

стиляющей поверхности, восходящие движения. Наблюдения показывают, что в области вторичных облачных вихрей конвекция распространяется до высоты 4—5 км, а иногда и до тропопаузы, в то время как в холодном воздухе конвекция развивается лишь в нижних 1,5—2 км.

В таком очаге интенсивной конвекции наблюдаются мощные кучевые и кучево-дождевые облака, формирующиеся в открытых ячейках диаметром 50—100 км. Отмечены случаи образования слоистообразной облачности раньше, чем возник фронт и даже циклон.

Эти примеры служат подтверждением отмеченной в п. 3 роли тепла конденсации, выделяющегося при образовании облачности, в возникновении фронта.

На фотографиях, полученных со спутников, фронты представлены полосами облачности, отходящими от центров облачных вихрей. Ширина таких полос может достигать 500—700 км, а их длина — 7000—8000 км.

Наблюдения со спутников позволили установить связь облачности со струйными течениями. Наиболее часто слоистообразная облачность (перисто-слоистая, высоко-слоистая) в виде длинных полос располагается справа от оси струйного течения (в теплом воздухе). Ширина такой полосы или лент перистой облачности наиболее часто составляет 400—600 км, а их длина — 500—1700 км. Скорость ветра в центре струи, когда наблюдается облачность, более 40 м/с. В тех случаях, когда скорость ветра на оси струи больше 100 м/с, образуется волнистообразная облачность в виде валов, расположенных под прямым углом к основной облачной полосе. Верхняя граница облаков струйных течений чаще всего совпадает с уровнем, на котором скорость ветра достигает максимума (в вертикальном направлении).

7 Глобальное поле облачности

К настоящему времени с помощью спутников уже получено такое количество данных об облаках, которое значительно (особенно на океанах и в малонаселенных районах суши, а также по южному полушарию в целом) превосходит число наземных наблюдений.

Поскольку расстояние до облаков при наблюдении с земной поверхности невелико, то в поле зрения наблюдателя оказываются не только нижние (по площади которых и должно определяться количество облаков n), но и боковые поверхности облаков, особенно тех, которые находятся в нижней половине небесной сферы. В связи с этим значения n , полученные по наземным наблюдениям, как правило, завышены. Кроме того, завышение средних

значений n (за сутки, месяц, сезон, год) происходит в связи с тем, что в большинстве стран мира наблюдения за облаками ночью (когда их количество может существенно отличаться от дневного) не проводятся. Однако очень тонкие кристаллические облака, а также облака над снежной (ледяной) поверхностью (особенно при очень низких температурах) со спутников не всегда обнаруживаются, вследствие чего полученные значения n , по спутниковым данным, в высоких широтах несколько занижены.

Основой для приводимых в этом параграфе сведений о количестве облаков послужили карты фотомонтажей облачности, огромная работа по составлению и дешифрированию которых а также по использованию спутниковой информации для целей диагноза и прогноза погоды проведена в Гидрометцентре СССР и ГосНИЦИПР.

Количество облаков определено по данным карт фотомонтажей для сферических прямоугольников размером 5° по широте и 10° по долготе. Ежедневные данные за период с 1966 по 1980 г. использованы для расчета средних (по времени и площади) значений n , средних квадратических отклонений (σ), асимметрии (A) и эксцесса (E), корреляционных и спектральных функций, плотности и функций распределения n , а также других характеристик глобального поля облачности.

Остановимся прежде всего на зональных (осредненных по кругам широт) характеристиках облачности. Средние сезонные значения n на всех широтах северного и южного полушарий (через 5°) приведены в табл. 17.32.

В обоих полушариях во все сезоны года как на океанах, так и на материках при перемещении вдоль меридана наблюдается два максимума и два минимума n : максимумы — в умеренных и экваториальных широтах, минимумы — вблизи полюсов и в субтропиках.

Зоны экстремумов n смещаются (хотя и со значительным сдвигом во времени) в каждом полушарии в том же направлении, в каком удаляется Солнце от экватора: весной и летом — по направлению к полюсам, осенью и зимой — к экватору. Так, согласно табл. 17.33, максимум n в умеренных широтах северного полушария располагается вблизи широты 45° во второй половине зимы и вблизи $62,5^\circ$ в конце лета — начале осени, при этом значения n_{\max} летом на 5—7 % больше, чем зимой. Столь же значительно изменение положения (широты) субтропического минимума (в северном полушарии — от 15° зимой до 30° летом) и экваториального максимума, совпадающего с внутритропической зоной конвергенции (от 15° ю. ш. в феврале до 10° с. ш. в сентябре). В южном (преимущественно океаническом) полушарии четко выражен лишь годовой ход расположения субтропического минимума (от 10° ю. ш. в июне до 30° ю. ш. в декабре) и очень мало изменяется положение n_{\max} в умеренных широтах.

Таблица 17.32. Средние за сезон зональные значения количества облаков (%) 1971—1980 гг.

φ°	Океан			Материк			Полушарья					
	II—II	V—III	III—VI—VIII	II—II	V—III	III—VI—VIII	IX—X	II—II	V—III	VI—VIII	IX—X	
85 с.	26	26	44	43	—	—	—	—	—	—	—	—
80	32	33	57	49	22	—	—	—	—	—	—	—
75	37	38	59	53	28	—	—	—	—	—	—	—
70	44	45	67	59	32	—	—	—	—	—	—	—
65	56	56	65	67	41	—	—	—	—	—	—	—
60	60	60	66	69	46	—	—	—	—	—	—	—
55	70	70	70	73	48	—	—	—	—	—	—	—
50	76	75	72	75	48	—	—	—	—	—	—	—
45	74	72	66	70	48	—	—	—	—	—	—	—
40	70	67	60	65	44	—	—	—	—	—	—	—
35	68	64	56	61	43	—	—	—	—	—	—	—
30	68	64	59	60	43	—	—	—	—	—	—	—
25	59	56	55	53	34	—	—	—	—	—	—	—
20	52	49	57	52	22	—	—	—	—	—	—	—
15	49	47	57	54	24	—	—	—	—	—	—	—
10	51	51	63	62	31	—	—	—	—	—	—	—
5 с.	60	58	64	63	49	—	—	—	—	—	—	—
0	57	53	56	55	64	—	—	—	—	—	—	—
5 ю.	59	54	56	58	68	—	—	—	—	—	—	—
10	61	54	56	58	69	—	—	—	—	—	—	—
15	61	56	60	61	65	—	—	—	—	—	—	—
20	62	59	63	63	55	—	—	—	—	—	—	—
25	62	62	66	67	48	—	—	—	—	—	—	—
30	63	67	70	71	41	—	—	—	—	—	—	—
35	67	71	71	72	46	—	—	—	—	—	—	—
40	71	75	74	75	48	—	—	—	—	—	—	—
45	75	77	76	78	51	—	—	—	—	—	—	—
50	77	79	78	80	66	—	—	—	—	—	—	—
55	78	80	78	81	69	—	—	—	—	—	—	—
60	79	81	79	82	76	—	—	—	—	—	—	—
65	79	81	79	81	75	—	—	—	—	—	—	—
70	74	77	74	76	—	—	—	—	—	—	—	—
75	69	73	68	71	—	—	—	—	—	—	—	—
80	56	57	49	52	—	—	—	—	—	—	—	—
85 ю.	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Зональное количество облаков на одной и той же широте во все сезоны года на океанах больше, чем на материках (как правило, на 10—15%), особенно велика разность значений n в субтропиках, где она превосходит 20%, а в некоторых случаях даже 30%.

Познавательный и прикладной интерес представляют сведения о количестве облаков, осредненном по большим площадям (океанам, материкам, полушариям, планете в целом). При подсчете доли площади, покрытой облаками, следует учитывать изменение

Таблица 17.33. Годовой ход экстремальных значений n (%) и их положение (широта)

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Максимумы умеренных широт													
φ° с. ш.	45	45	47,5	50	55	55	55	62,5	62,5	55	55	50	52,5
n_{max}	59	60	60	65	65	64	65	65	67	67	65	62	62
φ° ю. ш.	60	57,5	57,5	60	60	60	60	60	60	60	60	57,5	60
n_{max}	78	78	81	81	80	79	78	79	82	81	82	80	80
Субтропические минимумы													
φ° с. ш.	15	15	15	20	20	27,5	30	30	30	25	20	17,5	22,5
n_{min}	42	41	39	42	45	48	45	44	43	42	43	46	46
φ° ю. ш.	27,5	25	25	17,5	10	10	12,5	12,5	15	15	20	30	20
n_{min}	58	56	55	54	52	51	52	54	56	58	58	60	57
Экваториальный максимум (ВЗК)													
φ°	10 ю.	15 ю.	7,5 ю.	5 с.	5 с.	5 с.	7,5 с.	7,5 с.	10 с.	5 с.	5 с.	2,5 с.	5 с.
n_{max}	64	60	58	60	64	66	64	62	63	65	61	62	61

площади сферических прямоугольников (со сторонами $\Delta\lambda = 10^\circ$ и $\Delta\varphi = 5^\circ$) в зависимости от широты φ . Поскольку площадь такого прямоугольника

$$a \Delta\varphi \cdot a \Delta\lambda \cdot \cos \varphi_i = a^2 \Delta\varphi \cdot \Delta\lambda \cdot \cos \varphi_i$$

(здесь a — радиус Земли, φ_i — широта центра i -го прямоугольника), то доля площади, покрытой облаками,

$$n = \frac{\sum_{(i)} n_i a^2 \Delta\varphi \Delta\lambda \cos \varphi_i}{\sum_{(i)} a^2 \Delta\varphi \Delta\lambda \cos \varphi_i} = \frac{\sum_{(i)} n_i \cos \varphi_i}{\sum_{(i)} \cos \varphi_i},$$

где суммирование (по i) распространяется на все прямоугольники в пределах рассматриваемой площади (океана, суши, полушария). Определенная по этому соотношению величина n называется средним по площади количеством облаков.

Месячные значения n , осредненные по всем океанам (воде) и всем материкам (суше), по полушариям и Земле в целом, приведены в табл. 17.34. Годовые колебания n незначительны на океанах (амплитуда n не превышает 5 %) и более четко выражены на материках (здесь значения n летом на 8—12 % больше, чем зимой). Месячные значения n над водной поверхностью полушария существенно больше, чем над сушей. В северном полушарии разность значений n на океанах и материках составляет около 10 % летом и увеличивается до 18—20 % зимой. В южном полушарии эта разность особенно значительна: 20—25 % в декабре—феврале (лето) и 30—32 % в июне—августе (зима). В среднем за год коли-

Таблица 17.34. Осредненные месячные значения количества облаков (%). 1971—1980 гг.

Месяц	Северное полушарие			Южное полушарие			Земля		
	океан	материк	в целом	океан	материк	в целом	океан	материк	в целом
I	58	40	51	67	47	62	63	42	57
II	56	40	50	65	49	61	61	43	56
III	54	42	49	67	45	62	61	43	56
IV	56	47	52	67	44	62	62	46	57
V	59	49	54	67	41	61	64	46	58
VI	61	49	56	67	37	60	64	45	58
VII	60	49	55	67	35	60	65	44	58
VIII	59	50	55	69	37	62	65	46	59
IX	59	49	55	70	40	63	65	46	59
X	60	45	54	69	43	63	65	44	58
XI	59	42	52	69	43	63	65	42	58
XII	60	41	52	69	46	64	65	43	58
Год	58	45	53	68	42	62	64	44	58

чество облаков составляет над Мировым океаном 64 %, над сушей планеты 44 %. Океаны южного полушария покрыты облаками во все месяцы года в большей степени, чем океаны северного (разность значений n колеблется между 13 % в марте и 6 % в июне; в среднем за год она равна 10 %).

Количество облаков на суше с ноября по март в южном полушарии также больше, чем в северном. Однако с апреля по октябрь и в среднем за год соотношение обратное: n в южном полушарии меньше, чем в северном (в среднем за год на 3 %). Поскольку разность значений n на океанах более значительна, чем на суше, то южное полушарие в целом во все месяцы года больше покрыто облаками, чем северное (разность изменяется от 13 % в марте до 4 % в июне; в среднем за год она составляет 9 %).

В течение 10-летнего периода (1971—1980 гг.) облака в среднем покрывали 53, 62 и 58 % площади соответственно северного полушария, южного и земного шара в целом.

Функции распределения количества облаков обладают рядом особенностей. Для большинства метеовеличин распределение близко к нормальному. В то же время плотность распределения n по данным наблюдений с земной поверхности чаще всего имеет вид U-образной кривой, а по данным наблюдений со спутников — куполообразный вид. Это принципиальное различие объясняется прежде всего тем, что распределение n более, чем любой другой метеовеличины, зависит от размера площади, по которой определено количество облаков. О такой зависимости свидетельствуют следующие рассуждения. Если n определяется в точке (при наблюдении с земной поверхности — в зените, со спутника — в надире), то могут наблюдаться только два состояния: полная облачность ($n=100$ %) или ясно ($n=0$). С другой стороны, если площадь, охваченная наблюдением, достаточно велика (например, весь материк или океан), то n во всех случаях будет близко к его среднему значению, а вероятность малых (0—2 балла) и больших (8—10 баллов) значений n очень мала.

С целью реализации этой идеи и получения фактических данных о плотности распределения n выполнен анализ высококачественных фототелевизионных изображений облачного покрова. Количество облаков определено для сферических квадратов (с общим центром), размер которых изменялся от $0,5 \times 0,5^\circ$ до $10 \times 10^\circ$.

В табл. 17.35 приведены (для сокращения объема только по трем квадратам) сведения о плотности распределения n во все сезоны года по наблюдениям в 1979—1981 гг. на Европейской части СССР (число наблюдений в каждом квадрате зимой (З) — 2105, весной (В) — 2430, летом (Л) — 1512 и осенью (О) — 2598).

Отметим прежде всего общую для всех сезонов закономерность: для квадратов $0,5 \times 0,5^\circ$, $1 \times 1^\circ$ и $2 \times 2^\circ$ распределение носит U-образный характер — максимумы плотности распределения (f) приходится на малые (0—2 балла) и большие (8—10 баллов) зна-

Таблица 17.35. Эмпирическая плотность распределения (%) количества облаков в различные сезоны года

Квадрат	Сезон	Количество облаков, баллы											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	З	33	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	67
	В	51	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	49
	Л	74	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	26
	О	51	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	49
0,5×0,5°	З	17	6	5	2	3	2	4	4	4	16	38	
	В	34	7	7	2	3	2	2	3	4	12	24	
	Л	50	12	10	2	1	0	1	2	2	9	11	
	О	35	7	7	2	2	1	3	3	2	14	24	
1×1°	З	11	7	5	5	4	2	4	6	8	18	29	
	В	26	10	8	5	5	2	3	5	5	13	18	
	Л	39	18	9	6	2	1	2	2	3	9	9	
	О	26	10	7	5	4	2	4	4	5	17	16	
10×10°	З	1	2	3	9	10	8	12	19	18	17	2	
	В	5	5	7	14	14	9	14	14	10	8	0	
	Л	2	16	19	23	12	8	6	6	7	2	0	
	О	2	4	8	16	15	10	12	15	11	5	0	

чения n , а минимум — на 4—6 баллов; для квадратов $8 \times 8^\circ$ и $10 \times 10^\circ$ распределение n приближается к куполообразному — максимум f смещается на 3—7 баллов, а при облачности 0 и 10 баллов плотность распределения минимальна.

Средние значения \bar{n} зимой на Европейской части СССР примерно в 2 раза больше, чем летом (осредненные по всем квадратам они равны 6,4 балла зимой и 3,1 балла летом). Зависимость \bar{n} от размера квадрата слабая и неоднозначная (табл. 17.36). Сред-

Таблица 17.36. Статистические характеристики количества облаков (баллы)

Характеристика	Сезон	Квадрат							
		0	0,5×0,5°	1×1°	2×2°	4×4°	6×6°	8×8°	10×10°
\bar{n}	З	6,7	6,4	6,5	6,5	6,4	6,4	6,3	6,3
	В	4,9	4,6	4,6	4,7	4,8	4,8	4,8	4,9
	Л	2,6	2,7	2,9	3,0	3,2	3,4	3,5	3,6
	О	4,9	4,6	4,7	4,8	4,9	4,9	5,0	5,0
σ^n	З	4,7	4,0	3,7	3,4	3,0	2,6	2,4	2,2
	В	5,0	4,3	4,0	3,7	3,2	2,9	2,6	2,5
	Л	4,4	3,8	3,6	3,3	2,9	2,6	2,4	2,2
	О	5,0	4,4	4,1	3,6	3,2	2,8	2,6	2,3

ние квадратические отклонения (σ_n) при оценке n по малым квадратам сравнимы с \bar{n} . С увеличением квадрата σ_n уменьшается.

При решении задач динамики облаков, общей циркуляции атмосферы и климата Земли нередко возникает необходимость параметризации (сглаживания) функций распределения n с помощью некоторых аналитических выражений. Испытано несколько видов таких выражений: гамма-функция, степенная, экспоненциальная, Грамма—Шарлье. В лучшем согласии с эмпирическими данными оказалась параметризация с помощью обобщенного логарифмически нормального распределения

$$F = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{y_n} \exp\left(-\frac{\tau^2}{2}\right) d\tau. \quad (7.1)$$

Здесь

$$y_n = \frac{\tau - \bar{\tau}}{\sigma_\tau}, \quad \tau = \ln \frac{n+1}{10-n},$$

где $\bar{\tau}$ и σ_τ — среднее значение и квадратическое отклонение переменной τ , n — в баллах.

Средние значения модуля разности $\Delta = F'' - F'$ между аппроксимированными (F'') с помощью формулы (7.1) и эмпирическими (F') значениями функции распределения во все сезоны года оказались близкими к 0,03. В 80—90 % случаев модуль разности Δ не превышает 0,05, при этом равновероятны как положительные, так и отрицательные значения Δ .

Корреляционные функции с целью исключения пространственной неоднородности и нестационарности построены для нормированных на стандарт (σ_n) значений n . Результаты расчета осредненных по кругам широт и меридианам коэффициентов корреляции (r) приведены в табл. 17.37. Видно, что корреляционная связь между значениями n вдоль параллелей значительно теснее, чем вдоль меридианов: коэффициенты $\bar{r}(x)$ на одинаковых расстояниях существенно больше $\bar{r}(y)$. В обоих полушариях корреляционные функции убывают с увеличением расстояния. Однако в южном полушарии с ростом x и y коэффициенты $\bar{r}(x)$ убывают медленнее, а $\bar{r}(y)$ — быстрее, чем в северном. Объясняются эти закономерности преобладанием зональных переносов полей облачности над меридиональными. Пространственные масштабы корреляции

$$x^* = \int_0^{\infty} \bar{r}(x) dx \quad \text{и} \quad y^* = \int_0^{\infty} \bar{r}(y) dy$$

(при зависимости \bar{r} от x и y , близкой к экспоненциальной, $\bar{r}(x^*) = 0,37$ и $\bar{r}(y^*) = 0,37$) равны: $x_N^* = 3500$ км и $y_N^* = 1400$ км в север-

Таблица 17.37. Осредненные коэффициенты корреляции (%) нормированных средних месячных значений n вдоль параллелей — $\bar{r}(x)$ и меридианов — $\bar{r}(y)$. 1971—1975 гг.

\bar{r}	Расстояние, км									
	555	1110	1665	2220	2775	3330	3885	4440	4995	5550
Северное полушарие										
$\bar{r}(x)$	75	72	60	56	44	40	32	32	19	17
$\bar{r}(y)$	81	53	25	2	-16	-24	-23	-17	-6	-
Южное полушарие										
$\bar{r}(x)$	78	67	59	52	45	50	34	49	36	38
$\bar{r}(y)$	71	36	4	-19	-31	-38	-39	-37	-25	-

ном полушарии, $x_S^* = 5000$ км и $y_S^* = 1100$ км — в южном. Поскольку в южном полушарии зональность полей выражена более сильно, чем в северном, то масштабы корреляции, характеризующие размеры облачных полей, удовлетворяют неравенствам: $x_N^* < x_S^*$ и $y_N^* > y_S^*$.

Анализ пространственно-временных корреляционных функций показал, что по мере уменьшения временного периода осреднения ослабевает корреляционная связь между значениями n на заданном расстоянии и становится менее выраженной анизотропность поля облачности, т. е. уменьшается различие между $r(x)$ и $r(y)$.

8 Фазовое состояние облаков

Облака, как и туманы, могут состоять из капель воды, кристаллов льда и из смеси капель и кристаллов. Первые из них называют капельными (или водяными), вторые — кристаллическими (или ледяными), третьи — смешанными. При положительных температурах воздуха возможны только капельные облака. При отрицательных температурах наблюдаются все три вида облаков, при этом капли находятся в переохлажденном (метастабильном) состоянии. Процесс замерзания их носит вероятностный характер.

Как часто наблюдаются облака в различном фазовом состоянии, показывает табл. 17.38. Согласно данным этой таблицы, включающей в общей сложности результаты 61 580 наблюдений, переохлаждение — явление широко распространенное, встречающееся вплоть до очень низких температур (-42°C). С пониже-