ИЗВЕСТИЯ АН. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА, 2002, том 38, № 1, с. 47–55

УДК 551.583

СТОХАСТИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ВЕЛИЧИН МЕСЯЧНЫХ ОСАДКОВ И СРЕДНЕМЕСЯЧНЫХ ТЕМПЕРАТУР

© 2002 г. Л. Л. Голубятников*, Й. Ямагата**, Г. А. Александров*

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
109017 Москва, Пыжевский пер., 3

** Национальный институт изучения окружающей среды
Япония, Ибараки 305, Тсукуба, Оногава 16–2

E-mail: golubll@dol.ru, golub@omega.ifaran.ru

Поступила в редакцию 06.03.2001 г., после доработки 03.07.2001 г

Рассмотрен метод моделирования величин месячных осадков и среднемесячных приземных температур воздуха. Предлагаемый алгоритм моделирования основан на методе обратных функций. В качестве фактических климатических параметров использовались данные из базы UEA/CRU. Метод применен для создания модельных временных рядов месячных осадков и среднемесячных приземных температур воздуха для территории суши с пространственным разрешением 0.5 на 0.5 градусов географической широты и долготы. Получаемые с помощью предложенного стохастического генератора временные ряды рассматриваемых климатических параметров статистически адекватны рядам фактических данных для любого интервала в месяцах и годах.

ВВЕДЕНИЕ

Решение многих задач анализа и изучения окружающей среды связано с необходимостью иметь достаточно длинные временные ряды климатических параметров. Длины реальных временных рядов необходимых характеристик климата часто оказываются недостаточными для получения достоверных оценок наступления исследуемого события. В этом случае возникает задача создания модельных временных рядов климатических параметров на основе данных наблюдений за этими характеристиками климата. Для решения этой проблемы используются стохастические погодные модели называемые также погодными генераторами.

Наиболее часто погодные генераторы используются в задачах анализа характеристик гидрологического цикла атмосферы и подстилающей поверхности суши [1–3], при моделировании динамики растительного покрова [4, 5], для прогнозирования реакции сельскохозяйственных культур на изменения агроклиматических условий их возделывания [6–8]. Погодные генераторы нашли свое применение в ряде современных исследований связанных с изучением динамики регионального климата и оценок его возможных изменений в ближайшем будущем [9–11], с прогнозированием изменения трендов климатических характеристик при изменении климата [12, 13], с оценкой риска в проектах углеродного секвестирования [14, 15].

К настоящему времени разработано несколько десятков погодных генераторов, позволяющих получить модельные временные ряды тех или иных климатических параметров на основе данных наблюдений. Краткие обзоры стохастических погодных моделей представлены в работах [7, 11, 16]. Среди концептуальных основ этих генераторов можно выделить два основных подхода. Один из них состоит в том, что погодные процессы рассматриваются как случайные цепи Маркова первого порядка с двумя состояниями: к первому состоянию относятся влажные дни, т.е. дни с измеряемыми осадками, ко второму состоянию относятся сухие дни, т.е. дни без осадков и дни с незначительными осадками. Условные вероятности перехода из состояния в состояние определяются из локальных погодных данных и в зависимости от реализовавшегося состояния моделируются климатические параметры (количество осадков, температура, солнечная радиация и другие). Этот подход лежит в основе таких погодных генераторов как, например, WGEN [17], Met&Roll [7]. Другой метод моделирования основан на так называемом серийном подходе [18]. Суть этого метода в том, что на основе данных многолетних наблюдений моделируются длины влажных и сухих непрерывных последовательностей дней (серий), сменяющих друг друга в течение года. Затем, в зависимости от длины каждой серии, моделируются климатические параметры. На этом методе моделирования основан такой погодный генератор как LARS-WG [19, 20].

Стохастические погодные модели, как правило, являются локальными моделями и требуют калибровки относительно наблюдаемых данных

для каждого нового географического местоположения.

Для моделирования величин осадков в погодных генераторах часто используется гамма-распределение [16, 21–24]. Свойства этого распределения и методы подбора его параметров на основе экспериментальных данных неоднократно обсуждались в литературе [24–26]. В ряде работ для моделирования величин осадков в изучаемом регионе используются и другие известные в теории вероятностей специальные законы распределения, такие как логарифмически нормальное, Пирсона первого типа, смешанное экспоненциальное [16, 18, 21, 26]. При моделировании значений приземных температур воздуха предполагается их соответствие нормальному закону распределения [18, 22]. В ряде публикаций для рассматриваемых их авторами территорий приведены полученные на основе метеорологических данных графики распределения температуры воздуха, которые не соответствуют гауссовскому распределению (см., например, [21, 27]). Таким образом, используемая во многих моделях гипотеза о том, что функции распределения как осадков, так и температуры не зависят от географического местоположения исследуемой территории, является достаточно спорным предположением.

Задача нашего исследования состоит в том, чтобы разработать метод моделирования величин месячных осадков и среднемесячных температур воздуха, который был бы применим в любом изучаемом регионе.

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ

В нашем исследовании в качестве фактических климатических данных используются среднемесячные приземные температуры воздуха и месячные количества осадков из базы данных UEA/CRU, разработанной и распространяемой Отделом климатических исследований Университета Восточной Англии [28]. В этой базе данных представлены многолетние климатические данные за период с 1901 по 1995 г. с пространственным разрешением 0.5 на 0.5 градусов географической широты и долготы. В данной работе мы рассматриваем только данные, которые относятся к покрытой растительным покровом территории суши.

Начальным этапом решения нашей задачи является определение законов распределения значений ежемесячных осадков и среднемесячных температур для каждого месяца года в каждой ячейке пространственного разрешения. С этой целью для рассматриваемых климатических параметров на основе их временных рядов строятся так называемые статистические ряды.

Обозначим через $x^i_{\min}$ и $x^i_{\max}$ минимальное и максимальное значения рассматриваемого климатического параметра для i-го месяца ($i = 1, \ldots, 12$) и через N^i – количество измерений этого параметра в данном месяце. Диапазон изменения рассматриваемого параметра разбиваем на n равных частей $[x^i_{\min}, x^i_{\max}] = \bigcup_{j=1}^{n} [x^i_j, x^i_{j+1}]$ и подсчитываем количество значений измерений параметра (m^i_j), попавших в каждый интервал этого разбиения. По значениям m^i_j получаем частоты попадания в соответствующие интервалы

$$p^i_j = m^i_j / N^i.$$

Совокупность интервалов $[x^i_j, x^i_{j+1}]$ и соответствующие им частоты p^i_j определяют статистический ряд изучаемого климатического параметра для i-го месяца.

Скажем, что в данной ячейке пространственного разрешения для i-го месяца значения рассматриваемого климатического параметра маловероятны в интервалах

$$[x^i_1 = x^i_{\min}, x^i_k] = \bigcup_{j=1}^{k-1} [x^i_j, x^i_{j+1}] \quad \text{и}$$

$$[x^i_t, x^i_n = x^i_{\max}] = \bigcup_{j=t}^{n-1} [x^i_j, x^i_{j+1}],$$

если для любого подинтервала $[x^i_j, x^i_{j+1}]$ этих интервалов соответствующая ему частота p^i_j не превышает $1/N^i$. Назовем значения климатической характеристики для i-го месяца регулярными, если они лежат в интервале $[x^i_k, x^i_t] = \bigcup_{j=k}^{t-1} [x^i_j, x^i_{j+1}]$.

Данных для определения подходящего закона распределения маловероятных значений рассматриваемых климатических параметров недостаточно. Мы предполагаем равномерное распределение этих значений температур и осадков в качестве простейшей математической гипотезы.

На основе полученных для i-го месяца статистических рядов исследуемых климатических характеристик можно определить функции распределения для их регулярных значений. Без ограничения общности предполагаем, что в рассматриваемых ячейках пространственного разрешения для регулярных величин как осадков, так и температуры выполняется равенство $\sum_{j=1}^{n} p^i_j = 1$. Зададим эмпирические функции распределения для исследуемых климатических параметров в граничных точках интервалов $[x^i_j, x^i_{j+1}]$, которые фигуриру-

ют в статистических рядах для этих параметров, следующим образом

$$F(x_1^i) = 0,$$
$$F(x_j^i) = a_j^i, \quad j = \overline{2, n-1},$$
$$F(x_n^i) = 1,$$

где $a_j^i = \sum_{k=0}^{i} p_k^i$. Соединяя соседние полученные точки прямыми линиями, получим приближенную эмпирическую функцию распределения. Таким образом, используемые в нашем исследовании функции распределения имеют вид:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x < x_1, \\ p_j \dfrac{x - x_{j-1}}{x_j - x_{j-1}} + a_{j-1}, & x_{j-1} \le x < x_j, \ j = \overline{2, n}, \\ 1, & x \ge x_n. \end{cases} \quad (1)$$

Следовательно, наша задача состоит в моделировании случайных величин, соответствующих полученным законам распределения (1). Для этой цели мы используем метод обратных функций [29]. Суть этого метода в следующем.

Рассмотрим случайную величину X, распределенную по закону

$$F(x) = P\{X < x\}. \quad (2)$$

Найдем распределение $F'(y)$ случайной величины $Y = F(X)$, где функция $F(X)$ задана соотношением (2). Согласно определению функции распределения, случайная величина Y принимает значения в интервале (0,1) и

$$F'(y) = P\{Y < y\} = P\{F(X) < F(x)\}.$$

Вследствие монотонного возрастания функции $F(X)$ условие $F(X) < F(x)$ эквивалентно условию $X < x$, так что

$$P\{F(X) < F(x)\} = P\{X < x\} = F(x) = y,$$

причем $0 \le y \le 1$, т.е. случайная величина Y распределена равномерно в интервале (0,1). Таким образом, любую случайную величину можно преобразовать в случайную величину с равномерным законом распределения на интервале (0,1).

Верно и обратное утверждение: если Y – случайная величина с равномерным распределением в интервале (0,1) и $F(x)$ – функция распределения некоторой случайной величины X, то случайная величина X может быть получена из случайной величины Y с помощью формулы

$$X = F^{-1}(Y), \quad (3)$$

где F^{-1} – функция, обратная по отношению к функции F. Действительно, при монотонном возрастании функции $F(x)$, неравенство $F^{-1}(Y) < x$ равносильно неравенству $Y < F(x)$. Следовательно,

$$P(X < x) = P\{F^{-1}(Y) < x\} = P\{Y < F(x)\} = F(x).$$

Тем самым имеем способ преобразования последовательности случайных чисел с равномерным законом распределения в интервале (0,1) в последовательность случайных чисел с заданной функцией распределения $F(x)$. Для такого преобразования необходимо из совокупности случайных чисел с равномерным законом распределения в интервале (0,1) выбрать случайное число y и решить уравнение

$$F(x) = y$$

относительно x. Решение этого уравнения и представляет собой случайное число из совокупности случайных чисел имеющих функцию распределения $F(x)$.

Таким образом, согласно формуле (3), последовательность случайных чисел с функцией распределения (1) можно определить из последовательности случайных чисел равномерно распределенных в интервале (0,1), по формуле

$$x = F^{-1}(y) = (x_j - x_{j-1})(y - a_{j-1})/p_j + x_{j-1},$$

если $a_{j-1} \le y < a_j$ и $a_j = \sum_{k=0}^{j} p_k$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассматриваемый в данной работе стохастический генератор величин месячных осадков и среднемесячных температур воздуха не связан с каким-либо конкретным местом исследований и применим в любом изучаемом регионе.

Получаемые с помощью предложенного метода моделирования значения месячных осадков и среднемесячной температуры воздуха хорошо согласуются с фактическими данными этих климатических параметров. В табл. 1 и 2 приведены фактические и модельные величины месячных осадков и среднемесячной температуры, рассчитанные для территории суши. Из представленных в этих таблицах результатов следует, что различия между модельными значениями и эмпирическими данными лежат в диапазоне точности измерений.

Величину расхождения между фактическими и расчетными значениями исследуемых климатических параметров можно оценить по графикам представленным на рис. 1 и 2. На рис. 1а и 1б приведены графики изменений величины месячных осадков для января и июля по меридиану 20° E, территория суши вдоль которого охватывает широкий биоклиматический диапазон. Графики абсолютных отклонений модельных результатов от

Таблица 1. Фактические (1) и модельные (2) значения месячных осадков (мм) для территории суши (оценка по выборке из 95 значений)

Диапазон широт	Данные	Месяц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
75–70°N	1	21.2	21.3	22.2	18.1	18.2	31.7	38.0	42.2	35.3	28.5	27.1	22.7
	2	20.8	20.9	21.8	17.6	17.7	31.3	37.7	41.9	34.9	28.1	26.7	22.3
70–60°N	1	24.1	20.3	20.9	21.6	28.1	43.6	55.6	56.8	45.3	37.1	31.4	26.2
	2	23.9	20.1	20.7	21.3	27.8	43.4	55.5	56.7	45.2	36.9	31.2	25.9
60–50°N	1	33.8	26.2	28.8	32.2	44.4	63.7	78.5	73.4	59.3	49.8	44.2	38.5
	2	33.6	26.0	28.6	32.0	44.3	63.7	78.4	73.2	59.2	49.7	44.0	38.4
50–40°N	1	33.9	29.3	34.3	39.7	49.9	59.2	62.2	56.9	46.4	41.4	40.3	38.2
	2	33.7	29.2	34.1	39.6	49.8	59.2	62.2	56.8	46.3	41.4	40.2	38.1
40–30°N	1	38.3	37.8	45.1	44.4	44.8	46.6	58.9	53.8	42.5	33.8	33.7	37.6
	2	38.2	37.7	45.0	44.4	44.8	45.5	58.9	53.7	42.5	33.8	33.7	37.5
30–20°N	1	14.1	17.0	22.2	32.5	50.1	81.9	102.6	97.2	67.8	33.6	16.2	12.7
	2	14.0	16.9	22.2	32.4	50.0	81.7	102.4	97.1	67.8	33.7	16.2	12.7
20–10°N	1	12.4	9.9	12.6	23.8	58.8	102.8	142.7	159.6	121.7	71.8	34.9	18.7
	2	12.3	9.8	12.5	23.8	58.9	102.6	142.6	159.4	121.5	71.8	34.9	18.6
10–0°N	1	69.2	67.8	102.4	150.5	195.0	190.3	188.3	188.3	178.9	167.9	117.7	82.5
	2	69.2	67.8	102.5	150.5	194.8	190.3	188.1	188.2	178.8	167.9	117.7	82.5
0–10°S	1	208.5	207.5	243.8	223.9	159.2	98.8	81.2	79.1	100.7	140.0	172.4	193.5
	2	208.2	207.3	243.5	223.8	159.0	98.9	81.1	79.0	100.7	139.9	172.3	193.3
10–20°S	1	208.6	189.2	170.9	79.3	31.9	17.2	14.6	15.1	28.2	67.0	117.9	183.1
	2	208.8	189.1	171.0	79.5	32.1	17.3	14.5	15.0	28.1	67.0	118.0	183.0
20–30°S	1	87.6	80.7	67.5	40.2	32.8	25.8	21.7	19.2	25.8	43.4	53.7	73.9
	2	88.3	80.9	67.8	40.5	33.0	25.9	21.9	19.3	25.8	43.4	53.8	74.0
30–40°S	1	48.0	48.7	53.5	45.3	51.0	50.8	49.7	46.3	44.3	50.5	47.4	48.0
	2	48.2	49.1	53.6	45.6	51.0	51.0	49.8	46.4	44.3	50.6	47.4	48.1
40–50°S	1	55.2	47.6	61.6	69.5	92.1	87.1	85.1	81.7	67.8	64.2	57.1	60.0
	2	55.3	47.6	61.6	69.9	92.0	87.1	85.3	81.7	67.7	64.0	57.2	59.9
50–60°S	1	46.1	41.2	51.3	49.8	46.5	42.5	41.3	43.7	33.6	33.7	38.0	42.2
	2	46.2	41.2	51.7	49.6	46.7	42.5	41.2	43.9	33.7	33.5	37.9	42.1

фактических их значений для указанных месяцев приведены на рис. 1в и 1г. Из представленных результатов следует, что отклонения расчетных величин среднемесячных осадков от фактических не значительны: наибольшее расхождение до 2–5 мм наблюдается для регионов с большими ежемесячными количествами осадков 100–240 мм. Аналогичные графики для среднемесячных значений температур воздуха приведены на рис. 2. Как следует из представленных на рисунке графиков, отклонение модельных значений этой климатической характеристики от соответствующих фактических значений не превосходит 0.4°C.

Степень совпадения распределений фактических и расчетных значений исследуемых климатических характеристик можно оценить по распределениям годовых осадков и среднегодовых температур воздуха, полученных на основе месячных значений соответствующих величин. Для разных широт территории суши в табл. 3 приведены следующие статистические характеристики этих распределений: средние значения, медианы, нижняя и верхняя квартили. Эти числовые характеристики распределений дают представление о расположении и рассеянии значений изучаемых параметров. Из представленных в табл. 3 данных следует, что распределения

Таблица 2. Фактические (1) и модельные (2) значения среднемесячных температур воздуха (°C) для территории суши (оценка по выборке из 95 значений)

Диапазон широт	Данные	Месяц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
75–70°N	1	–31.5	–31.3	–28.0	–19.9	–9.1	0.6	5.2	2.6	–4.1	–14.4	–25.4	–29.5
	2	–31.5	–31.3	–28.0	–19.9	–9.1	0.6	5.2	2.5	–4.1	–14.5	–25.4	–29.5
70–60°N	1	–26.5	–24.9	–19.3	–10.3	–0.6	7.6	11.4	9.1	3.0	–6.7	–18.3	–24.4
	2	–26.5	–24.9	–19.3	–10.3	–0.6	7.6	11.4	9.1	2.9	–6.8	–18.3	–24.5
60–50°N	1	–18.3	–16.3	–9.6	–0.1	7.5	13.1	16.0	14.3	8.8	1.2	–8.4	–15.7
	2	–18.3	–16.3	–9.7	–0.2	7.5	13.1	16.0	14.3	8.8	1.2	–8.4	–15.8
50–40°N	1	–10.3	–8.4	–2.1	6.2	12.6	17.3	20.2	19.0	13.8	6.9	–1.3	–7.8
	2	–10.4	–8.5	–2.1	6.2	12.6	17.3	20.1	19.0	13.8	6.9	–1.4	–7.9
40–30°N	1	–0.3	1.7	6.1	11.4	16.2	20.6	23.2	22.5	18.6	12.7	6.2	1.3
	2	–0.4	1.7	6.1	11.4	16.2	20.5	23.1	22.5	18.6	12.7	6.2	1.3
30–20°N	1	12.8	14.6	18.3	22.4	26.1	28.4	28.7	28.3	26.5	22.9	17.9	13.9
	2	12.7	14.6	18.3	22.4	26.1	28.3	28.7	28.2	26.5	22.9	17.9	13.9
20–10°N	1	21.5	23.2	26.0	28.5	29.9	29.6	28.3	27.6	27.7	27.0	24.4	22.0
	2	21.4	23.2	25.9	28.5	29.8	29.6	28.3	27.6	27.7	27.0	24.4	22.0
10–0°N	1	24.7	25.6	26.3	26.3	25.7	24.9	24.3	24.4	24.9	25.1	25.0	24.6
	2	24.7	25.6	26.2	26.2	25.7	24.9	24.3	24.4	24.8	25.1	25.0	24.6
0–10°S	1	25.0	25.1	25.2	25.2	24.9	24.2	23.9	24.4	25.1	25.4	25.4	25.2
	2	25.0	25.1	25.2	25.2	24.9	24.2	23.8	24.4	25.0	25.4	25.4	25.1
10–20°S	1	24.5	24.5	24.3	23.3	21.5	19.6	19.3	20.8	23.0	24.6	24.9	24.7
	2	24.5	24.5	24.2	23.3	21.4	19.5	19.2	20.8	23.0	24.5	24.9	24.7
20–30°S	1	26.0	25.4	23.8	20.6	16.9	14.1	13.6	15.5	18.5	21.4	23.7	25.4
	2	26.0	25.4	23.8	20.6	16.9	14.1	13.6	15.5	18.5	21.4	23.7	25.3
30–40°S	1	22.4	21.9	19.6	16.0	12.5	9.8	9.1	10.4	12.8	15.6	18.6	21.0
	2	22.3	21.8	19.6	15.9	12.5	9.7	9.1	10.3	12.8	15.6	18.6	21.0
40–50°S	1	14.4	14.1	12.2	9.2	6.0	3.5	3.1	4.2	6.3	8.9	11.1	13.2
	2	14.4	14.1	12.2	9.2	6.0	3.5	3.1	4.2	6.3	8.9	11.1	13.2
50–60°S	1	9.7	9.4	8.1	6.0	3.1	1.3	0.8	1.8	3.5	5.8	7.3	8.9
	2	9.7	9.4	8.1	5.9	3.1	1.3	0.8	1.7	3.5	5.7	7.3	8.9

модельных и фактических значений анализируемых климатических параметров достаточно хорошо согласуются друг с другом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотренный метод моделирования величин месячных осадков и среднемесячных приземных температур воздуха позволяет генерировать статистически адекватные исходным данным ряды этих климатических характеристик. Так как при реализации предложенного алгоритма в каждой ячейке рассматриваемого пространственного разрешения на основе используемого архива климатических данных строятся эмпирические функции распределения этих климатических параметров, то генерируемые ряды климатических характеристик жестко привязаны к исходному множеству данных. По этой причине, при использовании в качестве исходных фактических данных иного архива результаты моделирования изменятся и степень этого отличия будет зависеть от величины отличия между новыми данными и данными первоначально используемого архива.

Предложенный метод моделирования величин месячных осадков и среднемесячных приземных температур воздуха не связан с конкретным пространственным разрешением исходного архива метеорологических данных. Этот факт позволяет нам сделать предположение об успешном приме-

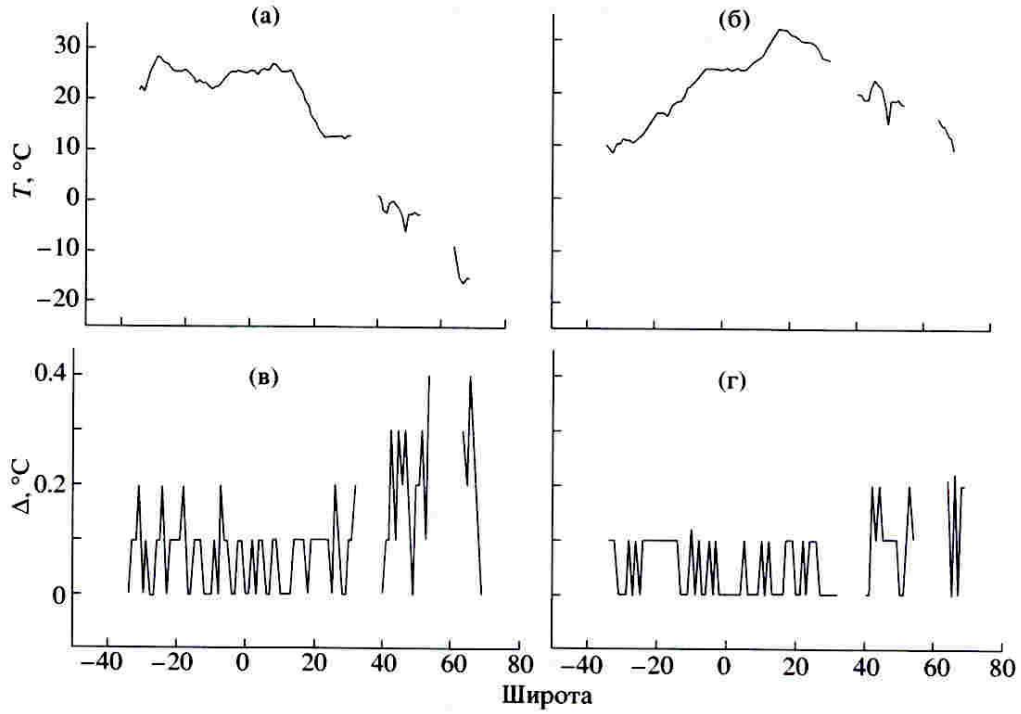


Рис. 1. Сравнение фактических и модельных значений температур для территории суши вдоль меридиана 20° Е: а – средняя температура января (T) за период 1901–1995 гг.; б – средняя температура июля (T) за период 1901–1995 гг.; в – абсолютное отклонение (Δ) средней температуры января (за период 1901–1995 гг.) от средней температуры января, оцененной по выборке из 95 сгенерированных значений; г – абсолютное отклонение (Δ) средней температуры июля (за период 1901–1995 гг.) от средней температуры июля, оцененной по выборке из 95 сгенерированных значений.

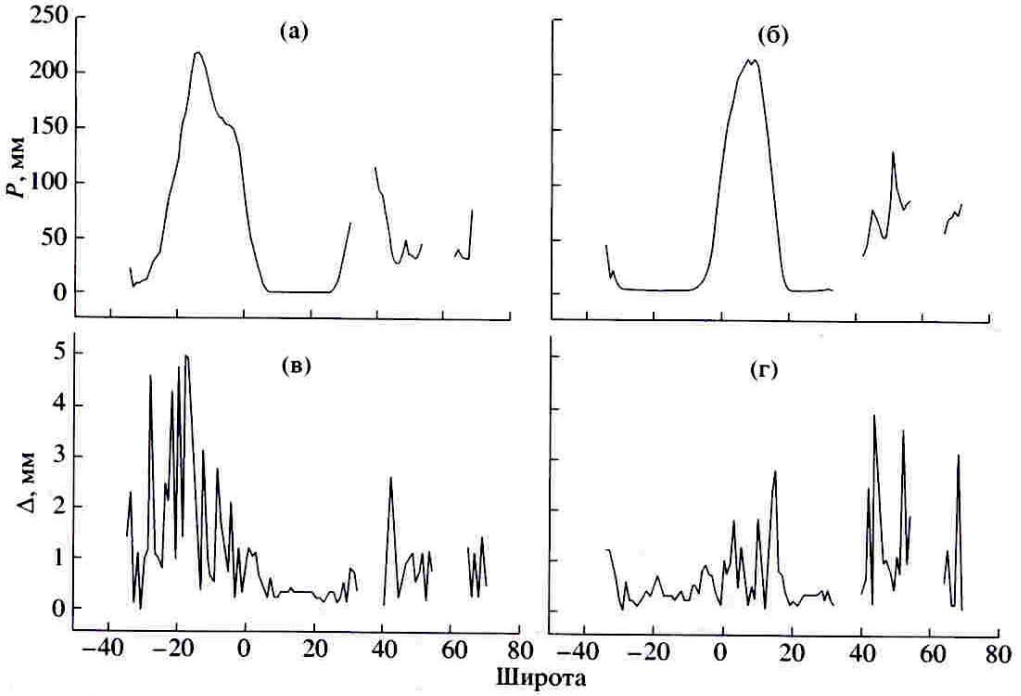


Рис. 2. Сравнение фактических и модельных значений осадков для территории суши вдоль меридиана 20° Е: а – среднее количество осадков января (P) за период 1901–1995 гг.; б – среднее количество осадков июля (P) за период 1901–1995 гг.; в – абсолютное отклонение (Δ) среднего количества осадков января (за период 1901–1995 гг.) от среднего количества осадков января, оцененного по выборке из 95 сгенерированных значений; г – абсолютное отклонение (Δ) среднего количества осадков июля (за период 1901–1995 гг.) от среднего количества осадков июля, оцененного по выборке из 95 сгенерированных значений.

Таблица 3. Статистические характеристики фактического (1) и модельного (2) распределений годовых осадков (P, мм) и среднегодовых температур воздуха (T, °C)

Диапазон широт	Данные	Среднее		Нижняя квартиль		Медиана		Верхняя квартиль	
		P	T	P	T	P	T	P	T
75–70°N	1	326.4	–15.4	310.2	–16.0	330.9	–15.4	342.0	–14.7
	2	321.8	–15.4	307.5	–15.9	320.4	–15.4	334.6	–14.9
70–60°N	1	411.1	–8.3	379.2	–9.1	410.7	–8.3	439.6	–7.5
	2	408.7	–8.4	379.5	–8.9	406.3	–8.4	435.5	–7.8
60–50°N	1	572.8	–0.6	528.1	–1.3	571.9	–0.6	614.8	0.1
	2	571.1	–0.7	527.8	–1.2	568.2	–0.7	611.4	–0.1
50–40°N	1	531.8	5.5	480.6	4.9	528.3	5.5	578.8	6.1
	2	530.5	5.5	481.9	5.0	526.6	5.5	574.8	5.9
40–30°N	1	517.2	11.7	460.7	11.2	512.4	11.7	566.6	12.1
	2	516.6	11.7	461.1	11.4	510.4	11.7	565.6	12.0
30–20°N	1	547.8	21.7	495.1	21.4	541.9	21.7	594.4	22.0
	2	547.1	21.7	494.6	21.5	540.1	21.7	592.7	21.9
20–10°N	1	769.8	26.3	709.6	26.0	765.2	26.3	824.6	26.6
	2	768.6	26.3	708.6	26.1	760.9	26.3	821.6	26.5
10–0°N	1	1698.9	25.1	1606.1	24.9	1697.3	25.1	1779.8	25.4
	2	1698.4	25.1	1609.5	25.0	1691.4	25.1	1781.0	25.3
0–10°S	1	1908.5	24.9	1809.3	24.6	1914.2	24.9	1995.4	25.2
	2	1907.2	24.9	1813.2	24.8	1900.7	24.9	1994.5	25.0
10–20°S	1	1122.9	22.9	1034.7	22.5	1120.4	22.9	1199.0	23.3
	2	1123.4	22.9	1033.3	22.7	1114.1	22.9	1203.5	23.1
20–30°S	1	572.3	20.4	496.7	20.0	560.8	20.4	634.2	20.9
	2	574.6	20.4	501.8	20.2	562.9	20.4	635.1	20.6
30–40°S	1	583.4	15.8	507.7	15.4	575.1	15.8	647.3	16.2
	2	585.1	15.8	514.6	15.5	575.5	15.8	646.2	16.0
40–50°S	1	829.1	8.9	760.6	8.5	817.4	8.9	884.8	9.2
	2	829.3	8.8	767.5	8.6	822.2	8.8	885.2	9.1
50–60°S	1	510.0	5.5	448.8	5.2	496.9	5.4	559.7	5.8
	2	510.1	5.4	461.0	5.2	503.7	5.4	552.7	5.6

нении описанного метода для генерирования рядов рассматриваемых климатических характеристик на основе исходных данных с другим пространственным разрешением.

Анализ таких статистических характеристик, как средние значения, медианы, нижняя и верхняя квартили для распределений годовых осадков и среднегодовых температур воздуха, полученных на основе месячных значений соответствующих величин, показывает, что распределение модельных и фактических значений исследуемых климатических параметров достаточно хорошо согласуется друг с другом. Из этого анализа следует, что используемый метод восстанавливает в некотором приближении регулярный годовой ход температур и осадков.

ВЫВОДЫ

Предложенный нами стохастический генератор величин месячных осадков и среднемесячных приземных температур воздуха априори не связан с какими-либо определенными типами распределения этих величин. Получаемые с помощью рассмотренного метода моделирования значения месячных осадков и среднемесячной температуры воздуха хо-

рошо согласуются с фактическими данными этих климатических параметров.

Статистический анализ результатов моделирования показал, что предположение о равномерном распределении маловероятных значений рассматриваемых климатических параметров вполне допустимо в рассматриваемой задаче. В то же время мы считаем, что для получения более точных генерируемых рядов исследуемых климатических характеристик нужны дальнейшие исследования в этом направлении.

Приведенные оценки свидетельствуют о надежности предложенного метода моделирования и о целесообразности его использования для создания модельных временных рядов климатических параметров по имеющимся данным наблюдений.

Следует отметить, что эмпирические функции распределения для моделирования строятся на основе данных за период 1901–1995 гг. и отражают изменчивость климата именно за этот период. Для ряда исследований большой интерес представляет построение и анализ эмпирических функций распределения рассматриваемых климатических параметров для некоторых конкретных периодов, например, таких как похолодание 60-х годов, современное потепление. Предложенный нами метод жестко не ограничен какими-либо временными рамками на исходные данные, поэтому описанную нами методику можно применять и в указанных исследованиях.

Данная работа выполнена при поддержке Ассоциации международных научных инициатив по окружающей среде (AIRIES, Япония, проект 00-K1-11).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Арпе К., Бенгтссон Л., Голицын Г.С., Ефимова Л.К., Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч.* Анализ изменений гидрологического режима на водосборе Ладожского озера и стока Невы в XX и XXI веках с помощью глобальной климатической модели // Метеорология и гидрология. 2000. № 3. С. 5–13.
2. *Мануйлова Н.И., Мохов И.И., Петухов В.К.* Оценка влияния характеристик гидрологического цикла на чувствительность глобального климата к антропогенным воздействиям // Метеорология и гидрология. 1992. № 8. С. 44–51.
3. *Williams J.R., Nicks A.D., Arnold J.G.* Simulator for water resources in rural basins // J. Hydraulic Engineering. 1985. V.111. P. 970–986.
4. *Логофет Д.О., Голубятников Л.Л., Денисенко Е.А.* Неоднородные марковские модели сукцессии растительности: новые перспективы старой парадигмы // Изв. РАН. Сер. биол. 1997. № 5. С. 613–622.
5. *Kittel T.G.F., Rosenblood N.A., Painter T.H., Schimel D.S.* VEMAP Modeling Participants. The VEMAP integrated database for modeling United States ecosystem/vegetation sensitivity to climate change // J. Biogeog. 1995. V. 22. P. 857–862.
6. *Денисенко Е.А., Свирежев Ю.М., Чевелев К.В.* Локальная оценка урожайности зерновых культур при изменении климата: концепция риска // Журн. общ. биологии. 1995. Т. 56. № 1. С. 118–124.
7. *Dubrovsky M., Zalud Z., Stastna M.* Sensitivity of CERES-Maize yields to statistical structure of daily weather series // Clim. Change. 2000. V. 46. P. 447–472.
8. *Mearns L.O., Rosenzweig C., Goldberg R.* The effect of changes in daily and interannual climatic variability on CERES-Wheat: a sensitivity study // Clim. Change. 1996. V. 32. P. 257–292.
9. *Верещагин М.А., Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М.* О вероятных изменениях средней годовой температуры воздуха на востоке Русской равнины в конце текущего и начале XXI столетия // Метеорология и гидрология. 1996. № 8. С. 38–43.
10. *Dubrovsky M.* Creating daily weather series with use of the weather generator // Environmentrics. 1997. V. 8. P. 409–424.
11. *Hayhoe H.N.* Improvements of stochastic weather data generators for diverse climates // Clim. Res. 2000. V. 14. P. 75–87.
12. *Groisman P.Ya., Karl T.R., Easterling D.R., Knight R.W., Jamason P.F., Hennessy K.J., Suppiah R., Page C.M., Wibig J., Fortuniak K., Razuvaev V.N., Douglas A., Foerland E., Zhai P.M.* Changes in the probability of heavy precipitation: important indicators of climatic change // Clim. Change. 1999. V. 42. P. 243–283.
13. *Semenov V., Bengtsson L.* Secolar trends in daily precipitation characteristics: greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM. Hamburg: Max-Planck Inst. 2000. Report № 313. 2000. 47 p.
14. *Goloubiatnikov L.L.* Carbon sink function of terrestrial ecosystems: a mathematical method for modelling // Eco-Frontier Fellowship (EFF), Global Environment Research Found. 2001. P. 285–300.
15. *Yamagata Y., Alexandrov G.A.* Would forestation alleviate the burden of emission reduction? An assessment of the future carbon sink from ARD activities // Climate Policy. 2001. V. 1. P. 27–40.
16. *Wilks D.S.* Interannual variability and extreme-value characteristics of several stohastic daily precipitation models // Agric. For. Meteor. 1999. V. 93. P. 153–169.
17. *Richardson C.W.* Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation // Water Resour. Res. 1981. V. 17. P. 182–190.
18. *Racsko P., Szeidl L., Semenov M.* A serial approach to local stochastic weather models // Ecol. Model. 1991. V. 57. P. 27–41.
19. *Semenov M.A., Barrow E.M.* Use of a stochastic weather generator in the development of climatic change scenarios // Clim. Change 1997. V. 35. P. 397–414.
20. *Semenov M.A., Brooks R.J.* Spatial interpolation of LARS-WG stochastic weather generator in Great Britain // Clim. Res. 1999. V. 11. P. 137–148.

21. *Дроздов О.А., Васильев В.А., Кобышева Н.В., Раевский А.Н., Смекалова Л.К., Школьный Е.П.* Климатология. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 568 с.

22. *Briggs W.M., Wilks D.S.* Estimation monthly and seasonal distributions of temperature and precipitation using the new CPC long-range forecasts // J. Clim. 1996. V. 9. P. 818–826.

23. *Schubert S.* A weather generator based on the European "Grosswetterlagewn" // Clim. Res. 1994. V. 4. P. 191–202.

24. *Katz R.W.* Extreme value theory for precipitation: sensitivity analysis for climate change // Advances in Water Resources. 1999. V. 23. P. 133–139.

25. *Ison N.T., Feyerherm A.M., Bark L.D.* Wet period precipitation and the gamma distribution // J. Appl. Climatol. 1971. V. 10. P. 658–665.

26. *Wilks D.S.* Statistical methods in atmospheric science. New York: Academic Press. 1995. 468 p.

27. *Weaver C.P., Ramanathan V.* Relationships between large-scale vertical velocity, static stability and cloud radiative forcing over Northern Hemisphere extratropical oceans // J. Clim. 1997. V. 10. P. 2871–2887.

28. *New M., Hulme M., Jones P.* Representing twentieth century space-time climate variability. Pt 1: development of a 1901–1990 mean monthly terrestrial climatology // J. Clim. 1999. V. 12. P. 829–856.

29. *Полляк Ю.Г.* Вероятностное моделирование на электронных вычислительных машинах. М.: Советское Радио, 1971. 400 с.

Stochastic Generator of Monthly Precipitation and Monthly Average Temperature

© 2002 г. L. L. Golubyatnikov*, Y. Yamagata, and G. A. Aleksandrov***

** Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Pyzhevskii per. 3, Moscow, 109017 Russia*

*** National Institute for Environmental Studies, Onogawa 16-2, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan*

e-mail: golubll@dol.ru, golub@omega.ifaran.ru

Abstract—A method is proposed for simulating the monthly precipitation and monthly average temperature of air near the earth's surface. The proposed algorithm is based on the method of inverse functions. The climatic parameters used in simulations were derived from the UEA/CRU database. The method was applied to simulate time series of monthly precipitation and monthly average temperatures of air over a dry land territory with a spatial resolution of $0.5° \times 0.5°$ in latitude and longitude. The time series of the climatic parameters obtained with the proposed stochastic generator appear statistically adequate to actual data series for any time interval in months and years.