

УДК 551(501.815+594+515.3)

Радиолокационные характеристики конвективных облаков разных регионов при переходе в грозовую стадию

А.А. Синькевич¹, В.Б. Попов¹, А.М. Абшаев², В.А. Вое³, S.D. Pawar⁴,
Ю.П. Михайловский¹, М.Л. Торопова¹, V. Gopalakrishnan⁴, Ж.М. Геккиева^{5*}

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

² НППЦ «Антиград»

360004, г. Нальчик, ул. Чернышевского, 198, Россия

³ Weather Modification Inc International

58102, Fargo, ND, 20th Street North, USA

⁴ Indian Institute of Tropical Meteorology

411008, Pashan, Pune, Maharashtra, Dr. Homi Bhabha Road, India

⁵ Высокотурбинный геофизический институт

360030, г. Нальчик, пр. Ленина, 2, Россия

Поступила в редакцию 4.09.2020 г.

Рассмотрены радиолокационные характеристики конвективных облаков в трех регионах мира (Индия, Северный Кавказ и Северо-Запад РФ) при переходе в грозовую стадию. Во всех регионах наблюдается увеличение мощности облаков. На Северо-Западе РФ и Северном Кавказе происходит увеличение максимальной отражаемости и объемов облаков с большими значениями отражаемости. В Индии изменения отражаемости облаков небольшие.

Ключевые слова: гроза, радиолокатор, грозовое облако; thunder, radar, cumulonimbus.

Введение

В настоящее время превалирует мнение, что электризация грозовых облаков в наибольшей степени обусловлена столкновением кристаллов с частицами крупы при наличии переохлажденных капель [1]. Весьма существенной может быть и роль коронных разрядов, которые возникают в облаке при наличии крупных частиц осадков, а также крупных кристаллов [2]. Для изучения грозовых облаков широко используются радиолокаторы различных диапазонов длин волн. Радиолокационная отражаемость от облаков определяется их микроструктурой, пропорциональна концентрации частиц и размеру гидрометеоров в шестой или четвертой степени (для частиц, у которых плотность обратно пропорциональна размеру) [3]. С учетом этого обстоятельства радиолокаторы – наиболее информативное техническое средство, позволяющее фиксировать момент перехода облака в грозовую стадию по изменению отражаемости и других радиолокационных парамет-

ров вследствие появления крупных гидрометеоров [4]. В связи с разнообразием физических процессов, приводящих к электризации облака, зависимости количественных радиолокационных характеристик от множества метеорологических факторов (включая географическое положение) и их значения при переходе кучево-дождевых облаков в грозовую стадию являются предметом исследований [5].

В нашей статье анализируются статистические радиолокационные характеристики облаков, переходящих в грозовую стадию, для трех регионов: Индия, Северный Кавказ и Северо-Запад России, которые находятся в различных физико-географических и климатических условиях, что отражается на развитии грозовых кучево-дождевых облаков. Характеристики атмосферной циркуляции определяют годовой ход грозовой активности. В общем ряду выделяется Индия, для которой характерна муссонная циркуляция.

Данные и методика анализа

Для каждого района было отобрано ~60 конвективных облаков, переходящих в грозовую стадию. Для них были рассчитаны радиолокационные характеристики за 10 мин до начала грозовой активности и при первых разрядах. В Индии были выбраны облака, характерные для окончания периода муссонов, в России – континентальные облака теплого периода года.

* Андрей Александрович Синькевич (sinkevich51@mail.ru); Виктор Борисович Попов (qoower@gmail.com); Али Магомедович Абшаев (abshaev.ali@mail.ru); Bruce Austin Voe (bboe@weathermodification.com); Sunil Dnyandeo Pawar (pawar@tropmet.res.in); Юрий Павлович Михайловский (yuralych@yandex.ru); Марина Леонидовна Торопова (marina-toropova@mail.ru); Venkatachalam Gopalakrishnan (gopal@tropmet.res.in); Жулдуз Магомедовна Геккиева (julduz_gekkieva@mail.ru).

Данные в Индии получены радиолокатором WR-100, установленным в г. Гадаге (15°25' с.ш., 75°36' в.д.); анализируемый период: конец сентября – начало октября 2019 г. Радиолокационные данные для Северного Кавказа получены по измерениям МРЛ-5, расположенного вблизи г. Ставрополя (45°06' с.ш., 42°06' в.д.), за май – сентябрь 2010–2018 гг. Для Северо-Запада России использовались данные радиолокатора ДМРЛ-С вблизи г. Санкт-Петербурга (59°57' с.ш., 30°42' в.д.) за май – сентябрь 2017–2018 гг. Радиолокационные данные для всех регионов усреднены с шагом 1 км по горизонтали и вертикали. Основные технические характеристики использованных радиолокаторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные технические характеристики радиолокаторов

Параметр	Радиолокатор		
	WR-100	МРЛ-5, II канал	ДМРЛ-С
Длина волны, см	5,4	10	5,3–5,5
Ширина луча, град.	1,65	1,5	1,0
Чувствительность, дБ/Ватт	–	–140	–142
Максимальная дальность обнаружения метеорообъектов, км	100 (при отражаемости 0 дБZ)	300	250

Погрешность радиолокационных измерений гидрометеоров зависит от погрешности инструментальных измерений, а также от принятых допущений относительно однократности и некогерентности рассеяния, формы гидрометеоров, их диэлектрических свойств и вида функции распределения по размерам [4, 6]. Различия в радиолокационных характеристиках облаков рассматриваемых регионов могут быть в некоторой степени связаны с различием параметров используемых метеорологических радиолокаторов (табл. 1). В частности, при расчете высоты верхней или нижней границы облака в условиях нормальной рефракции погрешность может быть связана с точностью позиционирования антенны. Если принять последнюю равной 0,1°, то на расстоянии 50–100 км от радиолокатора максимальная погрешность измерения высоты метеоцели может достигать 175 м, а на 200 км – 350 м.

Анализировались следующие радиолокационные характеристики: высота верхней границы облака по уровню отражаемости 5 дБZ H_{top} (км), максимальная отражаемость Z_{max} (дБZ), высота $H_{Z_{max}}$ (км), на которой обнаружена Z_{max} , высота $dH_{Z_{max}}$ (км) относительно изотермы 0° С, толщина облака $dH35$ и $dH45$ (км) и объем облака $dV35$ и $dV45$ (км³) выше изотермы 0° С с отражаемостью, превышающей порог 35 и 45 дБZ.

Грозовые разряды определялись по измерениям следующих систем: грозопеленгационная сеть в Индии (URL: <https://www.tropmet.res.in/~lip/annual-reports/AR-English-2013-14.pdf>), LS8000 на Северном Кавказе [7] и Blitzortung на Северо-Западе РФ. Наибольшая медиана в распределении частот молний отмечалась на Северном Кавказе (1,2 мин⁻¹), в Ин-

дии она составила 0,3 мин⁻¹, а на Северо-Западе РФ – 0,2 мин⁻¹. Эти различия могут быть обусловлены как региональными особенностями облаков, так и разницей в характеристиках грозопеленгаторов.

Анализ радиолокационных характеристик

По результатам измерений были сформированы выборки указанных выше радиолокационных характеристик для трех регионов. Выполнен анализ различий выборок до и в момент первых разрядов для каждого параметра и по каждому региону. В связи с тем, что выборки в большинстве своем не подчиняются нормальному закону распределения, для их сравнения использовался непараметрический метод проверки различия зависимых выборок – критерий знаковых рангов Уилкоксона [8]. С его помощью рассчитаны р-уровни значимости (p-value) схожести значений медиан исследуемых характеристик в облаках с разрядами и без них для каждого региона (табл. 2).

Известно, что чем больше р-значение, тем меньше различий между распределениями двух выборок. Полученные р-значения указывают на то, что в облаках Индии переход в грозовую стадию не сопровождается заметными изменениями радиолокационных характеристик (р-значение > 0,1), кроме высоты верхней границы облаков (р-значение = 0,01). На Северном Кавказе и на Северо-Западе России наблюдаются статистически значимые различия характеристик облаков до начала грозовой активности и при первых разрядах, за исключением $H_{Z_{max}}$ и $dH_{Z_{max}}$ для Северного Кавказа.

Для иллюстрации распределений исследуемых характеристик на рис. 1 представлены диаграммы «ящик с усами» отдельно по каждому региону.

Параметр $dH_{Z_{max}}$ показывает, что максимальная отражаемость переходящих в грозовую стадию облаков в основном наблюдается на высотах ± 2 км относительно изотермы 0° С во всех регионах: на Северном Кавказе и в Индии обычно выше, а на Северо-Западе России – ниже уровня таянья. В рассматриваемых регионах России высоты расположения максимальной отражаемости $H_{Z_{max}}$ и $dH_{Z_{max}}$ в целом уменьшаются при переходе облаков в грозовую стадию, что можно связать с усилением процесса осадкообразования, т.е. осадки перемещаются в нижнюю часть облака, а регистрируемые максимальные значения отражаемости обусловлены частицами осадков. Особенно ярко это проявляется в облаках Северо-Западного региона. В Индии этот процесс не наблюдается.

Для регионов России $dH35$ и $dH45$ увеличиваются при переходе облаков в грозовую стадию. В Индии большая часть выборки этих параметров как до, так и в момент начала грозовой активности находится в пределах 2,5–4,5 км. Таким образом, для облаков в РФ грозовая активность происходит на фоне вертикального развития областей с крупными частицами (в соответствии с радиолокационным

Статистические характеристики исследуемых параметров

Регион	Параметр	p-значение	Среднее	Стандартное отклонение	Медиана	Максимум
Индия	H_{top}	0,01	12,7/13,2	1,6/1,5	12,5/13,5	14,5/14,5
	Z_{max}	0,8	44,7/44,5	4,4/4,4	45/45,5	53,5/54
	$H_{Z_{max}}$	0,38	5,4/5,2	1,7/1,7	5,8/5,8	8/8,75
	$dH_{Z_{max}}$	0,38	0,4/0,2	1,7/1,7	0,8/0,8	3/3,75
	$dH35$	0,59	3,6/3,5	1,5/1,9	4,5/3,5	7,5/8,5
	$dH45$	0,92	1/1,1	1,4/1,6	0/0	4,5/5,5
	$dV35$	0,41	64,5/76,3	72/86,5	30/42	336/370
	$dV45$	0,79	5,1/5,7	12,1/11,3	0/0	74/56
Северный Кавказ	H_{top}	0	10,1/11,4	2/2,4	9,5/11,1	16/16
	Z_{max}	0	46,3/52,6	7/6	46/51	61/70
	$H_{Z_{max}}$	0,1	4,9/4,6	1,1/1,6	4,5/4,5	9,5/8
	$dH_{Z_{max}}$	0,1	1,2/0,9	1,7/1,4	1/1	4,6/4,6
	$dH35$	0	3,2/4,7	1,8/1,8	3,2/4,4	7,9/8,4
	$dH45$	0	1,2/2,5	1,9/2,2	0/1,7	7,2/7,7
	$dV35$	0	178/335	251/318	62/206	1040/1730
	$dV45$	0	33,3/76,5	81,1/139	1/25	387/719
Северо-Запад России	H_{top}	0	8,7/10	1,4/1,6	8,5/9,5	12,5/13,5
	Z_{max}	0	49,2/52,7	4,4/3,3	49/52	60,5/59
	$H_{Z_{max}}$	0	2,2/1,8	0,9/0,5	1,5/1,5	4,5/3,5
	$dH_{Z_{max}}$	0	-0,5/-0,9	0,8/0,7	-0,7/-0,8	2,1/0,6
	$dH35$	0	2,6/3,2	1,1/1,2	2,6/3,2	5,8/5,7
	$dH45$	0	0,7/1,3	0,7/1	0,6/1,2	2,6/4,6
	$dV35$	0	65/108	48,6/82,2	53,5/79	234/422
	$dV45$	0	7,9/19,5	12/23,4	3/11	62/114

Примечание. Числитель – значение характеристики за 10 мин до разрядов, знаменатель – в период первых разрядов

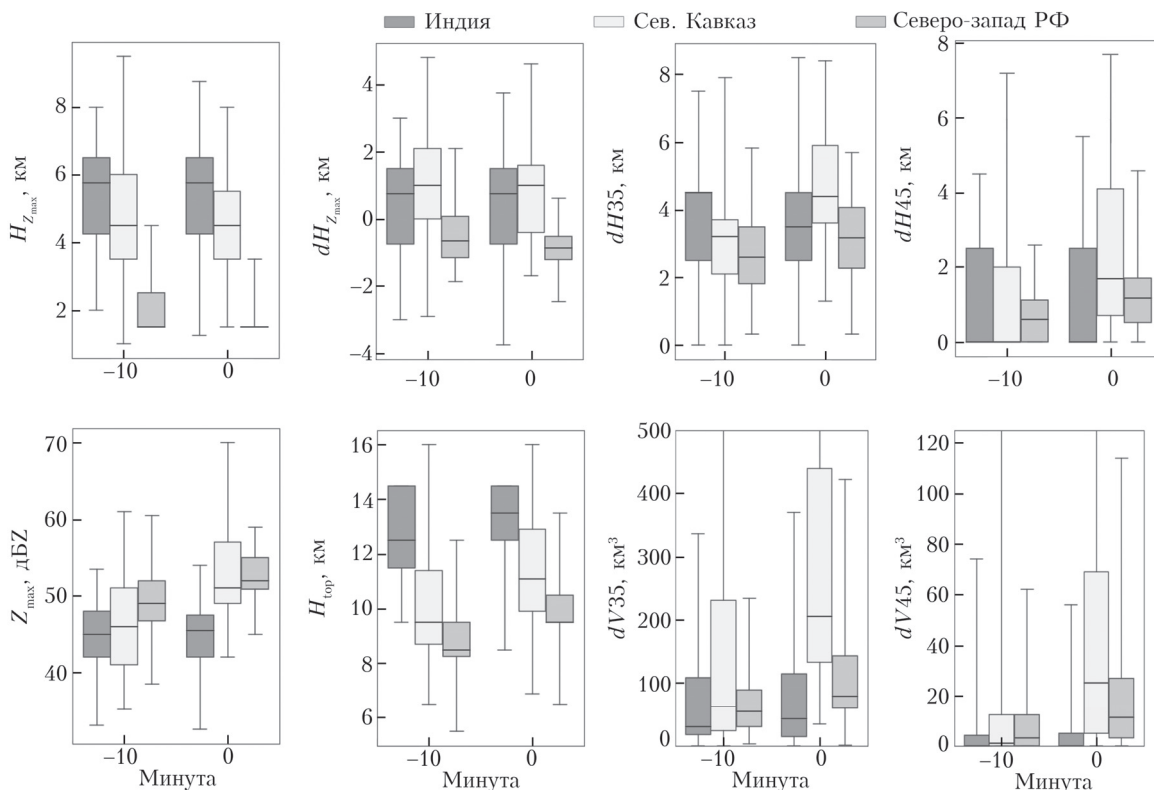


Рис. 1. Диаграмма «ящик с усами» выборок радиолокационных характеристик для двух сканов радиолокатора; 0 мин – скан, в котором зафиксированы разряды; -10 мин – скан за 10 мин до разрядов; «ящик» определяет положение квантилей 25 и 75%, линия внутри ящика – медиана; «усы» – минимальное и максимальное значения в выборке

уравнением можно допустить, что отражаемость в значительной степени определяется крупными гидрометеорами). Для постмуссонных облаков в Индии такого увеличения не наблюдается.

Максимальная отражаемость Z_{\max} для исследованных облаков в РФ растет при переходе в грозовую стадию, что может быть связано с увеличением гидрометеоров. В постмуссонных облаках в Индии разницы в распределениях Z_{\max} не отмечается. Максимальная отражаемость для Северо-Запада РФ на -10 мин оказалась наибольшей по сравнению с другими регионами. Это можно объяснить тем, что $dH_{Z_{\max}}$ в этот момент в основном меньше 0, таким образом фиксируется максимум отражаемости в зоне таянья. В этой области кристаллические частицы покрываются водяной пленкой, что приводит к увеличению отражаемости за счет изменения диэлектрических свойств рассеивающих частиц.

Единственный параметр облаков, который увеличивается для всех регионов при их переходе в грозовую стадию, — это высота верхней границы (H_{top}). Наибольшие значения этого параметра (медиана равна 13,5 км) в Индии, а наименьшее — в Северо-Западном регионе России (медиана равна 9,5 км), что соответствует общему увеличению мощности облаков с уменьшением широты.

Объемы $dV35$ и $dV45$ увеличиваются при появлении первых разрядов у рассматриваемых облаков в РФ. Отметим, что значения рассматриваемых объемов облаков в Индии невелики; $dV45$ для Северо-Запада России составляет 11 км^3 (медиана), для Северного Кавказа — 25 км^3 , в то время как для Индии его медианным значением является 0 км^3 . Таким образом, появление грозных разрядов сопровождается заметным увеличением рассматриваемых объемов с высокими значениями отражаемости на территории России, а в Индии эти изменения не наблюдаются. Одним из существенных отличий постмуссонных облаков в Индии от континентальных облаков РФ можно считать отсутствие (или малое количество) крупных ледяных час-

тиц, которые в значительной степени определяют отражаемость облака выше нулевой изотермы, что отмечалось нами и ранее [9].

В качестве примера на рис. 2 приведены вертикальные разрезы отражаемости Z облаков в рассмотренных регионах.

Верхняя граница облаков в Индии и на Северном Кавказе заметно превышает верхнюю границу облаков на Северо-Западе России. Радиолокационная отражаемость облаков в Индии существенно ниже, чем на Северном Кавказе и Северо-Западном регионе РФ. Радиолокационные характеристики облака в Индии при переходе в грозовую стадию не изменились или уменьшились. В частности, отмечено уменьшение объемов переохлажденной части $dV35$ с 51 до 25 км^3 , $dV45$ с 7 до 0 км^3 и Z_{\max} с 50 до 46 дБZ . В отличие от рассматриваемого облака радиолокационные характеристики Сб на Северном Кавказе увеличились: $dV35$ с 74 до 174 км^3 , $dV45$ с 12 до 69 км^3 , Z_{\max} с 54 до 60 дБZ . Отметим существенное увеличение отражаемости выше изотермы 0° C (4 км) — $Z > 55 \text{ дБZ}$, которое может быть связано с увеличением размеров ледяных частиц. В исследованном облаке, развивавшемся на Северо-Западе России, зарегистрировано увеличение $dV35$ с 55 до 64 км^3 , а также уменьшение $dV45$ с 8 до 4 км^3 и Z_{\max} с 49 до 48 дБZ . Здесь заметно усилился процесс образования осадков — на 0-й минуте в нижней части облака фиксируется область повышенной отражаемости.

Обсуждение полученных результатов

Анализ изменения характеристик облаков континентального типа (облака на Северном Кавказе и северо-западе РФ) показал, что при переходе в грозовую стадию отмечается их вертикальное развитие, происходит увеличение отражаемости и объема облака с высокой радиолокационной отражаемостью, что может указывать на рост количества и размеров крупных ледяных частиц. В облаках

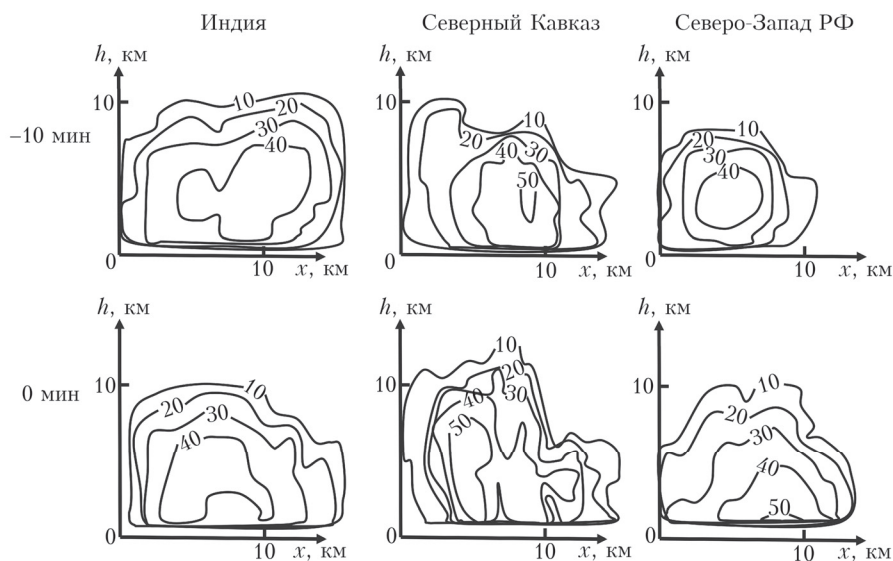


Рис. 2. Вертикальные разрезы Z облаков в трех регионах при переходе в грозовую стадию

постмуссонного типа (Индия) увеличивается только высота верхней границы, отражаемость изменяется незначительно. При этом отражаемость от облаков меньше, чем в континентальных облаках. Можно предположить, что это связано с существенно меньшим количеством крупных ледяных частиц. При достаточной неустойчивости атмосферы образуется конвективное облако; причем по данным наблюдений дождевые капли отличаются на 2,7 км выше нижней границы облака [10, 11]. Как и в [9], можно полагать, что задействован механизм формирования «теплого дождя». Определяющим механизмом образования дождевых капель является их коагуляция с облачными каплями. В то же время электрическая активность свидетельствует о присутствии ледяной фазы. Значительные скорости восходящего потока приводят к тому, что капли могут выноситься потоком и замерзать на достаточно больших высотах. При их быстром замерзании происходит выброс сплинтеров [12], которые за счет диффузионного роста образуют большое количество мелких кристаллов. Это препятствует их дальнейшему увеличению вследствие недостаточного количества водяного пара, что замедляет процесс формирования крупы — одной из важнейших составляющих, с которыми связана электризация облака. Этим может объясняться низкая электрическая активность муссонных облаков, отмеченная в [13, 14]. В пользу упомянутого предположения также говорит тот факт, что в Индии крайне редко выпадает град, а максимальная радиолокационная отражаемость грозных облаков ниже, чем в других регионах [3].

Заключение

Проведен сравнительный анализ радиолокационных характеристик облаков, переходящих в грозную стадию, в трех регионах Земли (Индия, Северный Кавказ и Северо-Запад РФ).

Единственный параметр облаков, который увеличивается для всех регионов при их переходе в грозную стадию, — высота верхней границы. Наибольшее значение этого параметра отмечено в Индии (медиана равна 13,5 км), а наименьшие — в Северо-Западном регионе РФ (медиана равна 9,5 км).

Максимальная отражаемость Z_{\max} для исследованных облаков в РФ увеличивается при переходе в грозную стадию, в облаках Индии разницы в распределениях Z_{\max} не отмечается. Максимальная отражаемость для облаков Северо-Запада РФ оказалась наибольшей среди всех рассмотренных групп в момент появления первых разрядов, что связано с увеличением отражаемости в зоне таяния ледяных частиц.

В РФ объемы переохлажденной части облаков с высокой отражаемостью увеличиваются при появлении первых разрядов. Соответствующие объемы у облаков Индии существенно меньше и слабо ме-

няются при переходе в грозную стадию. Указанные различия, по-видимому, связаны с условиями формирования крупных ледяных частиц, которых в облаках Индии оказывается значительно меньше.

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (грант № БРИКС_т 18-55-80020).

1. *Saunders C.* Charge separation mechanisms in clouds // *Space Sci Rev.* 2008. V. 137. P. 335–353.
2. *Синькевич А.А., Довгалюк Ю. А.* Коронный разряд в облаках // *Радиофизика.* 2013. Т. LVI, № 11–12. С. 1–12.
3. *Синькевич А.А., Краус Т.В.* Эффективность воздействия кристаллизующими реагентами на конвективные облака с целью увеличения осадков // *Радиолокационная метеорология и активные воздействия* [сб. статей]. СПб: Главная геофизическая обсерватория, 2012. С. 30–49.
4. *Абшаев М.Т., Бурцев И.И., Ваксенбург С.И., Шевела Г.Ф.* Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе гроззащиты. Л.: Гидрометеониздат, 1980. 231 с.
5. *Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Богданов Е.В., Аджиев А.Х., Малкарова А.М., Абшаев А.М.* Исследования развития грозо-градового облака. Часть 1. Развитие облака и формирование электрических разрядов // *Метеорол. и гидрол.* 2016. № 9. С. 27–40.
6. *Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Малкарова А.М., Баркова М.В.* Руководство по организации и проведению противорадовых работ. Нальчик: Печатный двор, 2014. 500 с.
7. *Аджиев А.Х.* Аппаратура и методика синхронной регистрации микрофизических и электрических характеристик конвективных облаков // *Приборы и техника эксперимента.* 2015. № 5. С. 151–152.
8. *Wilcoxon F.* Individual comparisons by ranking methods // *Biometr. Bull.* 1945. V. 1. P. 80–83.
9. *Краус Т.В., Синькевич А.А., Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Степаненко В.Д.* Исследование развития сверхмощного кучево-дождевого облака (провинция Андхра Прадеш, Индия, 28 сентября 2004 г.) // *Метеорол. и гидрол.* 2007. № 1. С. 30–42.
10. *Prabha T.V., Khain A., Maheshkumar R.S., Pandithurai G., Kulkarni J.R., Konwar M., Goswami B.N.* Microphysics of premonsoon and monsoon clouds as seen from in situ measurements during the cloud aerosol interaction and precipitation enhancement experiment (CAIPEEX) // *J. Atmos. Sci.* 2011. V. 68. P. 1882–1901. DOI: 10.1175/2011JAS3707.1.
11. *Bera Sudarsan.* Observations of monsoon convective cloud microphysics over India and role of entrainment-mixing // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2016. V. 121. DOI: 10.1002/2016JD025133.
12. *Beard K.V.* Ice initiation in warm-base convective clouds: An assessment of microphysical mechanisms // *Atmos. Res.* 1992. V. 28. P. 125–152.
13. *Manohar G., Kesarkar A.* Climatology of thunderstorm activity over the Indian region: II. Spatial distribution. // *Mausam.* 2004. V. 55. P. 31–40.
14. *Patra S., Kalapureddy M.* Cloud microphysical profile differences pertinent to monsoon phases: inferences from a cloud radar // *Meteorol. Atmos. Phys.* 2019. DOI: 10.1007/s00703-019-00666-9.

A.A. Sin'kevich, V.B. Popov, A.M. Abshaev, B.A. Boe, S.D. Pawar, Yu.P. Mikhailovskii, M.L. Toporova, V. Gopalakrishnan, Zh.M. Gekkieva. Radar characteristics of Cu during their transition to thunderstorm in different regions of the world.

Radar characteristics of convective clouds during their transition to thunderstorm stage are considered for three regions of the world (India, North Caucasus, and north-west of Russia). Cu depth increases in all regions; the reflectivity and cloud volumes with high reflectivity increase in Russia. Changes in reflectivity in clouds in India are low.