

**В.С. Комаров, А.А. Исаев, Б.Г. Шерстюков**

## **МЕТОДОЛОГИЯ ПРОГНОЗА МЕЗОКЛИМАТА ГОРОДА НА ПРИМЕРЕ КРИТЕРИАЛЬНЫХ ОЦЕНОК ХОЛОДНОГО ПЕРИОДА**

Рассматривается методология моделирования и прогноза временных последовательностей климатических характеристик (начала, конца, продолжительности и средней температуры) холодного периода с годовой заблаговременностью, осуществляемых на основе спектрального анализа и метода кратной цикличности. Проведенная оценка качества прогноза показывает его хорошую оправдываемость (около 70%).

Среди важных проблем современной мезоклиматологии все большую актуальность приобретает проблема оценки и прогноза эволюции мезоклимата больших городов. Это обусловлено тем, что в последние годы заметно усиливается влияние человеческой деятельности на изменение местного климата, особенно больших городов. Оно проявляется, например, в изменении радиационного режима городской атмосферы (так, из-за дыма и пыли, существенно влияющих на ее прозрачность, теряется до 20% солнечной радиации [1]), в снижении (за счет загрязнения воздушного баланса) эффективного излучения и, следовательно, ночного выхолаживания, в повышении (за счет сжигания топлива и малого расхода тепла на испарение) температуры внутри города по сравнению с окрестностями, что вызывает существование над городом «острова» тепла [2].

Все перечисленные факторы и сказываются на формировании и эволюции мезоклимата города. Поэтому представляет несомненный интерес правильная оценка и прогноз его временных изменений. Решению этой задачи и уделяется основное внимание в настоящей работе, выполненной при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект N 15694 от 1995 г.).

### **1. Методика и результаты расчета климатических характеристик**

Для исследования изменений мезоклимата города и разработки методологии его прогноза использован статистический подход, основанный на анализе климатических характеристик холодного периода, учитывающих весь комплекс влияющих факторов и наиболее заметно отражающих характер изменения местного климата.

К данным характеристикам относятся: дата начала осенью ( $D_n$ ) и дата окончания весной ( $D_k$ ) холодного периода; его продолжительность от даты начала до даты окончания ( $L$ ) и средняя температура  $T$ °C за период  $L$ .

Обычно начало холодного периода отсчитывается с того момента, когда осенью наблюдаемая среднесуточная температура понижается до +8°С или ниже и в течение 4 дней не поднимается выше +8°С, а окончание того же периода совпадает с моментом, когда весной среднесуточная температура повышается до +8°С и выше и в течение 4 дней не опускается ниже +8°С. Выбранные границы начала и конца холодного периода соответствуют началу и концу отопительного сезона. Выбор же 4-дневного периода базируется на средней продолжительности естественных синоптических периодов [3].

На практике (см., например, [4]) оценки  $D_n$ ,  $D_k$ ,  $L$ ,  $T$  получают обычно по косвенным формулам, учитывающим связи дат  $D_n$ ,  $D_k$  со средней температурой месяца, непосредственно предшествующего переходу (или следующего за переходом) в сторону  $t < 8^\circ\text{C}$  или  $t > 8^\circ\text{C}$ . Как показали предварительные расчеты, такой подход не учитывает реального годового хода температуры конкретного года и может использоваться лишь для получения приближенных оценок  $D_n$ ,  $D_k$ ,  $L$  по многолетним среднемесячным температурам воздуха. В частности, такой подход был использован при публикации соответствующих данных в справочнике [5].

В настоящей работе для получения упомянутых оценок использовались ежегодные среднемесячные температуры воздуха в холодный период года, интерполированные методом линейной интерполяции на каждые календарные сутки периода. Предварительно были выполнены обоснования к выбору оптимального интервала  $N$  (дни), в течение которого температура воздуха наиболее устойчиво опускается (поднимается) ниже (выше)  $8^{\circ}\text{C}$  по фактически измеренным среднесуточным температурам в месяцы холодного периода в Москве. Исследовано 10 вариантов критерия периода устойчивого перехода  $t < 8^{\circ}\text{C}$ ,  $t > 8^{\circ}\text{C}$ , начиная от одного до девятнадцати дней с шагом два дня за период 1950–1994 гг. В каждом варианте для каждого года вычислялись  $D_n$ ,  $D_k$ ,  $L$ ,  $T$ .

Анализ полученных данных показал, что с увеличением числа дней  $N$  устойчивых переходов температуры через  $+8^{\circ}\text{C}$  от 1 до 19 дата начала  $D_n$  постоянно сдвигается на более поздние сроки, достигая «насыщения» примерно через две недели. Аналогичным образом ведет себя и дата окончания холодного периода  $D_k$ . В отличие от  $D_n$  и  $D_k$  продолжительность  $L$  и средняя температура  $T$  холодного периода практически не зависят от интервала  $N$ , и их значения, по существу, не меняются.

Кроме того, тот же анализ показал, что оптимальным интервалом, с которого следует начинать отсчет дат начала и окончания холодного периода для условий Москвы, является интервал устойчивого понижения (повышения) температуры ниже (выше)  $+8^{\circ}\text{C}$  в течение не менее 5 суток подряд. Поэтому все последующие результаты ориентированы на этот критерий. При этом результаты, полученные на основе погодичных среднемесячных значений температуры, соответствуют результатам, полученным при том же критерии, но по фактическим данным.

В табл. 1 представлены статистические характеристики: среднее, стандартное (среднеквадратическое) отклонение, минимум и максимум величин  $D_n$ ,  $D_k$ ,  $L$ ,  $T$ , взятые за различные периоды усреднения (1880–1995, 1950–1995 и 1980–1995 гг.), что позволяет оценить характер изменения климата Москвы во времени.

Как следует из табл. 1, наибольшие изменения за столетие происходят с  $L$  и  $T$ . Так,  $L$  за последние 15 лет (1980–1995 гг.) по сравнению с началом столетия уменьшилась с 209 до 201 дня, а средняя температура с  $-3,0$  до  $-1,7^{\circ}\text{C}$ . Уменьшение продолжительности происходит за счет более раннего окончания холодного периода  $D_k$ .

Таблица 1

Средние оценки начала  $D_n$ , конца  $D_k$ , продолжительности  $L$  и средней температуры  $T^{\circ}\text{C}$ , холодного периода в Москве за различные периоды наблюдений

Годы	Величина	Характеристики			Среднеквадратическое отклонение	Среднее по тренду на 1901/2000 г.
		Среднее значение	Минимум	Максимум		
1880–1995	$D_n$	30.09	11.09	20.10	8	27.09/27.09
1950–1995		30.09	10.09	19.10	8	
1980–1995		30.09	10.09	15.10	8	
1880–1995	$D_k$	27.04	08.04	21.05	8	30.05/17.04
1950–1995		22.04	08.04	07.05	7	
1980–1995		19.04	10.04	29.04	6	
1880–1995	$L$	209	171	242	13	215/202
1950–1995		204	171	235	12	
1980–1995		201	185	222	10	
1880–1995	$T$	-3,0	-6,8	0	1,4	-3,6/-1,1
1950–1995		-2,4	-6,1	0	1,4	
1980–1995		-1,7	-4,6	0	1,2	

Если использовать экстраполяционные оценки по трендовым кривым (рис. 1), то оказывается, что к 2000 г. возможно смещение средней даты окончания  $D_k$  к середине апреля (17 апреля). И тогда при относительной неизменности  $L$  до 2000 г. средняя температура холодного периода к началу следующего столетия может повыситься в Москве по сравнению с текущим периодом примерно на  $0,5^{\circ}\text{C}$ , что весьма существенно.

## 2. Моделирование рядов и прогноз

Визуальный (рис. 1–3) и спектральный анализы (табл. 2) показывают наличие квазипериодических составляющих в рядах характеристик  $D_n$ ,  $D_k$ ,  $L$ ,  $T$  и наличие трендовой составляющей, особенно в рядах  $D_k$  и  $T$  (см. рис. 1, 3).

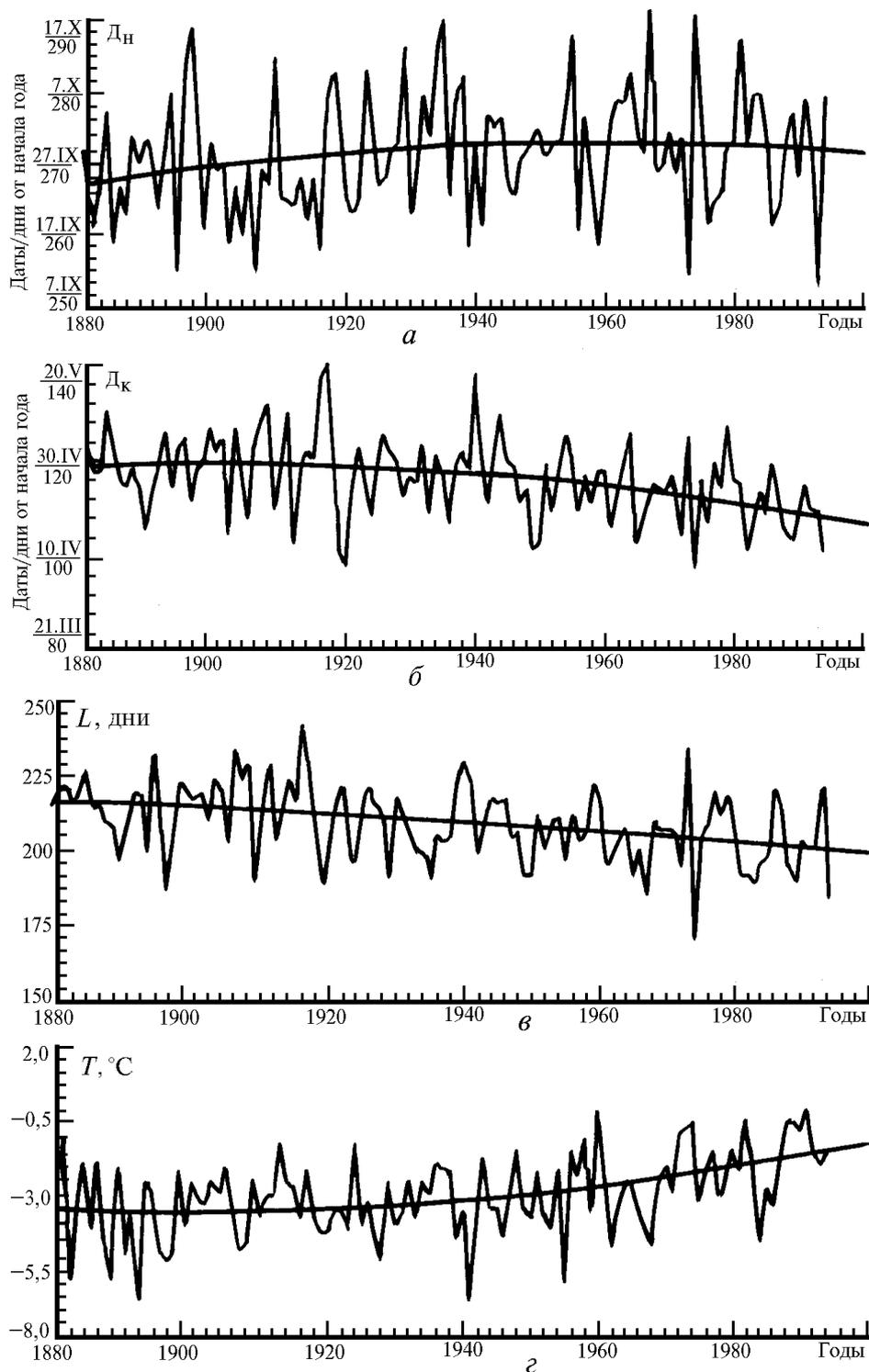


Рис. 1. Даты начала ( $D_n$ ), даты окончания ( $D_k$ ), продолжительность ( $L$ ), средняя температура ( $T$ ) и их тренды

Значимые циклы (гг.) колебаний характеристик холодного периода с 95%-й достоверностью для Москвы за 1950–1995 гг.

Характеристики	Циклы					
	16,0	8,9	4,2	3,4	2,8	2,4
$D_n$	–	8,0	5,4	3,2	2,7	2,2
$D_k$	18,2	7,8	4,5	3,3	2,8	2,2
$L$	15,3	8,5	4,1	3,1	–	2,2

Спектральный анализ свидетельствует о наличии квазикратных циклов, таких как 16/8/4/2. Более тщательный визуальный анализ графиков упомянутых характеристик холодного периода за всю историю наблюдений (график не приводится) показал, что цикл 16–18 лет состоит из двух неравных циклов примерно 8–9 лет, а циклы 8–9 лет из двух неравных циклов 4–5 лет или трех циклов примерно по 3 года, 4–5-летние циклы складываются из циклов 2 и 3 года. Попарное чередование близких, но неравных циклов осложняет применение классических методов анализа цикличности, поэтому дальнейший анализ и моделирование проводились методом так называемой кратной цикличности. Характеристики, содержащие тренд, описывались моделью линейного тренда и моделью кратной цикличности. Метод кратной цикличности содержит в себе метод наложения эпох по выбранным регулярным датам с периодом  $\tau$ . Период  $\tau$  выбирается таким, чтобы охватить совокупность нескольких неравных циклов. В нашем случае для чередующихся 4- и 5-летних циклов подходит  $\tau = 9$ , а для чередующихся 8–9-летних циклов –  $\tau = 17$ . Весь ряд разбивается на отрезки по  $\tau$  лет. Для каждой точки на интервале  $\tau$  вычисляется среднее значение из аналогичных точек всех отрезков. Получается некоторый усредненный эталон совокупности нерегулярных циклов.

Важным обстоятельством такого подхода является то, что модель одинаково хорошо описывает все выбросы и цикличности, которые имеют периоды, кратные длительности  $\tau$ . Интенсивность и продолжительность возмущений исследуемой величины в пределах отрезка времени  $\tau$  могут быть различными. Важно только, чтобы на таких же последовательных отрезках процессы повторялись с той же закономерностью. С физической точки зрения такой метод позволяет описывать систему сложных чередующихся возмущений, если их общим источником является периодическая сила с известным периодом.

На этапе анализа в нашем случае модель кратной цикличности описывает две периодические совокупности  $\tau_1$  и  $\tau_2$  циклов, вложенных в интервалы  $\tau_1$  и  $\tau_2$ . Периоды, как правило, 9 и 16–17 лет задавались первоначально по результатам спектрального анализа и анализа автокорреляционной функции временного ряда, а затем уточнялись путем многократных численных экспериментов по восстановлению исходного ряда при различных отклонениях от первоначально заданных периодов.

Оценка качества модели кратной цикличности каждой исследуемой характеристики выполнялась методом дисперсионного анализа. При этом оценивалась доля описанных моделью возмущений от общей дисперсии ряда.

Прежде чем переходить к описанию моделей характеристик холодного периода, опишем некоторые обозначения, которые вводятся ниже:  $R$  – несмещенная оценка описанной моделью доли общей дисперсии ряда;  $F$  – критерий Фишера;  $t$  – критерий Стьюдента; «вероятность» – вероятность случайности модели. Значение вероятности менее 0,05 означает случайность модели менее 5% или достоверность модели более 95%.

К вышеизложенному добавим, что при построении моделей использовались временные последовательности погодических оценок  $D_n$ ,  $D_k$  за период с 1950 по 1995 г.

В результате численных экспериментов первый период цикличности составлял 9 лет для каждой характеристики. Второй период цикличности имеет для всех характеристик близкие оценки. Для  $D_n$  он равен 17 годам, для других характеристик 16. Перейдем к описанию статистических свойств моделей.

### 3. Модель дат начала холодного периода ( $D_n$ )

Тренд в датах  $D_n$  за последние десятилетия отсутствует. Межгодовые изменения дат  $D_n$  носят квазипериодический характер (рис. 1, а).

В результате проведенных экспериментов выбрана модель кратной цикличности без учета тренда. Параметры модели приведены ниже.

Временной интервал	
Начальное время	1950 г.
Конечное время	1994 г.
Длина временной базы	45 лет
Первый период цикличности	9 лет
Второй период цикличности	17 лет

	Дисперсионный анализ			Критерий $F$	Вероятность
	Степень свободы	Сумма квадратов	Среднеквадратическое отклонение		
Модель	24	2700,4	112,52	4,2109	0,0030
Остатки	20	534,4	26,72	—	—
Всего	44	3234,8	—	—	—
$R=0,6366$					

Анализ остатков	
Среднее остатков	0
Стандартная ошибка остатков	3,4461
Максимальная абсолютная ошибка	8,8596
Время максимальной ошибки	1955 г.
Статистика Дарбина–Уотсона	1,733

Дисперсионный анализ модели показывает, что модель описывает 64% общей дисперсии исходного ряда ( $R = 0,6366$ ). Вероятность случайности модели менее 1%. Стандартная ошибка модели составила около 4 дней. На рис. 2 показаны реальные и модельные данные  $D_n$ , а также прогноз дат начала холодного сезона по модели. В 1995 г. холодный сезон начнется ориентировочно в 267-й день года, т.е. 24 сентября, с учетом разброса начало холодного сезона прогнозируется на интервалы с 17 сентября по 1 октября.

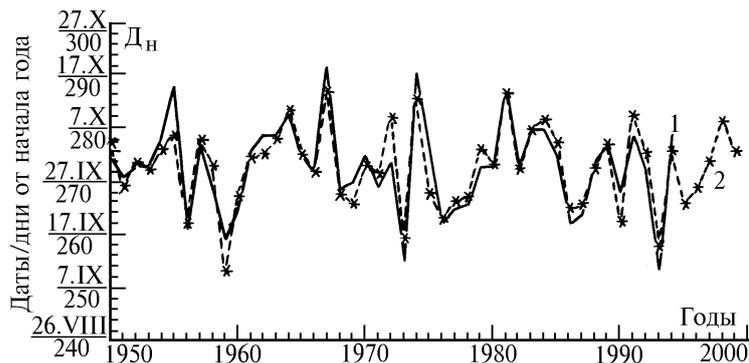


Рис. 2. Реальные (1) и модельные (2) даты начала холодного периода

#### 4. Модель дат окончания холодного периода ( $D_k$ )

В датах  $D_k$  за последние десятилетия наблюдается устойчивый линейный тренд (рис. 1, б), на фоне которого происходят квазипериодические изменения. Поэтому модель  $D_k$  строилась в два этапа. На первом этапе строилась модель линейного тренда.

##### Модель тренда для переменной $D_k$

Временной интервал	
Начальное время	1930 г.
Конечное время	1994 г.
Длина временной базы	65 лет
Значение $t = 1$ соответствует моменту времени	1930 г.
Тренд: $Y(t) = -0,15219 \cdot t + 120,07 + e$	

Параметр	Значение	Оценки параметров		
		Стандартная ошибка	Критерий $t$	Вероятность
$A$	-0,15219	0,048028	3,1687	0,0024
$B$	120,07	1,8232	65,857	0,0000
$R=0,1096$				

Анализ остатков	
Среднее остатков	0
Стандартная ошибка остатков	7,2648
Максимальная абсолютная ошибка	20,606
Время максимальной ошибки	1940 г.
Статистика Дарбина–Уотсона	2,001

Тренд описывает 10% общей дисперсии.

На втором этапе из исходного ряда вычтен тренд и проведен анализ остатков. В результате проведенных экспериментов для остатков выбрана модель кратной цикличности, все параметры которой приведены ниже.

*Модель кратной цикличности для остатков  $D_k$*

Временной интервал	
Начальное время	1950 г.
Конечное время	1994 г.
Длина временной базы	45 лет
Первый период сезонности	9 лет
Второй период сезонности	16 лет

	Степень свободы	Дисперсионный анализ		Критерий $F$	Вероятность
		Сумма квадратов	Среднеквадратическое отклонение		
Модель	23	1672,7	72,726	3,4244	0,0054
Остатки	21	446	21,238	–	–
Всего	44	2118,7	–	–	–
$R=0,5589$					

Анализ остатков	
Среднее остатков	0
Стандартная ошибка остатков	3,1482
Максимальная абсолютная ошибка	6,4815
Время максимальной ошибки	1973 г.
Статистика Дарбина–Уотсона	2,540

Дисперсионный анализ модели показывает, что модель остатков описывает 56% общей дисперсии исходного ряда ( $R = 0,5589$ ). Вероятность случайности модели менее 1%. Стандартная ошибка модели составила около трех дней. Реальные и модельные данные  $D_k$ , а также прогноз дат начала холодного периода здесь не приводятся. Дополнительно модель остатков была построена за более короткий период 1960–1995 гг.

*Модель кратной цикличности для остатков  $D_k$*

Временной интервал	
Начальное время	1960 г.
Конечное время	1994 г.
Длина временной базы	35 лет
Первый период сезонности	9 лет
Второй период сезонности	16 лет

	Степень свободы	Дисперсионный анализ		Критерий $F$	Вероятность
		Сумма квадратов	Среднеквадратическое отклонение		
Модель	23	1519,5	66,065	3,8895	0,1425
Остатки	11	186,84	16,985	–	–
Всего	34	1706,3	–	–	–
$R=0,6616$					

Анализ остатков	
Среднее остатков	0
Стандартная ошибка остатков	2,3105
Максимальная абсолютная ошибка	4,4286
Время максимальной ошибки	1977 г.
Статистика Дарбина–Уотсона	1,584

Дисперсионный анализ модели показывает, что модель с 1960 г. описывает 66% общей дисперсии исходного ряда. Вероятность случайности модели менее 1%. Стандартная ошибка модели составила около двух дней. На рис. 3 показаны остатки  $D_k$ . Прогностическая дата начала холодного периода будет складываться из суммы прогноза трендовой и циклической составляющих. Холодный сезон 1995/96 г. окончится ориентировочно в  $(110 + 15) = 125$ -й день года, т.е. 25 апреля, с учетом разброса конец холодного периода прогнозируется на интервал с 17 апреля по 2 мая.

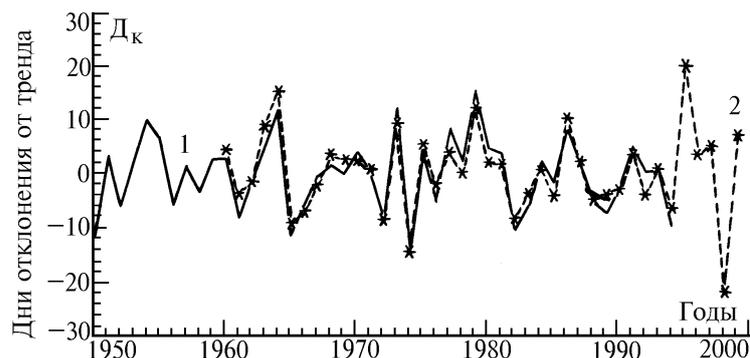


Рис. 3. Реальные (1) и модельные (2) отклонения от тренда дат окончания холодного периода

## 5. Оценки оправдываемости прогнозов $D_n$ и $D_k$

Оценка оправдываемости прогнозов  $D_n$  и  $D_k$  проводилась по независимым наблюдениям за 1985–1995 гг. Прогнозы строились по модели кратной цикличности на основе данных, предшествующих году прогноза. При этом погрешность прогнозов (табл. 3) оценивалась разностью  $\varepsilon$  прогностических  $D_n$  и  $D_k$  и реальных дат  $D'_n$  и  $D'_k$ :

$$\varepsilon_n = D_n - D'_n, \quad \varepsilon_k = D_k - D'_k.$$

Все ошибки прогнозов с годовой заблаговременностью для дат начала и окончания холодного сезона не превышают 10 дней. Если принять за допустимую погрешность одну неделю, то оправдываемость прогнозов дат начала и окончания холодного сезона в Москве составляет 70%. Оценки оправдываемости для ситуаций прогноза с 2–3-летней заблаговременностью показали аналогичную оправдываемость. Это свидетельствует об устойчивости параметров избранной модели, о целесообразности продолжения работы в этом направлении.

Таблица 3

Оценки оправдываемости прогнозов на независимых данных

Период данных	Год прогноза	$\varepsilon_n$	$\varepsilon_k$
1950–1984(85)	1985–86	4	-1
1950–1985(86)	1986–87	10	0
1950–1986(87)	1987–88	4	8
1950–1987(88)	1988–89	-6	10
1950–1988(89)	1989–90	-8	0
1950–1989(90)	1990–91	5	5
1950–1990(91)	1991–92	3	0
1950–1991(92)	1992–93	0	-6
1950–1992(93)	1993–94	1	-0
1950–1993(94)	1994–95	-10	8

- 1 Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышева Н.В. Климатология. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 568 с.
- 2 Владимирова А.М., Ляхин Ю.И., Матвеев Л.Т., Орлов В.Г. Охрана окружающей среды. Л.: Гидрометеоздат, 1961. 423 с.
- 3 Гневко Г.Г. Статистические характеристики периода с температурой воздуха ниже +8°C на территории ЕТС и Западной Сибири. Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, 1980. 100 с.
- 4 Руководство по месячным прогнозам погоды. Л.: Гидрометеоздат, 1972. 365 с.
- 5 Справочник по климату СССР. Ч. 1–2. Вып. 8. Л.: Гидрометеоздат, 1964.

Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск  
 Московский госуниверситет им. М.В. Ломоносова  
 Российский НИИ гидрометинформации, Мировой центр данных, Обнинск

Поступила в редакцию  
 7 июля 1995 г.

V. S. Komarov, A. A. Isayev, B. G. Sherstukov. **Methodology of Forecasting of City Mesoclimate by the Example of Criterion Estimates of Cold Period.**

Statistical properties of climatic characteristics series of dates of the beginning, end, duration, and mean temperature of the heating period are studied. The possibility of simulation and forecast of temporal series of annual outstripping based on so called method of multiple cyclicity. Good enough predictability (about 70%) shows the investigations of the problem to be promising.