

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.594.221

Строение грозового облака со смерчем и зависимость частоты молний от его характеристик

А.А. Синькевич¹, Ю.П. Михайловский¹, М.Л. Торопова¹, В.Б. Попов¹,
Д.С. Старых², Ю.А. Довгалюк¹, Н.Е. Веремей^{1*}

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

² ООО «ИРАМ»
188685, Ленинградская обл., Всеволожский р-н, пос. Воейково, 15

Поступила в редакцию 27.04.2020 г.

В настоящей статье обобщены результаты исследования мощного кучево-дождевого грозового облака над акваторией Финского залива. Под нижней границей этого облака наблюдался водяной смерч. В исследовании использованы дистанционные методы наблюдений, рассмотрены общие условия неустойчивости атмосферы, микрофизические и электрические характеристики облака. Обсуждается микроструктура облака и ее связь с частотой разрядов молний. Установлена высокая корреляция между частотой молниевых разрядов и объемом переохлажденной части облака, а также потоком осадков.

Ключевые слова: гроза, облако, электрическое поле, водяной смерч, радиолокация, Метеосат, микрофизика; thunderstorm, cloud, electric field, waterspout, radar, Meteosat, microphysics.

Введение

Развитие мощных кучево-дождевых облаков может привести к возникновению таких опасных явлений, как ливневые осадки, шквал, смерч, град, гроза. Формирование этих явлений тесно связано как с микрофизическими и динамическими, так и с электрическими характеристиками облаков [1]. Важное практическое значение имеют исследования, направленные на изучение связи параметров электрической активности с характеристиками грозовых облаков. В [1–4] показана сильная корреляция между частотой молний, объемом переохлажденной части облака и интенсивностью выпадающих осадков.

Одно из наиболее опасных и разрушительных явлений, связанных с конвективными облаками, — смерч. Скорость ветра в нем может достигать 50–100 м/с при сильной восходящей составляющей и вызывать значительные разрушения. Мощность и продолжительность жизни водяных смерчей меньше, чем континентальных, и это значительно затрудняет их обнаружение и исследование.

В настоящее время активно обсуждаются магнитогидродинамические и электрогидродинамические теории возникновения смерчей [5–8]. Одним из важ-

ных признаков, который подтверждает обоснованность роли электрических сил в формировании и поддержании вращательных движений в смерче, является наблюдаемая в некоторых случаях повышенная электрическая активность облака в период существования смерча в нем.

В настоящей статье анализируется случай образования и развития грозового кучево-дождевого облака (Cb) над Финским заливом с 14:00 по 16:00 ВСВ 12 августа 2018 г. В ходе его эволюции над водой сформировался водяной смерч, наблюдались ливневые осадки. Рассмотрены характеристики Cb и атмосферы, полученные с помощью радиолокатора ДМРЛ-С, радиометра SEVERI, установленного на спутник «Метеосат», грозопеленгационной сети Blitzortung, а также аэрологических наблюдений.

Цель настоящей работы — выявление особенностей микрофизического строения кучево-дождевого облака в начале грозовой деятельности и во время ее максимума, в период существования водяного смерча, а также выявление регрессионных связей радиолокационных и электрических характеристик облака.

Погодные условия и строение атмосферы

В рассматриваемое время состояние атмосферы характеризовалось прохождением фронта окклюзии; Cb находилось в непосредственной близости от точки окклюзии и центра циклона. Такое расположение соответствует одной из наиболее распространенных

* Андрей Александрович Синькевич (sinkevich51@mail.ru); Юрий Павлович Михайловский (yupalych@yandex.ru); Марина Леонидовна Торопова (marina-toropova@mail.ru); Виктор Борисович Попов (qoower@gmail.com); Дмитрий Сергеевич Старых (mitya_star@mail.ru); Юлия Александровна Довгалюк (dovgaluk35@mail.ru); Николай Евгеньевич Веремей (veremey@gmail.com).

ситуаций формирования водяного смерча над акваторией Балтийского моря [9]. Для анализа строения атмосферы и оценки конвективной неустойчивости были рассмотрены данные радиозондирования на ст. Воейково, модифицированные в приземном слое для учета подстилающей поверхности – акватории Финского залива.

Уровень свободной конвекции и уровень конденсации (LCL) совпали по высоте (59 м), давление на этом уровне составило 989 гПа, т.е. нижняя граница облака могла располагаться очень низко (похожая особенность строения атмосферы отмечена нами при рассмотрении Сб со смерчем над Ладожским озером [1]). Уровень выравнивания температур (EL) находился на высоте 8831 м; таким образом, глубина конвекции (толщина конвективно-неустойчивого слоя) составила 8772 м ($EL - LCL$). Общая энергия неустойчивости CAPE (Convective Available Potential Energy) равна 1542 Дж/кг, и такое значение указывает на вероятность развития опасных явлений.

Для изучения условий формирования водяного смерча можно опираться на данные исследования [9], где был рассмотрен и регион Балтийского моря. В нашем случае имеет место большая неустойчивость, чем средние значения в [9]: уровень конденсации располагается значительно ниже, глубина конвекции больше, наблюдается существенная разность температур воды и воздуха на уровне 850 гПа, превышающая 13 °С.

Характеристики кучево-дождевого облака в процессе развития

Рассмотрим изменение характеристик облака за время его существования. За начало отсчета «0 минут» примем 14:00 ВСВ – время, когда впервые появилось радиоэхо. Исследуемое облако просуществовало до 120-й минуты, после чего слилось с несколькими конвективными ячейками. На 20-й минуте зафиксированы первые молниевые разряды, а на 60-й минуте их частота была максимальной. Смерч наблюдался на 80-й минуте. Непосредственно перед наблюдением смерча на 70-й минуте началось слияние рассматриваемого облака с другим Сб, которое завершилось к 80-й минуте.

На рис. 1, а показан временной ход высоты верхней границы исследуемого облака $H_{вг}$ по измерениям радиолокатора ДМРЛ-С и радиометра SEVERI, приводится также частота молний по данным грозопеленгационной системы Blitzortung. Отметим, что результаты измерений частоты молний с использованием этой системы соответствуют частоте молний, регистрируемой грозопеленгационной системой Росгидромета «Алвес» [10].

До начала грозовой активности (0-я и 10-я минуты) $H_{вг}$ не превышала 7,5 км (рис. 1, а), максимальная отражаемость Z_{max} была менее 50 dBZ. На 10-й минуте начинают выпадать ливневые осадки с максимальной интенсивностью ~30 мм/ч. В момент появления первых разрядов (20-я минута) $H_{вг}$

достигает 10 км, $Z_{max} > 60$ dBZ, частота молний $F = 0,6$ мин⁻¹ (рис. 1, а). Начиная с этого момента Сб достигает максимума в своем развитии и переходит в стадию зрелости, находясь в ней все оставшееся наблюдаемое время жизни. На этом временном промежутке $Z_{max} = 53-63$ dBZ; по данным ДМРЛ-С $H_{вг}$ была в пределах от 9,9 до 10,8 км.

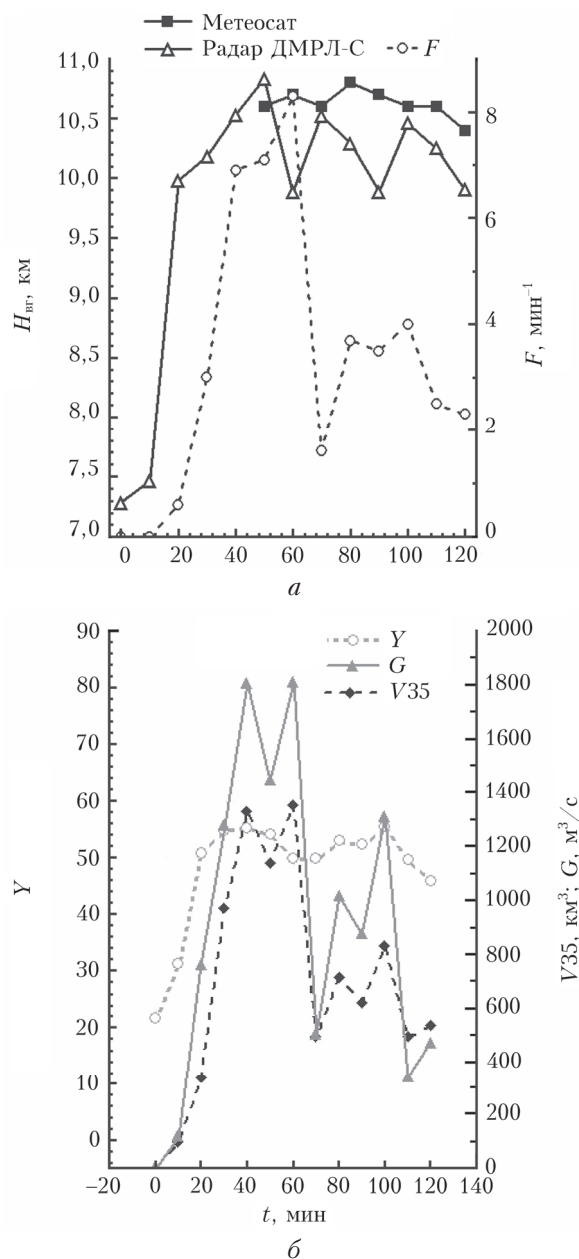


Рис. 1. Временной ход: а – высоты верхней границы облака $H_{вг}$ по данным радиолокатора (радар) и радиометра (MeteorSat) и частоты молниевых разрядов F ; б – радиолокационного критерия грозоопасности Y , объема переохлажденной части облака $V35$ и потока осадков G

В исследуемом районе присутствовали перистые облака с радиационной температурой -46 °С на верхней границе. С 50-й минуты Сб стало достаточно развитым, и его верхняя граница превзошла

высоту верхней границы перистых облаков. По радиометрическим измерениям (с учетом данных радиозондирования) высота его верхней границы была в диапазоне 10,6–10,8 км, а по радиолокационным – 9,7–9,9 км. Эту разницу можно объяснить тем, что облако находилось на расстоянии ~90 км от ДМРЛ-С. На таком расстоянии погрешности радиолокационного метода достаточно большие (среднеквадратическое отклонение измеряемой высоты облаков для ДМРЛ-С – 0,75 км). Погрешность измерения высоты верхней границы кучево-дождевых облаков по данным измерений радиационной температуры прибором SEVERI определяется инструментальной погрешностью самого прибора (0,13 К), методической погрешностью, связанной с тем, что излучение черного тела формируется некоторым слоем облака, а также погрешностью измерений температуры радиозондом. Было показано, что слой, формирующий излучение черного тела, для плотных кучево-дождевых облаков не превосходит 100 м [11]. Погрешность измерения температуры радиозондом близка к 0,5 °С. Таким образом, суммарная погрешность измерения высоты верхней границы плотных кучево-дождевых облаков может быть оценена в ±100 м. С учетом явления параллакса, а также наличия перистой облачности можно полагать, что эта погрешность примерно в 2 раза больше. Аналогичные результаты получены в исследовании [12].

Частота молний на 60-й минуте была максимальной ($F = 8,3 \text{ мин}^{-1}$), а на 70-й минуте происходит ее резкое уменьшение до $1,6 \text{ мин}^{-1}$. Далее,

после слияния облаков, отмечено увеличение F до $3,7 \text{ мин}^{-1}$. Аналогичный эффект регистрировался ранее [13]. Появление смерча (80-я минута) практически не изменило в частоту молний, в отличие от нашей более ранней работы [1]. В момент окончания наблюдений фиксировались разряды с частотой $2,3 \text{ мин}^{-1}$.

Таким образом, повышенная электрическая активность облака наблюдалась за 20 мин до формирования смерча. Частота молний в момент наблюдения смерча была на 55% меньше, чем в пик грозовой активности, что противоречит электрической теории образования опасного вихря [5–8]. Возможно, более существенный вклад в образование смерча внес процесс слияния конвективных ячеек [14, 15].

Микрофизическое строение

Обобщенная упрощенная схема микрофизического строения облака в основные моменты грозовой активности приведена на рис. 2. Схема была составлена на основе анализа вертикальных разрезов поляризационных радиолокационных характеристик исследуемого облака с использованием работ [1, 16].

На 10-й минуте из облака уже выпадали достаточно интенсивные осадки, а в его нижней части были зафиксированы крупные несферические капли дождя и морось (капли осадков диаметром менее 0,5 мм). Выше нулевой изотермы зафиксированы

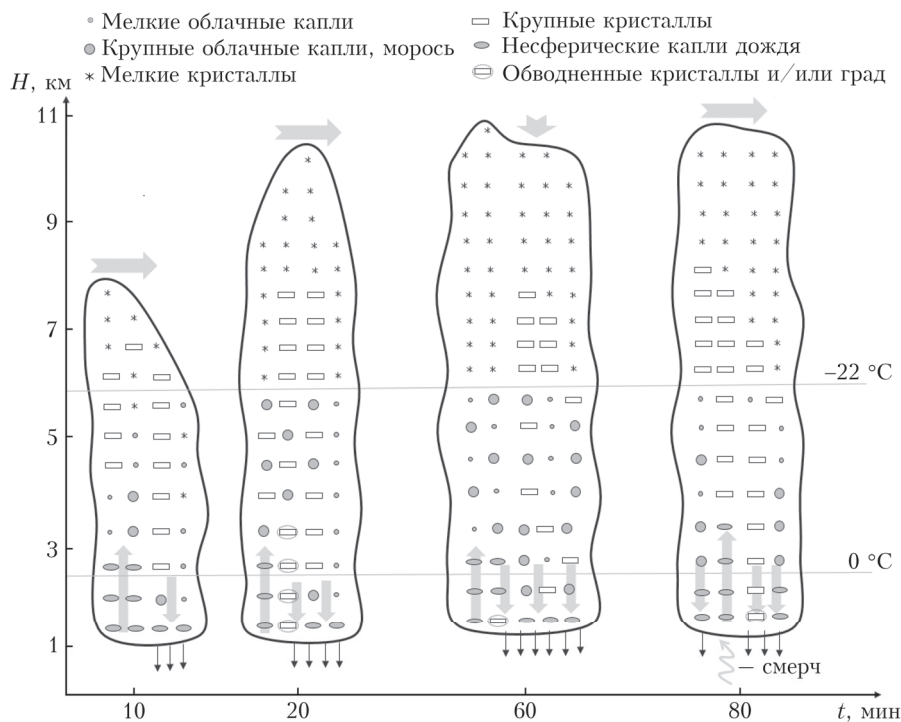


Рис. 2. Упрощенная схема микрофизического строения облака в основные моменты грозовой активности. Стрелки в нижней части облака указывают направления вертикальных потоков; серые стрелки в верхней части схемы – векторы смещения облака

облачные капли, морось, мелкие и крупные кристаллы. Эти фракции фиксировались вплоть до изотермы -22°C . Выше находилась только кристаллическая фракция. Известно, что взаимодействие мелких кристаллов с крупой в присутствии жидкокапельной фракции обеспечивает электризацию облака, что и наблюдалось в рассматриваемом случае. В облаке регистрируется область восходящих и нисходящих движений, последняя связана с выпадающими осадками.

Переход облака в грозовую стадию произошел в период между 10-й и 20-й минутами. Отмечено существенное развитие Сб, высота верхней границы увеличилась более чем на 2 км, достигнув 10 км. Скорость роста вершины была в среднем равна 3,4 м/с. Микрофизическое строение облака на 20-й минуте в основном сохраняется, в верхней части облака регистрируются только мелкие кристаллы. Ниже 8 км появляются крупные кристаллы. В нижней части облака присутствуют обводненные кристаллы, усиливается процесс осадкообразования. Таким образом, сохраняются условия, приводящие к электризации облака. Можно предположить, что сближение частиц осадков с облачными частицами и между собой запускает механизм электризации, обусловленный коронными разрядами [17].

Микроструктура облака в момент максимальной частоты молний на 60-й минуте в целом напоминает микроструктуру, зарегистрированную в момент первых разрядов. Различия состоят в том, что до пика грозовой активности обводненные кристаллы фиксируются в слое от нижней границы до высоты, несколько превышающей уровень нулевой изотермы, видимо, в зоне восходящих движений, а в момент максимальной частоты разрядов эти гидрометеоры обнаружены лишь в непосредственной близости к нижней границе облака.

Отличительная особенность микроструктуры облака в момент наблюдения смерча (80-я минута) заключается в том, что крупные сплюснутые капли, поднимаемые сильным восходящим потоком, связанным со смерчем, наблюдаются до высоты 4 км, а крупные кристаллы регистрируются вплоть до 9 км. Объем переохлажденной части облака с крупными кристаллическими частицами меньше, чем на 60-й минуте (см. рис. 1, б). Это могло стать причиной уменьшения частоты молний в момент наблюдения смерча.

Связь частоты молний с радиолокационными характеристиками

На рис. 1, б представлен временной ход радиолокационных характеристик: объема облака выше нулевой изотермы с отражаемостью более 35 dBZ (V_{35}), потока осадков (G) (объем воды, выпадающий из конвективной ячейки в единицу времени ($\text{м}^3/\text{с}$)), радиолокационного критерия грозоопасности Y , вычисленного по методике, изложенной в [3]. Изменение во времени V_{35} и G происходит доста-

точно синхронно с частотой молний. Максимальный коэффициент корреляции наблюдается между F и V_{35} ($r = 0,95$). Тесная связь присутствует у частоты молний с объемами переохлажденной части с отражаемостями 30 и 35 dBZ ($r = 0,96$ и $0,95$). Похожие результаты были получены ранее при анализе развития Сб как в условиях Северо-Запада, так и для Северо-Кавказского региона [3, 10], однако для облака со смерчем над Ладожским озером [1] эти коэффициенты корреляции были равны лишь 0,66 и 0,62 соответственно.

Из радиолокационных данных, характеризующих осадки, более тесная связь наблюдается у потока осадков с частотой разрядов ($r = 0,90$). Высокий коэффициент корреляции между F и Y , отмечавшийся нами ранее [3], в настоящем эксперименте не установлен.

Для сверхкраткосрочного прогноза формирования водяного смерча особое значение имеют характеристики облака на стадии развития, предшествующей его появлению. Был проведен анализ регрессионных связей исследованных выше параметров отдельно для периода развития и за все время жизни облака. Установлено, что коэффициенты регрессионных уравнений мало меняются. Это может свидетельствовать о том, что вихрь наблюдаемого масштаба не привел к существенному изменению характеристик связей частоты молний с параметрами облака.

Заключение

Исследовано грозовое кучево-дождевое облако с водяным смерчем, наблюдавшееся над Финским заливом. Верхняя граница Сб достигала высоты 10,8 км, а частота молниевых разрядов – 8,3 разряда в минуту, что составляет значительную величину для Северо-Запада РФ.

Анализ микроструктуры облака, полученный из данных доплеровских и поляризационных радиолокационных измерений, показал, что при переходе облака в грозовую стадию в нем присутствовали облачные капли, капли мороси, мелкие и крупные кристаллы. Непосредственно перед возникновением первых разрядов в облаке появляются обводненные градины. В момент максимальной частоты молний обводненные кристаллы обнаружены лишь непосредственно у нижней границы облака, до этого момента они фиксировались вплоть до нулевой изотермы и несколько выше. В момент смерча крупные кристаллы достигают максимальной высоты – 9 км.

Максимальная частота молний наблюдалась за 20 мин до формирования смерча, в момент наблюдения смерча она была на 55% меньше, чем в пик грозовой активности, что не подтверждает электрическую теорию образования опасного вихря.

Подтверждена установленная ранее тесная корреляционная связь между частотой молний и объемом переохлажденной части облака, а также потоком осадков.

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (грант БРИКС_т 18-55-80020). Авторы

статьи выражают признательность Саркисовой Алине за видеофайлы, на которых показан водный смерч (ссылка: <https://www.instagram.com/p/BmYmsqkFTNl/>).

1. Синькевич А.А., Попов В.Б., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Довгальюк 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., Dovgalyuk 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.
2. Liu C., Cecil D.J., Zipser E.J., Kronfeld K., Robertson R. Relationships between lightning flash rates and radar reflectivity vertical structures in thunderstorms over the tropics and subtropics // J. Geophys. Res. 2012. V. 117, N D6. 19 p.
3. Михайловский Ю.П., Синькевич А.А., Павар С.Д., Гопалакришнан В., Довгальюк Ю.А., Веремей Н.Е., Богданов Е.В., Куров А.Б., Аджиев А.Х., Малкарова А.М., Абшаев А.М. Исследования развития грозоградного облака. Часть 2. Анализ методов прогноза и диагноза электрического состояния облаков // Метеорол. и гидрол. 2017. № 6. С. 31–45.
4. 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.
5. Armstrong R.W., Glenn J.G. Electrical role for severe storm tornadogenesis (and modification) // J. Climatol. Weath. Forecast. 2015. V. 3, iss. 3. DOI: 10.4172/2332-2594.1000139.
6. Natyaganov V.L., Maslov S.A. Electromagnetic mechanisms of forming a tornado-like whirlwind // Moscow University Mechan. Bull. 2014. V. 69, N 2. P. 29–34.
7. Maslov S.A. Effect of the atmospheric electric field under a thundercloud on tornado funnel formation // Moscow University Mechan. Bull. 2017. V. 72, N 1. P. 23–27.
8. Синкевич О.А., Маслов С.А., Гусейн-Задес Н.Г. Электрические разряды и их роль в генерации вихрей // Физика плазмы. 2017. Т. 43, № 2. С. 203–226.
9. Sioutas M., Szilagyi W., Keul A. Waterspout outbreaks over areas of Europe and North America: Environment and predictability // Atmos. Res. 2013. V. 123. P. 167–179.
10. Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Матросов С.Ю., Попов В.Б., Снегуров В.С., Снегуров А.В., Довгальюк Ю.А., Веремей Н.Е. Связь структуры конвективных облаков с частотой молний по результатам радиофизических измерений // Метеорол. и гидрол. 2019. № 6. С. 37–51.
11. Руднева Л.Б., Синькевич А.А. Оценка геометрической толщины слоя, формирующего излучение черного тела в облаках различных форм // Тр. ГГО. 1981. Вып. 448. С. 76–85.
12. Randriamampianina R., Nagy J., Balogh T., Kerényi J. Determination of cloud top height using meteorological satellite and radar data // Phys. Chem. Earth. Part B: Hydrol., Oceans and Atmos. 2013. V. 25. P. 1103–1106.
13. Синькевич А.А., Попов В.Б., Тарабукин И.А., Дорофеев Е.В., Довгальюк Ю.А., Веремей Н.Е., Михайловский Ю.П., Снегуров В.С., Снегуров А.В. Изменения характеристик конвективных облаков и выпадающих осадков при слиянии облаков // Метеорол. и гидрол. 2018. № 8. С. 19–32.
14. Lee B.D., Jewett B.F., Wilhelmson R.B. The 19 April 1996 Illinois tornado outbreak. Part II: Cell mergers and associated tornado incidence // Weath. Forecast. 2006. V. 21. P. 449–464.
15. Wurman J., Richardson Y., Alexander C., Weygandt S., Zhang P.F. Dual-Doppler and single-Doppler analysis of a tornadic storm undergoing mergers and repeated tornadogenesis // Mon. Weath. Rev. 2007. V. 135. P. 736–758.
16. Kumjian M.R. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part I: Description of the polarimetric radar variables // J. Operat. Meteor. 2013. V. 1, N 19. P. 226–242.
17. Синькевич А.А., Довгальюк Ю.А. Коронный разряд в облаках // Изв. вузов. Радиофиз. 2014. Т. LVI, № 11–12. С. 1–12.

A.A. Sin'kevich, Yu.P. Mikhailovskiy, M.L. Toropova, V.B. Popov, D.S. Starykh, Yu.A. Dovgalyuk, N.E. Veremei. **Thunderstorm with waterspout structure and lightning frequency dependence from its characteristics.**

The aim of this work is to summarize the results of the study of the development of a high-depth thunderstorm over water area of the Gulf of Finland. A waterspout was observed under the base of the cloud. Remote sensing methods were used in the study. The general conditions of atmospheric instability, microphysical and electrical characteristics of the cloud are considered. Cloud microphysics and its relation with lightning frequency are discussed. High correlation was discovered between the frequency of lightning discharges and supercooled volume of the cloud, as well as precipitation flux.