

УДК 551.501.8.:551.509.322

Н.И. Толмачева, Л.Н. Ермакова

ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ГРАДОВОЙ ОБЛАЧНОСТИ В ПЕРМСКОМ КРАЕ³Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; e-mail: nitolmacheva@yandex.ru

Проведены исследования динамики кучево-дождевой облачности, выявлены причины изменчивости движения конвективной облачности. Рассмотрены стадии развития градовых процессов, определены уровни образования града и температурный интервал. Разработан метод определения условий зарождения и роста града в облаках на основе численной модели формирования облачных частиц.

Ключевые слова: метеорологический спутник; метеорологический радиолокатор; восстановление; облачные ячейки; метеорологические параметры; численная модель.

Зависимость траекторий перемещения кучево-дождевых облаков (Сb) от внешнего ветра является сложной, так как облака являются не пассивной примесью, увлекаемой окружающим ветром, а непрерывно изменяющейся и саморазвивающейся динамической системой. На направление и скорость горизонтального перемещения облака влияют не только ветер, но и вертикальный перенос количества движения внутри облака, образование и распад конвективных ячеек на периферии основного Сb. Поскольку перечисленные факторы зависят от размеров конкретного облака, скорости вертикальных движений, турбулентности, то в определенный момент облака одной и той же системы могут иметь различное направление и скорость движения.

Траектории Сb зависят от их размеров и вертикальных градиентов ветра в атмосфере. Облака с горизонтальными размерами, не превышающими 5–10 км, перемещаются в направлении и со скоростью среднего ветра в облачном слое (уровни 500–700 гПа), если вертикальный сдвиг ветра в слое конвекции невелик, а скорость ветра превышает 3–5 м/с. При слабых ветрах траектории Сb пульсируют, и определить скорость и направление смещения облаков становится трудно. Причиной этого является то, что на скорость облака (в данном случае – малую) накладываются перемещения его, обусловленные процессами роста и разрушения облачных ячеек у разных сторон Сb. В результате центр облачной массы не перемещается в постоянном направлении, а совершает беспорядочные блуждания [1, 5]. Если ветер сильно вращается с высотой, траектории облаков, горизонтальные размеры которых не превышают 10–15 км, отклоняются влево от среднего ветра в конвективном слое на 40° [2]. Девиация мелких Сb влево от ветра объясняется происходящим внутри облака переносом вверх количества горизонтального движения снизу, т. е. из слоя, где ветер обычно отклонен влево от его направления на больших высотах [6]. Влияние образования и распада новых ячеек на видимое перемещение Сb для мелких облаков невелико, вероятность роста (распада) облачных ячеек одинакова для всех сторон Сb. Мощные Сb часто смещаются вправо от ветра на угол, в среднем равный 20°. Скорость их видимого перемещения на 50% меньше скорости среднего ветра. Несовпадение траекторий облаков с направлением общего переноса воздуха, вызывается тем, что, если в окружающей атмосфере ветер усиливается с высотой, новые облачные ячейки чаще всего растут вблизи правого края мощных Сb, а диссипация облака наиболее интенсивна у левого. Объяснение этой закономерности было предложено в [6].

В работе исследуется динамика и изменчивость пространственного распределения кучево-дождевой облачности (Сb), что позволит выявить причины изменчивости движения и эволюцию конвективной облачности. В качестве исходных данных использовалась радиолокационная информация МРЛ–5 в радиусе обзора 200 км, о распределении Сb, сопровождающейся конвективными явлениями (ливнями, грозой, градом), аэрологические данные ст. Пермь и карты барической топографии (850, 700, 500 гПа). Радиолокационные данные представлены информацией, полученной на МРЛ–5 АМСГ Б. Савино (г. Пермь) с помощью АМРК «Метеоячейка» за 1996–2010 гг. Для анализа Сb облачности использовались данные наблюдений на метеостанциях Пермской, Свердловской областей, расположенных в радиусе действия МРЛ–5. Исследование проводилось для

территории Пермского края и частично Свердловской области. Выбирались случаи (сроки наблюдения) когда измерения за ячейкой производились через 30 мин не меньше 8 раз. Скорость и направление перемещения ячеек определялась по методике, изложенной в [5, 6]. На МРЛ скорость и направление перемещения радиоэха облачности и зон осадков рассчитываются по двум алгоритмам: кросскорреляции поля радиоэха за два последовательных срока и слежения за смещением центра радиоэха. Использование последнего алгоритма возможно для расчета скорости и направления перемещения только при развитии внутримассовых конвективных процессов и приводит к ошибкам при фронтальных ситуациях. Расчет скорости и направления перемещения радиоэха по алгоритму кросскорреляции заключается в расчете вектора смещения в направлении максимального коэффициента корреляции двух последовательных изображений поля радиоэха за интервал времени Δt . На основании практического применения алгоритма получены модификации метода. Определение скорости и направления смещения радиоэха облачности производится следующим образом:

– вычисляется интервал времени, за который произошло смещение поля радиоэха Δt ;

– производится смещение поля радиоэха таким образом, чтобы достичь максимального совмещения площадей радиоэха за два последовательных обзора. При этом для каждого смещения поля радиоэха за предыдущий обзор относительно поля за текущий обзор вычисляется коэффициент совмещения площадей (число совмещенных квадратов 4×4 км, занятых радиоэхом). Одновременно определяется максимальный коэффициент совмещения площадей;

– при максимальном значении коэффициента совмещения площадей в прямоугольной системе координат определяются смещения по осям x и y . Если максимальный коэффициент совмещения не один, то значения смещения Δx и Δy при нескольких максимальных коэффициентах осредняются;

– на основе средних значений смещения поля Δx_{cp} и Δy_{cp} вычисляется скорость поля радиоэха (V)

за интервал Δt и направление смещения (d):
$$V = \frac{(\Delta x_{cp}^2 + \Delta y_{cp}^2)^{\frac{1}{2}}}{\Delta t}; \quad d = \arctg \frac{\Delta x_{cp}}{\Delta y_{cp}}.$$

Прогноз опасных явлений и осадков по радиолокационным данным для конкретных пунктов основан на экстраполяции поля радиоэха облачности в соответствии с рассчитанными направлением и скоростью его движения. Таким образом, самым важным в прогнозе оказывается точное определение V и d .

В реальной атмосфере распределение ветра и характер эволюции Сб очень сложный, траектории Сб при сходстве внешних условий сильно различаются. Анализ изменчивости скорости конвективной облачности (КО), проведенный на территории Пермского края за 1996–2010 гг., указал на то, что разность максимальных и минимальных значений скорости ячеек в 6% случаев составляет более 25, в 30 % – 10–25, в 64 % – менее 10 км/ч. Исследование соотношения направления и скорости перемещения Сб с параметрами воздушного потока на уровнях 850, 700, 500 гПа позволило выявить определенные закономерности. Конвективные ячейки в 80% наблюдаемых сроков (всего 2784 случаев) отклоняются от направления ведущего потока на угол ($\Delta\alpha$) до 60° , в 10 % – более 90° . Отклонение часто (67%) происходит вправо от ведущего потока. С увеличением скорости основного потока угол отклонения уменьшается. Например, при скорости 10 км/ч угол отклонения 26° , 45 км/ч – 18° . Угол $\Delta\alpha$ уменьшается с увеличением верхней границы Сб ($H_{вг}$). При $H_{вг} = 5$ км угол отклонения составляет 30° , при высоте 10 км $\Delta\alpha = 24^\circ$.

В направлении ведущего потока осуществляется не только перенос облачности, но и распространение ее за счет эволюции. Сравнение скорости перемещения Сб и скорости ведущего потока (ΔV) показало, что изменяется не только величина отклонения, но и его знак. При $\Delta V = 10$ км/ч и ветре более 55 км/ч, скорости конвективных ячеек будут меньше скорости потока, при скорости менее 20 км/ч – наоборот. Угол отклонения движения КО от направления ветра на барическом уровне зависит не только от поворота ветра в слое 1–5 км, но и от разности скорости ветра и скорости движения ячейки. Результаты анализа радиолокационной и аэрологической информации (г. Пермь) показали, что направление вращения ветра с высотой в слое 1–5 км совпадает с отклонением КО от ветра на уровне 850 гПа. Значение угла отклонения траектории КО от направления ветра на уровне переноса меньше угла поворота ветра в слое 1–5 км. Траектории Сб при скорости ветра 20–40 км/ч отклоняются от направления ветра на уровне переноса на угол не более 15° , что входит в пределы погрешности оценки направления движения КО по данным МРЛ. При скорости ветра более 60 км/ч отмечается отклонение траекторий зон КО вправо от направления воздушного потока на угол 35° . Скорость перемещения ячейки и скорость ветра в слое 1–5 км совпадают при скорости 30 км. При больших скоростях ветра скорость радиоэха меньше скорости потока.

Воздушные потоки, обтекающие Сб, влияют на направление движения конвективной ячейки, изломы траекторий и отклонение от направления воздушного потока. Отклонение траектории Сб будет тем больше, чем больше ΔV и составляющая вихря скорости внутри облака. Для полного учета изменчивости скорости и направления движения Сб в течение периода существования проведен анализ эволюции характеристик Сб [5]. Местоположение центра области с максимальной скоростью восходящего потока в окрестности Сб определяется сдвигом ветра (по направлению) в слое от основания до верхней границы облака. Появление новых конвективных ячеек вероятно в том месте, где существует сильный восходящий поток. Его местоположение зависит от направления вращения ветра с высотой. Поэтому увеличение площади при развитии Сб происходит в определенном направлении и вносит вклад в результирующий вектор его движения. Следствием такого процесса является искривление общей траектории движения КО, отклонения от первоначального направления движения и от направления ветра в слое 850–500 гПа.

Только адвективным переносом невозможно объяснить движение радиоэха облачности и зон осадков (РОЗО), так как время жизни отдельных ячеек КО значительно меньше, чем продолжительность существования макромасштабных зон в целом. Для точного прогнозирования опасных явлений, связанных с РОЗО, необходимо учитывать изменения ширины облачной системы, что зависит от процессов обострения фронта. Распределение отношения $n = r_1/r_2$, где r_1 – ширина облачного поля перед фронтом, а r_2 – за фронтом, представлено в табл. 1.

При стационарном процессе, без существенной трансформации поля фронтальной облачности, составляющая распространения равна нулю. В случае обострения фронта ширина зоны КО может увеличиваться со временем. Процессы размывания атмосферного фронта могут приводить к уменьшению площади РОЗО и, следовательно, к уменьшению ширины зоны радиоэха. Эволюция атмосферных фронтов может надежно определяться по данным МРЛ и МСЗ в пределах всего региона.

Таблица 1

Распределение отношения n для РОЗО

Градации k	Тип фронта			Кол-во сроков
	ТФ	ХФ (основной и вторичный)	Стационарный с волнами	
0,0-0,4	-	16	27	43
0,41-0,8	7	20	40	67
0,81-1,2	16	17	36	69
1,21-1,6	12	4	22	38
1,61-2,0	10	2	6	18
2,21-2,4	5	-	10	15
2,41-2,8	5	-	9	14
2,81-3,2	3	-	2	5
>3,2	4	-	16	20
Σ случаев	62	59	168	289
K_{cp}	1,65	0,69	1,26	

Анализ сравнения направления перемещения радиолокационной ячейки грозоопасных очагов (1367 случаев) с направлением движения фронта показало, что траектории ячеек могут существенно отклоняться от направления движения фронта. Средний угол отклонения составляет 45° . В 65% случаев грозовые ячейки отклонились влево от направления движения фронта. Эта закономерность хорошо прослеживалась на холодных фронтах, в том числе и вторичных – 85 и 72%, теплых – 59%.

Все траектории радиоэха конвективной облачности (РКО) разделялись на прямые и ломаные. Траектории второго типа наблюдались в дни со сдвигом направления ветра в нижней тропосфере. Участки местности, над которыми отмечались резкие искривления траекторий движения РКО, отмечены на рис. 1.

Изменение направления движения Сб происходит в районах с наибольшим перепадом высот в окрестности отдельно возвышающихся холмов, возвышенностей в районе водохранилищ. Неоднородности земной поверхности оказывают существенное влияние на конвективные процессы облакообразования и эволюцию Сб. Влияние на траекторию движения Сб проявляется сложным механизмом воздействия подстилающей поверхности на трансформацию Сб, их развитие и распад. Изменение размеров, площади, высоты или формы РКО приводит к изменению характеристик их

движения. Исследование обнаружило влияние неоднородностей земной поверхности на траектории движения РКО при дестабилизации облачной конвекции и резкой трансформации Сб.

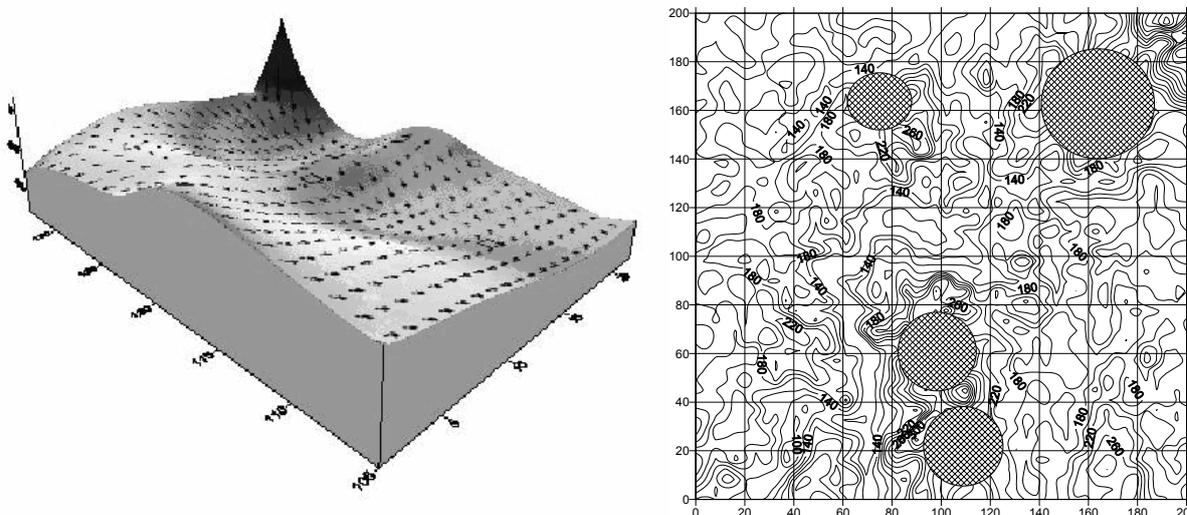


Рис. 1. Расположение районов с резким изменением направления движения конвективных ячеек

Перемещение конвективных ячеек в 70–80% случаев совпадает с направлением ветра на изобарической поверхности 700 гПа. Наилучшие совпадения достигаются при скорости перемещения 30–40 км/ч. Наиболее сложные и трудно прогнозируемые траектории перемещения отмечаются при скорости ветра менее 17 км/ч и ослаблении ветра с высотой в нижнем слое атмосферы. Проведенное исследование показало, что в этих ситуациях необходимо учитывать взаимодействие двух факторов: собственной динамики развития Сб и вертикальной изменчивости ветра в атмосфере.

В ходе исследования динамики радиолокационных характеристик кучево-дождевой облачности и связанных с ней опасных явлений погоды на территории Пермского края решены следующие задачи: проанализированы зависимости между скоростью и направлением движения конвективной ячейки и ведущего потока на высотах 850, 700, 500 гПа; определена динамика движения и угол отклонения ячеек, связанных с кучево-дождевой облачностью от зоны фронта; рассчитаны характеристики движения Сб; выявлены условия изменчивости скорости перемещения ячеек с опасными явлениями погоды.

Данные спутникового анализа позволяют получить важную информацию, способствующую лучшему пониманию проблемы развития облаков и образования осадков. Применение спутниковых методов актуально для решения многих задач градообразования. В настоящее время для исследования условий образования и роста града используется адиабатическая модель, которая, приближенно описывает облачные процессы. Актуальным является разработка численной модели формирования, описывающей облако на разных стадиях развития, что способствует исследованию физических процессов образования града. В исследовании апробируется двумерная нестационарная численная модель конвективного облака с описанием формирования облачных частиц и исследование физических закономерностей роста града. Решены следующие задачи:

- произведен анализ спутниковых и численных методов исследования конвективных осадков;
- апробирована двумерная численная модель градового облака, позволяющая оценить распределение водяного пара в облаке в различные моменты времени (стадии развития облака);
- проведен анализ процесса градообразования на основе сопоставления результатов расчетов по модели и экспериментальных радиозондовых и радиолокационных данных;
- проведено сравнение предложенного и ранее использовавшегося автором методов анализа образования града по спутниковым данным.

Главным фактором, определяющим содержание водяного пара в облаках и осадках, служит температура воздуха, что важно для количественной интерпретации спутниковых данных градообразования. Однако из-за изменения его содержания в облачности на разных стадиях развития и одних температурных уровнях могут формироваться различные виды града. В настоящее время для описания используется адиабатическая модель. Проанализируем перспективы и возможности

численного моделирования градовых облаков для создания модели облака, описывающей формирование облачных частиц и града.

Рассмотрим численную модель формирования облачных частиц, которая является развитием математической модели конвективного облака с описанием термодинамических и микрофизических процессов [1]. Усовершенствованная модель состоит из блоков: гидротермодинамического, микрофизического, в которые включены уравнения для расчета содержания водяного пара и облачных частиц. Гидротермодинамический блок модели состоит из уравнений движения, описывающих влажную конвекцию в приближении Буссинеска, уравнения неразрывности, уравнений термодинамики, начальных и граничных условий (подробные уравнения приводить не будем). Микрофизический блок описывает процессы нуклеации, конденсации, коагуляции капель с каплями, сублимации, аккреции, замерзания капель, осаждения облачных частиц в поле силы тяжести, их перенос воздушными потоками. Система уравнений для функций распределения капель $f_1(\vec{r}, m, t)$ и ледяных частиц $f_2(\vec{r}, m, t)$ имеет следующий вид:

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} + u \frac{\partial f_1}{\partial x} + (w - V_1) \frac{\partial f_1}{\partial z} = \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_K + \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{Ko} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_A + \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_D + \left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_3 + \Delta' f_1 + I_1, \quad (1)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial t} + u \frac{\partial f_2}{\partial x} + (w - V_2) \frac{\partial f_2}{\partial z} = \left(\frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_C + \left(\frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_A + \left(\frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_3 + \Delta' f_2 + I_2 + I_{AB},$$

где $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_K$, $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{Ko}$, $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_A$, $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_D$, $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_3$ – изменения функции распределения капель за счет

микрофизических процессов конденсации (K), коагуляции (Ko), аккреции (A), дробления (D) и замерзания (3) капель и кристаллов; $\left(\frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_C$, $\left(\frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_A$, $\left(\frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_3$ – изменения функции распределения

кристаллов за счет сублимации, аккреции и замерзания капель; V_1 , V_2 – установившиеся скорости падения жидких и твердых частиц (от 6 до 18 м/с). Для системы уравнений (1) используются начальные и граничные условия. Для анализа вида града в данной модели используются поля (вертикальные разрезы) температуры, удельного влагосодержания, влажности и ледности. Без учета кристаллизационных процессов уравнение, описывающее изменение с высотой содержания водяного пара в облачности, можно записать в виде $\frac{1}{n} \frac{dn}{dz} = (\alpha(T) - 1) \frac{1}{s} \frac{ds}{dz}$, где s – массовая доля водяного пара

(удельная влажность), α – коэффициент разделения, характеристика обмена жидкой и паровой фазами. Для решения системы уравнений модели на временном интервале (t_n, t_{n+1}) используется метод расщепления (Г.И. Марчук) на системы:

- уравнений переноса метеорологических субстанций вдоль траекторий и турбулентного переноса в интервале (t_n, t_{n+1}) ; $\frac{\partial \varphi}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla \varphi) = \Delta' \varphi$, где $\varphi = (u, w, \theta, s, f_1(m), f_2(m), f_3(m))$ – любая

метеорологическая субстанция, подверженная переносу;

- уравнений процессов конденсации, сублимации, замерзания капель и конечных значений удельной влажности и потенциальной температуры $\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{L_k}{C_p T} \frac{\theta}{\delta t} \frac{\delta M_k}{\delta t} + \frac{L_c}{C_p T} \frac{\theta}{\delta t} \frac{\delta M_c}{\delta t} + \frac{L_3}{C_p T} \frac{\theta}{\delta t} \frac{\delta M_3}{\delta t}$;

$\frac{\partial s}{\partial t} = -\frac{\delta M_k}{\delta t} - \frac{\delta M_c}{\delta t}$ в интервале (t_n, t_{n+1}) ;

- уравнений адаптации метеорологических полей с учетом конечных значений потенциальной температуры и удельной влажности на интервале (t_n, t_{n+1}) ; $\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\nabla \pi' + \vec{n}_z g \left(\frac{\theta'}{\theta_0} + 0,61s' - Q_s \right)$, где $\varphi =$

(u, w) ;

- уравнений, описывающих процессы дробления, коагуляции и аккреции кристаллов в интервале (t_n, t_{n+1}) .

Приведем результаты расчетов эффективности данных алгоритмов и исследования распределения водяного пара и других метеорологических характеристик в градовых облаках. Для градовых процессов по данным спутников, аэрологического зондирования на основе разработанной модели рассчитаны термодинамические и микроструктурные параметры, а также содержание водяного пара в облачности. На основе расчетов с применением уравнений модели получены оценочные значения относительной концентрации водяного пара в различных точках вертикального разреза облака. Момент времени, за который представлены данные, соответствует стадии максимального развития облака, в табл. 2-4 представлено поле влажности, температуры, яркости.

Таблица 2

Поле влажности (г/кг) в узлах сетки

Высота, км	Узлы сетки, №									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	0.05	0.12	0.15	0.14	0.12	0.06	0.03	0.01	0.00	0.00
7.5	0.26	0.51	0.55	0.53	0.48	0.36	0.23	0.13	0.07	0.03
7	0.41	0.75	0.68	0.66	0.55	0.44	0.36	0.26	0.15	0.07
6.5	0.34	0.70	0.62	0.57	0.44	0.34	0.29	0.23	0.15	0.08
6	0.28	0.61	0.50	0.40	0.38	0.21	0.17	0.15	0.11	0.06
5.5	0.20	0.46	0.40	0.23	0.11	0.08	0.08	0.08	0.07	0.04
5	0.05	0.29	0.28	0.43	0.04	0.02	0.03	0.04	0.04	0.02
4.5	0.02	0.15	0.16	0.04	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01

Таблица 3

Поле температуры (°С) в узлах сетки

Высота, км	Узлы сетки, №									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	-38.6	-38.7	-38.4	-38.1	-38.0	-38.0	-38.1	-38.2	-38.4	-38.5
7.5	-33.8	-33.7	-33.3	-33.1	-33.0	-33.0	-33.1	-33.2	-33.3	-33.5
7	-28.9	-28.7	-28.4	-28.1	-28.0	-28.1	-28.2	-28.3	-28.4	-28.5
6.5	-24.1	-23.7	-23.5	-23.1	-23.1	-23.2	-23.3	-23.4	-23.5	-23.6
6	-19.2	-18.9	-18.6	-18.2	-18.3	-18.4	-18.6	-18.6	-18.7	-18.8
5.5	-14.3	-14.1	-13.8	-13.4	-13.4	-13.6	-13.8	-13.9	-13.9	-14.0
5	-9.4	-9.2	-9.0	-8.6	-8.6	-8.8	-9.0	-9.1	-9.1	-9.1
4.5	-4.4	-4.3	-4.1	-3.8	-3.7	-4.0	-4.1	-4.2	-4.2	-4.3

Таблица 4

Поле яркости (ед.) в узлах сетки от стадии максимального развития

Время, ч	Узлы сетки, №									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6.00	155,3	177,3	175,6	171,4	162,7	156,3	152,9	150	147,1	144,5
9.00	146,4	167,2	164,2	161,2	152,6	146,2	142,8	139,9	136,9	134,5
12.00	136,1	154,4	151,5	148,1	142,3	136	132,6	129,6	126,7	124,3
15.00	123,4	139,6	137,6	135,1	131,3	125,4	121,9	118,9	116,2	114,1
18.00	112,9	123,3	122,5	121,2	117,7	113,5	110,5	107,7	105,3	103,6
21.00	98,6	106	106,1	104,7	103,4	100,3	97,8	95,7	93,9	92,9
00.00	89,8	93,3	94	93,7	92,9	91,1	90,5	88,3	87,6	87,3
03.00	82,3	83,2	83,5	83,4	83,2	82,6	82,3	82,1	82,0	82,0

Практическая реализация предложенного способа заключается в том, что сначала, используя данные радиозондирования, определяем температурный уровень образования града, затем спутниковым методом вероятность образования, а по модели вычисляем распределение характеристик по высоте. На рис. 2 приведено распределение образования града в зависимости от температуры в 6 случаях на разных стадиях развития облака и определенное разными методами, описанными выше. Для сравнения показана кривая распределения (5), рассчитанная на основе адиабатической модели.

Как видно из рис. 2, кривая распределения, построенная на основе адиабатической модели, близка к кривой распределения, полученной на основе предложенного спутникового метода. Если учесть, что в этой стадии развития облака скорость восходящих потоков достигает 16 м/с, то при таких скоростях воздушного потока могут удерживаться и расти градины с диаметром более 12 мм, т.е. использование адиабатической модели для интерпретации данных градин корректно только для крупного града.

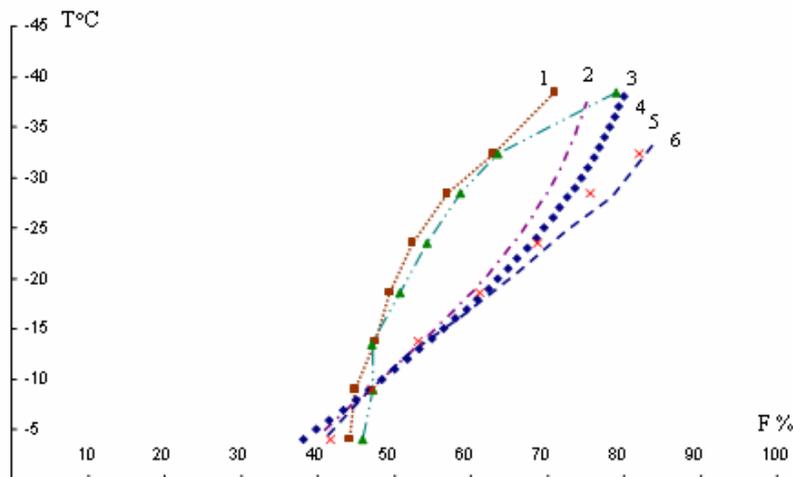


Рис. 2. Зависимость образования града от температуры для разных стадий развития облачности: 1 – стадия появления; 2 – развития; 3 – максимального развития; 4 – распределение на основе спутниковых данных; 5 – распределение на основе адиабатической модели; 6 – распределение на основе радиозондовой и радиолокационной информации

По адиабатической модели температурный диапазон образования града составил $-5 - -13^{\circ}\text{C}$, а по предложенной модели $-5 - -24^{\circ}\text{C}$. Диапазон роста градин, полученный на основе адиабатической модели, очень мал. Оценка температурного уровня образования града приведена в табл. 5. Метод, основанный на адиабатической модели, целесообразно использовать для интерпретации града, на зрелой стадии развития облака, он не точен в начальной стадии.

Таблица 5

Температура ($T^{\circ}\text{C}$) в слое образования града

Виды информации	Т адиабатическая модель, $^{\circ}\text{C}$	Т усовершенствованная, $^{\circ}\text{C}$
Аэрологическая	-13,5	-24
Спутниковая	-10	-17
Радиолокационная	-11,5	-11,5
Спутниковая и радиолокационная	-10	-14
Аэрологическая и спутниковая	-12	-17
Аэрологическая и радиолокационная	-13	-13

Результаты исследования:

- рассчитаны распределения метеорологических характеристик для градовых процессов, получено, что увеличение скорости восходящего потока приводит к более быстрому уменьшению концентрации водяного пара по высоте;

- для более точного расчета распределения зон града по высоте необходимо использовать несколько методов, определять совместно с использованием спутникового, радиолокационного методов и модели для анализа зарождения града;

- разработан метод определения условий зарождения и роста града в облаках на основе численной модели формирования облачных частиц;

- определены уровни образования града, температурный интервал (от -5°C до -24°C).

Библиографический список

1. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 360 с.
2. Толмачева Н.И. Исследование турбулентности в облачной среде // Вопросы прогноза погоды, климата, циркуляции и охраны атмосферы. Пермь, 2000. С. 26–28.
3. Толмачева Н.И. Исследование динамики конвективной облачности по радиолокационной информации // Географический вестник. 2010. №4(15). С. 63-68.
4. Толмачева Н.И., Ермакова Л.Н. Прогноз атмосферных осадков по информации метеорологических спутников // Географический вестник. 2008. №2 (8). С. 179-187.
5. Толмачева Н.И., Ермакова Л.Н. Восстановление метеорологических полей по спутниковым и радиолокационным изображениям облачности // Географический вестник. 2010. №1(12). С.62-69.

6. Толмачева Н.И., Ермакова Л.Н. Мезоструктурные особенности атмосферных фронтов по радиолокационной и спутниковой информации // Географический вестник. 2009. №3(11). С. 7-14.

N.I.Tolmacheva, L.N.Ermakova

DYNAMICS OF DEVELOPMENT HAILSTORM IN THE PERM

Researches of dynamics of Cb overcast are conducted, the reasons of variability of movement of convective overcast are established. Development stages hailstorm processes are considered, educational levels of hailstones and a temperature interval are defined. The method of definition of conditions of origin and hailstones growth in clouds on the basis of numerical model of formation of cloudy particles is developed.

К e y w o r d s: the meteorological companion; a meteorological radar; restoration; cloudy cells; meteorological parameters; numerical model.