

Термодинамические характеристики фронтальных облаков с осадками

Н.И. Калинин, Н.И. Толмачева

Стратификация атмосферы и вертикальный сдвиг ветра играют важную роль в процессах динамики облаков, их эволюции, образовании осадков и их прогнозировании. Малоинформативными для понимания физики процессов осадкообразования в слоистых облаках являются средние характеристики для всей толщины облаков, ветровой режим; 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.

Целью настоящей работы является изучение на статистическом материале ряда характеристик температурно-ветрового режима фронтальных слоисто-дождевых облаков с осадками. Произведена 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 1999-2001 гг. Использовались данные автоматизированного метеорологического радиолокационного комплекса (АМРК) МРЛ-5, ст. Пермь. Число случаев вертикального зондирования, использовавшихся при исследовании изменения температуры с высотой составило 342, для изучения вертикального сдвига ветра — 203 наблюдений.

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. Из рассмотрения исключали данные радиозондирования, в которых наблюдались заниженные значения относительной влажности, тонкие облака 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;

$\gamma = -\Delta T / \Delta Z$ °C/100 м – вертикальный градиент температуры;

$\gamma_s, \Delta H_s$ – соответственно градиент и толщина задерживающих слоев (слои с инверсией или изотермией);

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

$\Delta \gamma = \gamma - \gamma_b$ – величина, которая определяет термическую устойчивость в облаках и вне облаков ($\Delta \gamma = \gamma - \gamma_a$), где γ_b и γ_a – влажноадиабатический и сухоадиабатический градиенты температуры;

$\beta = | \Delta V | / \Delta H$ – вертикальный сдвиг ветра (вертикальный градиент ветра, где $|\Delta V|$ – модуль векторной разности скоростей ветра на границах слоя по вертикали, ΔH – толщина слоя;

$R = g (\gamma_b - \gamma) / T \beta^2$ – число Ричардсона.

© Н.А. Калинин, Н.И. Толмачева, 2006

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

При рассмотрении вертикального распределения температуры (стратификации) во фронтальных облаках Ns , $Ns-As$, $Ns-As-Cs$, дающих осадки, выделено пять типов распределений: 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 небольшую его 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 это же время повторяемость облаков, где есть задерживающие слои, возрастает 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 стратификаций. 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 ($|\gamma_3| < 0,4^\circ\text{C}/100$ 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).

Таблица 2

Повторяемость градиентов температуры в задерживающих слоях разной толщины, %

Толщина задерживающего слоя	γ_3 °C/100м						
	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

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

Показательной характеристикой задерживающих слоев является суммарное изменение температуры ΔT_3 . Наибольшая повторяемость суммарного изменения температуры приходится на его значения от 0°C 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 $\Delta T_3 < -5,0^\circ\text{C}$ для всех случаев она составляет 4%.

При исследовании процессов развития осадков важной является информация о слоях облаков, в которых $\gamma > \gamma_b$ ($\Delta\gamma > 0$). Повторяемость значений $\Delta\gamma$ в различных частях облаков в зависимости от их мощности показывает, что наибольшее отклонение значения γ от γ_b характерно для тонких ($\Delta H < 2,0\text{ км}$), 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 $0,1^\circ\text{C}/100\text{ м}$. При этом в верхней трети облаков чаще всего отмечаются влажнобезразличное $|\Delta\gamma| < 0,1^\circ\text{C}/100\text{ м}$ и слабоустойчивое состояния. Повторяемость случаев с влажнобезразличным и влажнестойчивым состоянием ($\Delta\gamma > -0,1^\circ\text{C}/100\text{ м}$) составляет для разной толщины облаков 41%. Такое состояние облачной атмосферы является благоприятным для естественного зарождения частиц осадков и их дальнейшего роста. В этих случаях облачная система находится в стадии развития. Максимальная повторяемость случаев с $\Delta\gamma > -0,1^\circ\text{C}/100\text{ м}$ для облаков, толщина которых менее 2,0 км, наблюдается в нижней трети (48%); по мере роста толщины облаков эта повторяемость уменьшается и для $\Delta H > 4,0\text{ км}$ составляет лишь 26%. Обратная картина присуща для верхней трети облаков — здесь максимум повторяемости случаев с $\Delta\gamma > -0,1^\circ\text{C}/100\text{ м}$ приходится на облака с $\Delta H > 4,0\text{ км}$ (47%), а минимум на облака с $\Delta H < 2,0\text{ км}$ (36%).

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

В исследовании установлено, что в верхней трети фронтальных облаков возникают наиболее благоприятные условия для зарождения и роста частиц осадков. Для всех рассмотренных облаков 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 41%. Влажнобезразличная и влажнонеустойчивая стратификация имеет повторяемость 33%. При исследовании сдвига ветра выявлено, что чаще всего (35–70%) наблюдается значение $\beta < 0,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$.