

УДК 551.501.8:551.509.322

Н.И. Толмачева, А.Д. Крючков

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФРОНТАЛЬНОЙ ОБЛАЧНОСТИ

Изучен ряд характеристик температурно-ветрового режима облаков с осадками, рассмотрено вертикальное распределение температуры во фронтальных облаках, проанализирована повторяемость вертикального сдвига ветра в N_s и его зависимость от толщины фронтальных слоисто-дождевых облаков.

Ключевые слова: турбулентность; стратификация; облачность; вертикальный сдвиг ветра.

Стратификация атмосферы и вертикальный сдвиг ветра играют важную роль в динамике облаков, их эволюции, образовании осадков и их прогнозировании. Малоинформативными для понимания физики процессов осадкообразования в слоистых облаках являются средние характеристики всей толщины облаков. Ветровой режим и такая его характеристика, как вертикальный сдвиг ветра, для данного класса облаков остается малоизученной. Учет влияния сдвига ветра на динамику облаков и на формирование в них осадков необходим, например, для регулирования осадков, а сведения о повторяемости сдвига ветра могут быть использованы при построении динамических моделей фронтальных облачных систем [1; 3].

Целью настоящей работы является изучение на статистическом материале ряда характеристик температурно-ветрового режима фронтальных слоисто-дождевых облаков с осадками. Проведены типизация и детализация распределения температуры по высоте для данной облачности, изучена повторяемость вертикального сдвига ветра в N_s и его зависимость от толщины фронтальных слоисто-дождевых облаков.

Основными исходными данными являются результаты радиозондирования атмосферы, информация радиолокатора МРЛ-5 и синоптические карты. Измерения проводились с ноября по март 1999–2010 гг. Использовались данные автоматизированного метеорологического радиолокационного комплекса (АМРК) МРЛ-5 ст. Пермь. При исследовании изменения температуры с высотой было использовано 1342 случая вертикального зондирования, для изучения вертикального сдвига ветра — 1203 наблюдения.

Форма облаков, высота нижней границы, характеристики осадков определялись по данным метеостанций. Высоту верхней границы облаков оценивали по данным радиозондирования и уточняли с помощью МРЛ-5 [2; 4]. Из рассмотрения исключали данные радиозондирования, содержащие заниженные значения относительной влажности, тонких облаков и с недостаточно надежно определенными верхними границами. Все облака были фронтального происхождения.

Для описания температурного и ветрового режимов слоистообразных облаков использовали следующие характеристики:

ΔH — толщина облаков;

$\gamma = -\frac{\Delta T}{\Delta Z}$ °C/100 м — вертикальный градиент температуры;

γ_s , ΔH_s — соответственно градиент и толщина задерживающих слоев (слои с инверсией или изотермией);

$\Delta T_s = T_{вг} - T_{нг}$ — суммарное изменение температуры в задерживающем слое;

$\Delta \gamma = \gamma - \gamma_{в}$ — величина, которая определяет термическую устойчивость в облаках и вне облаков ($\Delta \gamma = \gamma - \gamma_{с}$), где $\gamma_{в}$ и $\gamma_{с}$ — влажноадиабатический и сухоадиабатический градиенты температуры;

© Толмачева Н.И., Крючков А.Д., 2013

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 04-05-96043).

Толмачева Наталья Игоревна, кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии и охраны атмосферы Пермского государственного национального исследовательского университета; 614990, Россия, Пермь, ул. Букирева, 15; nitolmacheva@yandex.ru

Крючков Андрей Дмитриевич, магистр гидрометеорологии, инженер кафедры метеорологии и охраны атмосферы Пермского государственного национального исследовательского университета; 614990, Россия, Пермь, ул. Букирева, 15; meteo@psu.ru

$\beta = \frac{|\Delta V|}{\Delta H}$ — вертикальный сдвиг ветра, где $|\Delta V|$ — модуль векторной разности скоростей ветра на

границах слоя по вертикали, ΔH — толщина слоя;

$R = \frac{g(\gamma_s - \gamma)}{T\beta^2}$ — число Ричардсона.

Рассмотрение вертикального распределения температуры (стратификации) во фронтальных облаках Ns , $Ns-As$, $Ns-As-Cs$, дающих осадки, позволило выделить пять типов: 1 — температура с высотой непрерывно понижается начиная с некоторого уровня под облаком и вплоть до некоторой высоты над облаком, задерживающий слой отсутствует; 2 — задерживающий слой расположен над верхней границей облаков; 3 — задерживающий слой наблюдается внутри облака, 4 — задерживающие слои находятся над верхней границей и внутри облака; 5 — задерживающие слои расположены под нижней границей и внутри облака.

Многообразие стратификации в атмосфере, прежде всего, обусловлено параметрами задерживающих слоев внутри облака. Задерживающие слои изменялись по всей толщине и занимали как все облако, так и его небольшую часть. При этом в облаке наблюдалось два, реже три задерживающих слоя. Такое состояние облачных слоев характерно для типов 3, 4, 5. Повторяемость перечисленных типов стратификации зависит от толщины облаков (табл. 1). Чаще всего наблюдались типы 1 и 3, когда задерживающие слои отсутствовали или находились внутри облака.

Таблица 1

**Повторяемость основных типов стратификации температуры
в Ns , $Ns-As$, $Ns-As-Cs$ разной толщины, %**

Толщина облака, км	Тип стратификации					
	1	2	3	4	5	Прочие
<2,0	31	10	35	10	9	5
2,1–3,0	33	3	46	6	9	3
3,1–4,0	24	2	57	2	12	4
>4,0	20	1	63	3	12	2

При увеличении толщины облака доля облаков, где отсутствуют задерживающие слои, уменьшалась от 34 ($\Delta H = 2,1-3,0$ км) до 20% ($\Delta H > 4,0$ км). В то же время повторяемость облаков, где есть задерживающие слои, возрастала от 36 ($\Delta H < 2$ км) до 63% ($\Delta H > 4,0$ км).

Более сложные типы вертикального распределения температуры, не вошедшие в данную типизацию, встречаются редко (табл. 1). Полученная типизация в целом совпадает с классификациями, приведенными в исследованиях других авторов для Ns . Основные различия заключаются в повторяемости типов стратификации. В нашем исследовании почти в два раза больше облаков, содержащих задерживающие слои (тип 3). В то же время меньше случаев, в которых инверсия и изотермия отсутствуют, и почти в 5 раз меньше облаков, относящихся к типу 2. Объяснить эти различия можно тем, что в других исследованиях к типу 2 отнесено большое количество внутримассовых облаков, над верхней границей которых, как правило, располагается задерживающий слой, а в представленном исследовании они исключались.

Исследование показало, что более чем в половине случаев в Ns , $Ns-As$ встречаются задерживающие слои толщиной более 0,3 км. При любом значении ΔH наибольшая повторяемость γ_3 приходится на его небольшие ($|\gamma_3| < 0,4$ °C/100 м) значения, колеблясь от 46 % при $\Delta H_3 < 0,1$ км до 74 % при $0,51$ км $< \Delta H_3 < 0,60$ км (табл. 2).

Представляют интерес и слои с более глубокими инверсиями, с которыми часто связаны безоблачные прослойки. Эти задерживающие слои имеют небольшую мощность. Температурные градиенты $\gamma_3 < -3$ °C/100 м встречаются только в слоях мощностью менее 0,4 км. Табл. 2 дает представление о повторяемости слоев с изотермией ($\gamma_3 = 0$ °C/100 м). Наибольшей повторяемости (почти половина случаев) они достигают при толщине задерживающего слоя $0,31$ км $< \Delta H < 0,40$ км и $0,51$ км $< \Delta H < 0,60$ км.

Таблица 2

**Повторяемость градиентов температуры
в задерживающих слоях разной толщины, %**

Толщина задерживающего слоя, км	γ , °C/100 м						
	0	-0,01 ÷ -0,40	-0,41 ÷ -0,80	-0,81 ÷ -1,20	-1,21 ÷ -1,60	-1,61 ÷ -2,00	<-2,00
<0,10	24	23	10	22	11	5	6
0,11–0,20	32	25	20	10	4	4	5
0,21–0,30	46	21	14	8	5	3	4
0,31–0,40	52	21	12	6	4	2	2
0,41–0,50	41	26	20	7	3	2	1
0,51–0,60	50	25	12	8	5	1	2
>0,60	45	22	18	8	4	2	1

Показательной характеристикой задерживающих слоев является суммарное изменение температуры ΔT_3 . Наибольшая повторяемость суммарного изменения температуры приходится на его значения от 0 до -1 °C. Это объясняется тем, что в эту градацию вошли все случаи изотермии ($\Delta T_3 = 0$). При возрастании ΔT_3 по абсолютной величине повторяемость его резко уменьшается. Например, для $\Delta T_3 < -5,0$ °C во всех случаях она составляет 4 %.

При исследовании процессов развития осадков важной является информация о слоях облаков, в которых $\gamma > \gamma_v$ ($\Delta \gamma > 0$). Повторяемость значений $\Delta \gamma$ в различных частях облаков в зависимости от их мощности показывает, что наибольшее отклонение значения γ от γ_v характерно для тонких ($\Delta H < 2,0$ км), а также для нижних частей других облаков. Это связано с наличием инверсии и сверхадиабатических градиентов. Наиболее часто встречаются значения $\Delta \gamma$ в интервале от $-0,3$ до $0,1$ °C/100 м. При этом в верхней трети облаков чаще всего отмечаются влажнобезразличное $|\Delta \gamma| < 0,1$ °C/100 м и слабоустойчивое состояния. Повторяемость случаев с влажнобезразличным и влажнонеустойчивым состоянием ($\Delta \gamma > -0,1$ °C/100 м) составляет для разной толщины облаков 41%. Такое состояние облачной атмосферы благоприятно для естественного зарождения частиц осадков и их дальнейшего роста. В этих случаях облачная система находится в стадии развития. Максимальная повторяемость случаев с $\Delta \gamma > -0,1$ °C/100 м для облаков, толщина которых менее 2,0 км, наблюдается в нижней трети (48 %); по мере роста толщины облаков эта повторяемость уменьшается и для $\Delta H > 4,0$ км составляет лишь 26 %. Обратная картина характерна для верхней трети облаков – здесь максимум повторяемости случаев с $\Delta \gamma > -0,1$ °C/100 м приходится на облака с $\Delta H > 4,0$ км (47 %), а минимум – на облака с $\Delta H < 2,0$ км (36 %).

Вертикальный сдвиг ветра определялся как среднее для каждого слоя облаков (табл. 3).

В большинстве случаев в Ns β не превышает $1,0 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Наибольшие значения сдвига ветра чаще всего встречаются в нижней части облака. Повторяемость таких случаев уменьшается по направлению к верхней части. Во фронтальных облачных системах, где $\Delta H > 4,0$ км, увеличение повторяемости наибольших сдвигов ветра наблюдается в их средней части. По своей максимальной величине сдвиг ветра во всем облаке не превышает $5,0 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$. Повторяемость облаков с большими отрицательными значениями $\beta < -1,0 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, как правило, не превышает 11%. Они встречаются в нижней трети облаков, уменьшаясь к их верхней части.

Число Ричардсона (Ri) является критерием турбулентности и широко используется при оценках устойчивости стратификации атмосферы, изучении атмосферной конвекции. Оно рассчитывалось для трех частей облаков (по толщине). При этом с целью уменьшения ошибок расчетов вертикальное распределение температуры и скорости ветра аппроксимировалось сглаженными кривыми. Кривые плотности распределения Ri имеют значительную положительную асимметрию. При этом максимальные значения числа Ri существенно превышают его модальные значения. Это указывает на то, что в зимних облаках (20 %) наблюдается значительная термодинамическая устойчивость атмосферы. Стратификация атмосферы может стать неустойчивой, если число Ri примет значение меньше некоторой критической величины $Ri_{кр}$. Примем $Ri_{кр}$ равным единице. В зимних фронтальных облаках, дающих осадки, это значение близко к модальному значению Ri . Для разных третей облаков модальные значения Ri находятся в интервале от 0,3 до 2,0, в то время как медиана составляет 1,5–2,0. Отрицательные значения Ri в облаках встречаются редко. Часть таких облаков наблюдается при

термической неустойчивости ($Ri < Ri_{кр}$). Такое состояние атмосферы чаще всего наблюдается в верхней части облаков (40 %).

Таблица 3

Повторяемость значений вертикального сдвига ветра в частях облака, %				
Толщина облака, км	Часть облака	Значения $\beta \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$		
		0,0–0,5	0,6–1,0	>1,0
<2,0	Нижняя	35	26	36
	Средняя	40	34	26
	Верхняя	48	32	23
2,1–3,0	Нижняя	48	23	26
	Средняя	46	27	22
	Верхняя	64	25	12
3,1–4,0	Нижняя	43	24	34
	Средняя	63	21	16
	Верхняя	68	22	8
>4,0	Нижняя	59	30	15
	Средняя	57	17	24
	Верхняя	59	28	9

В исследовании установлено, что в верхней трети фронтальных облаков возникают наиболее благоприятные условия для зарождения и роста частиц осадков. Для всех рассмотренных облаков характерно, что задерживающие слои отсутствуют более чем в 90 % случаев. Вероятность того, что фронтальная облачная система находится в стадии развития, когда в верхней трети облаков стратификация близка к влажнобезразличной и влажнонеустойчивой, составляет 42 %. Влажнобезразличная и влажнонеустойчивая стратификация имеет повторяемость 32 %. При исследовании сдвига ветра выявлено, что чаще всего (55–70 %) наблюдается значение $\beta < 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Библиографический список

1. Брылев Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминова Г.Л. Радиолокационные характеристики облачности и осадков. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 232 с.
2. 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.
3. Толмачева Н.И. Комплексный анализ турбулентности в облачной среде // Тезисы докл. на Всеросс. конф. «Фридмановские чтения». Пермь, 1998. С. 101–102.
4. Толмачева Н.И. Прогноз зон активной конвекции по данным МРЛ и МСЗ // Тезисы докл. на Всеросс. конф. «Сергей Петрович Хромов и синоптическая метеорология». М., 2004. С. 63.

N.I. Tolmacheva, A.D. Kryuchkov

THE THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF FRONTAL CLOUDINESS

Studied a number of characteristics of temperature-wind regime of clouds with precipitation, considered the vertical distribution of temperature in the frontal clouds, analyzed the frequency of vertical wind shear in the Ns and its dependence on the thickness of the frontal nimbostratus.

Key words: turbulence; stratification; cloudiness; vertical wind shear.

Natalya I. Tolmacheva, Candidate of Geographical Science, Associate Professor of Department of Meteorology and the Protection of Atmosphere, Perm State National Research University; 15 Bukireva, Perm, Russia 614990; nitolmacheva@yandex.ru

Andrey D. Kruchkov, Ingeneer of Department of Meteorology and the Protection of Atmosphere, Perm State National Research University; 15 Bukireva, Perm, Russia 614990; meteo@psu.ru