

Н. И. ВУЛЬФСОН

КОНВЕКТИВНЫЕ ДВИЖЕНИЯ В КУЧЕВЫХ ОБЛАКАХ

(Представлено академиком Г. А. Гамбурцевым 26 III 1954)

Индикация атмосферных конвективных движений при помощи чувствительного термометра, установленного на самолете ⁽¹⁾, может быть осуществлена и в облаках. После обычно наблюдающегося скачка температуры, обусловленного смачиванием датчика при входе в облако, в дальнейшем конвективные потоки четко фиксируются по их температуре (см. рис. 1). При этом размеры сечений струй самолетом фиксируются достаточно точно; в определении интенсивности струй * могут содержаться небольшие ошибки за счет затраты различного количества тепла на испарение с поверхности датчика в случае, когда влажность отдельных струй существенно отличается от влажности окружающего облачного пространства.

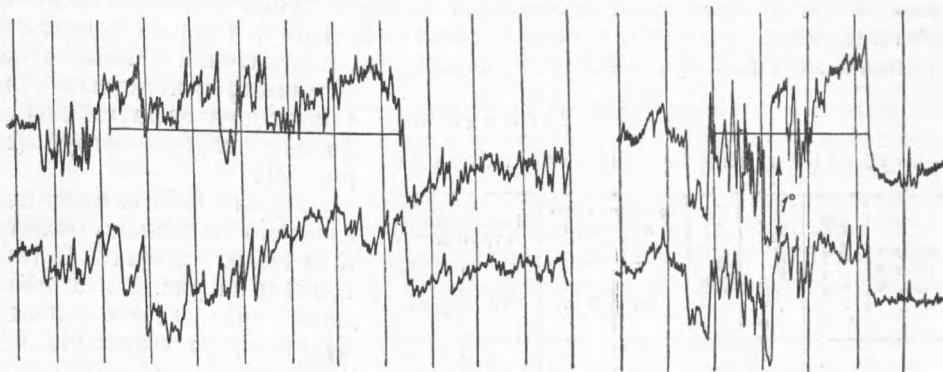


Рис. 1. Образцы осциллограмм (высота полета 1600 м). Верхние кривые — данные незащищенного датчика; температура понижается вверх; вертикальные линии — отметки времени через интервалы в 5 сек., горизонтальные — время нахождения в облаке

Датчики электронных термометров, применявшиеся в работе ⁽¹⁾ и в данной работе, изготовлялись из медной проволоки диаметром 50 м. Крупные капли, а особенно крупа, часто рвут проволоку. Поэтому измерения в облаках производились одновременно двумя спаренными термометрами, причем на защитный цилиндр одного из датчиков спереди одевалась обтекаемая насадка с небольшими отверстиями на цилиндрической части, а сзади — раструб. Датчик с каплеотбойной защитой достаточно интенсивно обдувается образующимися сзади него вихрями, так что инерционность термометра не меняется. Структура импульсов фиксируется обоими датчиками достаточно однородно (см. рис. 1), особенно вне облаков. Амплитуды импульсов вне облаков отмечаются защищен-

* Разности между максимальной температурой в струе и температурой окружающего пространства.

ным датчиком приблизительно в 1,4 раза меньше, чем незащищенным *. Такая поправка и вводилась в показания защищенного датчика в облаках.

Таблица 1

Результаты измерений в облаках *

Высота полета h в м	Число пересеч. облаков	Размеры сечения облака S_1 в м		Число пересеч. струй	Размеры сечений струй l в м		Интенсивность струй ** ΔI°		Число облаков теплее окружающей, простр.
		ср.	макс.		ср.	макс.	ср.	макс.	
1200	9	990	2350	65 (63)	95 (112)	515 (890)	0,32 (0,34)	1,20 (0,90)	0 (0)
1600	7	1743	3740	74 (68)	111 (111)	460 (690)	0,43 (0,49)	1,60 (1,65)	1 (4)
2000	5	2480	4760	77 (74)	121 (124)	370 (585)	0,45 (0,55)	1,40 (1,50)	1 (4)
2500	5	1544	3200	56 (56)	117 (124)	665 (695)	0,46 (0,57)	2,10 (2,15)	2 (3)
3000***	1(2)	5160 (3170)	5160	17 (29)	123 (124)	345 (345)	0,62 (0,77)	1,70 (2,55)	0 (1)

* В скобках приведены данные термометра с каплеотбойной защитой.

** При определении интенсивности струй учитывались изменения скорости и высоты полета во время пересечения струи.

*** На этой высоте наблюдались обледенение, крупа и значительная турбулентность с бросками самолета со скоростью $\pm 5-6$ м/сек по вариометру. В первом облаке измерения производились незащищенным датчиком на участке 2380 м, защищенным — на участке 2770 м.

В отдельных частях некоторых облаков формы импульсов, записанных термометрами, значительно отличаются друг от друга, так как смачиваемость датчика с каплеотбойной защитой существенно зависит от распределения размеров капель в облаке. Поэтому, а также вследствие немного меньшей чувствительности защищенного датчика данные обоих

Таблица 2

Результаты измерений вне облаков

Высота полета h в м	Длина маршрута S в км	Т-ра воздуха в $^\circ\text{C}$	Число пересеч. струй	Размеры сечений струй l в м		Интенсивность струй ΔI°	
				ср.	макс.	ср.	макс.
100	43,1	18,6	337	70	665	0,33	1,40
300	38,5	16,3	129	83	430	0,16	0,45
500	29,9	14,5	117	89	285	0,17	0,45
800	31,7	11,5	149	91	515	0,16	0,60
1200	27,5	9,1	98	94	435	0,24	1,05
1600	19,6	5,7	81	95	560	0,18	0,50
2000	17,4	1,7	48	108	480	0,16	0,50
2500	18,7	-1,5	65	98	595	0,18	0,75
3000	9,7	-3,2	32	36	80	0,18	0,35

термометров несколько отличаются друг от друга, особенно для слабых струй (см. рис. 2).

В июле 1953 г. было произведено несколько полетов в кучевых облаках. В табл. 1 и 2 и на рис. 2 и 3 приведены результаты полета 21 июля, произведенного по наиболее обширной программе при измерениях обоими термометрами.

Измерения производились в районе Вологды в зафронтальной, холодной воздушной массе с 12 ч. 30 м. до 14 ч. 30 м. московского времени. В этот период наблюдалось 1—2 балла перисто-кучевой и 5—6 баллов кучевой и мощнокучевой облачности, высотой 950—970 м. Из некоторых облаков выпадал слабый дождь. Верхняя граница большей части облаков не превышала 2000 м. Отдельные облака достигали приблизительно 3500—3600 м.

Приведенные данные отражают ряд характерных особенностей конвективных движений в кучевых облаках **:

* За счет того, что обдувается не вся поверхность проволоки датчика.

** Приведенные данные не включают около 10% более холодных, чем окружающее пространство, струй, наблюдающихся, главным образом, вне облаков с максимумом вблизи уровня конденсации. Отрицательная интенсивность этих струй обусловлена,

1. Размеры сечений струй в облаках больше, чем вне облаков (в среднем на 32%), и имеют широкий спектр до 700 (900) м. Распределение диаметров круглых в сечении струй можно получить ⁽¹⁾, решив интегральное уравнение

$$w_1(l) = \int_0^{\infty} w_2(x) \frac{l}{x \sqrt{x^2 - l^2}} dx,$$

или, считая, что конвективные движения представляют собой подъем отдельных масс воздуха, близких по форме к сфере, уравнение

$$w_1(l) = \int_0^{\infty} w_2(x) \frac{2l}{x^2} dx,$$

выведенное из аналогичных ⁽¹⁾ рассуждений. Здесь $w_1(l)$ — экспериментальное распределение размеров сечений, а $w_2(x)$ — искомая плотность вероятности распределения диаметров струй или пузырей.

2. Интенсивность струй в облаках значительно больше, чем вне облаков (в среднем на 89%). Только на высоте 100 м интенсивность струй сравнима с интенсивностью их в нижней части облаков. Средняя интенсивность струй в облаках 0°,43 (0°,52), максимальная — около 2° (2°,5).

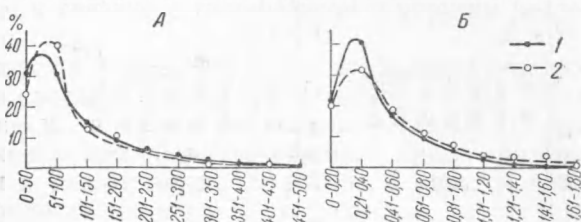


Рис. 2. Распределение струй в облаках: А — по размерам сечений. Б — по интенсивности; 1 — данные незащищенного датчика, 2 — данные датчика с каплеотбойной защитой

3. Относительное количество воздуха, поднимающегося в струях в облаках, значительно больше, чем вне облаков. В последнем случае отношение $\Sigma l/S$ (см. табл. 1 и 2) составляет 30—40% на всех высотах за исключением 100 м (55%) и 3000 м (12%). В облаках от оснований к вершинам отношение $\Sigma l/\Sigma S_1$ растет приблизительно от 70 до 85—90%. Таким образом, в кучевых облаках, особенно в верхней их части, преобладают восходящие движения. Компенсационные нисходящие движения осуществляются в основном, по видимому, вне облаков.

4. Размеры струй в облаках и особенно их интенсивность увеличиваются по мере удаления от основания облака. Между облаками размеры струй растут более медленно, затем уменьшаются; количество относительно интенсивных струй уменьшается с высотой, хотя среднее значение интенсивности приблизительно сохраняется. Сказанное объясняется освобождением в облаках скрытой теплоты конденсации, обуславливающей непрерывный рост интенсивности и скорости подъема струй, ведущий в свою очередь к увеличению массы увлекаемого струей воздуха и вероятности влияния струй. Между облаками отдельные струи и при выделении тепла конденсации относительно быстро истощаются.

5. Конвективные струи в облаке представляют собой струи, поднявшиеся из нижележащих слоев и затем усилившиеся в процессе поднятия в облаке. Об этом свидетельствуют приблизительно одинаковые средние значения и близкий характер распределения сечений струй в

по видимому, подъемом их по инерции выше уровней, на которых температура струй выравнивается с температурой окружающего пространства, и частично испарением отдельных ключев облаков. В таком случае направление движения холодных струй неопределенно, а скорости малы. Все отмеченные ниже особенности конвективных движений следуют из обработки результатов с учетом холодных струй.

облаках и вне облаков на $h = 1200$ м (рис. 3), а также приблизительно равная частота струй на $h = 800$ и (без различия на облачные и внеоблачные струи) на $h = 1200$ м (47 и 45 струй на 10 км). Таким образом, кучевое облако развивается за счет попадающих в него конвективных

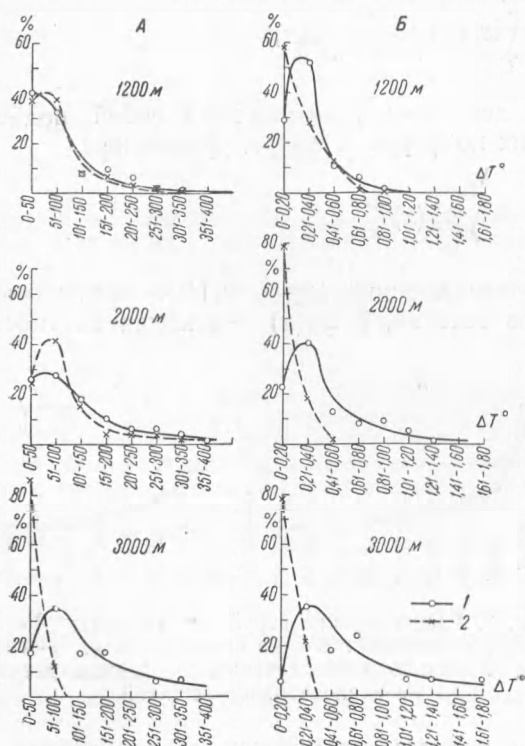


Рис. 3. Распределение струй по высотам: А — по размерам сечений, Б — по интенсивности; 1 — в облаках, 2 — между облаками

что облака преимущественно в своей центральной и верхней части часто фиксируются более теплыми, чем окружающее пространство, особенно защищенными датчиком. Наличие более совершенной защиты должно увеличить процент фиксируемых «теплых» облаков. Однако кучевое облако может быть более легким, чем окружающий воздух, даже будучи заметно холоднее его. Условие равновесия выражается формулой $T^* = T(p - 0,38 e^*) / (p - 0,38 e)$, где p — давление, а T^* , e^* , T и e — соответственно, температура и упругость водяного пара в облаке и в окружающем пространстве, причем очевидно: $(p - 0,38 e^*) / (p - 0,38 e) < 1$.

Пользуюсь случаем выразить глубокую благодарность чл.-корр. АН СССР Е. К. Федорову за помощь в постановке работы и за проявленное внимание и интерес в процессе ее выполнения, а также Е. Ф. Машиной и А. П. Сергеевой за помощь в обработке осциллограмм.

Геофизический институт
Академии наук СССР

Поступило
26 III 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Н. И. Вульфсон, ДАН, 91, № 2 (1953).

струй, зарождающихся в нижележащих слоях атмосферы.

6. Развивающееся кучевое облако активно втягивает в себя конвективные струи из подоблачного пространства, значительно большего по площади, чем площадь самого облака.

При неуправляемом полете под развивающимися облаками самолет всегда тянет вверх, иногда даже при полете на 500—700 м ниже основания мощнокучевых облаков. Наличие указанной циркуляции подтверждается и значительно большей частотой струй в основании облаков по сравнению с междуоблачным пространством (73 и 36 струй на 10 км).

Все отмеченные выше характерные особенности конвективных движений в облаках следуют из записи температуры любого из термометров.

Следует отметить также,