

М. С. Акентьева¹, В. А. Огородников¹, Н. А. Каргаполова^{1}*

Численная стохастическая модель совместных неоднородных пространственно-временных полей метеорологических параметров на Байкальской природной территории

¹ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: nkargapolova@sscc.ru

Аннотация. В статье представлена численная стохастическая модель совместных пространственно-временных полей температуры воздуха, вектора скорости ветра, балла облачности с трехчасовым разрешением и полусуточных сумм осадков на сети метеостанций, расположенных на Байкальской природной территории и в прилегающих к ней районах. Стохастический подход к моделированию такой комбинации метеопараметров для Байкальской природной территории и её окрестностей был применён впервые. Показано, что модель с достаточно высокой точностью воспроизводит основные статистические свойства реальных метеополей, в том числе учитывает их неоднородность по пространству и нестационарность по времени. Приведены примеры применения предложенной модели для оценки вероятностных характеристик редких и экстремальных метеорологических явлений. Представленная модель в дальнейшем может быть использована в климатических исследованиях при моделировании погодных сценариев с различными метеорологическими параметрами, для построения вероятностных прогнозов метеорологических и биоклиматических явлений.

Ключевые слова: стохастическое моделирование, стохастический «генератор погоды», Байкальская природная территория

M. S. Akenteva¹, V. A. Ogorodnikov¹, N. A. Kargapolova^{1}*

Numerical Stochastic Model of Joint Heterogeneous Spatio-temporal Fields of Meteorological Parameters on the Baikal Natural Territory

¹ Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: nkargapolova@sscc.ru

Abstract. The article presents a numerical stochastic model of joint spatio-temporal fields of air temperature, wind speed, cloud cover score with three-hour resolution and semi-daily precipitation at a network of weather stations located on the Baikal natural territory and in the adjacent areas. Stochastic approach to modeling such a combination of meteorological parameters for the Baikal natural territory and its environs was used for the first time. It is shown that the model reproduces the basic statistical properties of real meteorological fields with sufficiently high accuracy; it also takes into account their spatial heterogeneity and temporal non-stationarity. Several examples of application of the proposed model to assess the probabilistic characteristics of rare and extreme weather events are given. The presented model can later be used in climate studies when modeling weather scenarios with various meteorological parameters, to construct probabilistic forecasts of meteorological and bioclimatic phenomena.

Keywords: stochastic modeling, stochastic “weather generator”, Baikal natural territory

Введение

В качестве численной стохастической модели реального многомерного метеорологического процесса на сети метеостанций или на некоторой пространственно-временной сетке можно использовать ансамбль реализаций векторной случайной функции дискретных аргументов, которая обладает рядом свойств близких к свойствам реального процесса. В литературе модели такого типа часто называют стохастическими «генераторами погоды». В качестве входных характеристик модели реального метеорологического поля можно использовать, например, зависящие от пространственных и временных координат функции одномерных распределений метеорологических параметров и их совместную корреляционную матрицу.

В данной статье представлен «генератор погоды», предназначенный для моделирования пространственно-временных полей температуры воздуха, вектора скорости ветра, балла облачности с трехчасовым разрешением и полусуточных сумм осадков на сети метеостанций, расположенных на Байкальской природной территории и в прилегающих к ней районах. Приведены результаты верификации предложенной стохастической модели и примеры её применения для оценки вероятностных характеристик редких и экстремальных метеорологических явлений. Представленная модель в дальнейшем может быть использована в климатических исследованиях при моделировании погодных сценариев с различными метеорологическими параметрами, для построения вероятностных прогнозов метеорологических и биоклиматических явлений.

Исходные данные, использованные при построении модели

В статье представлен стохастический «генератор погоды», позволяющий численно моделировать совместные пространственно-временные поля приземной температуры воздуха, компонент скорости ветра, балла облачности с трёхчасовым разрешением и полусуточных осадков на сети метеостанций. Входные параметры «генератора» определяются на основе данных наблюдений в период с 1990 по 2022 г. на метеостанциях [1]. В базе данных [1] содержатся данные многолетних наблюдений на сети из 42 метеостанций, расположенных на Байкальской природной территории и в прилегающих к ней районах. На рис. 1 обозначено расположение метеостанций. Разработанная стохастическая модель позволяет варьировать число используемых метеостанций, и, соответственно, проводить моделирование как для отдельных частей Байкальской природной территории, так и для всей территории в целом.

Отметим, что в метеоданных содержатся сведения о модуле скорости ветра W м/с и его направлении φ , указываемого в румбах, а моделируются значения ортогональных компонент (u, v) вектора скорости ветра. Преобразование данных проводится по формулам $u = W \cos \tilde{\varphi}^o$, $v = W \sin \tilde{\varphi}^o$, где $\tilde{\varphi}^o = 0.08889\varphi$.

вектор-столбец, где $T_{j,i}^k, A_{j,i}^k, u_{j,i}^k, v_{j,i}^k$ – значения температуры воздуха, балла облачности и ортогональных компонент вектора скорости ветра в j -ый срок измерений ($j = 1, 2, \dots, 8$) в i -ый день ($i = 1, 2, \dots, D$) на k -ой метеостанции ($k = 1, 2, \dots, S$), а $P_{1,i}^k$ и $P_{2,i}^k$ – количество выпавших осадков за первую и вторую половину i -ых суток на k -ой метеостанции, соответственно. Вектор $\vec{\xi}_i^k$ состоит из $C = 34$

компонент. Обозначим также $\vec{\xi}_i = \left(\vec{\xi}_i^1, \vec{\xi}_i^2, \dots, \vec{\xi}_i^S \right)^T$ и

$\vec{\xi} = \left(\left(\vec{\xi}_1 \right)^T, \dots, \left(\vec{\xi}_D \right)^T \right)^T$ вектор-столбец значений рассматриваемых метеопараметров на всех метеостанциях во все сроки измерений в i -ый день и вектор-столбец значений рассматриваемых метеопараметров на всех метеостанциях во все сроки измерений во все дни, соответственно. Необходимо смоделировать вектор $\vec{\xi}$ со статистическими свойствами, близкими к свойствам реального метеопроцесса.

В качестве входных параметров модели вектора $\vec{\xi}$ будут использованы функции (или соответствующие им плотности) распределения всех компонент вектора и его корреляционная матрица.

Как показал статистический анализ, для относительно коротких временных интервалов (порядка 11-13 дней) можно использовать предположение о том, что последовательность векторов $\vec{\xi}_i, i = 1, 2, \dots, D$ является стационарной. В этом случае корреляционная матрица R вектора $\vec{\xi}$ – блочно-тёплицева с несимметричными нетёплицевыми блоками размерности $S \cdot C$. Размерность матрицы R – $(D \cdot S \cdot C) \times (D \cdot S \cdot C)$. Элементы матрицы R оценивались по данным метеонаблюдений. При необходимости, проводилась регуляризация матрицы тем же способом, что использован в [3].

В силу использованного предположения о стационарности последовательности векторов $\vec{\xi}_i, i = 1, 2, \dots, D$, одномерные распределения метеопараметров $T_{j,i}^k, A_{j,i}^k, u_{j,i}^k, v_{j,i}^k, P_{j,i}^k$ есть функции j и k , и не зависят от i . Зависимость распределений от k обеспечивает учёт моделью пространственной неоднородности реальных метеопроцессов.

Для аппроксимации эмпирической функции одномерного распределения температуры, и компонент вектора скорости ветра, как и в работе [3], были использованы смеси 2 нормальных распределений. Параметры смеси выбирались по алгоритму, предложенному в [4]. Этот алгоритм основан на комбинации метода моментов и минимизации специального функционала, характеризующего отклонение аппроксимирующего распределения от выборочного. Как и в работе [3], аппроксимация функций одномерного распределения осадков проводится с помощью комбинации кусочно-линейной функции и специальной нелинейной

функции для аппроксимации хвоста. Как указано выше, балл облачности – дискретная случайная величина, принимающая целые значения в интервале от 0 до 10. В качестве функции одномерного распределения этого метеопараметры для каждой k -ой метеостанции ($k = 1, 2, \dots, S$) и каждого срока j ($j = 1, 2, \dots, 8$) использовалась эмпирическая функция распределения, оцененная по реальным данным.

Численная реализация модели, т.е. построение траекторий вектора $\vec{\xi}$ с корреляционной матрицей R и вышеуказанными функциями одномерных распределений, осуществлялась с помощью итерационного алгоритма, предложенного в [5].

Верификация модели и примеры её применения для оценки статистических свойств редких и экстремальных метеоявлений

Верификация предложенного стохастического «генератора погоды» проводилась путём сравнения оценок различных статистических характеристик рассматриваемого метеопроцесса по реальным (РД) и модельным данным (МД). Ниже в табл. 1 – 4 приведено несколько примеров характеристик, использованных для верификации. Для всех оценок по РД приведены значения среднеквадратического отклонения σ оценки по использованному объёму реальной выборки. Для оценок по МД использовалось 10^5 модельных траекторий. Отметим, что для верификации использовалась та же выборка РД, по которой оценивались входные параметры модели. Это позволяет проверить, обладает ли модельный процесс, а точнее модельная выборка, статистическими свойствами, близкими к свойствам реальной выборки. По построению модели, гарантируется только близость одномерных распределений метеопараметров и коэффициентов корреляции между ними. Все нижеприведённые результаты получены при моделировании на интервале длительностью $D = 10$ дней на всех $S = 42$ станциях.

Проведённая верификация показала, что модельная выборка обладает статистическими свойствами, близкими к свойствам реальной выборки (для подавляющего большинства проведённых оценок, разница между оценками по реальным и модельным выборкам не превышает σ). В связи с этим, можно считать, что построенная в рамках проекта модель с достаточно высокой точностью воспроизводит вероятностные свойства реального пространственно-временного поля метеорологических параметров. Из табл. 1 – 4 видно, что модель успешно воспроизводит пространственную неоднородность, характерную для реального метеорологического поля.

Модель была применена для оценки вероятностных характеристик редких или экстремальных метеоявлений. Получить достоверные оценки таких характеристик по реальным данным не представляется возможным из-за малого объёма РД. Ниже на рис. 2 – 3 приведено несколько примеров полученных оценок.

Таблица 1

Оценки вероятности $P_1(l)$ того, что с 1 по 10 февраля температура воздуха на трёх указанных метеостанциях минимум в течение суток была не выше $l^\circ\text{C}$

$l^\circ\text{C}$	Иркутск, Хомутово и Большое Голоустное		Баргузинский заповедник, Баргузин и Усть-Баргузин	
	РД, $P_1(l) \pm \sigma$	МД	РД, $P_1(l) \pm \sigma$	МД
-18	0.090±0.028	0.063	0.235±0.056	0.213
-16	0.132±0.039	0.118	0.356±0.066	0.348
-14	0.201±0.053	0.213	0.549±0.070	0.510
-12	0.294±0.063	0.344	0.680±0.065	0.653
-10	0.524±0.066	0.501	0.792±0.057	0.765

Таблица 2

Оценки вероятности P_2 того, что с 20 по 29 июня в течение суток осадки на метеостанции отсутствовали или наблюдались следы осадков

Метеостанция	РД, $P_2 \pm \sigma$	МД
Червянка	0.612±0.035	0.594
Тайшет	0.529±0.033	0.497
о. Большой Ушканий	0.702±0.036	0.680
Цакир	0.459±0.035	0.427
Борзя	0.699±0.035	0.672

Таблица 3

Оценки вероятности $P_3(a,b)$ того, что балл облачности в течение 4 измерений подряд и осадки за эти полусутки больше или равны a и b мм, соответственно

a	b	Бабушкин, 1-10 февраля		Бабушкин, 20-29 июня	
		РД, $P_3(a,b) \pm \sigma$	МД	РД, $P_3(a,b) \pm \sigma$	МД
1	0.1	0.178±0.021	0.174	0.300±0.025	0.300
1	0.5	0.100±0.017	0.098	0.236±0.023	0.237
1	1.0	0.047±0.012	0.047	0.181±0.021	0.181
4	0.1	0.167±0.019	0.138	0.295±0.024	0.258
4	0.5	0.097±0.015	0.079	0.236±0.022	0.205
4	1.0	0.044±0.011	0.039	0.181±0.019	0.158

Заключение

Представленный «генератор погоды» успешно прошел верификацию. Он воспроизводит широкий класс статистических свойств реального совместного поля метеорологических параметров, включая его пространственную неоднородность.

Таблица 4

Оценки вероятности P_4 того, что в течение 4 измерений подряд на метеостанции будет пасмурно (балл облачности больше или равен 8).

Метеостанция	1-10 февраля		20-29 июня	
	РД, $P_4 \pm \sigma$	МД	РД, $P_4 \pm \sigma$	МД
Нижеудинск	0.343 ± 0.038	0.306	0.324 ± 0.033	0.325
Ершово	0.323 ± 0.032	0.303	0.364 ± 0.031	0.335
Киренск	0.597 ± 0.042	0.565	0.573 ± 0.041	0.537
Мамакан	0.803 ± 0.039	0.772	0.697 ± 0.036	0.659
Орлинга	0.391 ± 0.037	0.358	0.425 ± 0.034	0.404
Нижеангарск	0.399 ± 0.036	0.367	0.348 ± 0.033	0.323
Карам	0.340 ± 0.030	0.323	0.421 ± 0.034	0.406

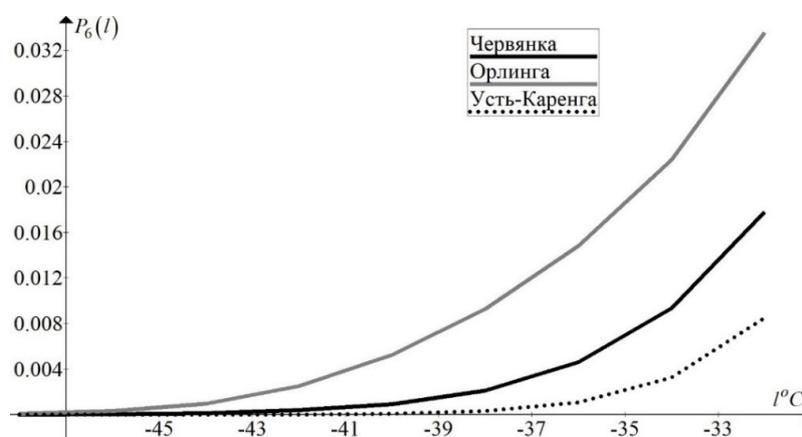


Рис. 2. Оценки вероятности $P_6(l)$ того, что в интервале с 1 по 10 февраля хотя бы в течение одних суток температура воздуха была ниже $l^\circ\text{C}$

Что касается перспектив дальнейшего развития и применения этого «генератор погоды», мы видим 2 основных направления. Во-первых, применяя техники пространственной и пространственно-временной интерполяции, полученные траектории поля на сети метеостанций можно преобразовать в траектории пространственно-временных полей на произвольных сетках. Используя теорию условных случайных процессов, можно получать вероятностный прогноз для моделируемых полей.

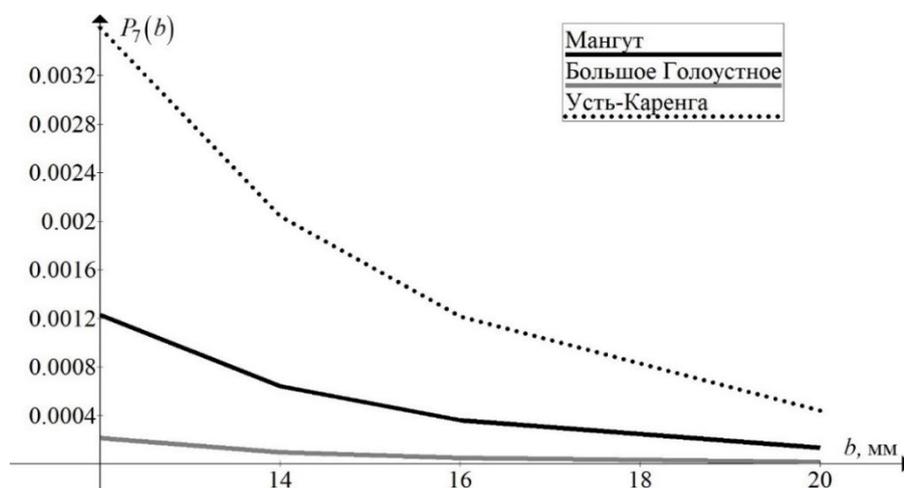


Рис. 3. Оценки вероятности $P_7(b)$ того, что в интервале с 20 по 29 июня хотя бы в течение одних суток количество выпавших осадков превышает b мм

Второе перспективное направление применения, рассмотренного «генератор погоды» – моделирование полей различных биоклиматических индексов. Так, например, по модельным траекториям температуры воздуха и скорости ветра можно вычислить модельные значения индекса холодного стресса, а добавив в «генератор погоды» моделирование поля относительной влажности можно получить значения эквивалентно-эффективной температуры. Варьируя параметры «генератор погоды» можно исследовать зависимость различных характеристик полей биоклиматических индексов от этих параметров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549, <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных>
2. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 3. Часть I. Метеорологические наблюдения на станциях. Л. Гидрометеиздат. – 1985.
3. Akenteva M.S., Kargapolova N.A., Ogorodnikov V.A. Development of a numerical stochastic model of joint spatio-temporal fields of weather parameters for the south part of the Baikal natural territory. Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2022. – Vol. 37. – No 2. – P. 73-83. DOI 10.1515/rnam-2022-0006
4. Марченко А.С., Минакова Л.А. Вероятностная модель временных рядов температуры воздуха // Метеорология и гидрология. - 1982. - №3 С. 39-47.
5. Zheng Z., Dai H., Wang Y., Wang W. A sample-based iterative scheme for simulating non-stationary non-Gaussian stochastic processes. Mechanical Systems and Signal Processing. – 2021. - Vol.151. - 107420. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107420>.

© М. С. Акентьева, В. А. Огородников, Н. А. Каргаполова, 2024