

УДК 551.501.815:551.515.3

## Характеристики кучево-дождевого облака с водяным смерчем над Ладожским озером по данным дистанционных измерений

А.А. Синькевич, В.Б. Попов, Ю.П. Михайловский, М.Л. Торопова,  
Ю.А. Довгалюк, Н.Е. Веремей, Д.С. Старых\*

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

Поступила в редакцию 1.08.2019 г.

Изучены характеристик грозового кучево-дождевого облака, из которого возник водяной смерч над Ладожским озером. Для исследования использованы результаты измерений метеорологического радиолокатора С-диапазона, грозопеленгационной системы и результаты высотного радиозондирования атмосферы. Анализ индексов конвективной неустойчивости показал малую и умеренную вероятность развития мощных конвективных процессов. Впервые применены алгоритмы классификации гидрометеоров и определения восходящих потоков по данным поляризационных характеристик, полученных радиолокатором ДМРЛ-С. С их помощью обнаружено появление крупных ледяных частиц в начале грозовой активности в облаке и зафиксирован протяженный восходящий воздушный поток, связанный со смерчем. Анализ зависимостей частоты молний от различных радиолокационных характеристик показал, что наиболее тесная корреляционная связь наблюдается с количеством крупных ледяных частиц, характеризуемым объемом переохлажденной части облака (выше изотермы 0 °С) с отражаемостью более 50 дБZ.

*Ключевые слова:* водяной смерч, поляризационный радиолокатор, алгоритм классификации гидрометеоров, восходящие потоки, индексы неустойчивости, частота молний; waterspout, polarimetric radar, hydrometeor classification algorithm, updraft, instability indices, lightning frequency.

### Введение

Смерч — это сильный маломасштабный вихрь под кучево-дождевой облачностью с поднимающейся к облаку осью. Диаметр воронки у поверхности земли может быть от нескольких десятков до нескольких сотен метров, а скорость ветра может достигать 50–100 м/с [1]. Большой интерес представляют условия возникновения и характеристики смерчей в северных широтах, где это явление встречается редко.

Объектом настоящего исследования является водяной смерч, который наблюдался около восточного берега Ладожского озера 6 августа 2018 г. в 18:27 ВСУ (рис. 1). Автор фотографии отмечает, что смерч существовал непродолжительное время и не вышел на сушу. Место съемки — деревня Заостровье Ленинградской обл. Координаты расположения смерча, определенные по данным радиолокатора: 60°17' с.ш., 32°36' в.д.

Для исследования развития облака проанализированы данные, полученные с помощью доплеров-

ского поляризационного радиолокатора ДМРЛ-С, работающего на длине волны  $\lambda = 5,3$  см, и данные о частоте разрядов по измерениям грозопеленгационной системы Blitzortung.



Рис. 1. Смерч над Ладожским озером

### Состояние атмосферы

Смерч сформировался над южной мелководной частью Ладожского озера. Значительное влияние на состояние атмосферы оказал действующий углубляющийся циклон, центр которого находился на северо-востоке относительно Ладожского озера. Рассматриваемая территория располагалась за холодным фронтом этого циклона.

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

Для определения потенциала развития опасных конвективных явлений в атмосфере проведен анализ ее стратификации. Данные по высотному распределению температуры, влажности и прочих характеристик взяты для ближайшей аэрологической станции Воейково (ULLI, 26063) за 12 ч ВСВ. Они модифицированы (в приземном слое) в соответствии с данными GFS (Global Forecasting System); кроме того, введена поправка на влажность над водной поверхностью.

Уровень конденсации находился на высоте 216 м, т.е. нижняя граница облака располагалась очень близко к подстилающей поверхности. Мощность конвективно-неустойчивого слоя составила 8,9 км. Рассмотренная стратификация атмосферы обладает умеренной неустойчивостью. Доступная конвективная потенциальная энергия (CAPE) составила 1451 Дж/кг. Показатели NCAPE (0,16) и CAPE в слое 0–3 км (395 Дж/кг) указывают на неустойчивость атмосферы с вероятным развитием гроз и смерчей. Параметр завихренности атмосферы VGP составил 0,208, что говорит о возможности развития смерчевых процессов. Расчет различных параметров неустойчивости (KINX, SHOW, S-index, SWEAT, TT и др.) показал крайне малую вероятность развития опасных конвективных явлений. На возможное развитие конвективных процессов указывает высота уровня свободной конвекции LFC (939 гПа), LIFT (–5,5), KO-index (–343,5), BRN (50). Об умеренной вероятности формирования гроз говорят значения Jefferson index (23) и Boyden index (95,6).

## Данные о структуре облака и методика их получения

Различия формы, фазового состояния частиц гидрометеоров и их преимущественной ориентации позволяют использовать при радиолокационном наблюдении методы поляризационной селекции для получения дополнительной информации о метеорологических объектах. В настоящее время поляризационные характеристики, измеренные радиолокатором, все чаще применяют для классификации гидрометеоров [2–4].

Большинство алгоритмов их классификации используют полуэмпирический метод, основанный на правилах нечеткой логики, который применяется при измерениях радиолокаторами S-диапазона [2]. Эти алгоритмы должны использоваться с осторожностью при работе в C- и X-диапазонах длин волн, для которых существенные резонансные эффекты и рассеяние Ми могут привести к неоднозначности в классификации. По этой причине алгоритмы классификации на основе нечеткой логики адаптированы для радиолокаторов X- [3] и C-диапазонов [4].

В нашем исследовании для анализа микроструктуры облака применялся отечественный радиолокатор C-диапазона – ДМРЛ-С. Для классификации гидрометеоров использована версия алгоритма нечеткой логики для этого диапазона длин

волн, описанная в [4]. Входные параметры алгоритма: радиолокационная метеорологическая отражаемость в горизонтальной поляризации  $Z_H$ , дифференциальная отражаемость  $Z_{DR}$ , удельный фазовый сдвиг  $K_{DP}$ , коэффициент кросскорреляции  $\rho_{HV}$ , полученные по радиолокационным наблюдениям, и окружающая температура воздуха  $T$ , измеренная высотным радиозондом. На выходе алгоритм присваивает каждому радиолокационному объему один из десяти классов гидрометеоров: морось, дождь, ледяные кристаллы и др. Класс гидрометеоров определяется по входным параметрам на основе численных расчетов рассеяния и поглощения гидрометеорами электромагнитных импульсов.

На первом этапе предусмотрена корректировка ослабления сигнала по дифференциальной фазе [4]. При распространении сигнала к измеряемому объекту через среду (например, дождь и град)  $Z_{DR}$  уменьшается вследствие того, что ослабление радиолокационных сигналов в горизонтальной поляризации сильнее ослабления сигналов в вертикальной поляризации. Поскольку ослабление не влияет на измерения фазы, дифференциальная фаза  $\Phi_{DP}$  чрезвычайно полезна для коррекции ослабления и дифференциального ослабления [5].

Для подбора коэффициентов уравнения связи  $\Phi_{DP}$  и ослабления сигнала необходимо провести синхронные измерения радиолокатора и дисдрометра [5]. Для радиолокатора ДМРЛ-С такие работы не проводились, поэтому этап корректировки  $Z_H$  и  $Z_{DR}$  на данный момент опущен. Для анализа рассматривались только участки облаков, расположенные в зонах, которые не подвержены значительному ослаблению.

Алгоритм [4] использован в настоящей работе для автоматического получения распределения гидрометеоров по вертикальному радиолокационному разрезу исследуемого облака. Для обеспечения достаточного отношения сигнал-шум и исключения влияния попадающих в зону видимости ДМРЛ-С высоких строений и деревьев область классификации была ограничена контуром  $Z_H > 10$  дБЗ и  $\rho_{HV} > 0,6$ .

По поляризационным данным радиолокатора можно также определить расположение восходящих потоков в облаках. Для этого используется так называемый столб  $Z_{DR}$  ( $Z_{DR}$  column). Он определяется как область выше уровня 0 °С, где  $Z_{DR} > 1$  дБ. Такое расположение области больших значений дифференциальной отражаемости указывает на сортировку капель по размеру в восходящем потоке. Верхняя часть столба  $Z_{DR}$  состоит из крупных переохлажденных капель, которые находятся в процессе замерзания, и обводненной крупы/града [5].

Для локализации восходящих потоков в настоящем исследовании использовался алгоритм определения столба  $Z_{DR}$ , предложенный в [6], где область восходящего потока определяется в зоне с  $T > 0$  °С и  $Z_{DR} > 1$  дБ. Интересуемая область ограничивается также контуром  $Z_H > 10$  дБЗ,  $\rho_{HV} > 0,85$ , чтобы обеспечить достаточное отношение сигнал-шум. Температура рассматриваемой области не должна превышать –20 °С, чтобы уменьшить вероятность

обнаружения ледяных кристаллов, связанных с повышенной  $Z_{DR}$ .

На основе анализа карт максимальной отражаемости ( $Z_{max}$ ) в столбе атмосферы выше 1 км удалось обнаружить кучево-дождевое облако, под которым наблюдался смерч вблизи деревни Заостровье над Ладожским озером ( $60^{\circ}17'$  с.ш.,  $32^{\circ}36'$  в.д.) в 18:30 ВСВ. Для распознавания кучево-дождевых облаков использовались радиолокационные ячейки с  $Z_{max} > 35$  дБZ. По картам  $Z_{max}$  получена информация о перемещении облака. На основе рассмотренных выше алгоритмов классификации гидрометеоров и обнаружения восходящих потоков построены вертикальные разрезы исследуемого облака для некоторых моментов его существования. Разрезы в виде условных схем представлены на рис. 2. Для удобства дальнейших рассуждений отсчет времени ведется с ближайшего к моменту наблюдения смерча радиолокационного обзора — 18:30 ВСВ. Этот момент времени принят за «0 мин».

На рис. 2, б видно, что начало грозовой активности совпадает с появлением крупы различной плотности. Считается, что формирование молний

связано со взаимодействием крупы с ледяными кристаллами, при этом крупные частицы приобретают преимущественно отрицательный заряд, их седиментация приводит к разделению зарядов в облаке и формированию электрического поля [7].

Период, когда в облаке наблюдалась максимальная частота разрядов, характеризовался усилением процесса образования осадков. В это время в облаке, помимо жидкой фракции, присутствовал град, в основном выше уровня изотермы  $0^{\circ}\text{C}$ .

Момент существования смерча сопровождался широким (около 5 км) восходящим потоком. Крупные ледяные частицы (крупы и град) выстроились в один скошенный «факел».

Для исследуемого облака проанализированы также вертикальные разрезы радиальной компоненты скорости перемещения гидрометеоров  $V_r$  и ширины доплеровского спектра радиальных скоростей  $W$ . Разрезы получены из анализа данных ДМРЛ-С в момент наблюдения смерча (рисунок не приводится). Анализ вертикального разреза  $V_r$  показал, что большая часть облака двигалась от ДМРЛ-С, но также присутствовали радиолокационные объемы

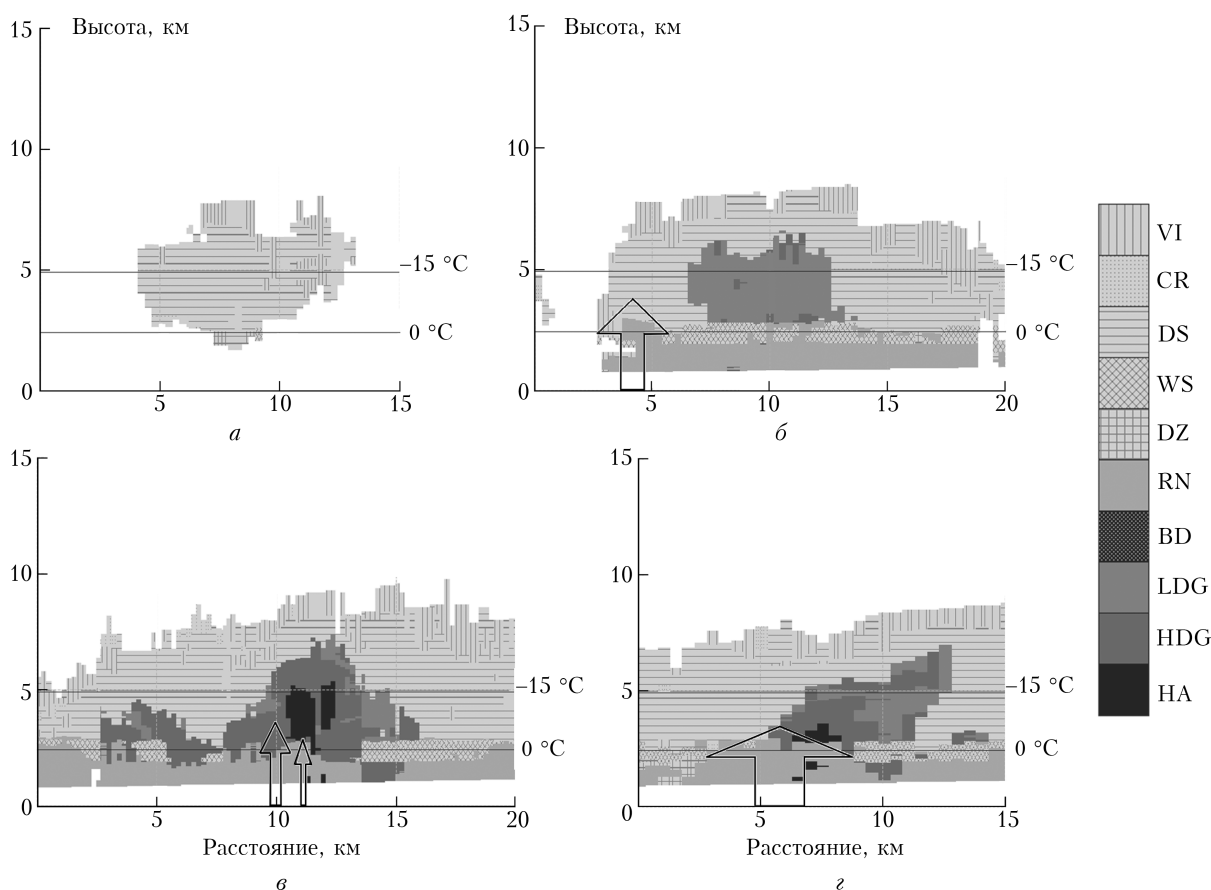


Рис. 2. Вертикальные разрезы, представляющие классы гидрометеоров и восходящие потоки, для основных моментов развития облака со смерчем, сделанные вдоль движения облака слева направо: –50 мин — появление радиоэха (а), –40 мин — первые разряды (б), –10 мин — максимум частоты разрядов (в), 0 мин — смерч (z); DZ — морось, RN — дождь, CR — ледяные кристаллы, DS — сухой снег, WS — тающий снег, VI — вертикальные ледяные кристаллы, LDG — крупы с низкой плотностью, HDG — крупы с высокой плотностью, HA — град, BD — большие капли/тающий град. Стрелками отмечены вертикальные потоки. Ширина стрелки восходящего потока указывает на ширину столба  $Z_{DR}$ , высота — средняя высота столба  $Z_{DR}$

с противоположным направлением движения. Такие «вкрапления» свидетельствуют о наличии вихря, основная часть которого находилась в нижней части облака и достигала высоты 3–4 км. Вихрь расположен в той же части облака, что и широкий восходящий поток, отмеченный на рис. 2, з. Там же расположены радиолокационные объемы с большими значениями  $W$  ( $> 7$  м/с).

Можно сделать вывод, что такие радиолокационные признаки, как наличие столба  $Z_{DR}$ , резкое изменение направления  $V_r$  в пространстве совместно с большими значениями  $W$  в нижней части облака, характеризуют наличие водяного смерча. Аналогичные выводы получены нами при исследовании водяного смерча, наблюдавшегося 12 августа 2018 г. над Финским заливом [8].

### Связь частоты молний с радиолокационными характеристиками

Можно ожидать, что электризация облака, связанная с микрофизическими и динамическими процессами, имеет определенные особенности при наличии смерча в облаке.

Различными исследователями рассматривались связи электрических характеристик облака и вертикальных скоростей [9], высоты верхней границы [10], интенсивности и потока осадков [11], объемов переохлажденной части облака [12–14] и др. Такие связи имеют региональные и сезонные особенности [9]. Их изучение представляет не только теоретическое, но и важное практическое значение, а именно – применение этих связей в сверхкраткосрочном прогнозе опасных явлений погоды.

Проанализируем связи электрических и радиолокационных параметров исследуемого облака, под которым наблюдался водяной смерч.

Частота разрядов  $f$  в облаке получена при помощи грозопеленгационной сети Blitzortung (<http://www.blitzortung.org>). Расчет координат молний проводился на основе моментов времени регистрации электромагнитного излучения молний в различных пунктах [15]. Считается, что эта сеть регистрирует преимущественно молнии типа «облако–земля». Она создается сообществом добровольных операторов грозопеленгационных станций по всему миру на некоммерческой основе. Один из них – Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, получившая доступ к данным сети Blitzortung.

На рис. 3 видно, что электрическая активность согласуется с данными наблюдений, показывающими, что перед смерчем часто заметно увеличивается число электрических разрядов [16].

В нашем случае максимальная частота разрядов отмечалась в промежутке времени –10...0 мин. После затухания смерча молний в рассматриваемом облаке не зарегистрировано. Окончание грозовой активности в облаке после исчезновения смерча может свидетельствовать о влиянии последнего на генерацию

электрических разрядов в облаке. Похожее наблюдалось нами ранее при исследовании облака с водяным смерчем над Финским заливом [8] и у американских коллег при исследовании суперячеек с торнадо [17].

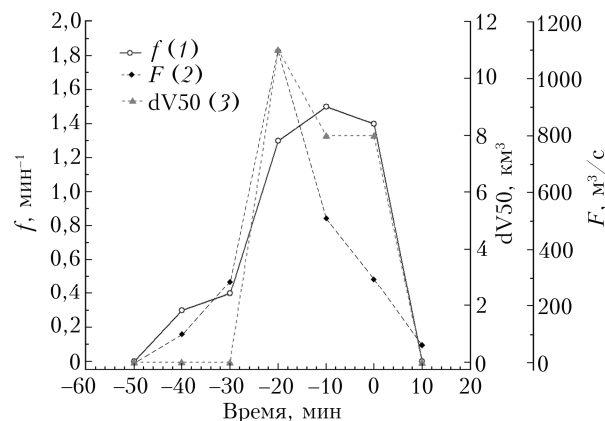


Рис. 3. Изменение во времени частоты электрических разрядов  $f$ , потока осадков  $F$  и объема  $dV50$  переохлажденной части облака выше изотермы  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  с отражаемостью более  $50\text{ dBZ}$

Рассмотрим линейные корреляционные связи  $f$  со следующими радиолокационными параметрами: максимальной радиолокационной отражаемостью выше  $1\text{ км}$   $Z_{\max}$ , высотой верхней границы облака  $H_{\text{top}}$ , максимальной интенсивностью осадков  $I_{\max}$ , потоком осадков  $F$ , максимальной радиолокационной отражаемостью на уровне изотермы  $-22,0\text{ }^{\circ}\text{C}$   $Z_3$  и объемами переохлажденной части облака выше изотермы  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  с отражаемостью более  $30\text{--}50\text{ dBZ}$  ( $dV30$ ,  $dV35$ ,  $dV40$ ,  $dV45$  и  $dV50$  соответственно). Коэффициенты корреляции Пирсона, коэффициенты детерминации и уровни значимости корреляции для всех параметров приведены в таблице.

Результаты расчетов показывают положительную корреляцию для всех рассматриваемых параметров. Наиболее тесная связь наблюдается между  $f$  и  $dV50$ . Ранее нами было показано, что мощность электрического генератора определяется количеством крупных ледяных частиц. Отражаемость облака выше нулевой изотермы  $dV$ , согласно уравнению метеорологической радиолокации, также определяется количеством крупных ледяных частиц в отражающем объеме [13, 14]. Следовательно, мощность электрического генератора может быть оценена на основе объема переохлажденной части облака с большой отражаемостью. В настоящем эксперименте наблюдается относительно слабая связь  $f$  с объемами переохлажденных частей облака  $dV30\text{--}dV40$ . На рис. 3 видно, что увеличение  $dV50$  происходит раньше, чем увеличение частоты молний, т.е. сначала увеличивается количество и размер ледяных частиц, а через некоторое время растет частота молний. Для такого случая получены также достаточно большие коэффициенты корреляции частоты электрических разрядов с максимальной интенсивностью осадков и максимальной ра-

**Характеристики связи частоты электрических разрядов с радиолокационными параметрами облака**

Радиолокационный параметр	Коэфф. корреляции Пирсона	Коэфф. детерминации	Уровень значимости корреляции
Максимальная радиолокационная отражаемость $Z_{\max}$ , дБZ	0,73	0,53	0,07
Высота верхней границы $H_{\text{top}}$ , км	0,65	0,43	0,11
Максимальная интенсивность осадков $I_{\max}$ , мм/ч	0,75	0,57	0,05
Поток осадков $F$ , м <sup>3</sup> /с	0,72	0,52	0,07
Максимальная радиолокационная отражаемость на уровне изотермы $-22,0$ °C $Z_3$ , дБZ	0,81	0,65	0,03
Объем переохлажденной части облака выше изотермы $0$ °C с отражаемостью более 30 дБZ $dV30$	0,66	0,43	0,10
35 дБZ $dV35$	0,62	0,38	0,14
40 дБZ $dV40$	0,63	0,39	0,13
45 дБZ $dV45$	0,70	0,49	0,08
50 дБZ $dV50$	0,94	0,88	0,00

диолокационной отражаемостью на уровне изотермы  $-22,0$  °C. Подобные зависимости наблюдалось нами ранее как для Северо-Западного региона России, так и для Северного Кавказа [14, 18, 19].

**Заключение**

Детально исследовано Сб облако с водяным смерчем, наблюдавшимся над Ладожским озером. Проанализировано состояние атмосферы в период развития облака и рассчитаны индексы конвективной неустойчивости. Некоторые из них показали, что в период наблюдения смерча была сильная атмосферная неустойчивость. Наиболее перспективными для предсказания водяного смерча из рассмотренных индексов можно считать энергию неустойчивости (CAPE, NCAPE, CAPE в слое 0–3 км) и параметр завихренности атмосферы (VGP). Установлено, что нижняя граница облака располагалась близко к подстилающей поверхности на высоте  $\sim 200$  м.

Для исследования облака использовались дистанционные средства измерения: доплеровский поляризационный радиолокатор, грозопеленгационная система. Для анализа изменения структуры облака применены алгоритмы классификации гидрометеоров и определения восходящих потоков на основе правил нечеткой логики и столба  $Z_{DR}$ . Они реализованы в виде программы, использующей поляризационные характеристики ДМРЛ-С. Отмечено появление крупы в облаке в момент начала грозовой активности. Также обнаружена конвергенция крупных ледяных частиц в области восходящего потока, связанного со смерчем.

Показана положительная связь между частотой молний в облаке и рядом радиолокационных параметров. Наибольший коэффициент корреляции (0,94)

получен между частотой молний и объемом переохлажденной части облака с отражаемостью больше 50 дБZ. Для этого случая получены также достаточно большие коэффициенты корреляции частоты молний с максимальной интенсивностью осадков (0,75) и максимальной радиолокационной отражаемостью на уровне изотермы  $-22,0$  °C (0,81).

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №17-05-00965\_а, БРИКС\_т №18-55-80020). Авторы статьи выражают признательность Сергею Егорченко, заснявшему и выложившему в сеть Интернет фотографию водяного смерча и позволившему использовать ее при проведении исследования ([https://vk.com/sergey\\_eg?w=wall1471346\\_2750%2Fall](https://vk.com/sergey_eg?w=wall1471346_2750%2Fall)).

1. *Бедрицкий А.И.* Российский гидрометеорологический словарь. СПб.: Летний сад, 2009. 66 с.
2. *Park H.S., Ryzhkov A.V., Zrnic D.S., Kim K.-E.* The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: Description and application to an MCS // *Weather Forecast.* 2009. V. 24. P. 730–748.
3. *Dolan B., Rutledge S.A.* A theory-based hydrometeor identification algorithm for X-band polarimetric radars // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2009. V. 26. P. 2071–2088.
4. *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. P. 2162–2186.
5. *Ryzhkov A.V., Zrnic D.S.* Radar Polarimetry for Weather Observations. Switzerland: Springer, 2019. 486 p.
6. *Carlin T.J., Gao J., Snyder J.C., Ryzhkov A.V.* Assimilation of ZDR columns for improving the spinup and forecast of convective storms in storm-scale models: Proof-of-concept experiments // *Mon. Weather Rev.* 2017. V. 145. P. 5033–5057.
7. *Синькевич А.А., Довгалюк Ю.А.* Коронный разряд в облаках // *Радиофизика.* 2014. Т. LVI, № 11–12. С. 1–12.
8. *Попов В.Б., Синькевич А.А., Янг Дж., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Старых Д.С.* Характеристики и структура кучево-дождевого облака с водяным смерчем в Северо-Западном регионе России // *Метеорол. и гидрол.* (в печати).
9. *Lal D.M., Pawar S.D.* Relationship between rainfall and lightning over central Indian region in monsoon and premonsoon seasons // *Atmos. Res.* 2009. V. 92, iss. 4. P. 402–410.
10. *Karagiannidis A., Lagouvardos K., Lykoudis S., Kotroni V., Giannaros T., Betz H.-D.* Modeling lightning density using cloud top parameters // *Atmos. Res.* 2019. V. 222. P. 163–171.
11. *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.
12. *Стасенко В.Н.* Радиолокационное исследование многоячейстных конвективных (грозовых) облаков. СПб.: Гидрометеоздат, 2004. 101 с.
13. *Степаненко В.Д.* Радиолокация в метеорологии (радиометеорология). Л.: Гидрометеоздат, 1973. 343 с.
14. *Михайловский Ю.П., Синькевич А.А., Павар С.Д., Гопалакришнан В., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Боданов Е.В., Куров А.Б., Аджиев А.Х., Малкарова А.М., Абшаев А.М.* Исследования развития грозового облака. Часть 2. Анализ методов прогноза

- и диагноза электрического состояния облаков // Метеорол. и гидрол. 2017. № 6. С. 31–45.
15. *Wanke E., Andersen R., Volgnandt T.* A world-wide low-cost community-based time-of-arrival lightning detection and lightning location network [Electronic Resource]. URL: [http://en.blitzortung.org/Compendium/Documentations/Documentation\\_2014-05-11\\_Red\\_PCB\\_10.4\\_PCB\\_12.3\\_PCB\\_13.1\\_PCB\\_14.1.pdf](http://en.blitzortung.org/Compendium/Documentations/Documentation_2014-05-11_Red_PCB_10.4_PCB_12.3_PCB_13.1_PCB_14.1.pdf) (last access: 13.01.2020).
  16. *Armstrong R.W., Glenn J.G.* Electrical role for severe storm tornadogenesis (and modification) // *J. Climatol. Weather Forecast.* 2015. V. 3, iss. 3. P. 1–8.
  17. *Stough M.S., Carey L.D., Schultz C.J.* Total lightning as an indicator of mesocyclone behavior // *XV Int. Conf. Atmos. Electr. Norman, Oklahoma, June 15–20, 2014.* P. 1–15.
  18. *Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Довгальюк Ю.А., Веремей Н.Е., Богданов Е.В., Аджиев А.Х., Малкарова А.М., Абшаев А.М.* Исследования развития грозового облака. Часть 1. Развитие облака и формирование электрических разрядов // *Метеорол. и гидрол.* 2016. № 9. С. 27–40.
  19. *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.

*A.A. Sin'kevich, V.B. Popov, Yu. P. Mikhailovskii, M.L. Toropova, Yu.A. Dovgalyuk, N.E. Veremei, D.S. Starykh.* **Characteristics of Cb with waterspout over Ladoga Lake derived from remote measurements.**

Characteristics of the thunderstorm with a waterspout over Ladoga Lake obtained with the help of C-band radar, lightning detection system, and radiosonde data are studied. The analysis of instability indices shows low and moderate probability of developing intensive convective processes. The hydrometeor classification and the updraft identification algorithms are used for the first time for the DMRL-C radar and are based on processing of polarization measurements. These algorithms made it possible to detect the appearance of big ice particles when lightning began and to extended updraft associated with the waterspout. The correlation analysis of the frequency of lightning and cloud characteristics, obtained by radar, was carried out. It showed the closest correlation of the frequency with the number of big ice particles, characterized by supercooled part of the cloud (above the 0 °C level) with the reflectivity higher than 50 dBZ.