадкомеров в случае, когда интенсивность осадков превышает 30 мм/ч, а осадки содержат частицы града.

Впервые выполнены оценки интенсивности осадков на основе измерений удельной дифференциальной фазы при поляризационных измерениях с помощью радиолокатора ДМРЛ-С для рассматриваемого района. Установлено, что коэффициент корреляции между интенсивностью осадков, получено из измерений дифференциальной фазы, и осадкомерных измерений является наибольшим по сравнению с другими методами. Это подтверждает ранее сделанный вывод о том, что данный метод является оптимальным при измерениях осадков, содержащих жидкие капли и град [22].

Установлены радиолокационные характеристики облаков: верхняя граница облаков была выше 12 км, максимальная отражаемость была больше 52 дБZ, максимальная интенсивность осадков могла превышать 160 мм/ч. В большинстве случаев высота области максимальной отражаемости была меньше высоты нулевой изотермы, т.е. наибольшие значения отражаемости регистрировались в зоне осадков, а также в области таяния гидрометеоров. В верхней части облаков располагались ледяные частицы различной формы и плотности, включая крупу. Град определялся вплоть до высоты 10 км. Осадки состояли из смеси жидкокапельных и градовых частиц.

Все исследованные облака были грозовыми. Отмечено наличие высокой корреляции между частотой электрических разрядов (молний) и интенсивностью осадков.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (грант № 22-27-20031) и Санкт-Петербургского научного фонда (соглашение № 58/2022 от 15 апреля 2022 г.).

Список литературы

1. Краус Т.В., Синькевич А.А., Гхулам А.С. Измерение осадков большой интенсивности дистанционными методами // Метеорол. и гидрол. 2012. № 7. С. 15–27.
2. Краус Т.В., Синькевич А.А., Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Степаненко В.Д. Исследование развития сверхмощного кучево-дождевого облака (провинция Андра Прадеш, Индия, 28 сентября 2004) // Метеорол. и гидрол. 2007. № 1. С. 30–42.
3. Bao X.W., Wu L.G., Zhang S., Li Q., Lin L., Zhao B., Wu D., Xia W., Xu B. Distinct raindrop size distributions of convective inner- and outer-rainband rain in Typhoon Maria (2018) // J. Geophys. Res.: Atmos. 2020. V. 125, N 14. P. e2020JD032482. DOI: 10.1029/2020JD032482.

4. *Blanchard D.C.* Raindrop size-distribution in Hawaiian rains // *J. Meteorol.* 1953. V. 10, N 6. P. 457–473. DOI: 10.1175/1520-0469(1953)010<0457:RSDIHR>2.0.CO;2.
5. *Zhao D., Gao W., Xu H., Yu Yu., Chen L.* A modeling study of cloud physical properties of extreme and non-extreme precipitation in landfalling typhoons over China // *Atmos. Res.* 2022. V. 277. DOI: 10.1016/j.atmosres.2022.106311.
6. *Zhang S., Bao X., Wu L., Yuan H.* Dual-polarization radar retrieval during Typhoon Lekima (2019): Seeking the best-fitting shape-slope relationship depending on the differential-horizontal reflectivity relationship // *Atmos. Res.* 2022. V. 267. DOI: 10.1016/j.atmosres.2021.105978.
7. *Степаненко В.Д.* Радиолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 343 с.
8. *Wang Hao, Yan Yilin, Long Keji, Qingqing Chen, Xingang Fan, Fugui Zhang, Linyin Tan.* Relationships between rapid urbanization and extreme summer precipitation over the Sichuan–Chongqing area of China // *Front. Earth Sci.* 2022. V. 10. DOI: 10.3389/feart.2022.909547.
9. *Чернокульский А.В., Елисеев А.В., Козлов Ф.А., Коршунова Н.Н., Курганский М.В., Мохов ИИ., Семенов В.А., Швець Н.В., Шихов А.Н., Ярынич Ю.И.* Опасные атмосферные явления конвективного характера в России: наблюдаемые изменения по различным данным // *Метеорол. и гидрол.* 2022. № 5. С. 27–41.
10. *Синькевич А.А., Куров А.Б., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Веремеи Н.Е.* Исследование характеристик грозных облаков на северо-западе России с использованием нейронных сетей // *Оптика атмосф. и океана.* 2022. Т. 35. № 12. С. 1008–1014.
11. *Павлюков Ю.Б., Корнев Д.П., Травов А.В.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018665447 Российская Федерация. Программный комплекс вторичной обработки информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С (шифр «ГИМЕТ-2010») версия 02, № 2018662687, заявл. 13.11.2018, опубл. 05.12.2018; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение «ЦЕНТРАЛЬНАЯ АЭРОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ» (ФГБУ «ЦАО»).
12. *Marshall J.S., Palmer W.M.* The distribution of raindrops with size // *J. Meteorol.* 1948. V. 5, N 5. P. 165–166. DOI: 10.1175/1520-0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2.
13. *Marshall J.S., Langille R.C., Palmer W.M.* Measurement of rainfall by radar // *J. Meteorol.* 1947. V. 4, N 6. P. 186–192. DOI: 10.1175/1520-0469(1947)004<0186:MORBR>2.0.CO;2.
14. *Fulton R.A., Breidenbach J.P., Seo D.J., Miller D.A.* The WSR-88D rainfall algorithm // *Weather Forecast.* 1998. V. 13, N 2. P. 377–395. DOI: 10.1175/1520-0434(1998)013<0377:TWRA>2.0.CO;2.
15. *Lang J.L., Barros A.P.* An investigation of the onsets of the 1999 and 2000 monsoons in central Nepal // *Mon. Weather Rev.* 2002. V. 130, N 5. P. 1299–1316. DOI: 10.1175/1520-0493(2002)130<1299:AIOTOO>2.0.CO;2.
16. *Morin E., Maddox R.A., Goodrich D.C., Sorooshian S.* Radar Z–R relationship for summer monsoon storms in Arizona // *Weather Forecast.* 2005. V. 20, N 4. P. 672–679. DOI: 10.1175/WAF878.1.
17. *List R.A.* Linear radar reflectivity – rainrate relationship for steady tropical rain // *J. Atmos. Sci.* 1988. V. 45, N 23. P. 3564–3572. DOI: 10.1175/1520-0469(1988)045<3564:ALRRRF>2.0.CO;2.
18. *Uijlenhoet J., Smith A., Steiner M.* The microphysical structure of extreme precipitation as inferred from ground-based raindrop spectra // *J. Atmos. Sci.* 2003. V. 60, N 10. P. 1220–1238. DOI: 10.1175/1520-0469(2003)60<1220:TMSOEP>2.0.CO;2.
19. *Matrosov S.Y., Cifelli R., Kennedy P.C., Nesbitt S.W., Rutledge S.A., Bringi V.N., Brooks E.* Martner a comparative study of rainfall retrievals based on specific differential phase shifts at X- and S-band radar frequencies // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2006. V. 23, N 7. P. 952–963. DOI: 10.1175/JTECH1887.1.
20. *Bringi V.N., Chandrasekar V.* Polarimetric Doppler Weather Radar: Principles and Applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 636 p. DOI: 10.1017/CBO9780511541094.
21. *Fehr T., Dotzek N., Höller H.* Comparison of lightning activity and radar-retrieved microphysical properties in EULINOX storms // *Atmos. Res.* 2005. V. 76, N 1–4. P. 167–189. DOI: 10.1016/j.atmosres.2004.11.027.
22. *Giangrande S., Ryzhkov A.* Estimation of rainfall based on the results of polarimetric echo classification // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2008. V. 47, N 9. P. 2445–2462. DOI: 10.1175/2008JAMC1753.1.
23. *Dolan B., Rutledge S.A., Lim S., Chandrasekar V., Thurai M.* A robust C-band hydrometeor identification algorithm and application to a long-term polarimetric radar dataset // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2013. V. 52, N 9. P. 2162–2186. DOI: 10.1175/JAMC-D-12-0275.1
24. *Chen G., Zhao K., Wen L., Yang J., Zheng Yu., Xu F., Lyu F., Sun K., Sun L.* Linking ice-phase microphysics to raindrop characteristics in deep convection: A warm-sector extreme rainfall case study in Eastern China // *Earth Space Sci.* 2023. V. 10. DOI: 10.1029/2022EA002697.
25. *Mosier R.M., Schumacher C., Orville R.E., Carey L.D.* Radar nowcasting of cloud-to-ground lightning over Houston, Texas // *Weather Forecast.* 2011. V. 26, N 2. P. 199–212. DOI: 10.1175/2010WAF2222431.1.
26. *Sin'kevich A., Boe B., Pawar S., Yang J., Abshaev A., Dougaluk Yu., Gekkieva J., Gopalakrishnan V., Kurov A., Mikhailovskii Yu., Toropova M., Veremei N.* Investigation of thundercloud features in different regions // *Remote Sens.* 2021. V. 13, N 16. DOI: 10.3390/rs13163216.
27. *Vincent B.R., Carey L.D., Schneider D., Keeter K., Gonski R.* Using WSR-88D reflectivity data for the prediction of cloud-to-ground lightning: A central North Carolina study // *Natl. Weather Dig.* 2003. V. 27, N 1. P. 35–44.
28. *Yang Y.H., King P.* Investigating the potential of using radar echo reflectivity to nowcast cloud-to-ground lightning initiation over southern Ontario // *Weather Forecast.* 2010. V. 25, N 4. P. 1235–1248. DOI: 10.1175/2010WAF2222387.1.
29. *Инюхин В.С., Макитов В.С., Куцев С.А.* Радиолокационные исследования формирования и развития

градовых очагов в мощных конвективных облаках // Метеорол. и гидрол. 2017. № 7. С. 103–111.

30. *Методические указания по производству метеорологических радиолокационных наблюдений на ДМРЛ-С на сети Росгидромета.* Санкт-Петербург, 2013. 173 с.

31. *Pessi A.T., Businger S.* Relationships among lightning, precipitation, and hydrometeor characteristics over the North Pacific Ocean // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 2009. V. 48, N 4. P. 833–848. DOI: 10.1175/2008 JAMC1817.1.

A.A. Sin'kevich, Yu.P. Mikhailovskii, A.B. Kurov, I.A. Tarabukin, N.E. Veremei, O.A. Dmitrieva, R.E. Torgunakov, M.L. Toropova. **Characteristics of convective clouds producing heavy precipitation in northwest Russia.**

Characteristics of clouds which produced heavy precipitation in St. Petersburg and Leningrad region on June 18, 2020, are considered based on measurements with C-band Doppler radar, Pluvio² 200 weight precipitation gauges, and Blitzortung lightning detection system. To assess the intensity of precipitation, different values of the coefficients in the Marshall–Palmer $Z-R$ ratio are studied. We show that it is reasonable to use the specific differential phase to calculate the precipitation intensity when it exceeds 30 mm/hour and precipitation consists of raindrops and hail.

The top of the clouds exceeded 12 km, the maximal reflectivity was higher than 52 dBZ, the maximal precipitation intensity could exceed 160 mm/hr. A significant volume of a cloud was occupied by hail particles, which were recorded from the earth's surface up to an altitude of 10 km. The highest reflectance was recorded in the precipitation zone, as well as in the hydrometeors melting area. All the clouds under study were thunderstorm. A sufficiently high correlation between the frequency of lightning and the intensity of precipitation is noted. Spearman's correlation coefficient exceeds 0.7.

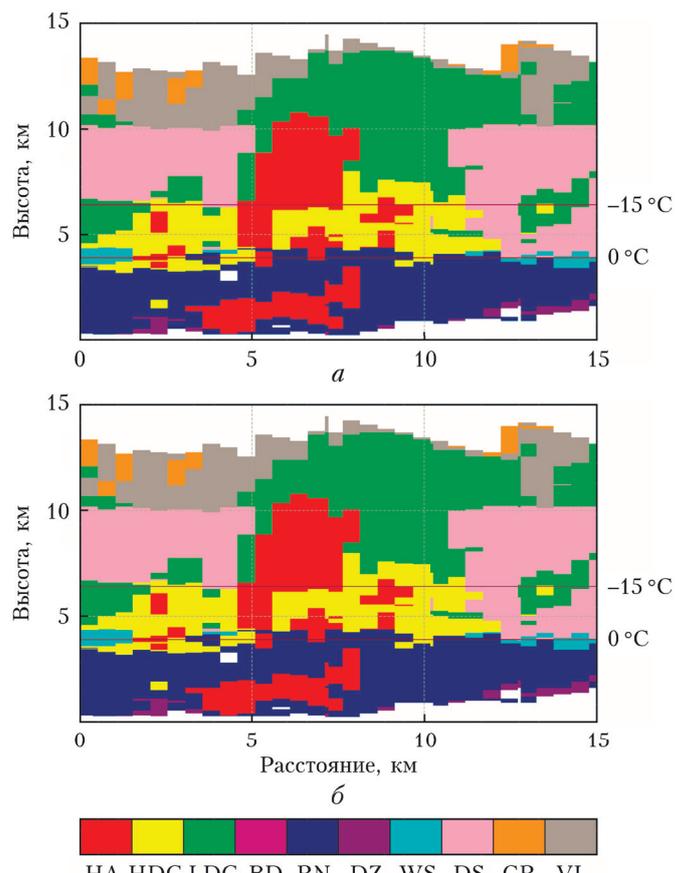


Рис. 2. Распределение на вертикальном радиолокационном сечении облака № 1 (*a*) и облака № 2 (*б*) гидрометеоров: VI – вертикальных ледяных кристаллов, CR – ледяных кристаллов, DS – сухого снега, WS – тающего снега, LDG – крупы с низкой плотностью, HDG – крупы с высокой плотностью, HA – града, DZ – мороси, RN – дождя, BD – больших капель/тающего града