

УДК 551.501.8.:551.509.322

Н.И. Толмачева

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАЗВИТИЯ КОНВЕКЦИИ В АТМОСФЕРЕ

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15; e-mail: nitolmacheva@yandex.ru

Проведены исследования развития кучево-дождевой облачности, выявлены причины изменчивости конвективной облачности. Рассмотрено развитие грозо-градовых процессов в Пермском крае, определены условия, уровни образования осадков, гроз, града. Разработан метод определения условий развития конвекции на основе численной модели.

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

Прогноз развития конвективной облачности является важным элементом системы штормооповещения. Автоматизация этой системы вызывает необходимость разработки численной схемы прогноза конвективной облачности и связанных с ней опасных явлений. Численный прогноз позволит повысить качество прогнозирования вследствие использования предикторов, характеризующих облако и условия его существования, а также за счет применения более совершенных алгоритмов распознавания опасных явлений.

Анализ и решение уравнений термодинамики атмосферы позволяет понять физику процесса, происходящего в атмосфере. Цель исследования — выявление условий возникновения конвекции (в теории и практике) и расчет ее параметров с использованием радиолокационных и спутниковых измерений. Основные задачи — исследование влияния приземного слоя атмосферы на развитие конвекции; выявление условий возникновения конвекции в расчетной модели; расчет параметров конвекции в атмосфере.

В настоящее время проводятся как экспериментальные, так и теоретические работы по возникновению конвекции в атмосфере [1-2; 6]. Исследуем возникновение конвекции в приземном слое, рассмотрим системы уравнений, описывающих конвекцию в двумерной модели. Для краткости рассмотрим начальные и конечные уравнения [2]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_i} \left(\frac{\partial p}{\partial x} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_i} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) - g, \quad (2)$$

где u — проекция скорости на ось x ; w — проекция скорости на ось z . В состоянии равновесия $v = 0$, $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$, $-\frac{1}{\rho_v} \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right) - g = 0$. Атмосферу и ее параметры рассмотрим в невозмущенном состоянии, изменение давления в горизонтальной плоскости (уравнение состояния) не будем учитывать $p_i = p_v$. Следовательно, для сухого воздуха — $\rho_i = \rho_v \frac{T_v}{T_i}$, для влажного — $\rho_i \approx \rho_v \frac{T_v}{T_i} [1 - \beta(s_i - s_v)]$. Конечная система уравнений для влажного воздуха тепловой конвекции имеет вид [1]:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_v} \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (3)$$

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = g \left[\Delta T_k + (\Delta \gamma_v)_k (z - z_k) - \frac{\varepsilon}{2} (z - z_k)^2 \right] + \beta [\Delta s_k + b(z - z_k)], \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

Алгоритмы расчета параметров конвекции, метод расчета количества и интенсивности осадков с учетом влажности облаков, вертикальных профилей скорости восходящего потока, алгоритм расчетов влажности, количества и интенсивности выпадения осадков приведены в предыдущем исследовании [6].

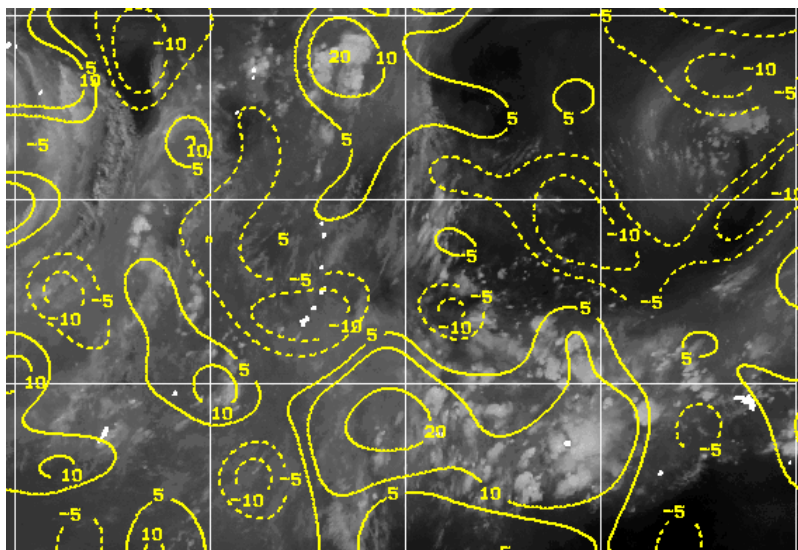


Рис. 1. Рассчитанные параметры конвекции (температура у земли и в слое облачности)

В работе проанализированы алгоритмы расчета параметров конвекции сухого и влажного воздуха (рис. 1-2), получен метод расчета количества и интенсивности осадков с учетом влажности облаков. Чем ближе значение градиента массовой доли водяного пара к критическому, тем вертикальный размер конвективной ячейки становится больше. В облачном слое, в отличие от подоблачного, распределение скорости имеет несимметричный характер, и уровни максимальной вертикальной скорости находятся в верхней части облака (рис 3-4). Важным моментом является то, что количество осадков

зависит от слоя с уровня максимальной влажности до уровня конвекции:
$$h_l = \frac{\pi^2}{4} \frac{k}{\rho_s} \frac{u_0}{v_g} \sqrt{\frac{\alpha \varepsilon (z_w - z_k)^5}{80(\alpha \Delta \gamma - \beta b)}}$$
,

где v_g – скорость потока на АТ-500.

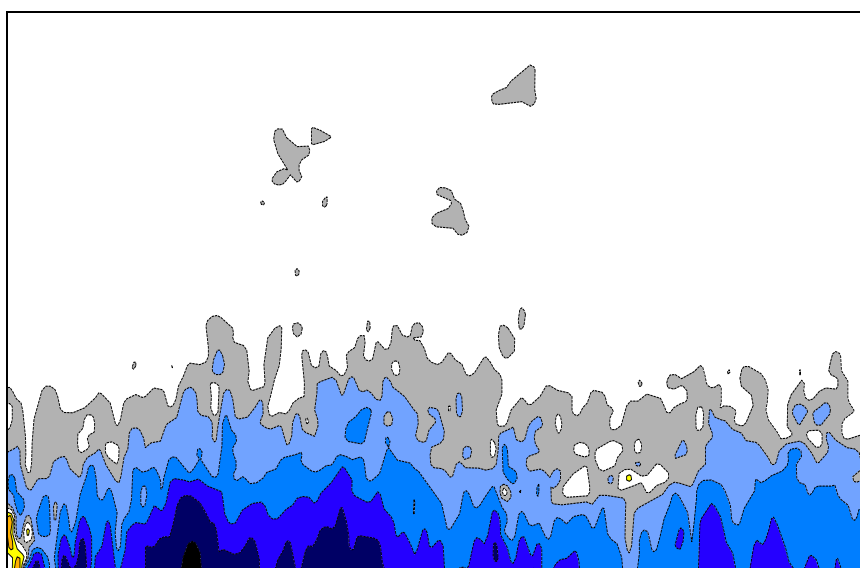


Рис. 2. Развитие конвекции, модель

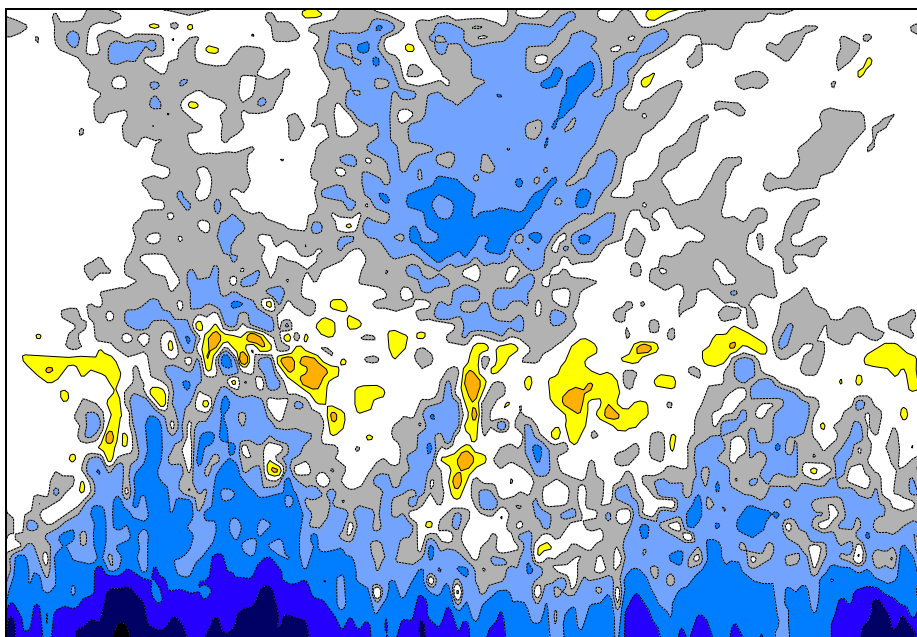


Рис. 3. Активная конвекция, информация МРЛ

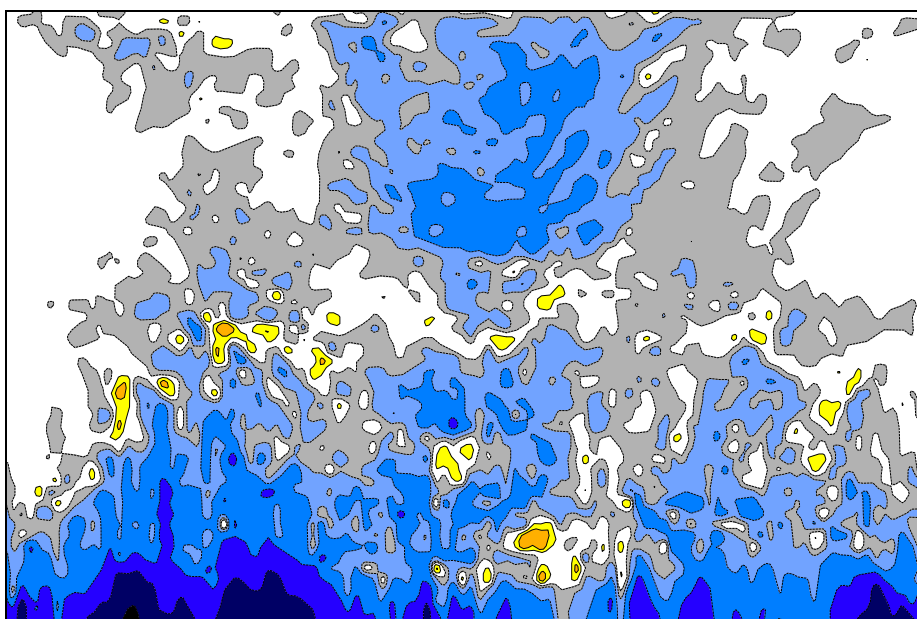


Рис. 4. Активная конвекция, спутниковая информация

В работе использовалась радиолокационная информация МРЛ-5 г. Пермь, данные метеорологических станций, приземные и высотные карты и космические снимки за 1996-2010 гг. Составлялась выборка, содержащая характеристики очагов гроз, по данным МРЛ определялись их площадь, отражаемость, высота верхней границы облачности, по космическому снимку – площадь очагов гроз, текстура и мезоструктура облачного поля и синоптическая ситуация. Для анализа отобрано 3672 случая, в зависимости от занимаемой площади грозовые очаги были разбиты на три группы: мезо- α (200-2000 км), мезо- β (20-200 км) и мезо- γ (2-20 км) зоны. За единицу площади был выбран квадрат размером 4x4 км. К мезо- γ зонам относили площади 1-5 ячеек, мезо- β – 6-50 ячеек, мезо- α – 51-500 ячеек.

Максимальное число случаев приходилось на мезо- β (51%) и мезо- α (36%) площади. Мезо- γ зоны отмечались в 13% случаев. Средние размеры зон, подсчитанные по радиолокационным данным, меньше, чем определенные по снимкам: мезо- γ меньше в 1,2 раза, мезо- β и мезо- α – в 0,8 раз. Наличие перистой облачности в грозовых облаках дает увеличение размеров зоны при ее определении по снимку.

Исследованы синоптические ситуации с очагами гроз различного масштаба и связь мезоструктуры облачного поля грозовой зоны с синоптической ситуацией. Выделено восемь типов синоптических ситуаций, при которых наблюдались грозы. Наибольшая повторяемость грозных очагов отмечена на фронтах (основные – 29%, вторичные – 25% случаев), а также на фронтах окклюзии (11% случаев), в центральных частях циклонов (16% случаев) и внутри однородных воздушных масс (19% случаев). Анализируя масштабы грозных зон при различных синоптических ситуациях (табл.1), можно говорить о том, что для холодных фронтов характерны мезо- β и мезо- α зоны, для фронтов окклюзии – зоны мезо- β , для центральных частей циклонов – мезо- α .

Таблица 1

Повторяемость масштабов очагов гроз при различных синоптических ситуациях, %

Синоптическая ситуация	Мезо- γ	Мезо- β	Мезо- α	Число случаев
Холодный фронт	9	47	44	63
Вторичный холодный фронт	22	48	30	51
Теплый фронт	23	73	4	16
Фронт окклюзии	15	65	20	30
Центр циклона	20	36	44	31
Ложбина	32	59	9	14
Гребень	42	37	21	11
Внутримассовая ситуация	56	28	16	12
Число случаев	43	111	74	228

В табл.2 представлены данные о мезоструктуре облачного поля, характерного для гроз при 8 типах синоптических ситуаций. Выделено пять основных типов мезоструктуры облачного поля грозных очагов: ячейки, гряды и полосы, крупные скопления Сb, отдельные яркие Сb, мелкие кучевообразные облака (имеющие серый тон изображения и соответствующие грозам с отражаемостью 30-45 dBz). Независимо от синоптической ситуации для грозных очагов из выбранных 5 типов мезоструктуры облачного поля наибольшая повторяемость отмечалась у трех видов: гряды - полосы, скопления Сb и отдельные Сb. Грозным очагам, выявленным по данным МРЛ, на космическом снимке соответствовали: на основных холодных фронтах - гряды, скопления и отдельные Сb; на вторичных холодных фронтах - скопления Сb и ячейки. Большое число грозных зон наблюдалось в центрах циклонов с характерной мезоструктурой в виде гряд и полос.

Таблица 2

Повторяемость мезоструктур облачного поля на космических снимках в зонах активной конвекции при различных синоптических ситуациях, %

Синоптическая ситуация	Ячейка	Гряды, полосы	Скопление Сb	Отдельные Сb	Мелкие Сu, Сb	Число случаев
Холодный фронт	4	38	30	23	5	65
Вторичный ХФ	23	20	32	11	14	53
Теплый фронт	2	14	12	28	44	9
Фронт окклюзии	3	23	24	41	9	24
Центр циклона	9	52	23	15	1	30
Ложбина	30	23	7	37	2	23
Гребень	58	2	19	20	1	11
Внутримассовая	2	26	0	27	15	13
Число случаев	56	59	45	38	30	228

Таблица 3

Повторяемость (число случаев) максимальной радиолокационной отражаемости при различных мезоструктурах облачного поля

Радиолокационная отражаемость (max) dBz	Ячейка	Гряды, полосы	Скопление Cb	Отдельные Cb	Мелкие Cu, Cb	Число случаев
14-29, 30-45	1	2	2	4	1	10
30-45	12	15	20	23	10	80
30-45, 46-57	15	28	25	16	8	92
30-45,46-57,57-65	1	4	3	1	1	10
46-57	1	6	6	5	2	20
46-57, 30-45	8	21	8	12	2	51
46-57, 57-65	1	2	1	2	–	6
57-65, 46-57	–	2	2	1	–	5
Всего	39	80	67	64	24	274

Характеристикой зон активной конвекции по данным МРЛ является радиолокационная отражаемость. В каждом грозовом очаге были выбраны ее преобладающие значения и выделены 8 групп сочетаний (первая группа имеет преобладающее значение, вторая – второстепенное). Явно выделяются три группы сочетаний отражаемости: 30-45, 30-45 и 46-57, 46-57 и 30-45 dBz. Рассмотрим значения отражаемости, характерные для каждого типа мезоструктуры облачного поля (табл. 3). Для гряд, полос и скоплений Cb характерны высокие значения отражаемости, качественно оцениваемые от умеренной до сильной, от сильной до очень сильной.

В работе проанализированы радиолокационные характеристики зон активной конвекции с учетом их площади, интенсивности отражаемости и высоты радиоэха. По интенсивности все случаи разбиты на 3 группы: слабые (14-29 dBz), умеренные (30-45 dBz) и сильные (46-57 dBz). При умеренной и сильной отражаемости чаще выделяются зоны мезо-β и мезо-α. При слабой отражаемости отмечается большое число случаев зон мезо-γ. В группе умеренной интенсивности характерно развитие облаков от 9 км и выше, а в группе сильной интенсивности – более 11 км.

Для определения грозоопасных районов следует рассматривать сочетание параметров по данным МРЛ и ИСЗ (площадь распространения явления, мезоструктуру (рисунок облачного поля, верхнюю границу и радиолокационную отражаемость). Рисунок облачного поля наиболее активных гроз имеет вид: гряды-полосы, скопления Cb мезо-β и мезо-α масштаба с преобладающей интенсивностью радиоэха 30-45, 46-57 и 46-57, 30-45 dBz и верхней границей более 9 км. Очаги активных гроз располагаются в передней части облачной полосы или центральной части циклона, представленной скоплением Cb. При использовании спутниковой информации полезно привлекать все характеристики облачности, но учитывать, что в различных ситуациях они неоднозначно связаны с грозами.

Использование информации метеорологических радиолокаторов (МРЛ) позволяет получать и использовать в прогнозе погоды пространственные характеристики облачности и осадков. Исследуем изменчивость пространственного распределения кучево-дождевой облачности (Cb) на основе радиолокационной информации. Полученные результаты позволят прогнозировать эволюцию конвективной облачности. В качестве исходных данных использовалась радиолокационная информация МРЛ-5 о распределении Cb, сопровождающихся конвективными явлениями (ливнями, грозой, градом), и аэрологические данные ст. Пермь.

Измерения параметров перемещения радиоэха Cb показывают, что за время существования одного и того же Cb скорость его перемещения (V) может испытывать значительные колебания, а траектория не всегда совпадает с прогнозируемой. Для прогностических целей необходимо выявить причины таких колебаний. Они могут определяться методическими ошибками, особенностями радиолокационного обнаружения облачности, принятой методикой измерения $V_{МРЛ}$ и свойствами атмосферы. К последним можно отнести факторы, обусловленные взаимодействием потоков в кучево-дождевом облаке, проходящим несколько стадий развития с полем ветра, а также особенностями подстилающей поверхности.

Проанализируем причины изменчивости скоростей движения Сб, полученных по данным МРЛ и МСЗ, и разработаем методику определения скорости и направления перемещения Сб в разных условиях атмосферы. Данные включают траектории, площади, отражаемости и углы разворота конвективной облачности (КО) — 1645 наблюдений (май–сентябрь 2002–2008 гг.). Расчет производится по формуле $V_{МРЛ} = 60 \frac{d_{МРЛ}}{t_{МРЛ}}$, где $d_{МРЛ}$ — перемещение центра тяжести КО (в км) за время $t_{МРЛ}$. Затем рассчиты-

валась средняя скорость $V_{ср}$ за все время наблюдения одной серии. Данные расчета сопоставлялись со скоростями ветра на стандартных изобарических поверхностях, полученных по данным аэрологического зондирования.

Ошибки оценки скорости КО определяются точностью расчета времени и положения центра тяжести по формуле, приведенной в [1]. Рассмотрим распределение b — относительное отклонение $V_{МРЛ}$ от средней скорости за всю траекторию. Из анализа следует, что $V_{МРЛ} > V_{ср}$ в 62 % случаев, а в 36 % — $V_{МРЛ} < V_{ср}$. При увеличении b проявляется уменьшение ее повторяемости. Проанализируем зависимость между последовательными значениями $V_{МРЛ}$ (км/ч) для всей траектории КО и $V_{ср}$ (рис. 5). Она определяется тесной связью — коэффициент корреляции $r = 0,88$, ошибка уравнения регрессии — 2,4 км/ч. Полученные оценки показывают, что при прогнозе скорости перемещения КО по величине $V_{МРЛ}$ можно использовать уравнение $V_{ср} = 0,84 V_{МРЛ} + 12,6$.

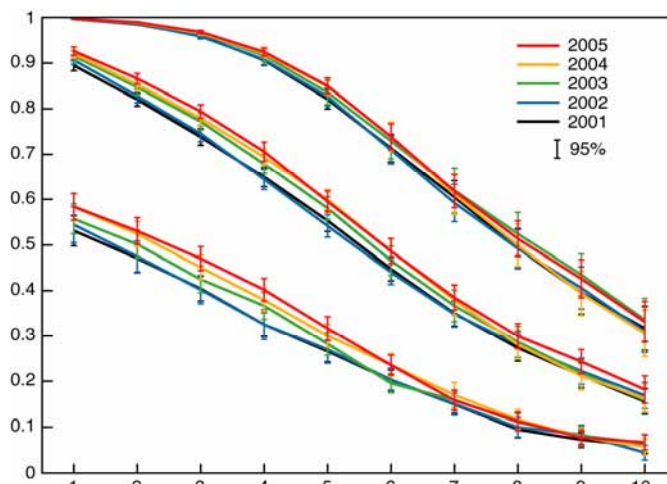


Рис. 5. Связь $V_{МРЛ}$ и $V_{ср}$ для Св, Сб, КО по всей траектории перемещения (до 10 точек)

Анализ зависимости величины $\Delta V_{ср}$ от вертикального сдвига скорости ветра в слое 1–6 км показал, что в большинстве случаев $\Delta V_{ср}$ меньше величины вертикального сдвига ветра в этом слое. Если сдвиг скорости ветра в указанном слое менее 10 км/ч или ветер ослабевает с высотой (отрицательный сдвиг), величина $\Delta V_{ср}$ больше абсолютного сдвига скорости ветра.

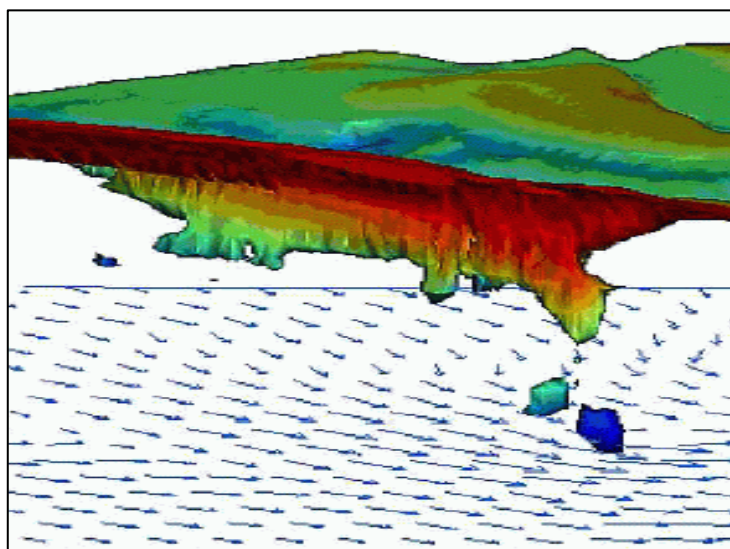


Рис. 6. Распределение средней скорости $V_{ср}$ за время наблюдения одной серии КО

Рассмотрим распределение повторяемости разностей скоростей ветра на трех изобарических поверхностях 850, 700, 500 гПа и V_{cp} . КО обычно перемещаются быстрее, чем поток на уровне 850 гПа, но с несколько меньшей скоростью, чем на уровне 700 гПа. В 38 % V_{cp} близко к V_{850} и V_{cp} , в 89 % — $V_{500} > V_{cp}$. Причина заключается в изменчивости вертикальной мощности ячеек КО, обусловленной динамикой развития Сб (рис 6).

При усилении или изменении скорости восходящего потока в Сб изменяется высота облака и протяженность зоны крупнокапельных частиц, дающих наибольший вклад в водность облака. При этом должна изменяться и толщина слоя тропосферы, воздушные потоки в котором влияют на движение Сб. Если в нем имеется вертикальный сдвиг ветра (по скорости и направлению), то благодаря переносу нисходящими и восходящими потоками из верхней части Сб вниз и снизу вверх момента количества движения внутри Сб устанавливается отличное от внешнего поля собственное поле ветра. Поле ветра внутри Сб не имеет установившегося характера [2]. Любое достаточно развитое по вертикали конвективное облако можно рассматривать как препятствие, поэтому на наветренной стороне Сб отмечается избыток давления, а на подветренной стороне — недостаток. Это динамическое давление, зависящее от постоянно изменяющегося поля ветра внутри облака, и определяет изменчивость скорости движения Сб на разных стадиях развития.

В работе [1] показано, что положение центра области с максимальным восходящим потоком в окрестности Сб определяется сдвигом направления ветра в слое от основания облака до его верхней границы. Появление новых ячеек рядом с ранее возникшей наиболее вероятно там, где существует самый сильный восходящий поток. Его расположение зависит от поворота ветра с высотой, поэтому расширение площади КО, если оно происходит при развитии Сб, идет в определенном направлении. Следствием такого направленного развития и распространения площади является искривление общей траектории движения, отклонение от первоначального направления движения или от направления основного направляющего ветра на уровнях 850 и 700 гПа (малых мезомасштабных площадей) и уровне 500 гПа (для больших мезомасштабных площадей).

В анализе выявлено девять профилей изменения ветра в слое 1–5 км. Наибольшая повторяемость отмечается, когда направление ветра (Δd) в слое между изобарическими поверхностями 850 и 500 гПа не изменяется, т. е. $\Delta d = d_{500} - d_{850} \leq \pm 18^\circ$. При анализе повторяемости градиента скорости ветра в том же слое типичной следует считать модель усиливающегося с высотой ветра (71 %). В 52 % случаев в атмосфере существует стратификация ветра, при которой конвективная облачность может перемещаться по криволинейным траекториям, что согласуется с ранее полученными результатами [5].

Для определения скорости движения КО за период существования без учета аэрологических данных о ветре рекомендуется для расчетов приведенная выше формула. При использовании аэрологической информации о распределении ветра на высотах для учета стратификации и ее влияния на изменчивость движения КО в Пермском крае для оперативной работы можно рекомендовать уравнение $V_{cp} = V_{700} + 12,3H + 0,10(V_{500} - V_{850}) - 11,4$. Оно учитывает как характеристики ветра в атмосфере, так и конвективной облачности и позволяет оценить ожидаемую неравномерность скорости и различие в скоростях движения облачности, вертикальная протяженность которых неодинакова. Для учета изменчивости скорости КО в течение периода ее существования необходим прогноз эволюции характеристик, например, прогноз изменения высоты верхней границы во времени. Все факторы, оказывающие влияние на движение Сб, в условиях изменяющейся стратификации могут быть учтены в автоматизированном режиме при наличии надежных алгоритмов, описывающих как особенности взаимодействия Сб и поля ветра, так и эволюцию облачности.

Численный прогноз позволит повысить качество прогнозирования вследствие использования предикторов, характеризующих само облако и условия его существования, а также за счет применения более совершенных алгоритмов распознавания опасных явлений. Для уточнения существующего прогноза развития конвективной облачности с 12-часовой заблаговременностью и связанных с ней опасных явлений погоды предлагается давать уточнение этого прогноза с 3-часовой заблаговременностью для прогнозирования этих явлений в конкретных пунктах района. Такой локальный прогноз предполагает большую точность и требует более подробных исходных данных. Для его составления необходимо учитывать неоднородный характер крупномасштабных процессов, орографическую неоднородность подстилающей поверхности, влияние городских застроек, приводящих к различной степени неустойчивости пограничного слоя. Эти условия могут вызвать усиление или ослабление мезомасштабных процессов с размерами 20–200 км, влияющих на развитие облачности над конкрет-

ными участками района. Данные аэрологического зондирования в свободной атмосфере можно считать репрезентативными над районом 100×100 км. Если изменения влажности и температуры нижних слоев имеют равное значение при благоприятной стратификации для возникновения эффективной конвекции по сравнению со свободной атмосферой, то влияние условий поверхности земли и в пограничном слое, имеющих большую изменчивость, необходимо учитывать более детально. Достичь этого можно за счет использования данных наземных метеорологических данных. МРЛ, как наиболее оперативное средство получения информации об облачности и зонах осадков, позволяет следить за эволюцией характеристик облачности. Это дает возможность корректировать, исправлять и добиваться большей точности трехчасового прогноза развития кучево-дождевой облачности (Cb) над конкретными пунктами Пермского края.

Выводы:

1. Получены критерии, определяющие развитие конвекции.
2. Выведены выражения для скорости потоков, размера конвективной ячейки в модели конвекции и экспериментально (на основе оперативных данных).
3. Предложены методики расчетов параметров конвекции по спутниковой и радиолокационной информации.
4. Проведены расчеты параметров возникновения конвекции в атмосфере и сравнение полученных результатов с метеорологическими данными.
5. Исследован механизм образования конвективных ячеек, рассмотрен ряд методик по прогнозированию и расчетам параметров конвективной облачности.

Библиографический список

1. Мазин И.П., Шметер С.М. Облака: строение и физика образования. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 280 с.
2. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 779 с.
3. Толмачева Н.И. Исследование турбулентности в облачной среде // Вопросы прогноза погоды, климата, циркуляции и охраны атмосферы. Пермь, 2000, С. 26–28.
4. Толмачева Н.И. Исследование динамики конвективной облачности по радиолокационной информации // Географический вестник. 2010. №4 (15).
5. Толмачева Н.И., Ермакова Л.Н. Восстановление метеорологических полей по спутниковым и радиолокационным изображениям облачности // Географический вестник. 2010. №1 (12).
6. Толмачева Н.И., Ермакова Л.Н. Динамика развития градовой облачности в Пермском крае // Географический вестник. 2011. №4 (19).

N.I.Tolmacheva

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.

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