

Динамико-стохастическое моделирование формирования снежного покрова на Европейской территории России

© 2014 г. А. Н. Гельфан, В. М. Морейдо

Институт водных проблем РАН, Москва
hydrowpi@aquas.laser.ru

Dynamic-stochastic modeling of snow cover formation on the European territory of Russia

A.N. Gelfan, V.M. Moreido

Institute of Water Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow

Статья принята к печати 23 января 2014 г.

Генератор погоды, динамико-стохастическое моделирование, снежный покров.

Dynamic-stochastic modeling, snow cover, weather generator.

Разработана динамико-стохастическая модель, компоненты которой – детерминистическая модель формирования снежного покрова и стохастические модели временных рядов входных метеорологических величин (стохастический генератор погоды). Детерминистическая модель формирования снежного покрова описывает изменения во времени толщины снега, содержания льда и талой воды в нём, процессы снеготаяния, сублимации и замерзания талой воды в толще снега. Калибровка модели по данным многолетних наблюдений за снежным покровом на 36 метеорологических станциях на Европейской территории России позволила получить адекватные результаты по воспроизведению запасов воды в снежном покрове и толщины снега. Разработан стохастический генератор погоды (NEsted Weather Generator, NEWGen) для моделирования методом Монте-Карло многолетних временных рядов среднесуточных значений температуры воздуха, осадков и влажности воздуха, которые представляют собой входные переменные детерминистической модели. Для оценки параметров и проверки стохастического генератора погоды использованы данные многолетних наблюдений на метеорологических станциях Европейской территории России. Тысячелетние ряды метеорологических величин, сгенерированные методом Монте-Карло, задавались в качестве «входов» в модель формирования снежного покрова, с помощью которой рассчитывались ряды толщины снега и снеготолщин и оценивались их вероятностные характеристики. Получено удовлетворительное соответствие статистических параметров, определённых по фактическим и рассчитанным рядам характеристик снежного покрова.

A dynamic-stochastic model, which combines a deterministic model of snow cover formation with a stochastic weather generator, has been developed. The model showed good performance in simulating time series of the snow water equivalent and snow depth. A disaggregation procedure has been proposed for transforming parameters of the annual weather generator into the parameters of the monthly one and, subsequently, into the parameters of the daily generator. Multi-year time series of the simulated daily weather variables have been used as an input to the snow model. The described model has been applied to different landscapes of European Russia, from steppe to taiga regions, to show the robustness of the proposed technique.

Введение

Многолетняя изменчивость снеготолщин в значительной степени определяет режим стока крупнейших рек Северного полушария, влияет на многолетние вариации запасов почвенной влаги и испарения в бассейнах этих рек, вносит вклад в динамику климатической системы. Всё это позволяет считать исследования физических механизмов временной изменчивости снеготолщин и их вероятностных свойств одной из актуальных проблем гидрометеорологии и климатологии. Совершенствование методов оценки вероятностных характеристик снеготолщин имеет большое значение при решении проблем инженерной гляциологии, связанных с расчётами снеготолщин на строительные конструкции для большей части территории России.

Применяемые в отечественной практике методы расчётов основаны на статистической обработке данных снеготолщинных измерений и определении расчётных снеготолщин по снеготолщинам малой вероятности превышения, полученных путём экстраполяции кривых распределения снеготолщин в

область редкой повторяемости [7]. При имеющейся продолжительности снеготолщинных наблюдений на большинстве гидрометеорологических станций (ГМС) России такие методы не обеспечивают получения надёжных оценок снеготолщинных нагрузок. Кроме того, при принятой частоте стандартных снеготолщинных измерений (раз в декаду) определённые по ним значения максимальных снеготолщинных запасов в отдельные годы были заметно занижены. Наконец, традиционный подход основан на гипотезе стационарности рядов наблюдений, которая может нарушаться при изменении условий формирования снежного покрова в результате климатических изменений, что ещё больше увеличивает неопределённость полученных оценок.

Для крупных речных бассейнов межгодовая изменчивость максимальных снеготолщинных запасов – результат сложного взаимодействия региональных климатических процессов и физико-географических особенностей формирования снежного покрова (характера рельефа, растительности). Перспективы для исследования этого взаимодействия и оценки вероятност-



Рис. 1. Расположение метеорологических станций, данные наблюдений которых использованы для апробации модели:

1 – метеорологические станции; 2 – граница бассейна р. Волга

Fig. 1. Location of the meteorological stations used for simulations:

1 – meteorological stations; 2 – Volga river basin boundary

ных характеристик максимальных снегозапасов связаны с применением динамико-стохастических моделей со случайными «входами», учитывающими вероятностную природу метеорологических процессов и физические (детерминистические) механизмы формирования снежного покрова.

В рамках настоящего исследования авторами разработана динамико-стохастическая модель формирования снежного покрова, состоящая из двух основных компонент: 1) физико-математической модели, описывающей физические механизмы формирования снежного покрова и снеготаяния в разных физико-географических и климатических условиях; 2) стохастического «генератора погоды» для моделирования многолетних рядов суточных значений метеорологических переменных. С помощью динамико-стохастической модели рассчитаны многолетние временные ряды максимальных снегозапасов и толщины снега разной обеспеченности на территории Европейской территории России. Используемая в работе методология динамико-стохастического моделирования ранее была разработана применительно к ис-

следованию вероятностных характеристик речного стока и рассмотрена в работах [4, 5].

Методика исследования

Для разработки динамико-стохастической модели формирования снежного покрова использовались следующие метеорологические параметры, полученные на 36 ГМС (рис. 1): среднесуточные значения температуры и относительной влажности воздуха, а также суточные суммы осадков. Источниками данных служили архивы ВНИИГМИ-МЦД Росгидромета и Всемирной метеорологической организации [2, 9]. Наблюдения охватывают период 1880–2009 г.; продолжительность рядов наблюдений варьирует от 52-х до 129 лет. Данные измерений снегозапаса и толщины снега для указанных станций взяты из базы данных декадных снегомерных наблюдений, разработанной совместно Институтом географии РАН и Центром изучения снега и льда Университета Колорадо (США) [9], а также из массива данных «Маршрутные снегомерные съёмки» архива ВНИИГМИ-МЦД [3]. Они охватывают период с

1966 по 2009 г.; продолжительность рядов наблюдений колеблется от восьми до 4-х лет.

Физико-математическая модель формирования снежного покрова

Изменения толщины и плотности снежного покрова от начала его формирования до окончания весеннего снеготаяния рассчитываются с учётом поступления твёрдых и жидких осадков, фазовых переходов в толще снега, задержания талой воды, уплотнения снега под действием собственной массы и определяются с помощью следующих уравнений [6]:

$$\frac{dH_s}{dt} = \rho_w \left[X_s \rho_0^{-1} - (S + E_s)(\rho_i i_s)^{-1} \right] - V;$$

$$\frac{d}{dt}(\rho_i i_s H_s) = \rho_w (X_s - S - E_s) + S_i;$$

$$\frac{d}{dt}(\rho_w w_s H_s) = \rho_w (X_l + S - E_l - R_s) - S_i,$$

где ρ_w , ρ_i и ρ_0 – соответственно плотности воды, льда и свежес выпавшего снега; X_s и X_l – соответственно интенсивности твёрдых и жидких осадков; S – интенсивность снеготаяния; E_s – интенсивность сублимации (возгонки) снежного покрова; E_l – интенсивность испарения жидкой воды из снежного покрова; V – интенсивность уплотнения снега под действием собственной массы; H_s – толщина снежного покрова; i_s и w_s – соответственно объёмное содержание льда и жидкой воды в снегу; S_i – интенсивность образования льда при замерзании талой воды в снегу; R_s – интенсивность водоотдачи снежного покрова, t – время.

Интенсивность снеготаяния считается пропорциональной положительной температуре воздуха $T_a > 0^\circ\text{C}$ и рассчитывается с использованием эмпирического коэффициента стаивания k_s по формуле

$$S = \begin{cases} k_s T_a, & T_a > 0^\circ\text{C} \\ 0, & T_a \leq 0^\circ\text{C} \end{cases}$$

Коэффициент стаивания k_s – эмпирический параметр, диапазон значений которого для различных типов подстилающей поверхности (лес, поле и т.д.) приведён в литературе (например [1]). Значение этого коэффициента уточняется в процессе калибровки модели. Интенсивность фазовых переходов при замерзании талой воды в снегу определяется по формуле

$$S_i = \begin{cases} k_s^* \sqrt{|T_a|}, & T_a < 0^\circ\text{C} \wedge \theta_s > 0 \\ 0, & T_a \geq 0^\circ\text{C} \vee \theta_s = 0 \end{cases}$$

где k_s^* – эмпирический коэффициент, принимаемый численно равным коэффициенту стаивания.

Суммарное испарение снежного покрова $E_{sl} = E_s + E_l$ считается пропорциональным среднесуточному дефициту влажности воздуха d_a , т.е. $E_{sl} = k_E d_a$, где k_E – эмпирический коэффициент, который уточняется в процессе калибровки модели. Доля сублимации E_s и испарения жидкой фазы E_l определяется в зависимости от содержания льда и незамёрзшей влаги в снегу по следующим выражениям:

$$E_s = \frac{\rho_i i_s}{\rho_s} E_{sl} = k_E d_a \frac{\rho_i i_s}{\rho_s};$$

$$E_l = \frac{\rho_w w_s}{\rho_s} E_{sl} = k_E d_a \frac{\rho_w w_s}{\rho_s},$$

где ρ_s – плотность снежного покрова, равная $\rho_s = \rho_i i_s + \rho_w w_s$.

Водоотдача снежного покрова начинается после превышения количества талой воды и соответственно величины водоудерживающей способности снега w_{max} . ● на определяется как

$$R_s = X_l + S - E_l - w_{max} (dH_s/dt),$$

где $w_{max} = 0,11 - 0,11 \frac{\rho_s}{\rho_w}$.

Интенсивность уплотнения снега под действием собственной массы V (см/час) вычисляется по формуле

$$V = 0,01 \rho_s \exp(0,08 T_a - 21 \rho_s) H_s^2,$$

где плотность и толщина снежного покрова выражены соответственно в г/см³ и см.

Модель, основанная на численном решении этих уравнений, реализована и использовалась в течение длительного времени для расчёта характеристик снежного покрова при моделировании формирования талого стока. Структура модели, алгоритм её численной реализации, методы задания параметров и обзор результатов испытания модели по данным метеорологических и снегомерных наблюдений в разных природных условиях подробно рассмотрены в работе [4]. Модель имеет два калибровочных параметра – коэффициенты стаивания и испарения с поверхности снежного покрова, которые оценивались минимизацией среднеквадратической погрешности расчёта снегозапасов и толщины снега для каждой из 36 станций. На рис. 2 в качестве примера показаны результаты расчёта ежедневных значений снегозапасов по данным наблюдений на ГМС Сыктывкар, а на рис. 3 даны результаты расчёта среднемноголетних значений максимальных в году снегозапасов для каждой станции.

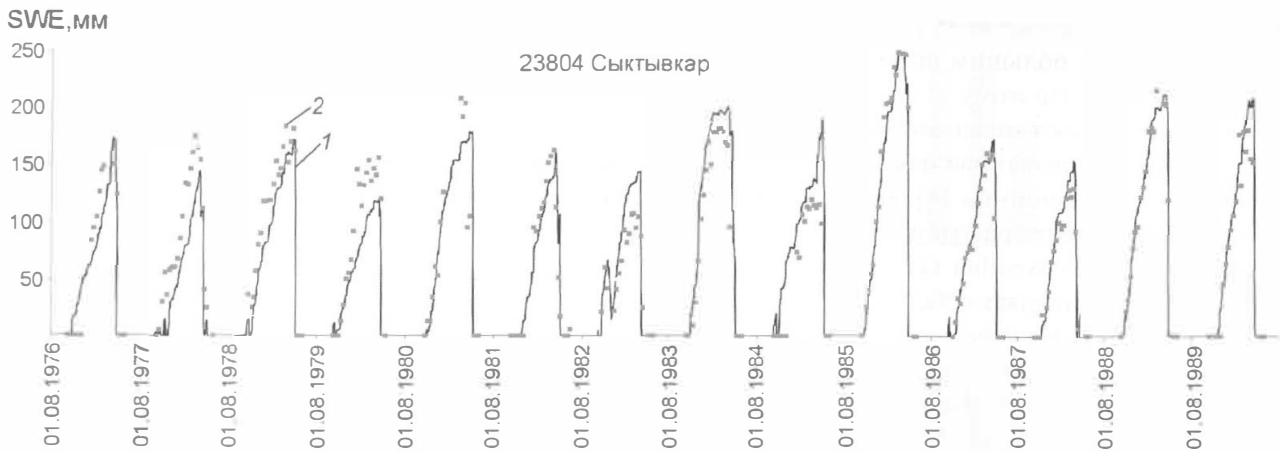


Рис. 2. Сопоставление смоделированных (1) и фактических (2) ежедневных снегозапасов SWE
 Fig. 2. Comparison of the modelled (1) and observed (2) snow water equivalent SWE

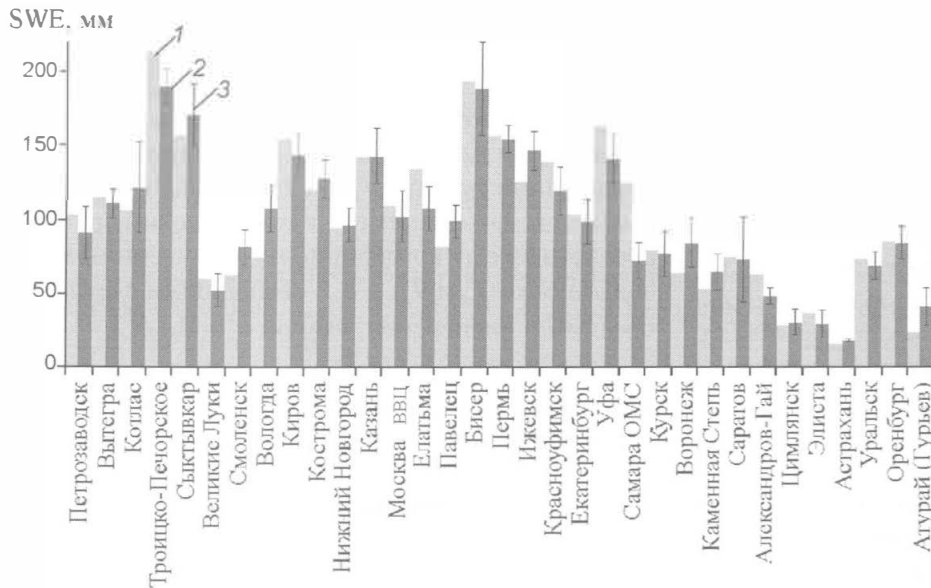


Рис. 3. Сопоставление фактической (2) и рассчитанной (1) норм максимальных снегозапасов; 3 – граница выборочной погрешности оценки среднего по фактическому ряду
 Fig. 3. Comparison of the observed (2) and simulated (1) maximum mean SWE; 3 – sample standard deviation is shown for the observed mean value

Качество моделирования оценивалось по отношению среднеквадратической погрешности расчёта снегозапасов (S) к среднеквадратической изменчивости фактических снегозапасов (σ). Чем меньше отношение S/σ , тем выше качество расчётов. При $S/\sigma \geq 1$ точность расчёта неудовлетворительная. Анализ полученных результатов показал, что для большинства станций получены удовлетворительные результаты расчёта характеристик снежного покрова по критерию S/σ . Среднее значение этого критерия получилось равным 0,6, при этом на 55% станций его значения не превышали 0,7. Не удалось получить удовлетворительные результаты лишь для одной ГМС – Атурай (Гурьев), на которой, как показал анализ данных, возможны высокие погрешности снегомерных измерений.

Стохастический генератор погоды

«Генератор погоды» – название разработанной К. Ричардсоном [10] стохастической модели WGEN (Weather Generator), описывающей совместный временной ход нескольких среднесуточных метеорологических величин. Термин «генератор погоды» стал нарицательным и сейчас используется для обозначения стохастических моделей, позволяющих получать методом Монте-Карло многолетние искусственные последовательности метеорологических переменных суточного разрешения, статистические характеристики которых близки к соответствующим характеристикам фактических рядов. Существующие генераторы погоды в большинстве своём основаны на подходах, предложенных в работе [10], и не содержат

явного описания временных рядов метеорологических величин с большим временным осреднением, чем сутки. Поэтому эти генераторы погоды обычно занижают низкочастотные (сезонную, межгодовую) составляющие изменчивости метеорологических переменных [8]. В рамках данного исследования был разработан генератор погоды NEWGEN (NEsted Weather GENerator), структура которого представляет собой систему «вложенных» генераторов, обозначаемых буквами «Y», «M» и «D», которые описывают последовательности метеорологических переменных с временным осреднением год, месяц и сутки соответственно.

Отличительная черта нового генератора погоды – процедура дезагрегации параметров, т.е. перехода от независимо определяемых параметров генератора погоды «Y» к параметрам генератора «M», а от них – к параметрам генератора «D» с учётом сезонного хода метеорологических переменных. Иными словами: эта процедура позволяет задать часть параметров высокочастотной модели «D» по параметрам низкочастотных моделей «M» и «Y». Использование в качестве основных независимых параметров генератора погоды статистических характеристик среднегодовых значений метеорологических величин и их сезонного хода, а не характеристик среднесуточных значений (как это делается в существующих генераторах погоды), значительно повышает выборочную устойчивость оценок параметров по имеющимся рядам наблюдений и робастность модели (устойчивость структуры и параметров модели к изменению исходных данных). Последнее обстоятельство важно при использовании генератора погоды для большого числа станций, расположенных в разных климатических условиях. Рассмотрим в общих чертах алгоритм моделирования искусственных последовательностей метеорологических величин с помощью разработанного генератора погоды.

1. С помощью генератора погоды «Y» методом Монте-Карло рассчитываются среднегодовые значения температуры воздуха, безусловной вероятности выпадения осадков, интенсивности осадков в дни с отрицательными и положительными температурами воздуха, дефицита влажности воздуха в дни без осадков. Для описания многолетнего хода этих переменных используются модели независимых случайных величин, параметры которых оцениваются по имеющимся многолетним рядам метеорологических наблюдений.

2. С помощью генератора погоды «M» моделируется внутригодовой ход метеорологических

переменных, перечисленных в п. 1, с использованием периодических функций, подобранных по соответствующим месячным данным. При этом сгенерированные случайные среднегодовые значения переменных задаются в качестве параметра вертикального смещения соответствующей функции. Параметры амплитуды и фазы считаются постоянными, равными их средне-многолетним значениям, подобранным по данным наблюдений.

3. С помощью генератора погоды «D» моделируются среднесуточные значения метеорологических переменных с использованием моделей, рассмотренных далее.

Модель температуры воздуха – аддитивная модель с сезонными трендами случайных отклонений, описываемыми моделью авторегрессии первого порядка:

$$T_n = \bar{T}_n + \Delta T_n; \Delta T_n = \phi \Delta T_{n-1} + \alpha_n,$$

где T_n – среднесуточная температура воздуха в n -е сутки ($n = 1, 2, \dots, 365$); \bar{T}_n – значение сезонного тренда в n -е сутки; ΔT_n – отклонение от тренда в n -е сутки; ϕ – параметр авторегрессии, равный среднегодовому коэффициенту корреляции между значениями T_n и T_{n-1} ; α_n – белый шум с нулевым средним и дисперсией, равной $\sigma_a^2 = (1 - \phi^2)$.

Сезонный тренд \bar{T}_n описывался периодической функцией, аппроксимирующей ход среднесуточных значений температуры воздуха в n -е сутки:

$$\bar{T}_n = T_0 + a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{N}n + a_2\right), \quad (1)$$

где T_0 – среднесуточная годовая температура воздуха; a_1 и a_2 – параметры амплитуды и фазы соответственно; $N = 365$.

Модель атмосферных осадков описывает два процесса: 1) последовательность дней с осадками и без осадков с использованием модели дискретной Марковской цепи первого порядка (ДМЦ1); 2) интенсивность осадков в день их выпадения с использованием модели независимых гамма-распределённых случайных величин. Модель ДМЦ1 с двумя состояниями широко используется для описания последовательности суточных осадков [4]. Марковское свойство последовательности дней с осадками и без, описываемое моделью, состоит в том, что текущее состояние условно независимо от всех прошлых состояний при заданном предшествующем состоянии:

$$Pr[J_n = j | J_0, J_1, \dots, J_{n-2}, J_{n-1} = i] = Pr[J_n = j | J_{n-1} = i],$$

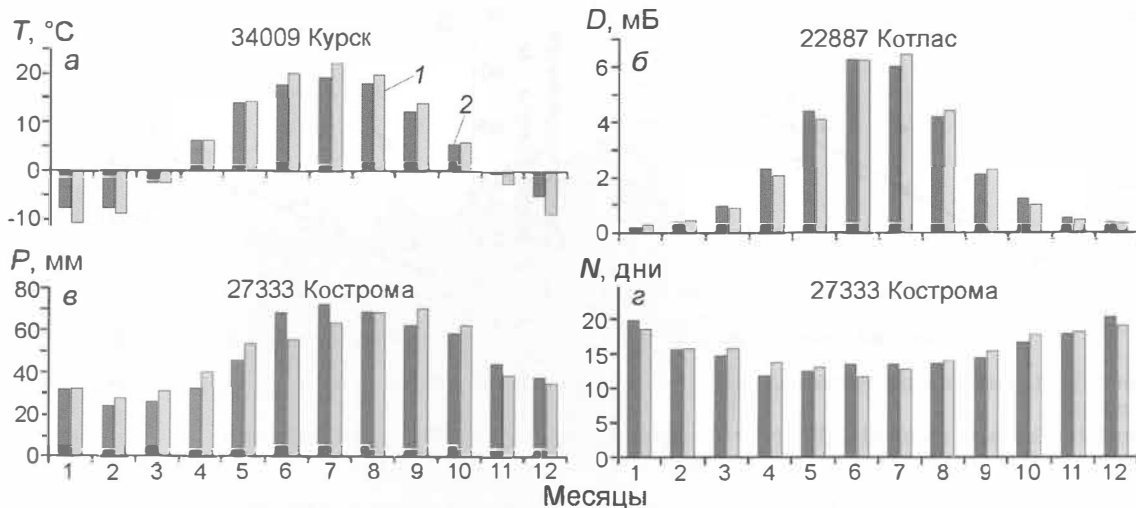


Рис. 4. Сравнение фактических (2) и рассчитанных (1) с помощью генератора погоды среднемесячных значений метеорологических характеристик:

a – температуры воздуха; б – дефицита влажности воздуха; в – суммы осадков; г – числа дней с осадками

Fig. 4. Comparison of the observed (2) and simulated (1) mean monthly characteristics:

а – air temperature; б – air humidity deficit; в – precipitation amount; г – number of wet days

$$\text{где } J_n = \begin{cases} 1, & X_n > 0; \\ 0, & X_n = 0; \end{cases}$$

$X_n \geq 0$ – последовательность случайных величин количества осадков; $i, j = 0, 1; n = 1, 2, \dots, 365$ – номер временного шага.

Модель ДМЦ1 характеризуется матрицей переходных вероятностей –

$$P_{ij} = (Pr)[J_n = j | J_{n-1} = i]$$

и вероятностями начальных состояний –

$$\pi_i = Pr[J_0 = i].$$

Учитывая, что $P_{i0} + P_{i1} = 1$ и $\pi_1 = 1 - \pi_0$, модель содержит всего три независимых параметра. Согласно [4], параметры переходных вероятностей можно оценить по двум безусловным статистикам, определяемым по ряду последовательностей дней с осадками и без осадков. $P_1 = Pr(J_n = 1)$ – безусловная вероятность выпадения осадков, равная математическому ожиданию величин J_n ; $r_1 = Corr(J_n, J_{n+1})$ – коэффициент корреляции между величинами J_n в соседние сутки. Независимые переходные вероятности (например, P_{00} и P_{11}) находятся по статистикам P_1 и r_1 из приведённой ниже системы уравнений, а также равенства $P_{i0} + P_{i1} = 1$:

$$P_1 = \frac{P_{01}}{P_{10} + P_{01}}, \tag{2}$$

$$r_1 = P_{11} - P_{01}. \tag{3}$$

Величина $\pi_i = Pr[J_0 = i]$ принималась равной P_1 . Внутригодовой ход среднемесячных значений величин P_1 описывался периодической функцией, аналогичной (1), при $N = 12$; величина r_1 считалась постоянной внутри года. В результате для каждого календарного месяца по уравнениям (2) и (3) рассчитывались постоянные значения переходных вероятностей в течение этого месяца. Среднесуточная интенсивность выпадения осадков вычислялась по модели гамма-распределённых случайных величин с параметрами, различными для суток с положительными и отрицательными температурами. Эти параметры (среднее значение и дисперсия) считались постоянными в течение каждого календарного месяца и равными соответствующим среднемесячным значениям. Изменения среднемесячных значений среднего и дисперсии в течение года описывались периодическими функциями.

Модель дефицита влажности воздуха. Величина дефицита влажности в день без осадков рассчитывается по модели независимых гамма-распределённых случайных величин, внутригодовой ход параметров которой (среднего значения и коэффициента вариации) задаётся периодической функцией, аналогичной (1). В день выпадения осадков дефицит влажности воздуха принимается равным нулю. Разработанный генератор погоды содержит 28 параметров, которые были оценены по многолетним рядам метеорологических наблюдений. Были смоделированы также искусственные ряды

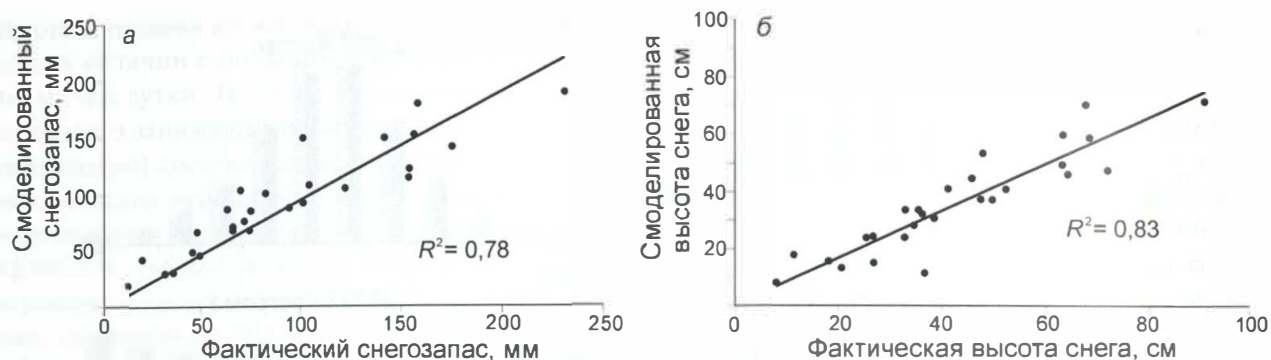


Рис. 5. Связь фактических и рассчитанных среднегоголетних максимальных снегозапасов (а) и максимальной в году высоты снега (б)

Fig. 5. Correlation between observed and calculated mean annual maximum SWE (a) and snow depth (b)

метеорологических переменных длиной 1000 лет для каждой метеорологической станции. На рис. 4 сравниваются некоторые статистические харак-

теристики среднемесячных значений фактических и смоделированных рядов. Расчёты показали, что новый генератор погоды позволяет удовлетво-

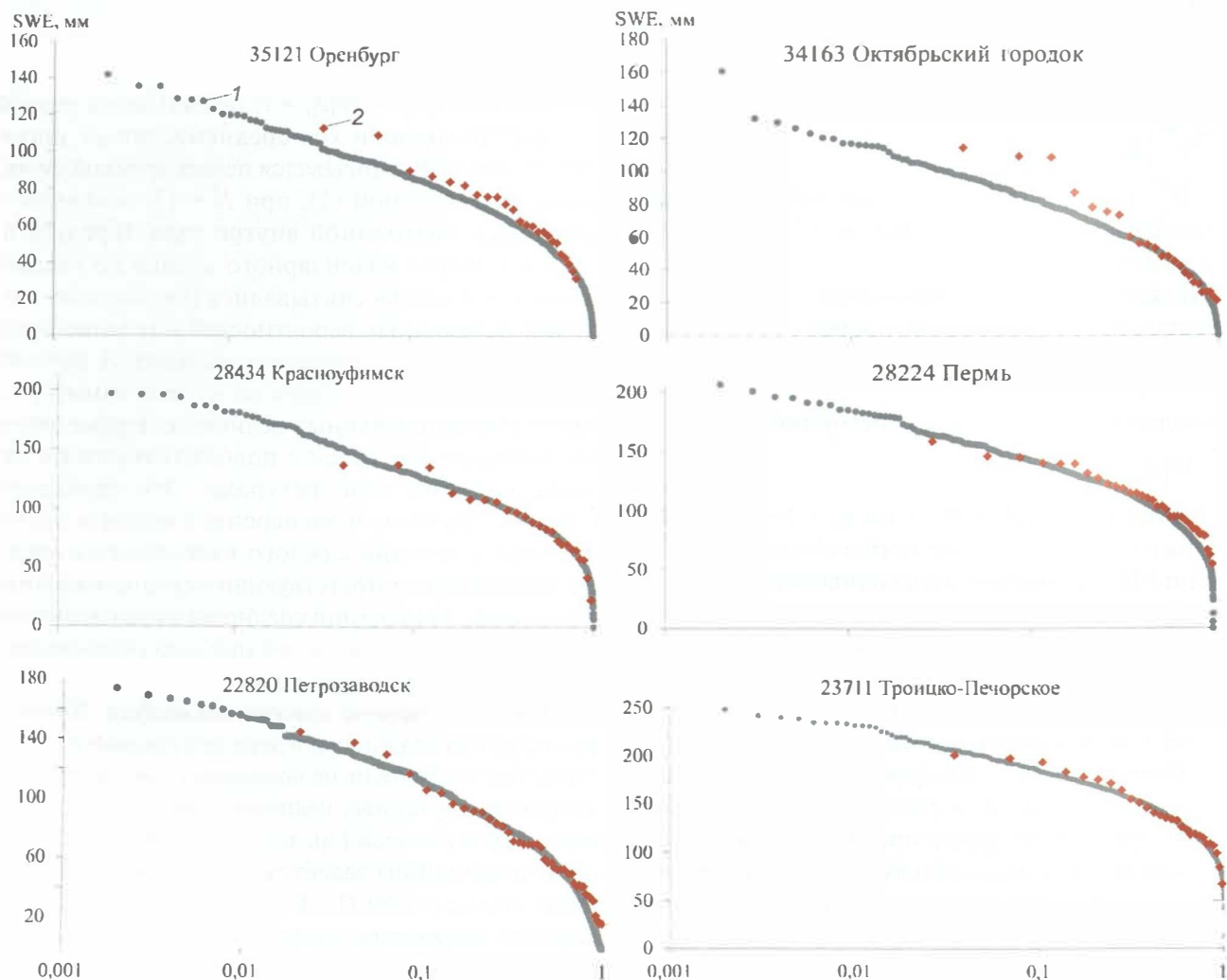


Рис. 6. Кривые вероятности превышения снегозапасов на 28 февраля, построенные по фактическим (2) и рассчитанным (1) рядам

Fig. 6. Exceedance probabilities of SWE based on the calculated (1) and observed (2) SWE values on February, 28

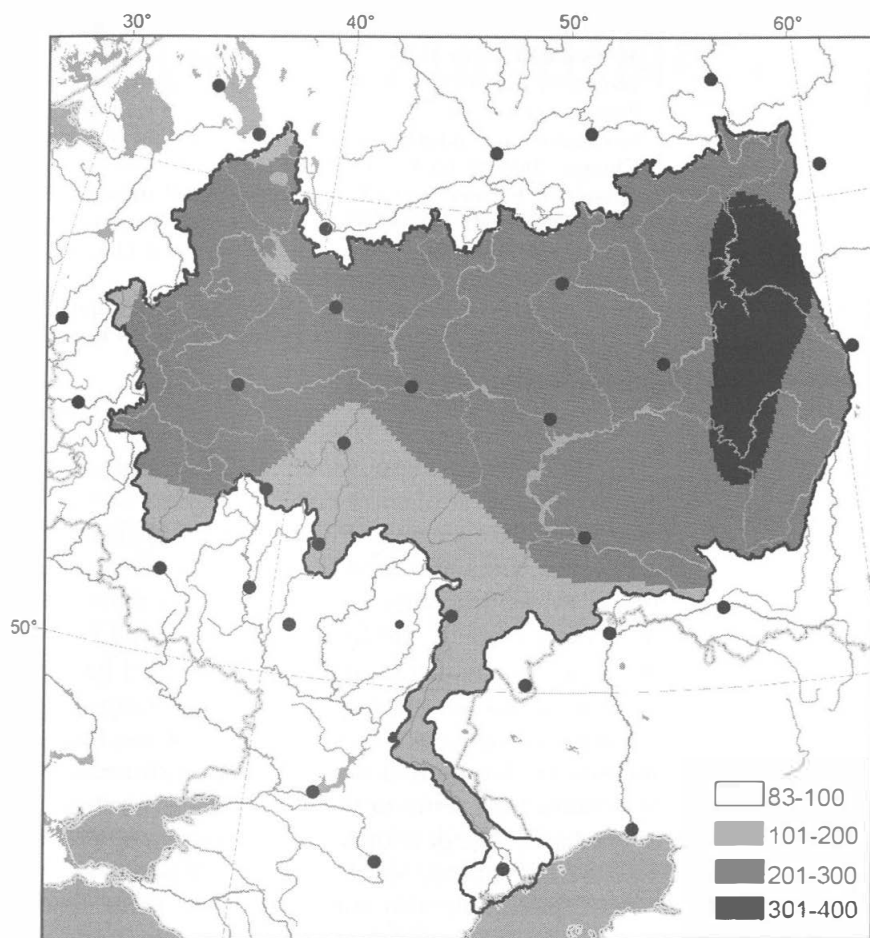


Рис. 7. Карта рассчитанных максимальных снегозапасов 4%-й обеспеченности. Точки – метеостанции; заливка – градации снегозапасов, мм

Fig. 7. Map of maximum SWE for 25-year return period. Dots are meteorological station locations, gradient fill – SWE classes in mm

рительно воспроизвести временные ряды метеорологических переменных разного временного осреднения на рассматриваемой территории Европейской территории России.

Динамико-стохастическое моделирование снегозапасов

С помощью модели NewGep методом Монте-Карло генерировались искусственные последовательности внутригодового хода среднесуточных значений осадков, температуры и влажности воздуха длиной 1000 лет, которые задавались в качестве граничных условий в модель формирования снежного покрова, с помощью которой рассчитывались 1000-летние ряды характеристик снежного покрова (снегозапасов и толщины снега) на рассматриваемых станциях. Подчеркнём, что климатические параметры, которые задавались в модели NewGep, и сгенерированные по ней 1000-летние ряды метеорологических величин, а следовательно, и рассчитанные ряды характеристик снежного покрова соответствуют современным климатическим условиям. С помощью моде-

ли удовлетворительно рассчитана также средняя по бассейну величина среднесуточных максимальных снегозапасов в году. Так, коэффициент детерминации между фактическими и рассчитанными значениями составил 0,78 (рис. 5, а). Модель удовлетворительно описывает и максимальную толщину снежного покрова; коэффициент детерминации между фактическими и рассчитанными максимальными в году параметрами толщины снега равен 0,83 (см. рис. 5, б).

В качестве примера результатов расчётов на рис. 6 показаны вероятности превышения снегозапасов, построенные по фактическим данным измерений на 28 февраля и по рассчитанным 1000-летним рядам снегозапасов на ту же дату для шести станций. На рис. 7 приведена карта максимальных снегозапасов 4%-й обеспеченности, построенная по рассчитанным рядам снегозапасов и иллюстрирующая возможности динамико-стохастической модели. Величины такой расчётной обеспеченности используются в отечественной инженерной практике для оценки максимальных снеговых нагрузок на строительные конструкции.

Заключение

Разработанная динамико-стохастическая модель формирования снежного покрова состоит из двух компонент: 1) детерминистической модели, описывающей физические процессы в снеге при его накоплении и таянии; 2) стохастических моделей метеорологических воздействий на снежный покров (так называемый стохастический генератор погоды), позволяющих воспроизвести методом Монте-Карло искусственные многолетние ряды метеорологических данных, задаваемых в качестве граничных условий в детерминистической модели. Детерминистическая модель и генератор погоды калиброваны и проверены по данным многолетних метеорологических наблюдений на 36 ГМС Европейской территории России. Разработанная динамико-стохастическая модель позволила с удовлетворительной точностью рассчитать статистические характеристики межгодовой изменчивости снегозапасов на рассматриваемой территории.

Работа выполнена в рамках программы № 12 фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН «Процессы в атмосфере и криосфере как фактор изменений окружающей среды».

Литература

1. Аполлов Б.А., Калинин Г.Л., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 422 с.
2. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на 223 метеорологических станциях на территории бывшего СССР (ТТГР). 2008. <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation>
3. Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных «Маршрутные снегомерные съемки». ВНИИГМИ-МЦД, 2009. <http://meteo.ru/data/166-snow-surveys>
4. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. М.: Наука, 2007. 280 с.
5. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н. Динамико-стохастические модели формирования речного стока. М.: Наука, 1993. 104 с.
6. Мотовилов Ю.Г. Моделирование снежного покрова и снеготаяния // Моделирование гидрологического цикла речных водосборов / Под ред. Л.С. Кучмента, Е.Л. Музылева. М.: изд. Национального геофизического комитета РАН, 1993. С. 9–37.
7. СНиП 2.01.07–85. Нагрузки и воздействия. М.: изд. Министра России, 1996. 82 с.
8. Dubrovský M., Buchtele J., Žalud Z. High-frequency and low-frequency variability in stochastic daily weather generator and its effect on agricultural and hydrologic modeling // Climatic Change. 2004. № 63. С. 145–179.
9. Krenke A. Former Soviet Union hydrological snow surveys, 1966–1996. Edited by NSIDC. Boulder, CO: National Snow and Ice Data Center / World Data Center for Glaciology, 1998, updated 2004. Digital media.
10. Richardson C.W. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation // Water Resources Research. 1981. № 17. P. 182–190.

Summary

A dynamic-stochastic model, which combines a deterministic model of snow cover formation with a stochastic weather generator, has been developed. The deterministic snow model describes temporal change of the snow depth, content of ice and liquid water, snow density, snowmelt, sublimation, re-freezing of melt water, and snow metamorphism. The model has been calibrated and validated against the long-term data of snow measurements over the territory of the European Russia. The model showed good performance in simulating time series of the snow water equivalent and snow depth. The developed weather generator (NEsted Weather Generator, NewGen) includes nested generators of annual, monthly and daily time series of weather variables (namely, precipitation, air temperature, and air humidity). The parameters of the NewGen have been adjusted through calibration against the long-term meteorological data in the European Russia. A disaggregation procedure has been proposed for transforming parameters of the annual weather generator into the parameters of the monthly one and, subsequently, into the parameters of the daily generator. Multi-year time series of the simulated daily weather variables have been used as an input to the snow model. Probability properties of the snow cover, such as snow water equivalent and snow depth for return periods of 25 and 100 years, have been estimated against the observed data, showing good correlation coefficients. The described model has been applied to different landscapes of European Russia, from steppe to taiga regions, to show the robustness of the proposed technique.