

Д.А. Безуглов, Е.Н. Мищенко, В.Л. Тюриков

**РЕГИОНАЛЬНАЯ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ОБЛАЧНОСТИ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ МАРКОВА**

На базе использования теории цепей Маркова предложена вероятностно-статистическая модель облачности, позволяющая учитывать особенности конкретного региона. Приведены графы вероятностного состояния форм облачности в зависимости от времени года применительно к Северо-Кавказскому региону, построенные на основе предложенной модели с использованием таблиц ТМ-1. Даны рекомендации по перекодировке таблиц ТМ-1.

При решении различных задач прикладной метеорологии, а также при исследовании атмосферы как информационно-динамического канала распространения оптических сигналов и переноса изображения, оптического мониторинга природной среды и методов оптической диагностики загрязнений атмосферы необходимы сведения о пространственно-временном распределении облачных частиц, определяющем оптический режим атмосферы исследуемого региона. Такие сведения могут быть представлены в виде пространственно-временной модели облачности этого региона. Существует несколько разновидностей моделей облачности, которые условно можно разделить на следующие классы: модели, основанные на уравнениях гидротермодинамики, статистические и вероятностные. Наиболее полно модели первого типа представлены в [1]. Такие модели, отражая суть происходящих в атмосфере физических процессов, недостаточно связаны с локальными факторами региона и, кроме того, их использование приводит к существенным трудностям вычислительного плана. Более удобными при этом являются статистические и вероятностные модели. Вопросы построения таких моделей подробно освещены в [2].

Однако несмотря на то, что теоретически вопросы построения таких моделей проработаны достаточно хорошо, практика все же испытывает необходимость в таких моделях, учитывающих особенности конкретного региона.

Таблица 1

Индикатриса рассеяния излучения с $\lambda = 0,63$ мкм, соответствующая широкому распределению облачных частиц по размерам

γ°	$f(\gamma)$	γ°	$f(\gamma)$
0	$0,1367 \cdot 10^5$	80	$0,4757 \cdot 10^{-1}$
1	$0,1358 \cdot 10^4$	90	$0,2557 \cdot 10^{-1}$
2	$0,1759 \cdot 10^3$	100	$0,1964 \cdot 10^{-1}$
4	$0,2588 \cdot 10^2$	110	$0,2145 \cdot 10^{-1}$
6	$0,1276 \cdot 10^2$	120	$0,3573 \cdot 10^{-1}$
8	$0,9282 \cdot 10^1$	130	$0,4884 \cdot 10^{-1}$
10	$0,7688 \cdot 10^1$	140	$0,3318 \cdot 10^{-1}$
15	$0,5644 \cdot 10^1$	145	$0,1875 \cdot 10^0$
20	$0,4242 \cdot 10^1$	150	$0,1497 \cdot 10^0$
25	$0,3106 \cdot 10^1$	155	$0,1318 \cdot 10^0$
30	$0,2279 \cdot 10^1$	160	$0,1181 \cdot 10^0$
40	$0,1169 \cdot 10^1$	165	$0,1093 \cdot 10^0$
50	$0,5665 \cdot 10^0$	170	$0,1141 \cdot 10^0$
60	$0,2555 \cdot 10^0$	175	$0,1537 \cdot 10^0$
70	$0,1089 \cdot 10^0$	180	$0,6756 \cdot 10^0$

Таблица 2

Коэффициенты рассеяния для облаков, сгруппированных по ярусам с учетом повторяемости отдельных форм

Формы облачности	$\sigma, \text{км}^{-1}$	
	Лето	Зима
Ci, Cc, Cs	2,5	2,5
Ac, As	42	32
St, Sc	54	36
Ns	38	36
Cu, Cb	100	100

Данная статья посвящена разработке региональной вероятностно-статистической модели облачности на основе использования теории цепей Маркова. На рис. 1 (а, б) и в табл. 1, 2 приведены характеристики облачности, полученные путем обобщения данных, имеющих в [1, 2–7] для видимого диапазона волн. В качестве индикатрисы рассеяния выбрана индикатриса, соответствующая широкому распределению с аппроксимацией его нормально-логарифмическим законом. При этом исходили из лучшей теоретической обоснованности такого распределения.

Приведенные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что существенное влияние на распространение излучения видимого диапазона оказывает облачность среднего и нижнего ярусов. Это позволяет мириться с гораздо худшей обеспеченностью данными, касающимися облачности верхнего яруса. Сезонные изменения толщин облачности не играют определяющей роли. Гораздо существеннее факт наличия или отсутствия форм облачности, принадлежащих к одному из ярусов, т.е. временная изменчивость этих форм. К тому же следует добавить, что временная изменчивость достаточно жестко связана с климатическими особенностями каждого региона и временем года. Данные о временной изменчивости форм облачности для исследуемого региона могут быть взяты из таблиц ТМ-1, содержащих статистику многолетних наблюдений, которые проводились сетью метеостанций Госкомгидромета над облачными покровами. Вид графы «Облачность», содержащей необходимые сведения, приведен в табл. 3. В ней дано количество баллов общей и нижней облачности, а также распределение облаков по формам в два этапа. На первом этапе по графам распределяются формы, относящиеся к одному из ярусов. Отдельной графой представлена конвективная облачность (Cu, Cb) и слоистые дождевые облака (Ns, FrNb). Необходимость выделения Ns, FrNb из нижнего яруса в отдельную графу обусловлена существенными отличиями данной формы облачности от слоистых структур St, Sc. С точки зрения оптических свойств отличие состоит в иной микроструктуре и толщине облачного слоя. Дальнейшая конкретизация форм облачности производится при заполнении таблицы путем подстановки в каждую из граф определенной десятичной цифры, соответствующей форме облачности.

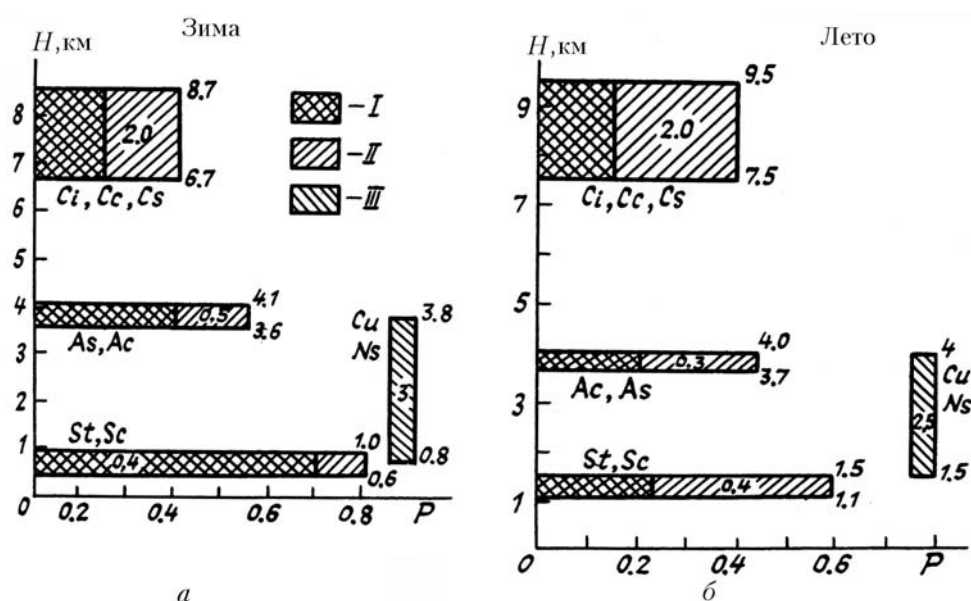


Рис. 1. Вертикальное распределение облаков, характерное для центральных районов СССР, a — зима, b — лето: I — облака нижнего, среднего и верхнего ярусов в количестве 8–10 баллов, высота границ (H) и их вероятность; II — то же в количестве 3–7 баллов; III — облака вертикального развития, без учета их вероятности

После соответствующей перекодировки Таблиц ТМ-1 по методике, которая будет излагаться ниже, была проведена статистическая обработка данных наблюдений по региону г. Ростова-на-Дону над облачными покровами для всех времен года: весна, лето, осень, зима за период 1978–1982 гг. Формально можно предположить, что атмосфера с учетом разбиения облачности по ярусам и выделения группы конвекторных облаков может находиться в 32-х состояниях, учитывая состояние «безоблачно». Однако из чисто физических соображений ясно, что таких состояний должно быть меньше ввиду невозможности сочетаний некоторых состояний. Например, состояние «безоблачно» с наличием облачности какого-либо яруса. Поэтому реально их оказалось меньше и после статистической обработки наибольшее количество состояний имела «весна» — 22. Часть из этих состояний является настолько редкими событиями, что без особого ущерба для модели и ввиду их малой статистической обеспеченности они были опущены. В процессе обработки проводилась проверка гипотезы о возможности представления процессов перехода из состояния в состояние в виде простейшего потока событий. Для этого проводилась проверка на стационарность потока событий и строились эмпирические плотности распределений временных интервалов между переходами из состояния в состояние. Для проверки гипотезы стационарности использовался метод, изложенный в [2], по которому вычислялась статистика $\hat{\chi}^2$ имеющая вид

$$\hat{\chi}^2 = \sum_{ij} \frac{f_{ij} g_{ij}}{f_{ij} + g_{ij}} \left(\frac{f_{ij}}{f_i} - \frac{g_{ij}}{g_i} \right)^2, \quad (1)$$

где $\|f_{ij}\|$ и $\|g_{ij}\|$ — матрицы переходных частот из состояния в состояние для двух половин сезонных выборок. Эта статистика имеет распределение χ^2 с $s(s-1)$ степенями свободы, где s — количество состояний. Проверка показала, что гипотеза стационарности потоков событий при делении полной выборки по четырем сезонам может быть принята для каждого из 4-х сезонов ($P_i > 0,24$, $i = \overline{1, 4}$).

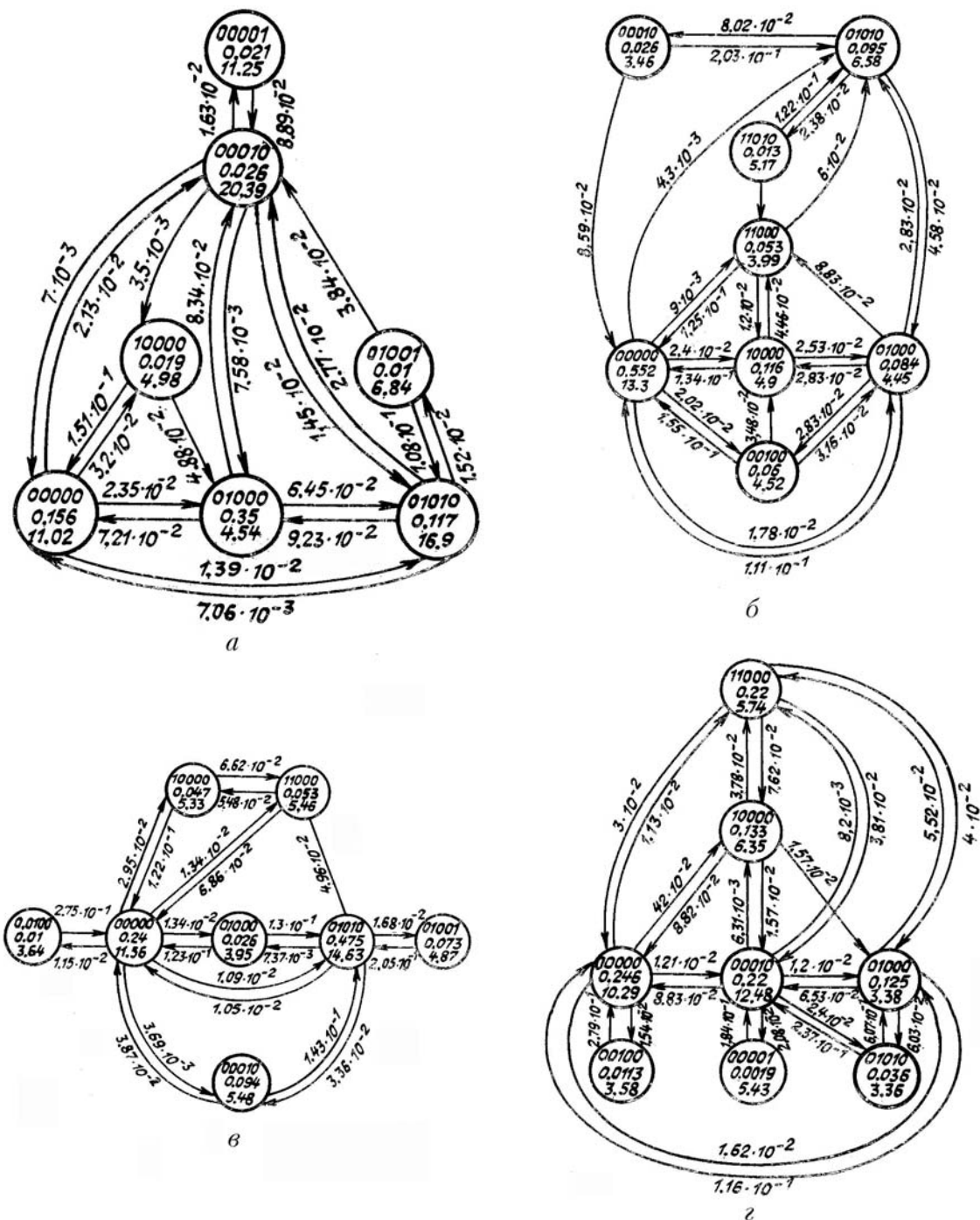


Рис. 2. Размеченные графы состояний облачного покрова: а — зима, б — лето, в — весна, г — осень

Кроме проверки на стационарность проводилась проверка гипотезы об экспоненциальном характере эмпирических плотностей распределений временных интервалов между переходами из состояния в состояние на основании критерия χ^2 [9]. Проверка показала достаточно хорошее совпадение гипотезы во всех случаях со статистическими данными. Исходя из полученных результатов и известных теоретических предпосылок о распределении промежутков времени в простейшем потоке, переводящем систему из состояния в состояние по экспоненциальному закону, авторы посчитали возможным

представить такой процесс перехода атмосферы в виде четырех размеченных граф состояний. Указанные графы приведены на рис. 2 (а-г). Каждое состояние характеризуется двоичным пятизначным кодом (табл. 3), полученным по результатам перекодировки данных в таблицах ТМ-1, вероятностью и средним временем непрерывного существования. Числа, проставленные у стрелок, указывающих направление перехода, характеризуют его интенсивность. Для каждой из представленных граф может быть составлена система дифференциальных уравнений вида

$$\frac{dP_1}{dt} = -P_1(\lambda_{12} + \lambda_{13} + \dots + \lambda_{1N}) + P_2\lambda_{21} + \dots + P_N\lambda_{N1};$$

$$\frac{dP_N}{dt} = -P_N(\lambda_{N1} + \lambda_{N2} + \dots + \lambda_{NN} - 1) + P_1\lambda_{1N} + \dots + P_{N-1}\lambda_{N-1}, \quad (2)$$

где P_i — вероятность состояния атмосферы; λ_{ij} — интенсивность переходов из i -го в j -е состояние. При заданных начальных условиях $P_i = 1$; $P_{j \neq i} = 0$ система может быть разрешена и в результате определены вероятности состояний облачности на любой заданный наперед момент времени.

Для составления граф состояний атмосферы необходимо произвести перекодировку данных, представленных в таблицах ТМ-1 (см.табл. 3). В процессе перекодировки десятичные цифры в таблицах меняются на «1», если облачность данного яруса присутствует, и на «0» — в обратном случае. Таким образом, состояние атмосферы отображается двоичным кодом, содержащим пять позиций. Однако при перекодировке возможна ситуация неопределенности. Например, когда при первоначальном заполнении Таблицы ТМ-1 наблюдение за определенными формами облачности было по каким-либо причинам затруднено (высокий балл нижних слоев облачности, туман, метель и т. д.). В этом случае согласно существующему правилу кодировки в Таблицах ТМ-1 в соответствующих графах проставлена цифра «восемь». Этот факт, собственно, и вносит неопределенность при формировании пятизначного двоичного кода, отражающего состояние атмосферы, которую предлагается разрешать следующим образом. Если кодовая комбинация содержит две либо три «восьмерки» в старших разрядах, что говорит о высоком балле (9–10) нижней облачности, не позволяющем наблюдать более верхние слои, то с учетом существующей связи между баллом облачности и средней толщиной всей облачности ($n = c\Delta H^2$, где n — балл облачности; ΔH — общая толщина облачности; c — постоянная, можно с высокой вероятностью предположить существование облачности среднего яруса и заменить существование облачности среднего яруса и заменить имеющуюся комбинацию восьмерок на код «0 1 0 LL», где «LL» — код состояния нижних форм облачности. Существование облачности верхнего яруса при этом не учитывается, т. к. учет этих форм практически не окажет влияния на совокупность оптических характеристик всей облачной массы.

Таблица 3

Фрагмент таблицы ТМ-1

Облачность, форма, шифр				
1	<i>Ci</i>	<i>Ac</i>	<i>Cu</i>	<i>St</i>
2	<i>Cc</i>	<i>As</i>	<i>Cb</i>	<i>Sc</i>
3	<i>Cs</i>			<i>Fr Ns</i>
4	<i>Ci Cc</i>	<i>Ac As</i>	<i>Cu Cb</i>	<i>St Sc</i>
5	<i>Ci Cs</i>			
6	<i>Cc Cs</i>			<i>Ns Fr Ns</i>
7	<i>Ci Cc Cs</i>			
8	определить нельзя			
9	безоблачно			
	Количество баллов			Высота нижней границы, шифр
	43, 44	45, 46	47, 48, 49, 50, 51	52, 53
			Пример:	
			2 0 1 0 0	
			1 0 1 0 0	
			0 4 0 2 3	
			0 1 0 1 1	
			8 8 8 1 0	
			0 1 0 1 0	
	Результат перекодировки			Исходный код

Если же кодовая комбинация таблицы состоит из пяти восьмерок (туман, метель и т.д.), то при формировании двоичного кода предполагается, что формы облачности, существующие до начала явления, затрудняющего наблюдения, остались неизменными. Это объясняется тем, что среднее непрерывное время существования форм облачности превосходит время существования подобных атмосферных явлений (подтверждается статистикой наблюдений Ростовского гидрометцентра).

Выводы. Разработанная региональная вероятностно-статистическая модель облачности на базе теории цепей Маркова может быть широко использована при составлении краткосрочных прогнозов как источник исходных данных в расчетах по атмосферной оптике, при обосновании выбора места расположения различных оптических систем, а также при моделировании процессов функционирования этих систем с учетом оптической погоды заданного региона. При этом прогноз получается в результате решения системы уравнений (2) в виде набора возможных состояний и их вероятностей в заданные моменты времени. Использование предложенной модели особенно эффективно при планировании работы различных оптических средств. Структура модели такова, что она может быть легко реализована с использованием персональных ЭВМ с базой данных и стандартного математического обеспечения для решения системы дифференциальных уравнений.

1. Матвеев Л. Т. Динамика облаков. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 312 с.
2. Груза Г. В., Ранькова Э. Я. Вероятностные метеорологические прогнозы. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 272 с.
3. Дубровина Л. С. Облака и осадки по данным самолетного зондирования. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 216 с.
4. Фейгельсон Е. М., Краснокутская Л. Д. Потoki солнечного излучения и облака. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 175 с.
5. Фейгельсон Е. М. Лучистый теплообмен и облака. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 228 с.
6. Волновицкий О. А., Павлова Л. Н., Петрушин А. Г. Оптические средства кристаллических облаков. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 200 с.
7. Атлас облаков. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. 268 с.
8. Яновицкий Э. Г., Думанский З. О. Таблицы по рассеянию света полидисперсной системой сферических частиц. Киев: Наукова думка, 1972. 124 с.
9. Вентцель Е. С. Исследование операций. М.: Советское радио, 1972. 552 с.

Ростовское высшее военное командно-инженерное училище ракетных войск

Поступила в редакцию
11 мая 1990 г.

D. A. Bezuglov, E. N. Mishchenko, V. L. Tyurikov. Regional Probabilistic Statistical Model of Cloudiness Based on the Use of the Markovian Chains Theory.

The paper suggests a probabilistic statistical model of cloudiness constructed basing on the use of Markovian chains theory. This model allows one to take into account regional features. The graphs of the probabilistic state of the cloudiness forms above the northern Caucasus are given for different seasons. The graphs were constructed using the suggested model and TM-1 Tables. Some recommendations on re-coding the TM-1 Tables are also given in the paper.