

УДК 551.501.81

Исследование характеристик грозовых облаков на Северо-Западе России с использованием нейронных сетей

А.А. Синькевич, А.Б. Куров[✉], Ю.П. Михайловский,
М.Л. Торопова, Н.Е. Веремей*

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

Поступила в редакцию 26.07.2022 г.;
после доработки 22.09.2022 г.;
принята к печати 25.10.2022 г.

Представлены результаты анализа радиолокационных характеристик облаков, включая поляризационные, и данных о грозовой активности за 9 июня 2020 г. в районе Санкт-Петербурга, когда отмечалась интенсивная грозовая деятельность. Выполнено сравнение параметров грозовых облаков и облаков без молний. Приведены статистические данные об их различиях. С использованием нейронных сетей проведен регрессионный анализ зависимости частоты молний от радиолокационных характеристик облаков. Оценено влияние рассмотренных параметров на частоту молний. Получено математическое выражение для расчета частоты молний на основе данных о максимальной величине дифференциальной отражаемости облака и объеме его переохлажденной части с отражаемостью не менее 35 дБZ.

Ключевые слова: грозовое облако, молния, радиолокационные характеристики, регрессионный анализ, нейронные сети; thunderstorm, lightning, radar characteristics, regression analysis, neural networks.

Введение

Гроза — это опасное погодное явление, которое может приводить к гибели людей, а также наносить большой материальный ущерб. Радиолокационная информация позволяет прогнозировать переход облаков в грозовую стадию. К настоящему времени проведено много исследований, показывающих, что существуют корреляционные связи между параметрами грозовых разрядов (частотой положительных и отрицательных разрядов молний и их токов) и характеристиками облаков, которые фиксируются радиолокаторами [1–3].

Взаимодействие облачных кристаллов с крупой и градом при наличии переохлажденных капель воды считается основным механизмом, приводящим к электризации облака [4]. Учитывая, что радиолокационная отражаемость сильно зависит от наличия крупных частиц, к которым относятся крупа и град, можно ожидать, что существует связь между электризацией облаков, а, следовательно, частотой молний, и радиолокационными характеристиками [5].

Выполненные ранее исследования показали связь частоты молний с высотой верхней границы облака [6], а также с максимальным значением

отражаемости, измеряемой на разных высотах [3, 7, 8]. В работе [9] получена тесная корреляционная связь между массой частиц крупы и града и частотой молний в мультячейковых и суперячейковых кучево-дождевых облаках. Изучались соответствующие зависимости от концентрации и размеров ледяных частиц, характеристик осадков в виде ледяных частиц [7, 10]. Измерения со спутника TRMM продемонстрировали слабую зависимость частоты молний от высоты верхней границы облака [11], но достаточно сильную от объема, содержащего смешанную фракцию. Нередко максимум частоты молний отмечается в зрелой стадии развития облака или в момент перехода к стадии диссипации [12].

Экспериментальные исследования показали, что частота молний связана с осадками в виде ледяной фракции [7, 13]. В большинстве случаев осадки предшествуют разрядам молний [12, 14]. Во всех работах указывается, что получаемые закономерности существенно зависят от района и сезона проведения исследования.

Применение нейронных сетей в метеорологии открывает новые возможности. Наиболее распространено использование нейронных сетей для классификации образов [15], например для определения тропического циклона на изображении, полученном дистанционно [16]. Нейронные сети используются также для обнаружения града, прогноза смерчей и вида осадков (дождь, снег и проч.) [17]. Они находят применение и в задачах прогноза опасных

* Андрей Александрович Синькевич (sinkevich51@mail.ru); Александр Борисович Куров (remotesensing@mail.ru); Юрий Павлович Михайловский (yurpalych@yandex.ru); Марина Леонидовна Торопова (marina-toropova@mail.ru); Николай Евгеньевич Веремей (veremey@gmail.com).

явлений погоды [18], включая ряд климатических параметров [19].

Также нейронные сети могут применяться в исследованиях регрессии между изучаемыми характеристиками, что продемонстрировано в настоящей статье.

Цель работы — установить связь частоты молний с радиолокационными характеристиками облаков на Северо-Западе России. Для исследования был выбран день 9 июня 2020 г., когда отмечалась интенсивная грозовая деятельность вблизи Санкт-Петербурга. Рассмотрены характеристики грозовых облаков, а также частота молний из облаков по измерениям грозопеленгационной системы Blitzortung, в которой используется разностно-дальномерный метод определения координат молний. Этой системой преимущественно фиксируются молнии «облако—земля» [20].

1. Состояние атмосферы

Атмосферная ситуация 9 июня 2020 г. характеризовалась прохождением локальной ложбины давления. По данным радиозондирования, выполненного аэрологической ст. Воейково (№ 26075), в атмосфере наблюдалась вертикальная термическая неустойчивость. Высота нулевой изотермы составляла 3,4 км.

Нижняя граница облаков находилась на высоте 1,5 км при температуре 13 °С. Запас энергии неустойчивости в слое развития конвекции составлял 2208 Дж/кг, указывая на то, что в анализируемый день могли развиваться мощные конвективные и кучево-дождевые облака. Значение энергии неустойчивости для рассматриваемой территории оказалось достаточно велико. Ветер имел северо-восточное направление. Уровень конвекции совпал с нижней границей тропопаузы и составил 11,3 км.

По данным автоматизированного доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С, находящегося в пос. Воейково, 9 июня 2020 г. в Санкт-Петербурге и Ленинградской обл. наблюдалось активное развитие облаков, сопровождавшееся ливневыми осадками, градом и грозами, что подтверждается также многочисленными наблюдениями очевидцев.

Минимальная радиационная температура на верхней границе облаков в рассматриваемом районе по данным измерений радиометра SEVERI, установленного на спутник Meteosat-11, была –59,7 °С. Это соответствует высоте 11,6 км, т.е. наиболее мощные облака достигали тропопаузы.

2. Выбор данных для анализа

Исследованы радиолокационные характеристики грозовых облаков, полученные с помощью ДМРЛ-С. Удаление облаков от радиолокатора не превосходило 125 км. Локатор позволяет получать информацию об отражаемости в горизонтальном и вертикальном каналах, а также поляризационные характеристики облаков и осадков (дифференци-

альная отражаемость, коэффициент кросскорреляции между каналами, дифференциальная фаза и удельный дифференциальный фазовый сдвиг). Кроме этого, доступны вторичные данные: границы облачности, метеорологические явления, интенсивность осадков и др. Исходные данные для исследования имеют пространственное разрешение 1 км. Период 10 мин. Доплеровские характеристики облаков в нашей работе не рассматривались.

Были обработаны сканы радиолокатора за 9 июня с 00:00 до 23:50. Для анализа выбраны радиолокационные ячейки, расположенные в слое атмосферы над нулевой изотермой, имеющие отражаемость свыше 35 дБZ (дБZ — внесистемная безразмерная величина, используемая при оценке коэффициента отражаемости: $\text{дБZ} = 10 \cdot \lg(Z/Z_0)$, где $Z_0 = 1 \text{ мм}^6/\text{м}^3$).

Наличие молниевых разрядов в рассматриваемых ячейках определялось по данным грозопеленгационной системы Blitzortung. Для каждой ячейки строился контур ее проекции на поверхность Земли. По результатам ее сопоставления с координатами разрядов и временем их регистрации определялся факт наличия разрядов в ячейке. В качестве примера на рис. 1 представлен фрагмент скана радиолокатора со значениями радиолокационной отражаемости (Z) от облаков и нанесенными отметками разрядов. Как видно, не все разряды находятся в пределах зон с отражаемостью ≥ 35 дБZ. Разряды, расположенные в зонах с отражаемостью < 35 дБZ, исключались из дальнейших расчетов.

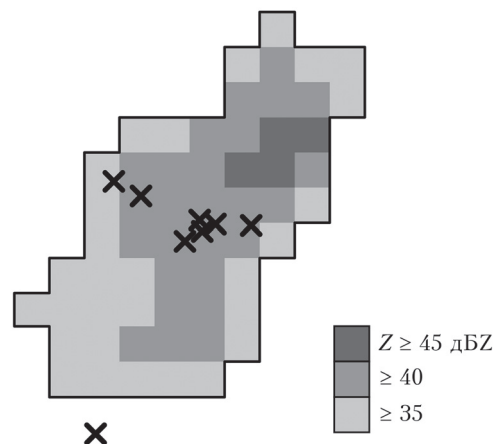


Рис. 1. Фрагмент радиолокационного скана, изображающий одно из анализируемых облаков; крестиками отмечены разряды, зарегистрированные системой Blitzortung

Молнии могут излучать несколько электромагнитных импульсов. В настоящей статье импульсы относились к одной молнии в том случае, если они фиксировались в течение не более 1 с от первого импульса. В качестве координат молний принимались координаты первых импульсов.

Исследовались радиолокационные ячейки объемом от 20 до 200 км³, чтобы исключить из рассмотрения небольшие облака и крупные группы облаков, в которых сразу несколько ячеек формировали единую зону отражаемости 35 дБZ. Для каждой из выбранных ячеек были выполнены

оценки объемов с различной отражаемостью (dV_{35} , dV_{40} и т.д.) и рассчитаны радиолокационные параметры.

Для получения микрофизических характеристик облаков использовались поляризационные радиолокационные измерения. С их помощью по методике, изложенной в [21], были оценены объемы зон с крупными каплями, снегом, крупой и градом в каждой из рассматриваемых ячеек.

Далее были проведены статистические исследования радиолокационных характеристик грозовых облаков, определена связь этих параметров и частоты молний в облаках.

3. Радиолокационные и грозовые характеристики облаков

За 9 июня 2020 г. было рассмотрено 204 конвективных облака, в которых не фиксировались молнии, и 148 облаков, где фиксировались. Статистические характеристики этих двух выборок приведены в таблице. Здесь представлены наиболее важные из полученных характеристик: объем переохлажденной части ячейки (dV_{35}); максимальная отражаемость ($\max Z$); максимальная интенсивность осадков ($\max I_{\text{precip}}$); максимальная вертикальная интегрированная водность ($\max VIL$); максимальная дифференциальная отражаемость ($\max Z_{\text{dr}}$); минимальное значение коэффициента кросскорреляции ($\min R_{\text{dr}}$); максимальная отражаемость при вертикальной поляризации сигнала ($\max Z_v$); объем зоны с крупой (dV_{graupe}); объем зоны с градом (dV_{hail}); расположения контура отражаемости 35 дБЗ ($\max H_{V35}$); частота молниевых разрядов (f) и соотношения объемов.

На рис. 2 представлены гистограммы распределения некоторых из перечисленных характеристик.

Рассмотрим полученные характеристики и их различия для групп облаков с молниями (Y), и без (N). Распределения dV_{35} для этих групп сильно различаются. Для группы N распределение близко к логнормальному с модой, равной 23 км^3 . При

этом объемы переохлажденной части dV_{35} могут достигать значительных величин (максимум равен 195 км^3). Распределение для группы Y относительно равномерное с повторяемостью значений в пределах 8–12%, при этом отмечается и пара мод в диапазонах 30–40 и 90–100 км^3 . Медиана распределения у группы Y более чем в два раза превышает медиану группы N .

Из облаков группы Y выпадали более интенсивные осадки, чем из облаков группы N , медианы в распределениях различаются примерно в два раза. Максимальная вертикальная интегрированная водность в облаках группы Y также превышает водность группы N , медианы в распределениях различаются также примерно в два раза.

Для групп Y и N медианы распределения $\max Z$ равна 46,0 и 41,7 дБЗ. Гистограмма распределения соответствующих величин демонстрирует тот факт, что молнии наблюдаются в облаках с большой отражаемостью, что может быть связано с высокой концентрацией крупных гидрометеоров. Отметим, что для группы Y минимальное значение $\max Z = 37,0$ дБЗ, т.е. молнии начинают регистрироваться при относительно низкой отражаемости, что соответствует данным [22] для исследуемого района. В работе [22] показано, что при $Z > 36,5$ дБЗ наблюдаются только грозовые облака. Эта величина меньше порога для перехода облака в грозовую стадию, равного 40 дБЗ, измеренного нами и целой группой исследователей [23–28]. При этом значительная часть облаков (группа N) имела отражаемость, превосходящую пороговое значение, но в них не наблюдалось молний. Это подтверждает установленный ранее факт, что переход облака в грозовую стадию зависит от нескольких его характеристик.

Максимальная высота контура отражаемости $\max H_{V35}$ также больше для грозовых облаков и в экстремуме достигает 12,5 км, что превышает максимальную высоту облаков для рассматриваемого дня, полученную из результатов зондирования со спутника Meteosat. Возможно, что это

Статистические характеристики облаков

Параметр	Среднее		Медиана		Мин.		Макс.		σ	
	N	Y	N	Y	N	Y	N	Y	N	Y
dV_{35} , км^3	59,4	104,1	43,5	95,0	20,0	20,0	195	200	42,8	53,8
$\max Z$, дБЗ	42,7	45,6	41,7	46,0	36,5	37,0	55,5	59,0	4,2	4,3
$\max I_{\text{precip}}$, мм/ч	21,2	31,4	13,0	27,0	0	1,0	154	165	22,6	24,8
$\max VIL$, кг/м ²	4,1	6,7	2,5	5,5	0,75	1,0	27,2	33,7	4,1	5,4
$\max Z_{\text{dr}}$, дБ	1,3	1,5	0,75	1,3	–1,0	–0,7	6,1	6,1	1,4	1,4
$\min R_{\text{dr}}$	0,93	0,92	0,95	0,94	0,74	0,72	1,0	1,0	0,04	0,05
$\max Z_v$, дБЗ	40,8	43,7	40,0	43,5	35,5	36,0	52,0	56,5	3,6	3,9
dV_{graupe} , км^3	57,1	99,4	43,0	92,5	18,0	18,0	185	197	40,6	50,4
dV_{hail} , км^3	0,31	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	14,0	48,0	1,4	6,3
$\max H_{V35}$, км	6,3	7,5	6,0	7,5	4,5	4,5	9,5	12,5	1,5	1,5
f , мин ^{–1}	–	0,14	–	0,10	–	0,10	–	0,90	–	0,09
$dV_{\text{hail}}/dV_{\text{graupe}}$, %	0,24	1,15	0	0	0	0	8,3	33,1	1,0	4,3
$dV_{\text{graupe}}/dV_{35}$, %	96,5	96,1	97,7	97,2	71,8	72,8	100	100	4,2	4,6

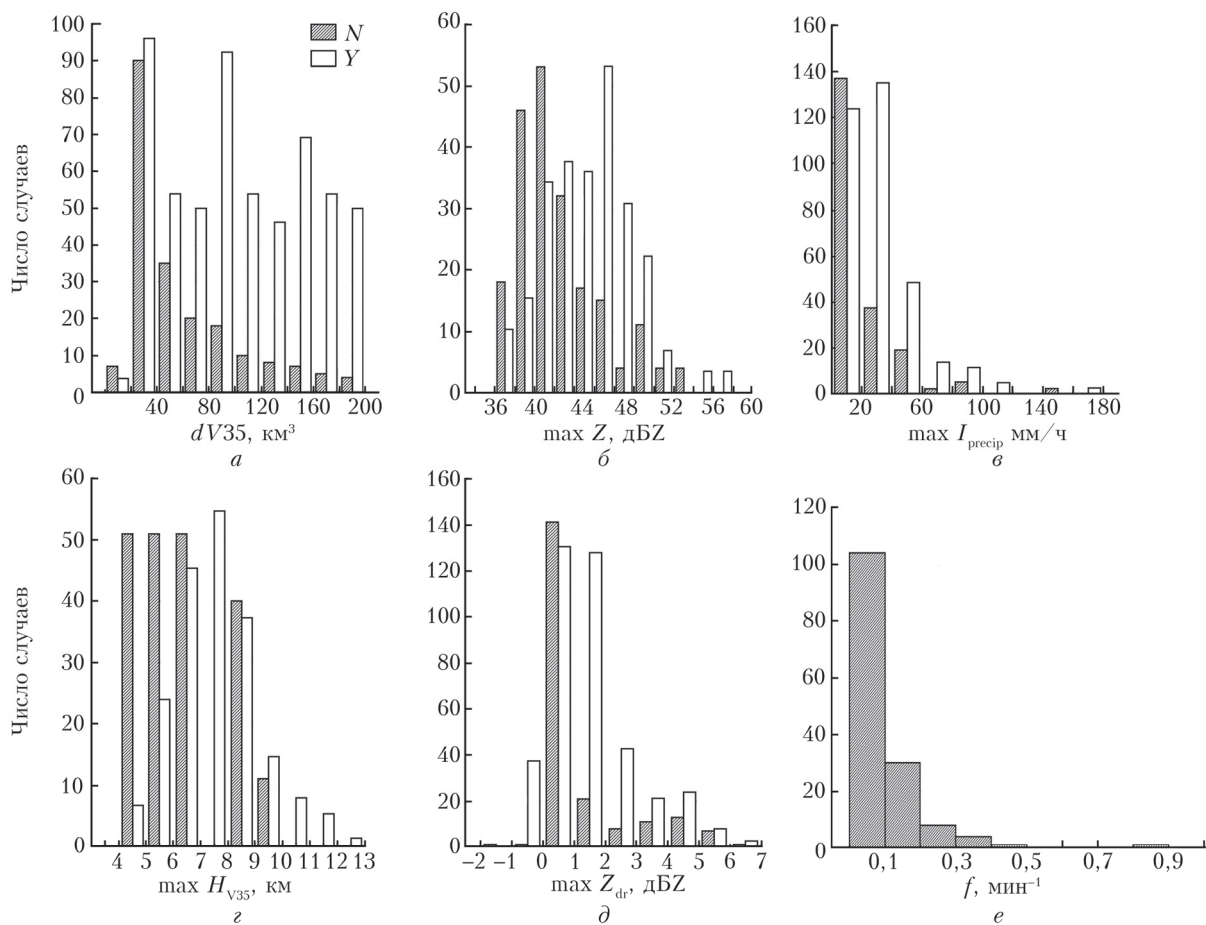


Рис. 2. Гистограммы распределений параметров dV_{35} (а), $\max Z$ (б), $\max I_{\text{precip}}$ (в), $\max H_{V_{35}}$ (г), $\max Z_{\text{dr}}$ (д), f (е), (индексы N и Y относятся к облакам, в которых не наблюдались и наблюдались молнии соответственно)

экстремальное значение связано с погрешностью измерений радиолокатором высоты облака за счет боковых лепестков диаграммы направленности антенны [12].

Поляризационные каналы радиолокатора ДМРЛ-С дают возможность получить ряд важных характеристик, которые позволяют делать выводы о микрофизическом строении облака. В радиолокаторе используются горизонтальная и вертикальная поляризации электромагнитной волны. Рассчитаны коэффициенты кросскорреляции для сигналов со взаимно перпендикулярными поляризациями. Для рассматриваемых групп медианы распределения коэффициента (в таблице представлено его минимальное значение по облаку $\min R_{\text{dr}}$) слабо различаются и составляют 0,94 и 0,95 для групп Y и N соответственно.

Максимальная дифференциальная отражаемость $\max Z_{\text{dr}}$ по группам различается весьма существенно. Распределение для группы Y сдвинуто в область больших значений. Такой сдвиг может указывать на то, что в облаках присутствуют крупные капли и крупа, покрытая водяной пленкой [29, 30].

По методике, представленной в [21], была получена информация об объемах облака выше нулевой изотермы, содержащих снег, крупу и град

(dV_{snow} , dV_{graupel} , dV_{hail}). Объемы облака со снегом были незначительными. Крупа составляла в среднем 96% от объема облака по контуру отражаемости 35 дБЗ для рассматриваемых групп. Объемы с градом больше у группы Y , чем N . В целом эти объемы незначительны и для обеих групп менее 1,5% от объема с крупой. Это указывает на то, что в рассматриваемых облаках формирование молний может происходить и при отсутствии града.

Для оценки различий между выборками облаков, в которых регистрировались и не регистрировались молнии (см. таблицу), использовался непараметрический критерий Манна–Уитни. Он применяется для случаев, когда распределения отличаются от нормальных, что имело место для рассматриваемых характеристик. Расчет по этому критерию показал, что различия между выборками (dV_{35} , $\max Z$, $\max I_{\text{precip}}$, $\max VIL$, $\max Z_{\text{dr}}$, $\min R_{\text{dr}}$, $\max Z_v$, dV_{graupel} , $\max H_{V_{35}}$) для групп облаков с молниями и без молний статистически значимы, т.е. уровень значимости $p < 0,05$. Единственная характеристика, для которой различия были не значимы — dV_{hail} , для нее $p = 0,085$. Таким образом, имеет место статистически значимое различие между основными радиолокационными характеристиками грозовых и негрозовых облаков.

Частота молний в облаках невелика, $f = 0,9 \text{ мин}^{-1}$. Медиана распределения $0,1 \text{ мин}^{-1}$. Ранее нами было получено, что для Северо-Запада РФ медиана распределения частоты молний равна $1,4 \text{ мин}^{-1}$ [23], т.е. в указанный день частота разрядов была небольшой. Одной из причин, приводящих к отличию частоты молний в данном исследовании от ранее полученных значений, является достаточно жесткий критерий отбора разрядов, которые относились к конкретно выбранному облаку. Разряды должны были попадать в контур с $Z = 35 \text{ дБЗ}$. Из рис. 1 видно, что при такой методике часть разрядов, которые формировались в облаках, находится в межоблачных промежутках и не учитывается при анализе, следовательно, за счет такой методики имеет место занижение частоты молний. Частота молний существенно меньше тех значений, которые были получены для Индии и Китая ($1,0 \text{ мин}^{-1}$) и для облаков, развивавшихся на Северном Кавказе (8 мин^{-1}), что объяснялось их региональными особенностями, а также особенностями анализа молниевой активности [23]. Несмотря на большое количество исследований в области глобального распределения молний вопрос об их частоте в отдельных облаках, развивающихся в разных физико-географических районах Земли, слабо изучен. Очевидно, что региональные особенности облаков должны сказываться на этой характеристике.

Конечно, частота молний в значительной степени зависит от размеров облака. Отношение $f/dV35$ характеризует необходимый объем облака для формирования одной молнии в минуту в том или ином регионе. В рассматриваемом случае это отношение равно $0,0014 \text{ мин}^{-1} \text{ км}^3$. Таким образом, для формирования одного разряда в минуту необходим объем переохлажденной части облака примерно в 700 км^3 , что больше среднего значения, полученного для разных регионов мира и равного 200 км^3 [23].

4. Регрессионные связи между частотой молний и радиолокационными характеристиками облаков

С помощью нейронных сетей изучено влияние измеряемых (и вычисляемых) радиолокационных характеристик на частоту молний. В общей сложности было построено 150 нейронных сетей. Входными данными были радиолокационные характеристики, а категориальной целевой переменной — наличие или отсутствие молний. При построении нейронных сетей использовался метод классификации.

Входные переменные: $dV35$, $dV40$, $dV45$ и $dV50$; $\max Z_{600}$, $\max Z_{\text{Ht0}}$, $\max Z_{\text{Ht15}}$, $\max Z$ — максимальная отражаемость на уровне 600 м, на уровне нулевой изотермы, на уровне изотермы -15°C и выше нулевой изотермы соответственно; $\max I_{\text{осад}}$; $\max VIL$; $\min Z_{\text{dr}}$; $\max Z_{\text{dr}}$; $\min R_{\text{dr}}$; $\min Z_v$; $\max Z_v$; $\min K_{\text{dp}}$ и $\max K_{\text{dp}}$ — минимальное и максимальное значение удельного дифференциального

фазового сдвига; $\max H_{V35}$; dV_{snow} , dV_{grapel} и dV_{hail} — объемы облака, содержащие снег, крупу и град, рассчитанные по методике [21].

Было выбрано следующее соотношение между размерами обучающей, контрольной и тестовой выборки — 70:15:15%. Выборки формировались случайным образом. Применялись две стратегии для создания нейронных сетей: автоматизированная и пользовательская. Для автоматизированной были использованы многослойный персептрон с количеством скрытых нейронов от 6 до 30 и радиальная базисная функция с количеством скрытых нейронов от 6 до 130. Применялось несколько функций активации для скрытых и выходных нейронов (тождественная, логистическая, гиперболическая и экспоненциальная). Для пользовательской нейронной сети также использовали многослойный персептрон с 18 нейронами.

В общей сложности обучалось 150 сетей, из них были сохранены пять лучших, дающих наибольшую производительность на контрольной и тестовой выборках и, следовательно, имеющих наименьшую погрешность. Погрешность для полученных пяти лучших нейронных сетей не превосходила 15%. Архитектура пяти сетей включала 21 входной, 13–29 скрытых и 2 выходных нейрона.

После построения сетей была проанализирована чувствительность, что позволило ранжировать переменные по степени влияния на выходной параметр. Переменными, оказывающими наибольшее влияние, оказались $\max Z_{\text{dr}}$, $dV35$, $\max H_{V35}$, $\max Z$, $\max Z_{\text{Ht15}}$. При этом если выбрать три наиболее важных переменных, то дифференциальная отражаемость присутствовала во всех пяти нейронных сетях, $\max Z$ — в двух сетях, а $\max Z_{\text{Ht15}}$ — в одной.

Таким образом, максимальная дифференциальная отражаемость, которая зависит от ориентации рассеивателей, в наибольшей степени влияет на формирование молний. Этот результат достаточно неожиданный и требует проверки в дальнейших исследованиях.

Напомним, что максимальные значения Z_{dr} наблюдаются при преимущественно горизонтальном расположении рассеивателей. Во многих случаях большие величины Z_{dr} указывают на наличие крупных капель и крупы, покрытой водяной пленкой. Имеющиеся данные позволяют сделать вывод о том, что грозовые разряды в облаках на Северо-Западе России наблюдаются при наличии крупных частиц, рассеивающих электромагнитное излучение преимущественно в горизонтальной плоскости.

Влияние $dV35$ и $\max H_{V35}$ на формирование грозовых разрядов отмечалось нами и ранее в ряде экспериментальных исследований [5].

С практической точки зрения полезно получить регрессионную зависимость между частотой молний и параметрами, которые в нейросетевых моделях являются наиболее чувствительными, т.е. оказывающими наибольшее влияние на выходную характеристику. В качестве таких характеристик были выбраны $dV35$, $\max H_{V35}$ и $\max Z_{\text{dr}}$. Были исследованы различные зависимости между этими

характеристиками (степенные, логарифмические, экспоненциальные). Использовался метод построения нелинейных регрессионных зависимостей. Наилучшая аппроксимация может быть представлена выражением ($p = 0,03$)

$$f [\text{мин}^{-1}] = 0,097 + 0,00057 \cdot dV35 - 0,011 \cdot (\max Z_{\text{dr}})^2 + 0,0024 \cdot (\max Z_{\text{dr}})^3.$$

Примечательно, что в формулу не вошла высота верхней границы контура отражаемости в 35 дБZ, что позволяет утверждать, что она оказывает меньшее влияние на частоту молний по сравнению с дифференциальной отражаемостью и объемом облака с отражаемостью 35 дБZ. Следует иметь в виду, что данное выражение может использоваться только для оценок частоты молний, так как оно получено на весьма ограниченном объеме данных. Кроме того, в данном исследовании молнии учитывались только в том случае, когда фиксировались непосредственно в облаке, где отражаемость превышала 35 дБZ.

Заключение

Установлено, что распределения объемов переохлажденных частей облаков с радиолокационной отражаемостью, превышающей 35 дБZ, различаются между группами облаков с молниями (Y), и без (N). Для облаков группы N это распределение близко к логнормальному, а распределение объемов для группы облаков Y относительно равномерное. Медиана распределения у группы Y более чем в два раза превышает соответствующую у группы N. Из группы облаков Y выпадали более интенсивные осадки, чем из облаков группы N, медианы в распределениях различаются также примерно в два раза. Медианы распределения максимальной отражаемости выше нулевой изотермы для групп Y и N равны 46,0 и 41,7 дБZ. Распределение дифференциальной отражаемости для группы Y сдвинуто в область больших значений по сравнению с группой N. Такой сдвиг может указывать на то, что в облаках на грозовой стадии присутствуют крупные капли или крупа, покрытая водяной пленкой. Этот результат подтверждает важнейшую роль крупы в электризации облаков. С использованием непараметрического критерия Манна–Уитни показано, что имеет место статистически значимое различие между основными радиолокационными характеристиками грозовых и негрозовых облаков.

С помощью нейронных сетей изучено влияние измеряемых (и вычисляемых) радиолокационных характеристик на частоту молний. В общей сложности было построено 150 нейронных сетей. После этого была проанализирована чувствительность, что позволило ранжировать переменные по степени влияния на выходной параметр. Переменными, оказывающими наибольшее влияние, оказались максимальная дифференциальная отражаемость, объем переохлажденной части и максимальная высота области отражаемости 35 дБZ. Построена регресси-

онная зависимость между частотой молний и радиолокационными параметрами, которые в нейросетевых моделях являются наиболее чувствительными, т.е. сильнее всего влияют на выходную характеристику.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 22-27-20031) и СПбНФ (соглашение № 58/2022 от 15 апреля 2022 г.).

Список литературы

1. Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Попов В.Б., Старых Д.С., Довгалою Ю.А., Веремей Н.Е. Строение грозового облака со смерчем и зависимость частоты молний от его характеристик // Оптика атмосф. и океана. 2020. Т. 33, № 9. С. 705–709. DOI: 10.15372/AOO20200907; Sin'kevich A.A., Mikhailovskiy Yu.P., Toropova M.L., Popov V.B., Starykh D.S., Dovgalyuk Yu.A., Veremei N.E. Thunderstorm with waterspout structure and the dependence lightning frequency on its characteristics // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 9. P. 645–649. DOI: 10.1134/S1024856020060226.
2. Qie X., Zhang Y. A review of atmospheric electricity research in China from 2011 to 2018 // Adv. Atmos. Sci. 2019. V. 36, N 9. P. 994–1014. DOI: 10.1007/s00376-019-8195-x.
3. Cecil D.J., Goodman S.J., Boccippio D.J., Zipser E.J., Nesbitt S.W. Three years of TRMM precipitation features. Part I: Radar, radiometric, and lightning characteristics // Mon. Weather Rev. 2005. V. 133, N 3. P. 543–566. DOI: 10.1175/MWR-2876.1.
4. Saunders C.P.R., Peck S.L. Laboratory studies of the influence of the rime accretion rate on charge transfer during crystal/graupel collisions // J. Geophys. Res.: Atmos. 1998. V. 103, D12. P. 13949–13956. DOI: 10.1029/97JD02644.
5. Синькевич А.А., Попов В.Б., Абшаев А.М., Боу Б., Павар С.Д., Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Гоналакришнан В., Геккиева Ж.М. Радиолокационные характеристики конвективных облаков разных регионов при переходе в грозовую стадию // Оптика атмосф. и океана. 2020. Т. 33, № 12. С. 932–936. DOI: 10.15372/AOO20201205; Sin'kevich A.A., Popov V.B., Abshaev A.M., Boe B.A., Pawar S.D., Mikhailovskiy Yu.P., Toropova M.L., Gopalakrishnan V., Gekkieva Zh.M. Radar characteristics of convective clouds during transition to the cumulonimbus stage in different regions of the world // Atmos. Ocean. Opt. 2021. V. 34, N 2. P. 134–139. DOI: 10.1134/S1024856021020081.
6. Ushio T., Heckman S.J., Boccippio D.J., Christian H.J., Kawasaki Z.-I. A survey of thunderstorm flash rates compared to cloud top height using TRMM satellite data // J. Geophys. Res.: Atmos. 2001. V. 106, N D20. P. 24089–24095. DOI: 10.1029/2001JD900233.
7. 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.
8. Zipser E.J., Lutz K.R. The vertical profile of radar reflectivity of convective cells: A strong indicator of storm intensity and lightning probability? // Mon. Weather Rev. 1994. V. 122, N 8. P. 1751–1759. DOI: 10.1175/1520-0493(1994)122<1751:TVPORR>2.0.CO;2.

9. 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.
10. Petersen W.A., Rutledge S.A. Regional variability in tropical convection: Observations from TRMM // *J. Clim.* 2001. V. 14, N 17. P. 3566–3586. DOI: 10.1175/1520-0442(2001)014<3566:RVITCO>2.0.CO;2.
11. Baker M.B., Christian H.J., Latham J. A computational study of the relationships linking lightning frequency and other thundercloud parameters // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 1995. V. 121, N 527. P. 1525–1548. DOI: 10.1002/qj.49712152703.
12. 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. гидр.* 2019. № 6. С. 37–51.
13. Petersen W.A., Christian H.J., Rutledge S.A. TRMM observations of the global relationship between ice water content and lightning // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32, N 14. DOI: 10.1029/2005GL023236.
14. 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. DOI: 10.15372/AOO20200211; 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. DOI: 10.1134/S1024856020040156.
15. Cornet C., Isaka H., Guillemet B., Szczap F. Neural network retrieval of cloud parameters of inhomogeneous clouds from multispectral and multiscale radiance data: Feasibility study // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2004. V. 109, N D12. DOI: 10.1029/2003JD004186.
16. Wimmers A., Velden C., Cossuth J.H. Using deep learning to estimate tropical cyclone intensity from satellite passive microwave imagery // *Mon. Weather Rev.* 2019. V. 147, N 6. P. 2261–2282. DOI: 10.1175/MWR-D-18-0391.1.
17. McGovern A., Lagerquist R., Gagne D.J., Jergensen G.E., Elmore K.L., Homeyer C.R., Smith T. Making the black box more transparent: Understanding the physical implications of machine learning // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2019. V. 100, N 11. DOI: 10.1175/BAMS-D-18-0195.1.
18. Андреева Е.С. Применение методов нейропрограммирования для определения рисков опасных явлений погоды // *Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Естеств. науки.* 2008. № 5. С. 105–107.
19. Chaharborj S.S., Borazjani M.M., Gheisari Y. Predicting climatic meteorological parameters by using the artificial dynamics neural networks: Case study, Bushehr City // *J. Comput. Sci. Comput. Math.* 2016. V. 6, N 4. DOI: 10.20967/jcscm.2016.04.005.
20. Михайловский Ю.П., Торопова М.Л., Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Синькевич А.А., Янг Дж., Лу Дж. Динамика электрической структуры кучево-дождевых облаков // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2021. Т. 64, № 5. С. 341–353.
21. 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.
22. Сальман Е.М. Комплексный радиолокационный метод метеорологического обслуживания авиации // *Тр. ГГО.* 1964. Вып. 159. С. 24–34.
23. Sin'kevich A., Boe B., Pawar S., Yang J., Abshaev A., Dovgalyuk Y., Gekkieva J., Gopalakrishnan V., Kurov A., Mikhailovskii Y., Toropova M., Veremei N. Investigation of thundercloud features in different regions // *Remote Sens.* 2021. V. 13, N 16. DOI: 10.3390/rs13163216.
24. Buechler D.E., Goodman S.J. Echo size and asymmetry: Impact on NEXRAD storm identification // *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 1990. V. 29, N 9. P. 962–969. DOI: 10.1175/1520-0450(1990)029<0962:ESAAIO>2.0.CO;2.
25. Gremillion M.S., Orville R.E. Thunderstorm characteristics of cloud-to-ground lightning at the Kennedy Space Center, Florida: a study of lightning initiation signatures as indicated by the WSR-88D // *Weather Forecast.* 1999. V. 14, N 5. P. 640–649. DOI: 10.1175/1520-0434(1999)014<0640:TCOCTG>2.0.CO;2.
26. 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. Wea. Dig.* 2003. V. 27, N 1. P. 35–44.
27. 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.
28. 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.
29. Kumjian M.R. Principles and applications of dual-polarization weather radar. Part I: Description of the polarimetric radar variables // *J. Operational Meteor.* 2013. V. 1, N 19. P. 226–242. DOI: 10.15191/nwajom.2013.0119.
30. Методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. Третья ред. М., 2019. 129 с.

A.A. Sin'kevich, A.B. Kurov, Y.P. Mikhailovskii, M.L. Toropova, N.E. Veremei. A study of thunderstorm characteristics in Northwest Russia using neural networks.

The paper presents the results of analysis of radar characteristics of clouds, including the polarization ones, and lightning data for June 9 2020, in the vicinity of Saint-Petersburg. The characteristics of thunderstorm and clouds without lightning are compared. Statistical difference between two groups of clouds has been found. The regression analysis of the correlation between the lightning flash rate and radar characteristics of clouds is performed using neural networks. The impact of these parameters on lightning flash rate has been estimated. A mathematical equation for calculating the lightning flash rate using the differential reflectivity maximum and the cloud volume with the reflectivity equal to 35 dBZ is derived.