

Н.И. Толмачева

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ КОНВЕКТИВНОЙ ОБЛАЧНОСТИ  
ПО РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ\*

Пермский государственный университет, 614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15,  
e-mail: [tolmacheva@psu.ru](mailto:tolmacheva@psu.ru)

Рассмотрен подход к оценке эволюции конвективной облачности, основанный на эмпирических взаимосвязях аэрологических и радиометеорологических величин. По данным радиолокационных наблюдений рассчитана угловая скорость и продолжительность вращения конвективных образований. Анализ наблюдений в летний период 1996–2008 гг. выявил периодичность изменения скорости и метеорологических параметров конвективных облаков.

К л ю ч е в ы е с л о в а: метеорологический радиолокатор; восстановление; облачные гряды; ячейки; метеорологические параметры.

С конвективными облачными системами связаны такие опасные метеорологические явления, как грозы, град, сильные ливни и шквалы. При изучении причин возникновения кучево-дождевых облаков (*Cb*), исследовании структуры конвективной облачности и процессов образования и выпадения осадков получены интересные результаты [1; 2; 5], послужившие основой классификации конвективных облаков с разделением их на одноячейковые, многоячейковые и суперячейковые. Наблюдения показывают, что не все облака укладываются в эту схему [4]. В работе [3] обобщены существующие подходы и предложена более сложная классификация, учитывающая число ячеек в конвективной системе, время жизни ячеек, тип эволюции ячеек (регулярный — с тремя подтипами и случайный), пространственную организацию ансамбля ячеек (компактный кластер, линия, неорганизованный), механизм зарождения града. Однако ни одна из классификаций не исчерпывает многообразия конвективных процессов.

Данные о воздушных потоках, геометрических размерах и локализации конвективных ячеек в кучево-дождевом облаке исследовались в работах [2; 5], авторы которых пришли к предположению о вихревой структуре облака и вращении его вокруг вертикальной оси. Метеорологическими радиолокационными наблюдениями за эволюцией и траекториями перемещения конвективных ячеек выявлено циклоническое вращение системы кучево-дождевых облаков, а доплеровские радиолокаторы обнаружили наличие вихрей во вращающихся кучево-дождевых облаках [5]. Вращение является одной из причин устойчивости и длительного существования конвективного облака, формируя в его нижней части мезоциклон, определяющий жизнь облака. Новые конвективные ячейки в облаке возникают в правой части облачной системы (по потоку), а затем движутся в левую и распадаются. Важными являются данные о параметрах вращения облачных систем, ячеек и влиянии вращения на жизненный цикл и градоопасность облака.

В данной статье рассматриваются особенности вращения конвективных ячеек облачных систем и дается оценка их изменений во времени. Анализ динамики развития кучево-дождевых облаков позволил рассчитать угловую скорость и период вращения конвективных образований, а также определить объем зоны отражаемости и оценить ее изменения во времени. В качестве исходных данных использовалась радиолокационная информация о распределении *Cb*, сопровождающихся конвективными явлениями (ливнями, грозой, градом), а также результаты аэрологического зондирования на ст. Пермь.

Исследование проводилось с помощью автоматизированного метеорологического радиолокационного комплекса (АМРК) «Метеоячейка», расположенного в г. Перми (АМСГ Б. Савино). Основа комплекса — двухволновой метеорологический радиолокатор МРЛ-5. Система АМРК «Метеоячейка» дает возможность автоматической обработки получаемой информации в

масштабе реального времени, записи ее на носители и формирования базы данных радиолокационных наблюдений.

При вхождении облачной системы в зону радиолокатора проводилось изучение структуры радиоэха облаков во всем диапазоне высот и анализировался вертикальный разрез облака в определенном азимуте каждые 30 мин. Измерялись максимальная радиолокационная отражаемость ( $Z$ , dBz) на  $\lambda = 3,2$  см, высота верхней границы радиоэха ( $H_{вг}$ , км), высота зоны повышенной отражаемости ( $H_{\Delta Z}$ , км) и высота максимальной отражаемости ( $H_{max}$ , км). Для измерения параметров вращения конвективных ячеек анализировались горизонтальные разрезы зоны отражаемости на высотах 0–1, 1–2, 2–3, 3–4 и 4–5 км. Параметры вращения облаков определялись путем измерения углов поворота горизонтальных сечений зоны отражения на разных высотах за определенные промежутки времени. Для измерения объемов зон отражения использовалась информация о вертикальных разрезах отражаемости и площадях горизонтальных сечений на высотах.

Радиолокационные наблюдения за динамикой развития кучево-дождевых облаков проведены в летний период 1996–2008 гг. Формированию исследуемых условий погоды в Пермской области чаще всего способствовало прохождение холодных фронтов, связанных с располагавшимися над Уралом циклонами. На АТ<sub>700</sub> и АТ<sub>500</sub> отмечалась высотная ложбина. Циклоны — низкие барические образования — прослеживались до высот 1,5–2,5 км, скорость смещения холодных фронтов составляла около 40 км/ч, контраст температур в зоне фронта — от 4 до 7°C на 300 км. Грозовая деятельность начиналась около 12 ч местного времени, количество осадков в пунктах составило 2–14 мм, верхняя граница облаков простиралась в среднем до 11 км. Параметры, рассчитанные по данным аэрологического зондирования и характеризующие условия развития кучево-дождевых облаков, представлены ниже (табл. 1 и 2).

Таблица 1

**Параметры, характеризующие условия развития Св на территории Пермской области в 1996–2008 гг.**

Период	$H_{ук}$ , км	$H_{конв}$ , км	$W_{max}$ , м/с	$H_{Wmax}$ , км	$H_{троп}$ , км	$T_{троп}$ , °С	$\gamma$ , °С/100 м		
							$\gamma_{Земля-Нук}$	$\gamma_{Нук-НWmax}$	$\gamma_{Нук-Нконв}$
лето	2,2	10,0	7,0	4,0	11	-52,0	0,14	0,46	0,70
осень	2,1	8,5	6,2	3,3	11	-47,0	0,10	0,44	0,60
зима	1,6	7,0	5,5	3,0	8	-51,0	0,9	0,33	0,51
весна	2,0	9,6	6,3	3,1	9	-49,0	0,15	0,40	0,66

Примечание:  $H_{ук}$  и  $H_{конв}$  – уровни конденсации и конвекции,  $W_{max}$ , – максимальная скорость вертикальных потоков,  $H_{Wmax}$  – высота  $W_{max}$ ,  $H_{троп}$  – высота тропопаузы,  $T_{троп}$  – температура тропопаузы,  $\gamma$  – градиент температуры.

Таблица 2

**Средняя высота изотерм ( $H_{изот}$ )**

$H_{изот}$ , км							
0° С	-5° С	-10° С	-15° С	-20° С	-30° С	-40° С	-50° С
3,0	4,2	5,1	6,0	6,8	8,0	9,3	10,6

Исследовано 2240 конвективных ячеек. Данные о параметрах вращения ячеек приведены в табл. 3, где  $V$  – угловая скорость,  $P$  – период вращения ячеек. Углы поворота горизонтальных сечений отмечались каждые 30 мин. Ячейки, существовавшие менее 30 мин., не рассматривались. Измерялся поворот радиоэха внутри изолинии 35 dBz на разных высотах.

Таблица 3

**Характеристики облачных ячеек**

Период наблюдений, ч.мин	$V$ , град/мин.		$P$ , ч.мин.	
	2–3 км	4–5 км	2–3 км	4–5 км
10.00–15.30	1,44	2,00	3.00	2.00
11.00–14.30	4,48	3,15	1.30	2.30
11.00–16.30	2,56	1,80	2.30	3.30
11.30–15.00	2,51	2,08	3.30	2.30
11.30–16.00	1,52	2,23	4.00	2.30
12.00–14.30	4,42	3,35	1.30	2.00
12.30–16.00	1,88	3,17	3.00	3.00

12.30–17.00	1,76	2,20	3.30	2.30
14.00–17.30	3,70	3,49	1.30	2.00

Диаметр сечения изменялся от 4 до 16 км, значения угловой скорости, измеренные на высоте 3 км, находились в пределах 1,44–4,48 град/мин, на высоте 5 км — 1,80–3,49 град/мин. Время полного оборота ячейки на 360° изменялось от 1 ч. 30 мин. до 4 ч. (2–3 км) и от 2 ч. до 3 ч. 30 мин. (4–5 км). На рис. 1 приведены последовательные разрезы отражаемости на высоте 4–5 км. Зона радиоэха, очерченная изолинией 35 dBz, совершила поворот на 250° за 120 мин. Изолинии равных значений отражаемости проведены через 2 dBz. Средняя угловая скорость за этот период составила 2,1 град/мин; зона имеет вытянутую форму длиной 25 км, шириной от 12 до 6 км. Отмечается деление радиоэха, в котором правая часть становится мощнее с центральной изолинией 45 dBz. Изменение ориентации сечений, отмеченное на рис. 1, указывает на вращение облака против часовой стрелки, что соответствует циклонической циркуляции. Обращает на себя внимание колебание значений  $V$  от 2 до 12 град/мин, что объясняется цикличностью развития конвективного облака.

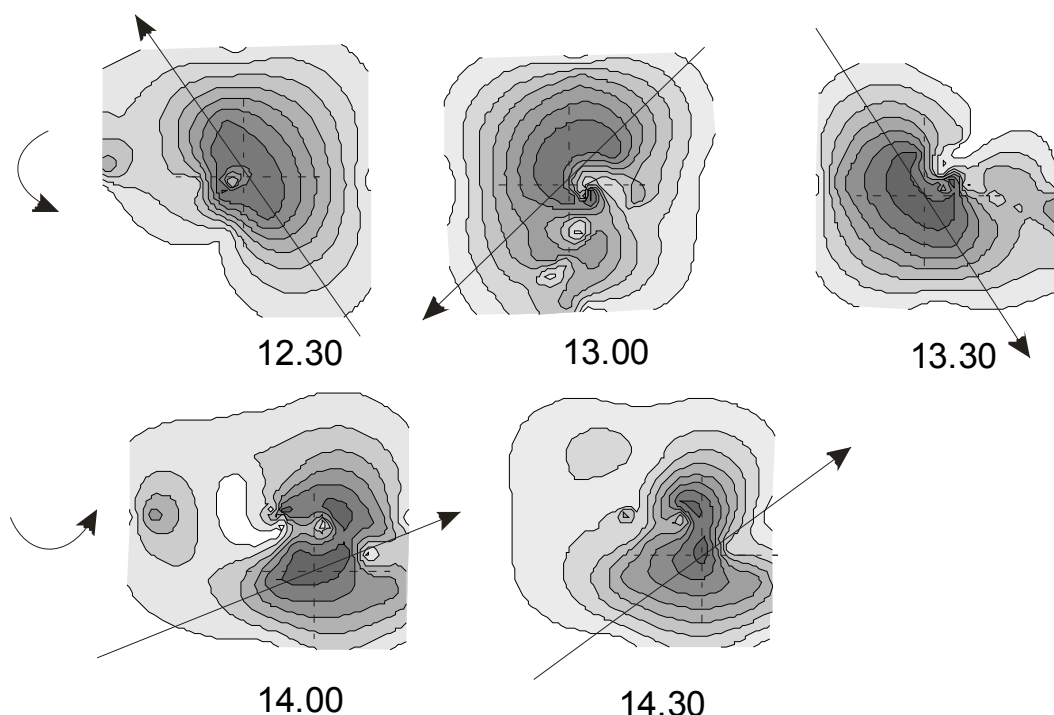


Рис. 1. Изменение отражаемости кучево-дождевой облачности на высоте 4–5 км

Угловая скорость вращения конвективного облака определяется по формуле  $V = \pi u \operatorname{tg} \alpha / r$ , где  $V$  — угловая скорость вращения,  $r$  — расстояние от центра облачной системы до облачной ячейки,  $u$  — скорость перемещения облачной системы;  $\alpha$  — угол между проекцией на земную поверхность оси траектории смещения облачной системы и проекциями осей траекторий перемещения внутри общей системы конвективных ячеек, перемещающихся с правого на левый фланг облачной системы [1]. Значение  $V$  растет с увеличением скорости смещения облака  $u$  и угла  $\alpha$  и уменьшается с увеличением  $r$ . Из формулы следует, что удаленные на разное расстояние от центра облачной системы облачные ячейки будут вращаться с разными угловыми скоростями. Центральная часть вращается быстрее периферийной, и конвективное облако представляет собой вихрь с вертикальной осью. Вследствие вращения конвективное облако обособлено от атмосферного воздуха, в котором оно сформировалось, поэтому на периферии оно деформирует воздушные потоки. Вращение облака определяет конфигурацию линии шквалов, поскольку само вращающееся облако формирует порывы ветра (скорость порывов ветра в шквале сильнее под передним правым краем облака), а скорость вращательного движения суммируется со скоростью воздушного потока.

Исследование эволюции отражаемости показало, что на горизонтальных разрезах, выполненных после 15 ч., отмечается распад облачной системы. Компактная структура радиоэха разрушается в течение 60 мин. с образованием разорванного кольца (рис. 2). Причиной такого

развития может быть увеличение центробежной силы, происходящее вследствие усиления вращения облака, что подтверждается значениями  $V$  за этот промежуток времени.

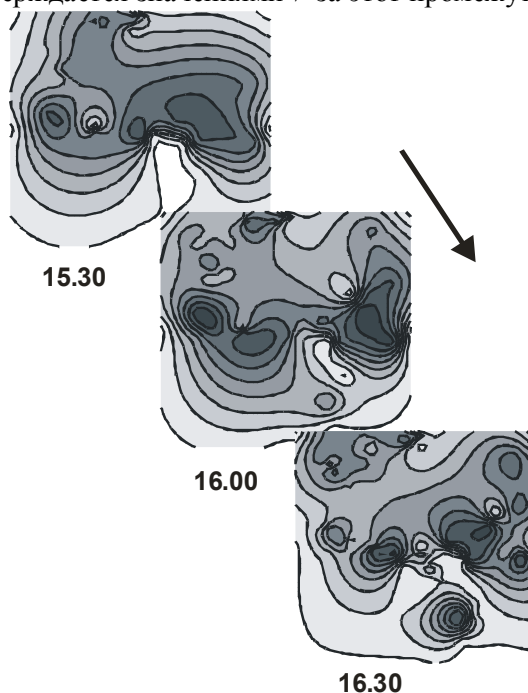


Рис. 2. Разрушение радиоэха кучево-дождевой облачности

Из табл. 4 следует, что с 15 ч. 00 мин. до 16 ч. 30 мин. происходит резкое увеличение угловой скорости вращения облака. На высоте 2–3 км она возросла с 2,5 до 11,6 град/мин, на высоте 3–4 км — с 0,5 до 5,3 град/мин, т.е. в 5–10 раз. Произошло рассредоточение к краям облака крупных частиц, что и вызвало ослабление отражаемости в центре ячейки. Период колебаний  $V$  близок к длительности циклов развития конвективных ячеек.

Таблица 4

#### Угловая скорость вращения кучево-дождевого облака

Период, ч.мин.	Высота 2–3 км		Высота 3–4 км	
	$\varphi$ , град	$V$ , град/мин	$\varphi$ , град	$V$ , град/мин
15.00–15.30	21	2,5	5	0,5
15.30–16.00	22	5,0	12	3,2
16.00–16.30	35	11,6	16	5,3

Таблица 5

#### Динамика изменения параметров кучево-дождевых облаков

Время ч.мин.	$Z_{\max}$ , км	$H_{\max}$ , км	$H_{\text{вр}}$ км	$S$ км <sup>2</sup> ( $\geq 20$ dBz)			$v$ , ( $\geq 20$ dBz) км <sup>3</sup>	$\Delta v$ , км <sup>3</sup>	$dv/dt$ , км <sup>3</sup> /мин
				Высота					
				0–1 км	2–3 км	4–5 км			
10.00	39	4,4	8,8	14	520	300	800	–	–
10.30	43	4,3	10,4	80	500	300	950	150	5
11.00	47	4,2	9,8	83	580	300	1100	150	5
11.30	44	4,0	10,4	18	700	300	1600	500	17
12.00	45	3,8	10,9	25	580	250	1450	-150	-5
12.30	40	3,6	10,9	63	620	250	1760	310	10
13.00	37	3,5	10,4	62	630	300	1860	100	-3
13.30	40	4,4	10,4	45	700	200	1740	-120	-4
14.00	35	3,2	10,9	61	580	250	1870	130	4
14.30	40	3,0	11,2	85	810	250	2380	510	17
15.00	39	2,9	10,9	62	720	350	2410	30	1

15.30	50	3,8	10,4	121	920	350	2790	380	13
-------	----	-----	------	-----	-----	-----	------	-----	----

Окончание табл. 5

Время ч.мин.	$Z_{\max}$ , км	$H_{\max}$ , км	$H_{\text{вр}}$ км	$S$ км <sup>2</sup> ( $\geq 20$ dBz)			$\nu$ , ( $\geq 20$ dBz) км <sup>3</sup>	$\Delta \nu$ , км <sup>3</sup>	$dv/dt$ , км <sup>3</sup> /мин
				Высота					
				0–1 км	2–3 км	4–5 км			
16.00	56	4,1	9,9	132	900	500	2890	100	3
16.30	55	2,6	9,8	165	1000	700	3820	930	31
17.00	56	3,0	9,8	175	750	570	2970	-850	-28
17.30	53	1.8	9,8	182	621	570	2700	-270	-9
18.00	50	3,0	8,8	170	600	550	2350	-350	-12

Рассмотрим динамику изменения площадей сечения ( $S$ ) и объемов радиоэха облаков ( $\nu$ ) при отражаемости более 20 dBz (табл. 5). Площади сечений радиоэха в процессе развития облака возрастают с 500 до 1000 км<sup>2</sup> (высота 2–3 км). На высоте 4–5 км площадь не превышает 700 км<sup>2</sup>. В момент начала наблюдений  $S$  отражаемости на уровне 0–1 км только 14 км<sup>2</sup> (зона осадков), через час площадь увеличивается до 80 км<sup>2</sup>. Уровень верхней границы радиоэха за период наблюдений изменяется в пределах 8,8–11,2 км; максимум высоты верхней границы радиоэха соответствовал периодам возрастания угловой скорости вращения облака. Объем зоны радиоэха, ограниченный поверхностью 20 dBz, в начале наблюдений составил 800 км<sup>3</sup> и достиг максимума (3820 км<sup>3</sup>) к 16 ч.30 мин. Изменение объема радиоэха имеет волнообразный характер. Даже в фазе усиления облака наблюдались кратковременные замедления, когда объем отражаемости уменьшался на 5 км<sup>3</sup>/мин. Перед достижением максимального объема рост практически прекращался, а положительное изменение объема уменьшилось до 7 км<sup>3</sup>/мин, замедления развития облака происходили с периодом 2 ч. Площадь сечения зоны осадков на уровне 0–1 км на всем протяжении наблюдений была в 3–40 раз меньше площади радиоэха на высотах 2–3 и 4–5 км. Когда площадь зоны осадков (0–1 км) достигла максимума, она была в 4–6 раз меньше площади отражаемости на высотах (табл. 5).

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Угловая скорость вращения конвективных облачных ячеек составляет 1,4–4,5 град/мин, время полного оборота изменяется от 1 ч. 30 мин. до 4 ч.
2. Вращение конвективной облачной системы является основным условием ее возникновения, устойчивости и длительности существования.
3. Кучево-дождевое облако вращается неравномерно: отмечаются периодические увеличения и уменьшения скорости вращения. С изменениями угловой скорости совпадают изменения приращения объемов радиоэха облака, а также колебания максимальных значений радиолокационной отражаемости и верхней границы радиоэха, т.е. фактор вращения определяет жизненный цикл конвективного облака.

#### Библиографический список

1. Бибилашвили Н.Ш., Ковальчук А.Н., Терехова Т.Н. Динамика и термодинамическая структура мощного градового облака // Труды ВГИ. 1983. Вып. 50, С. 3–8.
2. Толмачева Н.И. Исследование турбулентности в облачной среде // Вопросы прогноза погоды, климата, циркуляции и охраны атмосферы / Перм. гос. ун-т. Пермь, 2000, С. 26–28.
3. Мазин И.П., Шметер С.М. Облака, строение и физика образования. Л., Гидрометеиздат, 1983, 280 с.
4. Толмачева Н.И. Дистанционные методы исследования мезометеорологических процессов. Перм. гос. ун-т. Пермь, 2010. 200 с.
5. Foot G.B. Aspects of cumulonimbus classification relevant to hail problem // J.Rech. Atmos. 1985. Vol.19, № 1. P. 61–74.

N.I. Tolmacheva

#### THE INVESTIGATION OF CONVECTIVE CLOUDNESS' DYNAMIC ACCORDING TO THE RADAR INFORMATION

The approach to an estimation of meteorological parameters on pictures from meteorological radar information is considered. It is based on the complex account of values textural characteristics in

overcast on to pictures. Application of the given approach has shown, that results of the diagnosis and the forecast of overcast, precipitations, speeds and wind directions under the information from artificial meteorological radar can be used in weather forecast in region.

**K e y w o r d s:** the meteorological radar; restoration; cloudy ridges; the sells; meteorological parameters.