

В радиометеорологии высота верхней границы облачности, за которую принимается высота радиоэха, наряду с радиолокационной отражаемостью, является основной радиолокационной характеристикой распознавания облачности и явлений погоды. В результате радиолокационного исследования кучево-дождевой облачности (*Cb*) на территории центральной части Уральского Прикамья, были определены пространственная структура и статистические характеристики отражаемости конвективных ячеек с ливнями, грозой и градом [6–9]. Высота радиоэха облачности и явлений представляет не меньший интерес.

В данной статье представлены результаты статистического исследования высоты верхней границы радиоэха опасных явлений погоды, связанных с кучево-дождевой облачностью, на территории центральной части Уральского Прикамья. В ходе работы были поставлены и решены следующие задачи: проанализирована корреляционная связь между фактической высотой *Cb* и высотой радиоэха облачности в зависимости от расстояния; определены статистические характеристики высоты распространения радиоэха конвективной облачности; получена повторяемость высот радиоэха для различных видов конвективных явлений (ливни, гроза, град); оценена зависимость максимальной высоты радиоэха *Cb* от высоты распространения нулевой изотермы, а также зависимость максимальной отражаемости *Cb* от высоты распространения радиоэха.

Радиолокационные данные представлены информацией, полученной на МРЛ–5 АМСГ Большое Савино (г. Пермь) с помощью АМРК «Метеоячейка» за 1998 – 2003 гг. Центральная часть Уральского Прикамья включает в себя три субъекта Российской Федерации: центральную и южную часть Пермской области, Коми-Пермяцкий автономный округ и юго-запад Свердловской области. Исследовались 2765 конвективных ячеек с ливнем, 1188 ячеек с грозой, 62 ячейки с градом.

Максимальная высота (H_{\max}), до которой распространяются *Cb*, зависит от состояния атмосферы [11]. Наибольшие значения (до 20 км) H_{\max} конвективных облаков отмечаются в тропиках, понижаясь к высоким широтам. При определении высоты *Cb* по информации МРЛ необходимо помнить, что верхняя граница радиоэха соответствует верхней границе облаков, если выполняется условие $Z(H_{\text{ВГ}}) \geq Z_{\min}(R)$, где $Z(H_{\text{ВГ}})$ — отражаемость на верхней границе облака, R — расстояние от границы облака до МРЛ, а $Z_{\min}(R)$ — минимально обнаруживаемая отражаемость на этом расстоянии [1, 12]. Точность определения высоты облаков с помощью МРЛ зависит от технических параметров МРЛ, способов измерения высоты радиоэха, мощности боковых лепестков антенны, структуры отражаемости в верхней части облака. Причем высота радиоэха облачности оказывается завышенной за счет конечных размеров зондирующего импульса радиолокатора. Это завышение компенсируется ослаблением сигнала МРЛ с увеличением расстояния и рефракцией радиоволн [12]. Таким образом, происходит завышение верхней границы облачности на расстоянии $R \leq 40$ км и ее занижение на расстоянии более 40 км. При значении потенциала МРЛ $P_m \geq 47$ дБZ средние вероятные ошибки определения верхней границы *Cb* для различных расстояний составляют [3]:

удаление от МРЛ, км	30	31–50	51–100	101–150	151–200	201–300
средняя ошибка, м	± 150	± 200	± 300	± 500	± 700	± 1000

Меньшее значение потенциала МРЛ ведет к резкому увеличению ошибки измерения высоты радиоэха, так как верхняя часть облаков не может быть обнаружена.

Оценим зависимость высоты радиоэха конвективной облачности от расстояния ее обнаружения. Ввиду различий в мощности, водности и концентрации частиц летних *Cb* по сравнению с зимними, дадим подобную оценку для каждого месяца.

Месяц (число случаев)	I (24)	II (25)	III (20)	IV (37)	V (419)	VI (1086)
Коэффициент корреляции, <i>r</i>	-0,8	-0,54	-0,5	-0,25	0	0
Месяц (число случаев)	VII (1274)	VIII (561)	IX (226)	X (25)	XI (17)	XII (49)
Коэффициент корреляции, <i>r</i>	0	-0,16	-0,31	-0,23	-0,53	-0,38

В течение всего года отмечается обратная зависимость между двумя рассмотренными характеристиками. Значимые коэффициенты корреляции [5] наблюдаются в месяцы холодного периода (декабрь–февраль) и в месяцы теплого периода (август и сентябрь). Максимальное значение корреляции (0,8) соответствует январю. Для апреля, октября и ноября коэффициенты корреляции лежат ниже уровня значимости, а в мае–июле линейная связь между высотой радиоэха и расстоянием вообще отсутствует. Данные о высоте радиоэха на расстоянии свыше 40 км в холодный период года редко правильно характеризуют фактическую высоту облачности. Это объясняется небольшими значениями отражаемости в верхней части слоисто-дождевых и кучево-дождевых облаков, из-за чего мощность электромагнитных сигналов, отраженных от верхних слоев облачности, часто ниже чувствительности МРЛ. В этом случае радиолокатор обнаруживает только крупнокапельную зону облака, которая обычно расположена заметно ниже вершин облаков. Поскольку отражаемость зимнего конвективного облака ниже *Cb*, развившегося в теплый период года, то и эффективный радиус обнаружения зимних *Cb* значительно меньше той же характеристики *Cb*, развившихся летом. Таким образом, для холодного периода года справедливо условие, согласно которому, чем дальше от МРЛ расположено конвективное облако, тем с большей погрешностью могут быть определены его вертикальные размеры.

В апреле–июле отмечаются максимальные размеры кучево-дождевой облачности (табл.1). Развитию *Cb* в эти месяцы способствует, помимо фронтального, термический фактор. Облака в летний период достигают значительных высот (иногда пробивая тропопаузу), по фазовому составу являются смешанными, обладают большой водностью, а, следовательно, и большими значениями отражаемости во всем слое облака. Такие облака прослеживаются в пределах всего радиуса действия радиолокатора и, как показывают приведенные данные и табл. 1, для них происходит незначительное занижение высоты радиоэха облачности с расстоянием.

В августе и сентябре, за счет уменьшения абсолютного числа гроз и града и увеличения повторяемости *Cb* с ливневыми осадками, а также ослабления термической конвекции, облака не получают такого вертикального развития, как в мае–июле, и обладают меньшими значениями отражаемости во всем слое облака, что также ведет к искажению их истинных вертикальных размеров.

Таблица 1

Средние месячные значения высоты радиоэха кучево-дождевой облачности

в зависимости от расстояния до МРЛ

Расстояние, км	Месяц					
	I	II	III	IV	V	VI
0–200	3,01±0,47	4,49±0,55	3,82±0,71	4,24±0,48	5,09±0,23	6,46±0,16
0–50	3,6	4,85	4,2	4,39	4,97	6,96
51–100	2,75	3,9	3,25	4,05	4,9	6,73
> 100	2,05	3,69	3,25	3,75	4,98	5,93
Расстояние, км	Месяц					
	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0–200	8,0±0,14	6,46±0,2	5,3±0,24	4,1±1,11	4,78±0,82	3,8±0,59
0–50	8,03	6,93	5,94	4,23	5,12	5,75
51–100	8,37	6,39	5,14	3,19	3,63	3,2
> 100	7,87	6,03	4,43	–	3,25	2,64

Примечание: для расстояния 0–200 км среднемесячные значения высоты радиоэха кучево-дождевых облаков даны с доверительными интервалами при 5 %-ом уровне значимости.

Если принять, что средняя высота радиоэха на расстоянии 0–50 км от МРЛ соответствует реальной средней высоте облачности, то из данных табл. 1 следует, что в холодный период года (октябрь–апрель) происходит занижение высоты радиоэха облаков на расстоянии 51–100 км в среднем на 1167 м, на расстоянии свыше 100 км — на 1547 м. В теплый период года (май–сентябрь) занижение облачности на расстоянии 51–100 км составляет 260 м, на расстоянии более 100 км — 718 м.

Рассмотрим, как изменяются статистические характеристики высоты радиоэха конвективной облачности (табл. 2) (здесь \bar{X} — среднее значение; σ — среднеквадратическое отклонение; As — коэффициент асимметрии; E — эксцесс; Mo — мода; Me — медиана; C_v — коэффициент вариации [4]). Как видно из данных табл. 2, распределение H_{\max} отличается от нормального, имеет некоторую асимметричность (в целом за год положительную) и, за исключением отдельных случаев, плосковершинность, что говорит о преобладании высот радиоэха Cb выше их среднего значения при том, что наиболее часто встречающееся в выборке значения H_{\max} (Mo) меньше \bar{X} , а размах изменчивости не превышает $\pm 3\sigma$.

Обратимся к статистическим характеристикам высоты радиоэха конвективной облачности, сопровождающейся ливнями, грозами и градом.

Таблица 2

Статистические характеристики высоты радиоэха C_b в зависимости от расстояния и периода года

Статистическая характеристика	Расстояние, км	Месяц												Период	
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	ГП	ХП
\bar{x}	0–50	3,6	4,85	4,2	4,39	4,97	6,96	8,03	6,93	5,94	4,23	5,12	5,75	6,7	4,67
	51–100	2,752,	3,9	3,25	4,05	4,9	6,73	8,37	6,39	5,14	3,19	3,63	3,2	6,48	3,44
	> 100	5	3,69	3,25	3,75	4,98	5,93	7,87	6,03	4,43	–	3,25	2,64	6,34	2,83
σ	0–50	0,75	1,27	1,4	1,29	2,17	2,47	2,32	2,22	1,72	1,88	1,54	1,46	2,4	1,45
	51–100	0,99	1,01	0,79	1,38	2,26	2,56	2,56	2,44	1,98	1,74	0,43	0,91	2,72	1,32
	> 100	0,89	1,14	1,06	0,77	2,64	2,63	2,56	2,49	1,89	–	–	1,17	2,86	1,15
As	0–50	0,78	-0,73	1,08	1,14	0,74	0,41	-0,15	0,24	0,59	-0,49	-0,69	-0,65	0,39	0,07
	51–100	-0,84	-0,25	-0,69	0,77	0,76	0,41	-0,37	0,37	0,6	0,43	0	-0,32	0,37	0,53
	> 100	0,72	0,2	0,94	1,88	0,54	0,46	-0,28	0,55	0,45	–	–	0,16	0,28	0,22
E	0–50	-0,81	0,62	0,26	-0,17	-0,22	-0,51	-0,9	-0,81	0,52	-1,59	-0,32	-0,29	-0,55	-0,86
	51–100	-0,35	-2,51	-1,7	2,05	-0,32	-0,5	-0,64	-0,83	-0,12	-3,58	-6,0	0,64	-0,83	1,19
	> 100	-2,23	-3,2	–	4,23	-1,0	-0,77	-0,49	-0,58	-0,56	–	–	-0,54	-1,02	-0,25
Mo	0–50	3,0	5,0	3,0	4,0	2,5	6,0	6,0	4,5	6,0	6,0	4,0	6,0	6,0	4,0
	51–100	3,0	4,0	3,0	3,5	6,0	5,0	10,0	4,5	4,0	1,75	3,25	3,25	5,0	3,5
	> 100	1,5	4,0	3,0	3,5	2,5	3,5	10,0	4,5	2,25	–	–	3,0	3,5	3,25
Me	0–50	3,25	5,0	4,0	4,0	4,25	6,25	7,88	7,25	6,0	4,5	5,75	6,0	7,0	4,5
	51–100	3,0	4,0	3,38	3,63	6,0	6,5	9,0	6,13	5,0	2,88	3,63	3,25	6,25	3,5
	> 100	1,5	3,62	3,0	3,5	4,0	5,25	8,25	5,5	4,0	–	–	2,88	6,0	3,0
C_v	0–50	0,16	0,31	0,25	0,22	0,42	0,47	0,42	0,38	0,380,	0,38	0,35	0,28	0,41	0,4
	51–100	0,29	0,21	0,15	0,38	0,42	0,47	0,45	0,39	42	0,7	0,08	0,33	0,46	0,42
	> 100	0,26	0,19	0,07	0,18	0,44	0,47	0,47	0,45	0,42	–	–	0,45	0,49	0,44
число случаев	0–50	11	17	10	19	150	318	318	217	114	10	13	15	834	89
	51–100	8	4	4	10	147	322	310	172	67	4	4	16	770	24
	> 100	5	4	3	8	122	446	646	199	72	–	–	18	1057	37

На территории исследования максимальная высота радиоэха конвективных облаков (РКО) изменяется в пределах 0,8 – 14,5 км (табл. 3), составляя в среднем для *Cb* с ливнями 4,7, с грозами 9,2, с градом 11,6 км. Таким образом, средние значения H_{\max} для кучево-дождевых облаков с различными явлениями существенно отличаются. В то же время, можно отметить, что максимальные значения высот для *Cb* с конвективными явлениями (отмеченный максимум распространения H_{\max}), например, для *Cb* с грозой и градом, одинаков, хотя модальные и медианные значения для градовых облаков превышают подобные характеристики для грозовых *Cb*.

По данным [11] модальное значение высоты кучево-дождевого облака с ливнем в центральных районах ЕТР составляет 6, в южных районах — 8 км. Для грозовых *Cb* величина этой же характеристики равна 8 км в центральных районах и 10 км в южных районах. Грозовые *Cb* в центральных и южных районах России в основном имеют $H_{\max} = 8 - 9$ км [2, 11], на Северном Кавказе, Грузии и Узбекистане — 8 – 10 км [10, 13], на Украине — 6 – 9 км [11].

Таблица 3

Статистические параметры распределения H_{\max} радиоэха для *Cb* с различными конвективными явлениями

<i>Cb</i> с явлением	\bar{H}_{\max} , км	Критические значения H_{\max} , км		$\sigma(H_{\max})$, км	$Mo(H_{\max})$, км	$Me(H_{\max})$, км
		минимум	максимум			
ливневый снег	3,8	0,8	8,0	3,5	3,0	3,3
ливневый дождь	5,6	1,3	11,8	4,9	6,0	5,5
гроза	9,2	3,5	14,5	3,2	10,0	9,5
град	11,6	8,8	14,5	1,8	10,5	11,5
РКО	6,9	0,8	14,5	7,7	6,0	7,0

Рассмотрим повторяемость распространения максимальной высоты радиоэха с конвективными явлениями до определенной высоты на территории исследования. На рис. 1 а – в представлены значения повторяемости H_{\max} в конвективных ячейках с ливнями, грозой и градом соответственно. Наибольшее число облаков, дающих ливневые осадки, имеют $H_{\max} = 4 - 6$ км (39 %), грозы чаще всего отмечаются в *Cb* с $H_{\max} = 8 - 10$ км (35 %), град — в *Cb* с $H_{\max} \geq 12$ км (52 %).

Возвращаясь к табл. 3, отметим, что хотя в ячейках с грозой и с градом зарегистрирован одинаковый максимум H_{\max} , повторяемость распространения грозовых *Cb* до высот >12 км составляет лишь 3 %.

На территории исследования в 26 и 30 % случаев грозы отмечались соответственно при $H_{\max} = 6 - 8$ и $10 - 12$ км, в 6 % случаев грозы развивались при $H_{\max} = 4 - 6$ км. Были отмечены также грозы с $H_{\max} < 4$ км (менее 1 %). Отдельные грозовые облака достигают высоты более 12 км.

Как уже было отмечено, наибольшая повторяемость *Cb* с градом (52 %) связана с $H_{\max} \geq 12$ км, в 40 % случаях град регистрировался при $H_{\max} = 10 - 12$ км, в 8 % случаев — при максимальной высоте менее 10 км. Таким образом, отмечаются значительные колебания H_{\max} кучево-дождевой облачности с конвективными явлениями, что особенно хорошо видно на примере грозовых *Cb*. Подобное распределение высот может объясняться тем, что МРЛ обнаруживает конвективные явления на разных стадиях их развития, кроме того, максимальная высота распространения радиоэха кучево-дождевой облачности имеет разное значение в летние месяцы, а также в мае и сентябре, которые при проведении исследования также были отнесены к теплomu периоду. Так, на территории исследования средняя максимальная высота радиоэха гроз, отмечавших-

ся в мае и сентябре, составляет 7,8 км, а наибольшее число гроз, отмечавшихся в эти месяцы, имеет $H_{\max} = 4 - 8$ км (59 % случаев).

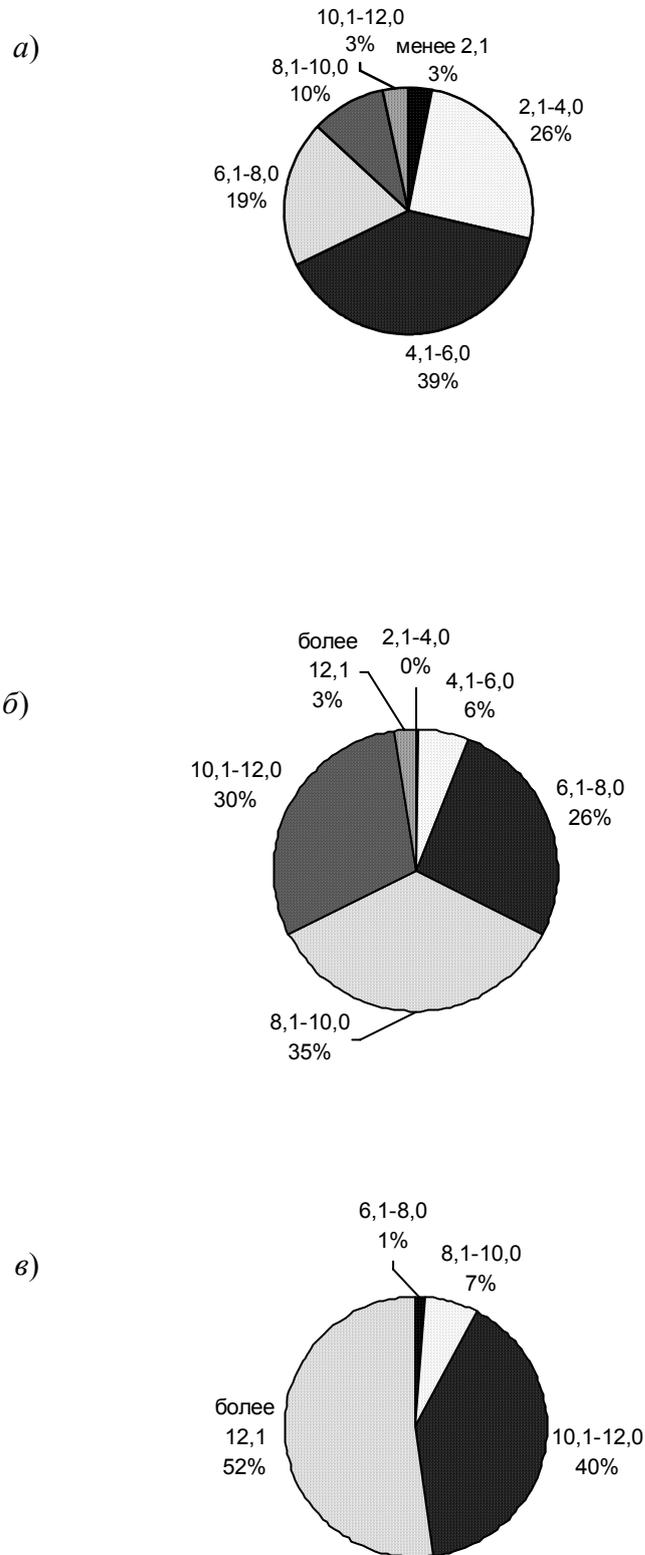


Рис. 1. Повторяемость (%) максимальной высоты радиоэха конвективных ячеек (км) а — с лицевыми осадками (2765 случаев); б — с грозой (1188 случаев); в — с градом (62 случая)

Перейдем к рассмотрению косвенных характеристик высоты радиоэха облачности, дающих представление о степени опасности явления и служащих дополнительными характеристиками при диагнозе вида явления. Такими характеристиками служат распространение высоты радиоэха выше уровня изотермы 0°C , толщина переохлажденного слоя в облаке, отношение высоты радиоэха к высоте изотермы 0°C .

Эффективность радиолокационного обнаружения гидрометеоров зависит от их фазового состояния и высоты верхней границы облачности [12]. Замечено, что в теплый период года осадки выпадают только из смешанных облаков, состоящих из капель воды и ледяных кристаллов [11]. Изменение фазового состояния в жидко-капельном облаке начинается после превышения облаком уровня нулевой изотермы, поэтому представляет интерес оценить распределение верхней границы облачности в зависимости от высоты уровня нулевой изотермы. Такое распределение связано с климатическими особенностями территории. На рис. 2 приведены значения высоты верхней границы конвективных явлений по радиолокационным данным в зависимости от высоты уровня изотермы 0°C для территории исследования (высота нулевой изотермы определялась по данным температурно-ветрового зондирования атмосферы на метеостанции Пермь–Бахаревка).

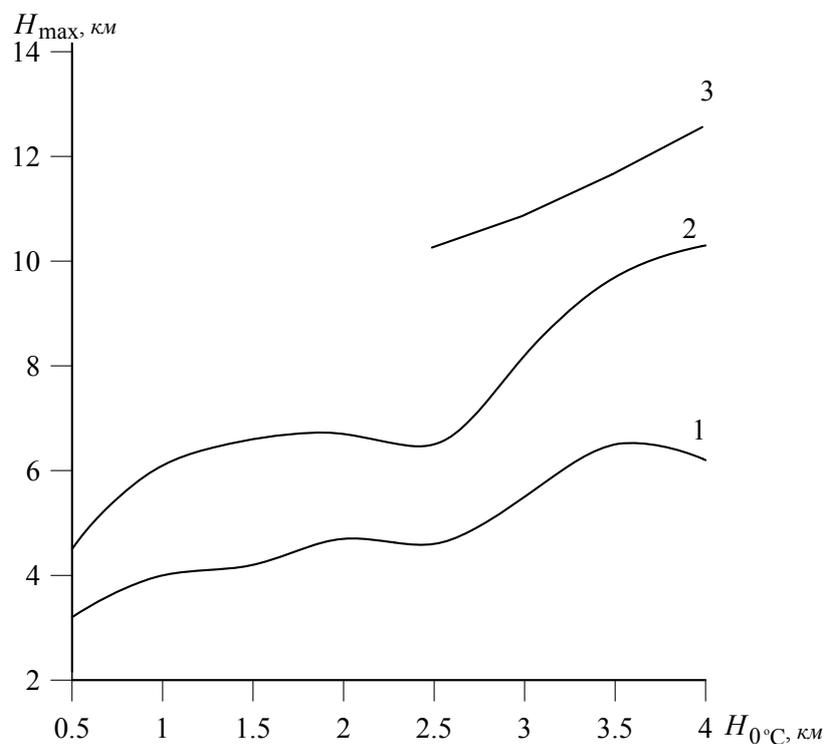


Рис. 2. Зависимости между максимальной высотой (H_{\max}) радиоэха *Sb* с ливнями (1), грозами (2) и градом (3) и высотой уровня нулевой изотермы $H_{0^{\circ}\text{C}}$

На рис. 2 четко прослеживается практически линейная зависимость между H_{\max} и $H_{0^{\circ}\text{C}}$ — с ростом $H_{0^{\circ}\text{C}}$ от 0,5 до 4,0 км во всех *Sb* с конвективными явлениями происходит увеличение H_{\max} от 3,6 до 12,3 км. При этом *Sb* с градом (в отличие от ливневых и грозовых *Sb*) фиксируется при $H_{0^{\circ}\text{C}} \geq 2,5$ км.

Рис. 2 подтверждает факт роста высоты радиоэха конвективных облаков с явлениями с увеличением интенсивности явления. Данные о распределении высот РКО в зависимости от высоты нулевой изотермы можно аппроксимировать следующим уравнением:

$$H_{\max} (\text{км}) = 2,39 H_{0^{\circ}\text{C}} + 1,59. \quad (1)$$

Уравнение получено по результатам обработки 2327 измерений за 2000 – 2001 гг. Коэффициент линейной корреляции между этими параметрами составил 0,55 при $\beta = 0,95$.

Увеличение высоты расположения изотермы 0°C ведет к росту H_{\max} , а, следовательно, возрастает высота переохлажденной части кучево-дождевой облачности (δ) (табл. 4). Для всех явлений наблюдается небольшое понижение толщины переохлажденной части облака в интервале значений $H_{0^{\circ}\text{C}} = 1,1 - 2,5$ км, что соответствует переходному периоду года, когда отмечаются Cb с меньшими вертикальными размерами по сравнению с конвективными облаками, образующимися в теплый период. В целом для РКО толщина переохлажденной части изменяется от 3,1 до 5,2 км, с минимальным значением δ при $H_{0^{\circ}\text{C}} = 1,1 - 1,5$ км.

Таблица 4

Толщина переохлажденной части Cb с явлением (δ), км

Cb с явлением	$H_{0^{\circ}\text{C}}, \text{ км}$							
	$\leq 0,5$	0,6 – 1,0	1,1 – 1,5	1,5 – 2,0	2,1–2,5	2,6 – 3,0	3,1 – 3,5	3,6 – 4,0
ливень	3,2	3,1	2,8	2,8	2,5	2,8	3,1	3,6
гроза	–	5,3	5,0	4,9	5,3	5,8	6,1	6,6
град	–	–	–	–	7,7	7,6	8,4	8,4
РКО	3,3	3,4	3,0	3,3	3,2	3,9	4,6	5,2

Отметим также, что увеличение толщины переохлажденной части облака с ростом уровня изотермы 0°C в пределах Cb с одним явлением происходит плавно, тогда как значения δ для Cb с разными явлениями резко отличаются. Так, средняя толщина переохлажденной части ливневых Cb составляет 3,0, грозовых — 5,6, градовых — 8,0 км. В среднем для РКО $\delta = 4,2$ км.

Подводя итог анализу распределения высоты кучево-дождевой облачности, можно отметить, что интенсивность явления во многом определяется высотой радиоэха облачности. Кучево-дождевые облака с явлениями, обладающие значительной вертикальной протяженностью, как правило, имеют большие значения отражаемости.

По результатам статистической обработки 2568 измерений за 2000 – 2001 гг. получены следующие уравнения зависимости между максимальной отражаемостью и высотой распространения радиоэха кучево-дождевых облаков с явлениями:

для ливневых и грозовых Cb (коэффициент корреляции $r = 0,48$ при $\beta = 0,95$)

$$Z_{\max} (\text{дБЗ}) = 0,92 H_{\max} + 39, \quad (2)$$

для градовых Cb ($r = 0,37$ при $\beta = 0,95$)

$$Z_{\max} (\text{дБЗ}) = 0,52 H_{\max} + 50. \quad (3)$$

Результаты проведенного статистического исследования высоты радиоэха облачности на территории центральной части Уральского Прикамья могут быть использованы в климатических расчетах, а также послужат основой для уточнения критериев радиолокационного распознавания конвективных явлений.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (проекты 01–05–96454 и 04–05–96043).

Библиографический список

1. Базлова Т.А. и др. Метеорологические автоматические радиолокационные сети / Т.А. Базлова. СПб, Гидрометеиздат, 2002, 332 с.
2. Брылев Г.Б. Радиолокационные характеристики облачности и осадков / Г.Б. Брылев, С.Б. Гашина, Г.Л. Низдойминога. Л., Гидрометеиздат, 1986, 232 с.
3. Калинин Н.А. Исследование атмосферы с помощью импульсных метеорологических радиолокаторов / Н.А. Калинин. Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2000, 104 с.
4. Заводченков А.Ф. Исследование характеристик гроз по данным метеорологического радиолокатора / А.Ф. Заводченков, М.С. Ахметов // Вопросы мезоклимата, циркуляции и загрязнения атмосферы / Пермь: Перм. ун-т, 1989. С. 90–93.
5. Исаев А.А. Статистика в метеорологии и климатологии / А.А. Исаев. М.: Изд-во МГУ, 1988. 248 с.
6. Калинин Н.А. Исследование радиолокационных характеристик распознавания опасных явлений погоды, связанных с кучево-дождевой облачностью / Н.А. Калинин, А.А. Смирнова // Метеорология и гидрология, 2004, № 12, в печати.
7. Калинин Н.А. Совместное использование данных радиолокационных и станционных наблюдений для анализа облачных полей / Н.А. Калинин, А.А. Смирнова // Метеорология и гидрология, 2002, № 8, с. 53–60.
8. Калинин Н.А. Численный анализ данных радиолокационных и станционных измерений облачности / Н.А. Калинин, А.А. Смирнова // Метеорология и гидрология, 2003, № 7, с. 31–39.
9. Калинин Н.А. Пространственная структура и статистические характеристики радиолокационной отражаемости опасных явлений погоды на территории Уральского Прикамья / Н.А. Калинин, А.А. Смирнова, Н.И. Толмачева, А.Д. Наумов // Вопросы прогноза погоды, климата, циркуляции и охраны атмосферы / Пермь: Перм. ун-т, 2003. С. 9–16.
10. Камалов Б.А. О функции распределения высоты верхней границы кучево-дождевой облачности / Б.А. Камалов, Х.А. Имамджанов, О.Б. Сатторов // Метеорология и гидрология, 2004, № 3. С. 62–70.
11. Мазин И.П. Облака и облачная атмосфера: Справочник / И.П. Мазин, А.Х. Хргиан. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 648 с.
12. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. РД 52.04.320-91. СПб, Гидрометеиздат, 1993, 360 с.
13. Степаненко В.Д. Радиотехнические методы исследования гроз / В.Д. Степаненко, С.М. Гальперин. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 204 с.