

УДК 551.501.81

Строение и характеристики кучево-дождевого облака во время формирования молний

А.А. Синькевич¹, И.А. Тарабукин¹, М.Л. Торопова^{✉1}, Ю.П. Михайловский¹,
Н.Е. Веремей¹, А.Б. Куров¹, И.Е. Юсупов², Н.В. Бочарников³,
А.С. Лялюшкин³, А.С. Солонин³, Д.С. Старых^{3*}

¹ Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова
194021, г. Санкт-Петербург, ул. Карбышева, 7

² Санкт-Петербургский государственный университет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

³ ООО «ИРАМ»

188685, Ленинградская область, Всеволожский район, пос. Воейково, 15

Поступила в редакцию 19.04.2023 г.;

после доработки 14.06.2023 г.;

принята к печати 2.10.2023 г.

Представлены результаты исследования одиночного грозового облака, которое развивалось в ночное время вблизи побережья Финского залива. С использованием трех метеорологических радиолокаторов, двух грозопеленгационных систем и трехмерной численной модели изучены физические процессы, которые обусловили его электризацию. Показано, что первая молния возникла в период, когда в верхней части облака имелась небольшая область, содержащая частицы крупы. Важнейшую роль в формировании этой области и микрофизической структуры облака оказали восходящие потоки, что показано как по данным радиолокационных наблюдений, так и численного моделирования. Дальнейшее усиление грозовой деятельности было связано с увеличением объема облака с крупой и градом. Анализ величины заряда отдельных облачных фракций по результатам численного моделирования показал, что градины являлись основными носителями отрицательного заряда.

Ключевые слова: грозовое облако, молния, радиолокационные характеристики, численное моделирование, микрофизическая структура; thunderstorm, lightning, radar characteristics, numerical simulation, microphysical structure.

Введение

Наличие грозových разрядов – индикатор того, что в облаке имеют место интенсивные процессы разделения электрических зарядов. Общеизвестным механизмом зарядения облачных частиц является разделение зарядов при взаимодействии ледяных частиц при наличии переохлажденных облачных капель; особую роль в этом процессе играет крупа (ледяные частицы диаметром 2–5 мм) [1].

Экспериментальные исследования показали, что частота молний связана с наличием ледяной фрак-

ции осадков [1, 2]. В большинстве случаев осадки предшествуют разрядам молний [3, 4]. Часто максимум частоты молний отмечается в зрелой стадии развития кучево-дождевых облаков (*Cb*) или в момент перехода к стадии диссипации [3]. Кучево-дождевые облака обычно проходят три стадии жизни: стадию развития, стадию зрелости (когда облако достигает максимального вертикального развития) и стадию диссипации (разрушения).

Отметим, что при разрядах на землю молнии переносят преимущественно отрицательные заряды (отрицательные молнии); в случае переноса положительного заряда их называют положительными. При выпадении града увеличивается частота положительных молний. При смене полярности молний с отрицательной на положительную усиливаются опасные явления, такие как интенсивные ливни, шквалы и град [5].

Заметное влияние на развитие конвективных облаков оказывает поле ветра в атмосфере. Сдвиг ветра играет важную роль в формировании мощных восходящих потоков за счет их пространственного разделения с нисходящими, что способствует увеличению влажности в переохлажденной части

* Андрей Александрович Синькевич (sinkevich51@mail.ru); Иван Алексеевич Тарабукин (tarabukin@mail.ru); Марина Леонидовна Торопова (marina-toropova@mail.ru); Юрий Павлович Михайловский (yurpalych@andex.ru); Николай Евгеньевич Веремей (veremey@gmail.com); Александр Борисович Куров (remotesensing@mail.ru); Игорь Евгеньевич Юсупов (igor_yusupov@mail.ru); Николай Владимирович Бочарников (bnv@iao.ru); Александр Сергеевич Лялюшкин (las@iram.ru); Александр Сергеевич Солонин (sas@iram.ru); Дмитрий Сергеевич Старых (mitya_star@mail.ru).

облака, а также концентрации и размеров ледяных частиц. Это обеспечивает интенсивную электризацию облака [6].

Исследования показывают, что максимум грозовой активности приходится, как правило, на послеполуденные часы [7, 8]. Ночью может наблюдаться интенсификация конвекции, сопровождающаяся развитием гроз и ливней, в районе теплых атмосферных фронтов. Однако имеется весьма ограниченное количество публикаций, посвященных радиолокационным характеристикам ночных гроз [7].

Важным инструментом исследования развития грозовых облаков и процессов электризации являются численные модели, позволяющие получать такие характеристики облаков, которые не измеряются на государственных наблюдательных сетях с достаточно малым пространственным и временным шагом (например, скорость восходящих движений, концентрация облачных частиц, напряженность электрического поля и плотность объемного заряда в облаке) [9].

Цель настоящей работы – на основе результатов радиофизических наблюдений и численного моделирования изучить особенности микрофизического строения конвективного облака в период, когда наблюдались молнии. Особенностью исследуемого случая является то, что изучалось грозовое облако, которое развивалось в ночное время (18–19 июня 2020 г.) в районе пос. Роцино вблизи побережья Финского залива.

1. Материалы и методы исследования

Данные для анализа получены с помощью трех метеорологических радиолокаторов. Первый из них, доплеровский метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С (далее РЛС1), позволяет проводить измерение двух ортогональных поляризованных компонент сигнала и осуществлять доплеровские измерения. Радиолокатор работает на длине волны 5,3 см. Он установлен в пос. Воейково (Ленинградская обл.) в 10 км восточнее Санкт-Петербурга. За 10 мин осуществляются два радиолокационных обзора: во время одного из них измеряются поляризационные характеристики облаков (радиолокационная отражаемость на горизонтальной и вертикальной поляризациях, дифференциальная фаза, коэффициент кросскорреляции), во время другого, помимо поляризационных измерений, получают данные в доплеровском режиме (радиальные скорости и ширины доплеровского спектра радиальных скоростей). Для обработки и визуализации данных ДМРЛ-С применялось программное обеспечение вторичной обработки радиолокационной информации «ГИМЕТ-2010» [10].

Второй радиолокатор – это ДМРЛ METEOR 50DX (далее РЛС2), установленный на здании Российского государственного гидрометеорологического университета в центре Санкт-Петербурга. Он работает на длине волны 3,2 см и позволяет проводить поляризационные и доплеровские измерения. Период обзора составляет 10 мин.

Третий радиолокатор – METEOR 500 (далее РЛС3), установленный в аэропорту Пулковое, Санкт-

Петербург. Период обзора составляет 10 мин. Радиолокатор не поддерживает двойную поляризацию, позволяет осуществлять доплеровские измерения (радиальные скорости и ширины доплеровского спектра радиальных скоростей) и работает на длине волны 5,3 см.

Для обработки и визуализации данных РЛС2 и РЛС3 применялось программное обеспечение вторичной обработки радиолокационной информации «Метеоячейка» [11].

Исходные данные имели разное пространственное разрешение: $1 \times 1 \times 1$ км (РЛС1), $2 \times 2 \times 1$ км (РЛС2) и $4 \times 4 \times 1$ км (РЛС3). Измерения различными РЛС не синхронизированы между собой, т.е. время начала и завершения обзора было различным.

Положение молний определялось с помощью грозопеленгационной системы, в которой используется разностно-дальномерный метод вычисления координат молний. При этом фиксируются преимущественно молнии «облако – земля» [12]. Для тех молний, которые не были зафиксированы в рассматриваемом облаке системой Blitzortung, данные получены с помощью однопунктового грозопеленгатора дальномером ФАГ-2Н [13], что обеспечило уменьшение пропусков их регистрации.

В рамках исследования было выполнено численное моделирование конвективного облака, переходящего в грозовую стадию, при помощи трехмерной нестационарной модели [9]. Данные моделирования применялись для анализа динамики развития основных характеристик облака с малым шагом во времени. Также проанализированы микрофизическая структура облака, пространственное распределение полей заряда в облаке и электрическая структура облака на разных стадиях развития.

В качестве начальных данных численная модель использует вертикальные распределения давления, температуры и влажности в атмосфере; для предварительного исследования неустойчивости атмосферы анализировались данные аэрологического зондирования на ст. Воейково (Ленинградская обл., 03:00 Мск, 19.06.2020 г.), модифицированные с учетом наземных наблюдений в срок развития грозового облака по данным ст. Озерки (индекс 22897). Атмосфера характеризовалась слабым поворотом ветра с высотой и наличием слоя приземной инверсии мощностью 530 м. Верхняя граница тропосферы находилась на высоте 11,2 км. Параметр CAPE (Convective Available Potential Energy) при подъеме частицы от верхней границы инверсии был равен 2139 Дж/кг. При этом уровень конденсации располагался на высоте 1300 м, а уровень нейтральной плавучести – 11,4 км. Таким образом, атмосфера была неустойчива, что соответствовало высокой вероятности развития гроз.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Динамика развития облака

Первое радиоэхо от исследуемого облака было зафиксировано радиолокатором РЛС-1 в 22:37 ВСВ

18.06.2020 г., что соответствует 01:37 по местному времени 19.06.2020 г. Для удобства дальнейшего анализа данный момент времени принимается за начало отсчета (0 мин). В это время облако располагалось на удалении 84 км от радиолокатора и 10 км от побережья Финского залива вблизи пос. Озерки. С учетом юго-западного ветра важнейшим источником водяного пара, который обеспечил формирование облака, мог быть Финский залив. РЛС3 и РЛС2 обнаружили облако на 10-й и 13-й мин соответственно.

Облако активно развивалось, и на 20-й мин его верхняя граница достигла максимальной высоты 12,5 км (РЛС1) (рис. 1). По результатам анализа данных радиозондирования (разд. 1) верхняя гра-

ница тропосферы была равна 11,2 км, следовательно, верхняя граница облака располагалась в тропопаузе. Средняя скорость роста вершины облака составила 5,4 м/с. В течение примерно 20–30 мин облако находилось в зрелой стадии развития, его верхняя граница мало менялась. Начиная с 40–50-й мин оно переходит в стадию диссипации.

Максимальное значение отражаемости Z_{max} в облаке по измерениям всех трех радиолокаторов (рис. 1) возрастает в течение 20–33 мин, в дальнейшем происходит ее уменьшение. По результатам измерений радиолокаторов РЛС1, РЛС3 и РЛС2 $Z_{max} = 61, 59$ и 55 дБЗ соответственно. Отражаемость по измерениям радиолокатора РЛС2 оказалась заметно меньше двух других, что может объясняться измерениями на разных длинах волн, секторами закрытия от городской застройки и (или) погрешностями градуировки. Высота расположения Z_{max} была наибольшей на 10–13-й мин развития, достигая 8 км, далее отмечается ее постепенное уменьшение до 1–2 км к 30-й мин, что указывает на начало выпадения осадков. После 60-й мин вновь происходит увеличение высоты расположения максимума отражаемости $H_{Z_{max}}$, что связано с разрушением облака и отрывом верхней кристаллической части от основания. На 60–76-й мин облако трансформировалось в кристаллические облака верхнего яруса.

2.2. Радиолокационные характеристики облака в период молниевой активности

В общей сложности было зарегистрировано 11 молний: одна на 12-й мин, семь молний в период 16–18-й мин и три молнии на 24–27-й мин. Отметим, что грозовая активность облака наблюдалась на стадии развития и зрелости. Это является особенностью данного случая, так как довольно часто значительная часть молний отмечается в периоды зрелой стадии развития Cb и на стадии диссипации [3]. Частота молний f , осредненная за 10-минутный интервал, составила $0,8 \text{ мин}^{-1}$ (13–23-я мин).

Рассмотрим структуру и характеристики облака: 1) во время регистрации первой молнии; 2) во время максимальной частоты молний; 3) после окончания грозовой активности. Высота вершины облака по измерениям РЛС1 в период грозовой активности находилась в пределах 10,5–12,5 км, а температура на верхней границе облака изменялась от $-52,8$ до $-58,7$ °С. Следовательно, вершина облака имела чисто кристаллическое строение.

Максимальная отражаемость облака при первом разряде составляла 35–37 дБЗ по данным РЛС1 и РЛС2 (таблица). По измерениям РЛС3 (обзор был завершен на 10-й минуте) $Z_{max} = 20$ дБЗ. Далее отмечалось значительное увеличение максимальной отражаемости. По данным измерений радиолокаторами в период, соответствующий максимальной частоте молний, отражаемость была в пределах 44–53 дБЗ. Столь существенное различие в значениях отражаемости обусловлено несовпадением периодов

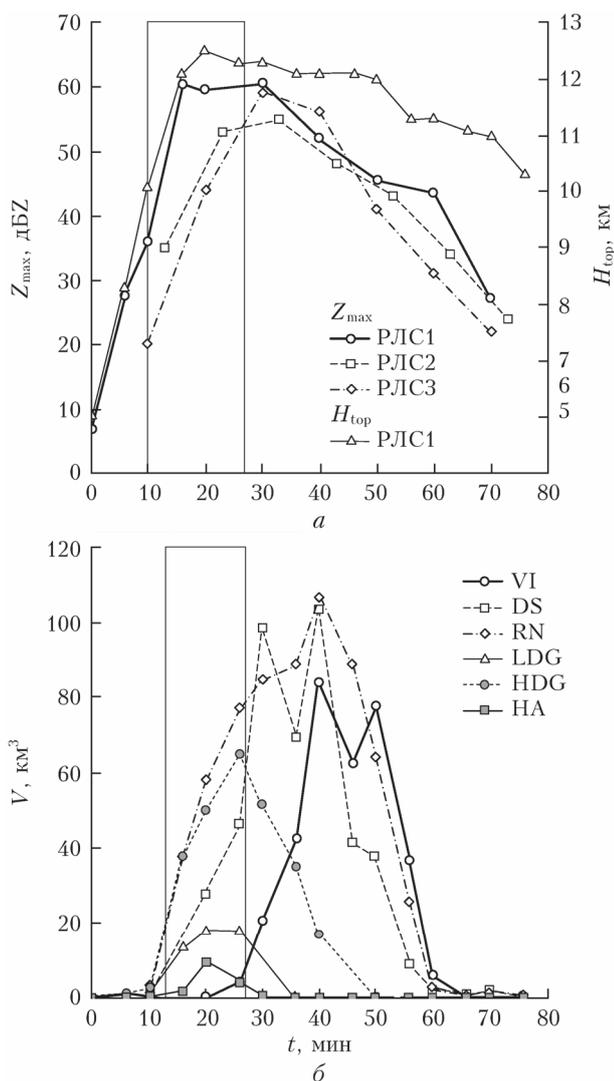


Рис. 1. Изменение во времени максимальной высоты облака H_{top} по данным РЛС1, максимальной отражаемости Z_{max} (а) и объемов облака V (б), расположенных выше нулевой изотермы, со следующими фракциями: VI – вертикально ориентированные кристаллы, DS – сухие снежинки, LDG – крупная низкая плотности, HDG – крупная высокая плотности, HA – град, RN – объем дождя в теплой части облака. Прямоугольником выделено время, когда регистрировались молнии

Радиолокационные характеристики грозового облака во время трех рассматриваемых периодов

| Характеристика | Первый разряд (12-я мин) | | | Максимальная частота разрядов (16–18-я мин) | | | После окончания разрядов (30–33-я мин) | | |
|--------------------|--------------------------|------|------|---|------|------|--|------|------|
| | РЛС1 | РЛС2 | РЛС3 | РЛС1 | РЛС2 | РЛС3 | РЛС1 | РЛС2 | РЛС3 |
| t_{sc} , мин | 10 | 13 | 10 | 16 | 23 | 20 | 30 | 33 | 30 |
| Z_{max} , дБZ | 37 | 35 | 20 | 49,5 | 53 | 44 | 61 | 55 | 59 |
| $H_{Z_{max}}$, км | 7,6 | 8 | 7 | 7,2 | 8 | 7 | 1,3 | 4 | 2 |
| H_{dV35} | 3,8 | 7 | — | 5,5 | 9 | 10 | 4,3 | 9 | 9 |
| $dV35$ | 4,9 | 8 | 0 | 51,8 | 256 | 180 | 68,4 | 236 | 232 |

Примечание. t_{sc} – время окончания скана радиолокатором.

обзоров радиолокаторов, а также недостаточной частотой сканирования для фиксации быстропротекающих процессов в облаке. Через 5–10 мин после окончания разрядов $Z_{max} = 55–61$ дБZ. Следовательно, максимальная частота молний наблюдается ранее момента, когда отражаемость достигает максимального значения. Обращает на себя внимание то, что к этому времени область с большими значениями отражаемости сместилась в нижнюю часть облака, $H_{Z_{max}} = 1,3–4$ км. Эти данные подтверждают сделанный ранее вывод, что при прогнозе грозы необходимо учитывать не только значение Z_{max} , но и высоту расположения этой области. Максимальная частота молний совпадала с периодом, когда $H_{Z_{max}}$ была в пределах от 7 до 8 км (таблица).

Объем переохлажденной части облака $dV35$ (таблица) является важной характеристикой, которая обычно коррелирует с частотой молний [1, 14]. Когда частота молний достигает максимума, наблюдается существенное увеличение указанного объема (на порядок и больше). При этом данная область простирается до достаточно большой высоты $H_{dV35} = 5,5–10$ км. Значения $dV35$, близкие к максимальным, сохраняются еще в течение 5–10 мин после окончания разрядов. Причина может быть связана с прекращением поступления достаточного количества водяного пара и его последующей конденсацией в облачные капли из-за удаления облака от побережья Финского залива. Таким образом, запас облачных капель исчерпывается и далее не возобновляется. Напомним, что переохлажденные капли – необходимая фракция для электризации облака [15].

По данным С.Ю. Матросова [16], с учетом [17], для измерения интенсивности осадков R (мм/ч) в С-диапазоне радиоволн целесообразно использовать удельную дифференциальную фазу K_{DP} (град/км). Формула для расчета интенсивности осадков имеет вид

$$R = 24,5K_{DP}^{0,85}. \quad (1)$$

Из представленных данных с учетом приведенной формулы следует, что максимальная интенсивность осадков была зарегистрирована РЛС1 на 23-й мин и составила 79 мм/ч. Отметим, что первая молния из облака была зарегистрирована на 12-й мин, за 8 мин до момента фиксации осадков радиолокаторами. Таким образом, появление молний предшествовало осадкам.

Характеристики, полученные по данным измерений рассматриваемых радиолокаторов, достаточно сильно отличаются друг от друга. Это, возможно, обусловлено тем, что частота сканирования недостаточно большая, чтобы можно было регистрировать быстропротекающие процессы в облаке. Кроме того, как было отмечено ранее, исходные данные имели разное пространственное разрешение. Различия в пространственном разрешении сказываются на оценках объемов переохлажденной части $dV35$, завышая соответствующие значения при худшем пространственном разрешении.

2.3. Структура облака в период молниевой активности

Микрофизическая структура облака получена по методике [18]. В качестве входных данных были использованы поляризационные характеристики по измерениям РЛС1. Анализ выполнен по данным трех обзоров: завершенных на 10-й мин (регистрация первой молнии, скан 1), 16-й мин (максимальная частота разрядов, скан 2) и 30-й мин (молниевая активность прекратилась, скан 3). Вертикальные сечения с микроструктурой облака, выполненные перпендикулярно направлению движения для выбранных моментов времени, представлены на рис. 2 (цв. вкладка). Для них приводятся также сечения дифференциальной отражаемости и результаты численного моделирования: поля вертикальных скоростей и объемная плотность заряда.

На 10-й мин (скан 1 РЛС1) облако активно развивалось, верхняя граница располагалась на высоте 12,5 км ($-52,8$ °С). Была зарегистрирована одна молния на 12-й мин. В центре облака наблюдался столб дифференциальной отражаемости Z_{dr} , который является индикатором восходящего потока (рис. 2, б) [19]. Его нижняя граница совпадала с нижней границей облака, а верхняя находилась на высоте 6 км. Наличие этого столба связывают с интенсивным восходящим потоком, в котором крупные капли сплющиваются в горизонтальной плоскости, увеличивая тем самым отражаемость при горизонтальной поляризации сигнала [19]. Выше нулевой изотермы по сечению облака регистрируются кристаллические частицы (рис. 2, а). В верхней части между изотермами $-17,9$ и $-27,3$ °С располагается достаточно узкая область, содержащая частицы крупы. Ее объем составляет $1,7$ км³. Эта зона находилась непосредственно над столбом диф-

ференциальной отражаемости, и ее возникновение может быть связано с наличием восходящего потока, который переносил крупные жидкие капли из нижней в верхнюю часть облака. При столкновении со снежной крупой и кристаллами они формировали ледяную крупу. Это подтверждается рис. 2, а, где вблизи изотермы -15°C располагается очаг формирования крупы высокой плотности. Электризация рассматриваемой области могла происходить за счет контактной электризации при взаимодействии кристаллов с крупой при наличии переохлажденных капель воды [19]. В нижней части облака фиксируется зона осадков, которые не достигли подстилающей поверхности. Имеется также небольшая область с моросью. Этот вид осадков обычно характерен для слоистообразных облаков. Возможно, в данном случае наблюдались небольшие дождевые капли, которые ошибочно отнесены к мороси в методике [18].

По результатам численного моделирования при появлении первой молнии вертикальная скорость была равна 18 м/с (рис. 2, в), а максимальная радиолокационная отражаемость — $62,1\text{ дБЗ}$. Зарядовая структура облака имела трехполюсный вид (положительный заряд в вершине облака и в зоне осадков, отрицательный в промежутке между ними). Однако пространственное распределение этих зарядов отличалось от классического. Так, максимум положительного заряда в вершине облака оказался по модулю в несколько раз меньше, чем аналогичный максимум отрицательного заряда. Область отрицательного заряда оказалась достаточно малой мощности, а слой нижнего положительного заряда, напротив, занимал по высоте до 3 км (рис. 2, г). Анализ величины заряда отдельных облачных фракций показал, что градины в рассматриваемый момент являются основным носителем отрицательного заряда (наибольшие по модулю значения расположены на высоте $5,7\text{ км}$).

Период обзора радиолокатора, наиболее близкий ко времени достижения максимальной частоты разрядов, был завершен на 16-й мин (скан 2). В течение 2 мин по его завершению было зарегистрировано семь молний. Верхняя граница облака располагалась в тропопаузе ($12,1\text{ км}$), температура вершины была $-53,7^{\circ}\text{C}$. Существенно увеличилась область, где присутствовали частицы крупы (рис. 2). В верхней части также фиксируются более крупные ледяные частицы, которые были отнесены к частицам града (между изотермами $-13,6$ и $-37,1^{\circ}\text{C}$). Можно считать, что значительный объем крупных ледяных частиц стал источником существенной электризации облака в соответствии с механизмом, отмеченным выше. В нижней части облака располагается обширная область осадков, которые в это время уже выпадают на подстилающую поверхность.

В период времени, совпадающего с максимальной частотой разрядов, отражаемость в облаке по результатам моделирования достигла $62,2\text{ дБЗ}$. При этом значение скорости восходящего потока составило 16 м/с , наблюдалось формирование нис-

ходящих движений, наиболее выраженных в подветренной части облака (рис. 2, ж). Качественный вид зарядовой структуры облака сохранился (рис. 2, з). Отмечено смещение области наибольших концентраций градин и дождевых капель ближе к основанию облака, что указывает на формирование осадков.

Известно явление, которое в западной литературе носит название «скачок молний» (lightning jump, LJ) [20, 21]. В некоторых мощных кучево-дождевых облаках внезапно генерируется большое количество молний, их частота заметно увеличивается в определенный момент времени. В рассматриваемом случае существенное возрастание частоты молний произошло на $16\text{--}18\text{-й}$ мин. Условно это усиление грозовой активности можно отнести к явлению LJ, хотя обычно частота молний при этом явлении заметно больше.

Во время скана 3 облако находилось в зрелой стадии развития (рисунок не приводится). Верхняя граница располагалась на высоте $12,3\text{ км}$ ($-53,3^{\circ}\text{C}$). Произошли существенные изменения в строении облака по сравнению с предыдущим периодом. Заметно уменьшилась область, занятая крупными ледяными частицами. Область с градом сместилась в нижнюю часть облака, сформировав обширную зону осадков. При этом разрушается столб дифференциальной отражаемости, что указывает на ослабление восходящих движений и прекращение поступления новых порций облачных капель в верхнюю часть облака. Следовательно, исчезают условия для электризации облака.

По данным моделирования из облака продолжали выпадать осадки, их интенсивность равнялась 24 мм/ч . Скорость восходящих потоков уменьшилась до 13 м/с . Область облака с преобладанием сильных восходящих потоков также заметно уменьшилась. Скорость нисходящих потоков достигала 12 м/с в подоблачной зоне выпадения осадков. Максимальная радиолокационная отражаемость в облаке составляла $51,2\text{ дБЗ}$, ее экстремум располагался на высоте $3,4\text{ км}$ и был связан с частицами осадков. Положительный заряд в верхней части облака выражен сильнее, чем на предыдущих стадиях.

Одной из причин столь быстрого прекращения грозовой деятельности может быть удаление облака от побережья Финского залива и отсутствие теплых влажных масс воздуха, которые являлись источником облачных капель. Вторая причина может быть связана с тем, что отсутствовал заметный сдвиг ветра в атмосфере, и обусловленный интенсивными осадками появившийся нисходящий поток мог подавить восходящие движения, совпадавшие с ним в пространстве.

Изменение объемов, занимаемых рассматриваемыми фракциями, демонстрируется на рис. 1. Молниевые разряды отмечались в период, когда объемы облака с крупой и градом достигли достаточно больших величин. В отличие от этих фракций существенное увеличение объемов с вертикально ориентированными ледяными кристаллами,

снежинками и дождем происходит заметно позже (на 30–50-й мин). Это косвенно указывает на более важную роль крупы и града в формировании молний по сравнению с другими облачными фракциями.

2.4. Прогноз грозовой активности с помощью программ «ГИМЕТ-2010» и «Метеоячейка»

Обе рассмотренные программы вторичной обработки радиолокационной информации («ГИМЕТ-2010» и «Метеоячейка») используются при оперативной работе для распознавания очагов гроз в поле радиозахвата. По радиолокационным данным для каждой ячейки определяется наличие грозы по четырем интервалам ее вероятности: < 30, 30–70, 70–90, > 90%.

В нашем случае можно сравнить вероятность наличия гроз, рассчитанных по радиолокационным данным, с фактически наблюдаемыми молниями по грозопеленгационным измерениям. Время перехода облака в грозовую стадию (при расчетах по измерениям РЛС1 и РЛС3) совпадает с реальным временем появления молнии. В период максимальной грозовой активности и вплоть до ее окончания на 27-й мин вероятность грозы по данным всех радиолокаторов была более 70%, в большинстве случаев – более 90%. После окончания молниевой активности гроза по радиолокационным данным определялась до 46–53-й мин, т.е. 26 мин, хотя в это время молниевые разряды уже не наблюдались. Это говорит о необходимости усовершенствования алгоритмов в части предупредительности отсутствия явления.

Заключение

Выполнено исследование кучево-дождевого грозового облака, которое развивалось вблизи Финского залива в ночное время. По результатам зондирования трех метеорологических радиолокаторов (ДМРЛ-С, ДМРЛ МЕТЕОР 50DX, ДМРЛ МЕТЕОР 500) и двух грозопеленгационных систем (ФАГ-2Н и Blitzortung) получены значения основных параметров облака в ходе его развития.

Первая молния отмечалась при максимальной радиолокационной отражаемости, равной 35 дБЗ. Максимальная радиолокационная отражаемость была зафиксирована после достижения максимума частоты разрядов, что отличается от данных из других литературных источников.

Данные радиолокационных измерений и численного моделирования показали, что переход облака в грозовую стадию был обусловлен наличием сильного восходящего потока, выделяемого по наличию столба удельной дифференциальной отражаемости (радиолокационные данные) и достигавшего в верхней части облака скорости 18 м/с (результаты численного моделирования). По данным моделирования показано, что облако при переходе в грозовую стадию и во время наиболее интенсивного формирования разрядов имело структуру за-

ряда, отличающуюся от классической: слой нижнего положительного заряда занимал до 3 км.

При первой молнии в верхней части облака между изотермами $-13,6 \div -32,4$ °С обнаружена небольшая область с ледяной крупой объемом около $1,7 \text{ км}^3$. Можно предположить, что взаимодействие частиц крупы с кристаллами при наличии переохлажденных облачных капель в этой области обеспечило электризацию облака. В дальнейшем существенно увеличился объем облака, где присутствовали частицы крупы и града, что привело к интенсификации грозовой активности. Такие результаты подтверждают представления о важной роли ледяной крупы в процессах электризации.

Характеристики, полученные по данным измерений используемых радиолокаторов, достаточно сильно отличаются друг от друга. В первую очередь это относится к максимальной отражаемости от облака, что особенно важно при установлении пороговых значений, соответствующих появлению молний.

Проанализировано распознавание гроз специальным программным обеспечением «ГИМЕТ-2010» и «Метеоячейка». Установлено, что первая молния была зафиксирована в тот же срок, когда в первый раз была определена гроза по радиолокационным данным. В период регистрации молниевых разрядов гроза по радиолокационным данным определялась с вероятностью более 70% и продолжала определяться еще в течение 26 мин после прекращения разрядов. Такие результаты говорят о хорошей предупредительности наличия грозы по радиолокационным данным. Однако необходимо усовершенствовать алгоритм прогнозирования в части отсутствия опасного явления.

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

Список литературы

1. Chang J., Gu J., Ji F., Chang F., Sayit H. Relationship between microphysical properties of convective clouds and lightning activity in a typical thunderstorm in Sichuan Basin // *Pol. J. Environ. Stud.* 2020. V. 30, N 1. P. 571–583. DOI: 10.15244/pjoes/123291.
2. 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: 10.1175/2008JAMC1817.1.
3. Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Матросов С.Ю., Попов В.Б., Снегуров В.С., Снегуров А.В., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е. Связь структуры конвективных облаков с частотой молний по результатам радиофизических измерений // *Метеорол. и гидрол.* 2019. № 6. С. 37–51.
4. Синькевич А.А., Попов В.Б., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Старых Д.С. Характеристики кучево-дождевого облака с водяным смерчем над Ладожским озером по данным дистанционных измерений // *Оптика атмосф. и океана.*

2020. Т. 33, № 2. С. 153–158; *Sin'kevich A.A., Popov V.B., Mikhailovskii Yu.P., Toropova M.L., Dogaulyuk Yu.A., Veremei N.E., Starykh D.S.* Characteristics of cumulonimbus with waterspout over Ladoga Lake from remote measurements // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 4. P. 387–392.
5. *Qie X., Zhang Y.* A review of atmospheric electricity research in China from 2011 to 2018 // *Adv. Atmos. Sci.* 2019. V. 36. P. 994–1014. DOI: 10.1007/s00376-019-8195-x.
 6. *Deierling W., Petersen W.A., Latham J., Ellis S., Christianet H.* The relationship between lightning activity and ice fluxes in thunderstorms // *J. Geophys. Res.* 2008. V. 113, N D15. P. D15210. DOI: 10.1029/2007JD009700.
 7. *Davini P., Bechini R., Cremonini R., Cassardo C.* Radar-based analysis of convective storms over Northwestern Italy // *Atmosphere.* 2012. V. 3, N 1. P. 33–58. DOI: 10.3390/atmos3010033.
 8. *Sun J., Chai J., Leng L., Xu G.* Analysis of lightning and precipitation activities in three severe convective events based on Doppler radar and microwave radiometer over the Central China Region // *Atmosphere.* 2019. V. 10, N 6. P. 298. DOI: 10.3390/atmos10060298.
 9. *Веремей Н.Е., Довгальук Ю.А., Затевахин М.А., Игнатъев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С.* Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака // *Труды ГГО.* 2016. Вып. 582. С. 45–91.
 10. *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, опубл. 05.12.2018; заявитель ФГБУ «ЦАО».
 11. *Автоматизированные метеорологические радиолокационные комплексы «Метеоячейка»* / под ред. Н.В. Бочарникова, Г.Б. Брылева и др. СПб.: Гидрометеоздат. 2007. 238 с.
 12. *Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Веремей Н.Е., Довгальук Ю.А., Синькевич А.А., Янг Дж., Лу Дж.* Динамика электрической структуры кучево-дождевых облаков // *Изв. вузов. Радиофиз.* 2021. Т. 64, № 5. С. 341–353.
 13. *Фазовый анализатор грозоопасности ФАГ-2Н.* URL: <http://www.digital-dragon.ru/products/testing-equipment/thunder-analyser/> (дата обращения: 6.03.2023).
 14. *Xu W., Zipser E.J., Liu C., Jiang H.* On the relationships between lightning frequency and thundercloud parameters of regional precipitation systems // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. P. D12203. DOI: 10.1029/2009JD013385.
 15. *Takahashi T.* Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms // *J. Atmos. Sci.* 1978. V. 35. P. 1536–1548. DOI: 10.1175/1520-0469(1978)035<1536:REAACG>2.0.CO;2.
 16. *Matrosov S.Y., Cifelli R., Kennedy P.C., Nesbitt S.W., Rutledge S.A., Brangi V.N., Brooks E.* 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. P. 952–963. DOI: 10.1175/JTECH1887.1
 17. *Brangi V.N., Chandrasekar V.* *Polarimetric Doppler Weather Radar.* Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 636 p.
 18. *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.
 19. *Kumjian M.R.* Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part II: Warm- and cold-season applications // *J. Operational Meteorol.* 2013. V. 1, N 20. P. 243–264. DOI: 10.15191/nwajom.2013.0120.
 20. *Rigo T., Farnell Barqué C.* Evaluation of the radar echo tops in Catalonia: Relationship with severe weather // *Remote Sens.* 2022. V. 14. P. 6265. DOI: 10.3390/rs14246265.
 21. *Farnell C., Rigo T., Pineda N.* Exploring radar and lightning variables associated with the lightning jump. Can we predict the size of the hail? // *Atmos. Res.* 2018. V. 202. P. 175–186. DOI: 10.1016/j.atmosres.2017.11.019.

A.A. Sin'kevich, I.A. Tarabukin, M.L. Toropova, Yu.P. Mikhailovskii, N.E. Veremei, A.B. Kurov, I.E. Yusupov, N.V. Bocharnikov, A.S. Lalushkin, A.S. Solonin, D.S. Starykh. **Structure and characteristics of a Cb during lightning formation.**

The article studies a single thundercloud that developed at night near the coast of the Gulf of Finland. Using three meteorological radars, two lightning detection systems, and a 3D numerical model, the physical processes that caused its electrification are analyzed. It is shown that the first lightning occurred during the period when there was a small area containing graupel particles in the upper part of the cloud. Updrafts played an important role in the formation of this area and the microstructure of the cloud, as shown both by radar observations and numerical simulation. Further intensification of thunderstorm activity is associated with an increase in the cloud volume with graupel and hail. Analysis of the charge values of individual cloud fractions based on the results of numerical simulation showed that hailstones are the main carriers of the negative charge.

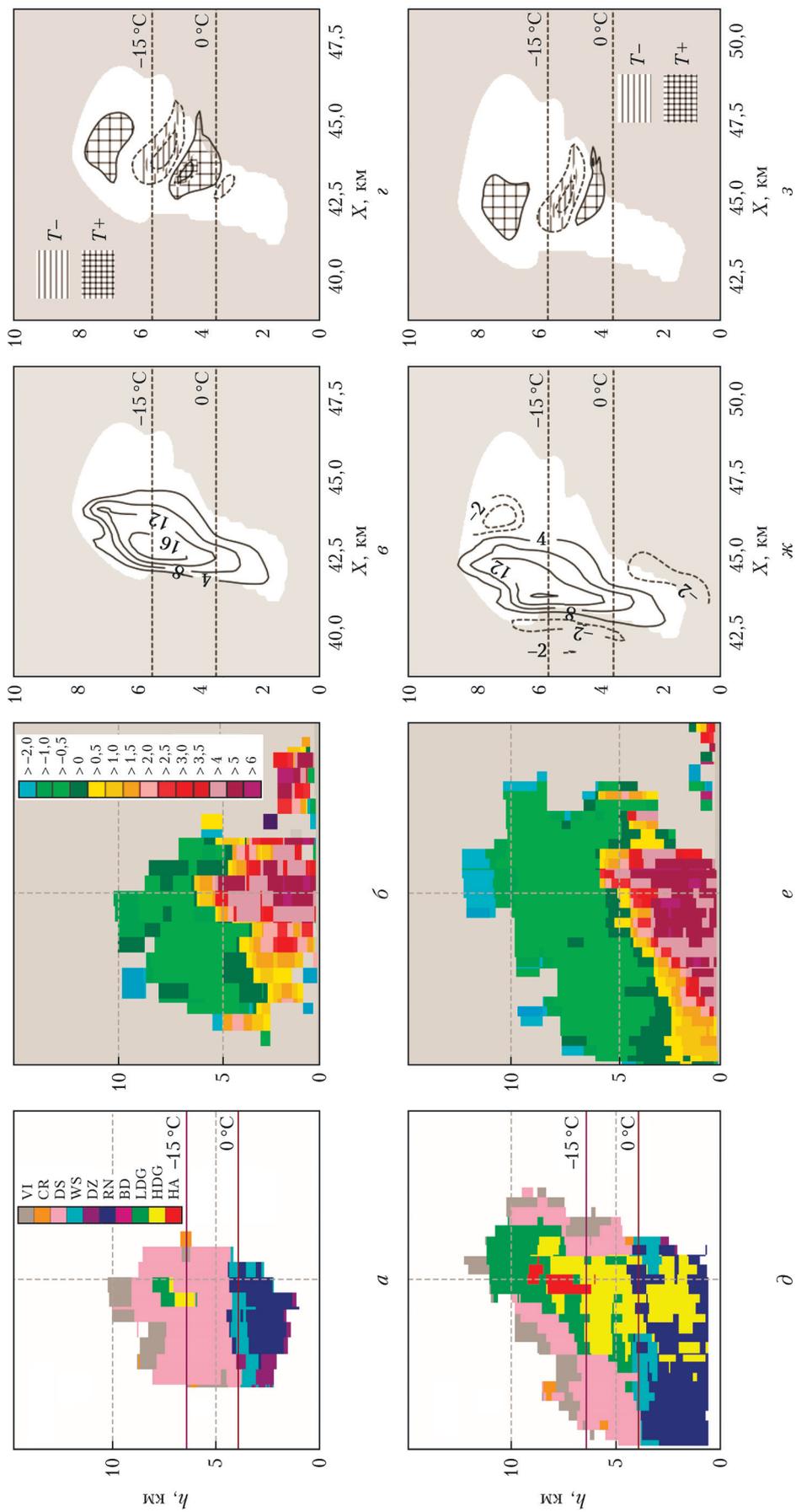


Рис. 2. Микрофизическое строение облака (а, д), дифференциальная отражаемость (б, е), пространственное распределение характеристик облака по данным численного моделирования: скорости восходящих (нисходящих) потоков W (в, ж) и плотности объемного заряда T (з, и) в моменты, соответствующие первой молнии (а–з) и максимальной частоте молний (д–и). Обозначения: VI – вертикальные ледяные кристаллы, CR – ледяные кристаллы, DS – сухой снег, WS – тающий снег, LDG – крупная с низкой плотностью, HDG – крупная с высокой плотностью, HA – град, DZ – морось, RN – дождь, BD – большие капли/тающий град