

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-3-105-123>

УДК 556.124.2

Развитие модели динамики снежного покрова Гидрометцентра России

Ю.А. Симонов, Н.К. Семенова

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
simonov@mecom.ru, snkone123@mail.ru*

Концептуальные модели формирования стока, применяемые в оперативной практике гидрологических прогнозов Гидрометцентра России, включают упрощенную параметризацию динамики снежного покрова, основанную на использовании коэффициента стаивания снежного покрова, водоудерживающей способности снега и вторичном замерзании талой воды в случае возврата отрицательных температур воздуха. Такая схематизация процесса хорошо зарекомендовала себя для надежного расчета водного эквивалента снега для последующего использования в расчетах поступления талой воды на поверхность водосбора и расчета характеристик речного стока. Вместе с тем отсутствие расчета плотности снега и его высоты в используемой схематизации накладывает ограничения на ее использование в гидрологических моделях схем расчета глубины промерзания почвы, что представляется крайне важным для моделирования стока на реках умеренных широт, то есть для большинства рек России. Для преодоления данного недостатка в расчетную схему модели добавлена параметризация плотности снега и его высоты, проверенная по данным снегомерных маршрутов Росгидромета и показавшая хорошее и удовлетворительное качество моделирования модельных характеристик.

Ключевые слова: модель снежного покрова, гидрологические прогнозы, концептуальная гидрологическая модель

Development of the snow cover dynamics model of the Hydrometeorological Center of Russia

Yu.A. Simonov, N.K. Semenova

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
Moscow, Russia
simonov@mecom.ru, snkone123@mail.ru*

Conceptual models of runoff formation used in the operational practice of hydrological forecasting by the Hydrometeorological Center of Russia include simplified parameterization of snow cover dynamics based on the use of snow cover melting coefficient, water-retaining capacity of snow and secondary freezing of meltwater in case of return of negative air temperatures. This schematization of the process is well established for the reliable calculation of the snow water equivalent for subsequent use in the calculation of meltwater inflow to the catchment surface and the calculation of streamflow characteristics. At the same time, the lack of calculation of snow density and

snow height in the used schematization restricts the use of schemes for calculating of soil freezing depth in hydrological models, which seems to be extremely important for modelling runoff on mid-latitudes rivers, i.e. for the most Russian rivers. To overcome this disadvantage, the snow density and snow height parameterization was added to the calculation scheme of the model, which was verified using Roshydromet's snow measurement routes data and shown a good and satisfactory quality of modeling of model characteristics.

Keywords: snow cover model, hydrological forecasts, conceptual hydrological model

Введение

Моделирование характеристик снежного покрова являются ключевым для описания гидрологического цикла речных бассейнов для разных научных и прикладных задач, в том числе для задач оперативного гидрологического прогнозирования. Методики краткосрочного и среднесрочного прогноза расхода и уровня воды, основанные на использовании моделей формирования стока, содержат блок описания динамики снежного покрова различной детальности [2–5, 11, 13, 15, 22]. Как правило, в оперативном режиме доступность, полнота и качество входной гидрометеорологической информации позволяет реализовать концептуальные схемы динамики снежного покрова в рамках концептуальных моделей формирования стока [7, 18, 20, 21].

В рамках концептуальных моделей используются упрощенные схемы, основанные на приближенном решении уравнений теплового и водного балансов снежного покрова [4–6, 13], позволяющие рассчитывать основные характеристики снежного покрова, необходимые для оперативной гидрологии, с использованием ограниченного набора входной метеорологической информации, как правило, приземной температуры воздуха и суммы атмосферных осадков.

Основной характеристикой снежного покрова, используемой для дальнейших расчетов расхода и уровня воды в замыкающем створе водосбора является слой стаявшего снега за расчетный интервал времени, поступивший на поверхность речного бассейна. К широко используемым схемам такого рода относятся, например, концептуальные модели формирования стока Гидрометцентра России и модель HBV-96.

Модель формирования стока Гидрометцентра России [5] была одной из первых моделей формирования стока на водосборе, внедренных в практику оперативных гидрологических прогнозов, когда в конце 70-х годов прошлого века обширный материал натурных наблюдений на водно-балансовых станциях и экспедиционных исследований был проанализирован, обобщен и использован для схематизации и математического описания основных физических процессов, происходящих в толще снежного покрова, в зоне аэрации почв, промерзания, транспирации и испарения и стекания с поверхности и из внутрипочвенного слоя водосбора в русловую сеть.

Данная модель была внедрена в практику оперативных гидрологических прогнозов для ряда крупных речных бассейнов, в том числе для бассейна Вятки, Оки, Северной Двины, Дона и других рек [1].

Одно из очевидных преимуществ модели Гидрометцентра России является концепция динамики промерзания и оттаивания почвогрунтов, что немаловажно для речных бассейнов нашей страны. Модели содержат блок описания промерзания почвы, которое существенным образом зависит от глубины снежного покрова.

В модели глубина снежного покрова задавалась исходя из данных наблюдений на снегомерных маршрутах и метеорологических станциях наблюдательной сети Росгидромета. В условиях использования моделей на территории речных бассейнов с ограниченными данными наблюдений возникает необходимость моделировать высоту снежного покрова для задания данной величины в качестве входной в схему расчета глубины промерзания почвы. В связи с этим возникла необходимость усовершенствования используемого блока динамики снежного покрова путем внедрения алгоритма расчета плотности снега. Рассмотрение данного вопроса представлено в настоящей статье.

Схематизация динамики снежного покрова

В используемой схематизации предполагается, что снегонакопление происходит при температуре воздуха t менее некоторой критической температуры $T_{кр}$ (около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), когда происходит увеличение твердой части снежного покрова с конца предыдущего расчетного шага S_0 за счет выпадения снега p_T , а также за счет повторного замерзания талой воды H_3 , удерживаемой в снеге:

$$S = S_0 + p_T + H_3, \\ H_3 = a_3 \cdot a \cdot (T_{кр} - t),$$

где a_3 – коэффициент повторного замерзания (мм/сут $^{\circ}\text{C}$); a – коэффициент стаивания (мм/сут $^{\circ}\text{C}$), являющиеся параметрами модели. Предполагается, что замерзание талой воды прямо пропорционально коэффициенту стаивания. Количество жидкой воды $H_ж$ (мм), удерживаемой в снежном покрове, уменьшается за счет вновь замерзшей талой воды. В случае выпадения дождя $p_ж$ (осадки выпадают частично в виде дождя) идет увеличение количества жидкой воды в снеге:

$$H_ж = H_{ж,0} - H_3 + p_ж.$$

При достижении и превышении температурой воздуха t критической температуры воздуха $T_{кр}$ происходит таяние снежного покрова, образуется слой талой воды H_c (мм), который идет на пополнение количества талой воды, удерживаемой в снеге $H_ж$.

Слой стаявшей воды рассчитывается с учетом коэффициента стаивания a (мм/сут °С):

$$H_c = a \cdot (t - T_{кр}).$$

Происходит уменьшение твердой фазы снежного покрова S на величину слоя стаивания, при этом к значению твердой фазы добавляются осадки в твердой фазе:

$$S = S_0 + p_T - H_c.$$

Величина талой составляющей снежного покрова, наоборот, увеличивается на количество слоя стаивания, а также на величину выпавших за расчетный интервал времени осадков в жидкой фазе:

$$H_{ж} = H_{ж,0} + H_c + p_{ж}.$$

Итоговое значение водоподачи на поверхность водосбора H_B рассчитывается с учетом водоудерживающей способности снега γ следующим образом. В случае, если величина талой воды в снеге $H_{ж}$ превышает максимальной слой воды, который может удерживаться снегом $\gamma \cdot S$, то «излишки» талой воды поступают из снега на поверхность почвы и таким образом образуют основу для дальнейшего пополнения почвенной влаги или поверхностного стекания в русловую сеть в зависимости от состояния почвенного покрова:

$$\begin{aligned} H_B &= H_{ж} - \gamma \cdot S, & H_{ж} &> \gamma \cdot S, \\ H_B &= 0, & H_{ж} &\leq \gamma \cdot S. \end{aligned}$$

В случае образования талой воды, которая поступила на поверхность водосбора, пересчитывается значение количества талой воды в снеге, которое принимает значение максимально возможного количества воды, удерживаемого снежным покровом, то есть $\gamma \cdot S$. Схематизация процесса динамики снежного покрова и основные расчетные соотношения представлены на рис. 1.

Представленная модель динамики снежного покрова является достаточно распространенной и используется в тех или иных вариантах во многих концептуальных моделях формирования стока на водосборе, например, в HBV и ее вариантах [10, 13], Lisflood [14], модели Гидрометцентра СССР [5]. В используемой схеме существенную роль играют параметры: *коэффициент стаивания снежного покрова, водоудерживающая способность снега, температура начала таяния снега, фактор повторного смерзания талой воды*, удерживаемой в снежном покрове. Данные параметры определяются либо в процессе оптимизации параметров модели, либо задаются «априорно», исходя накопленного опыта и результатов натурных наблюдений (ссылки на источники литературы). Информация о параметризации параметров модели представлена ниже.

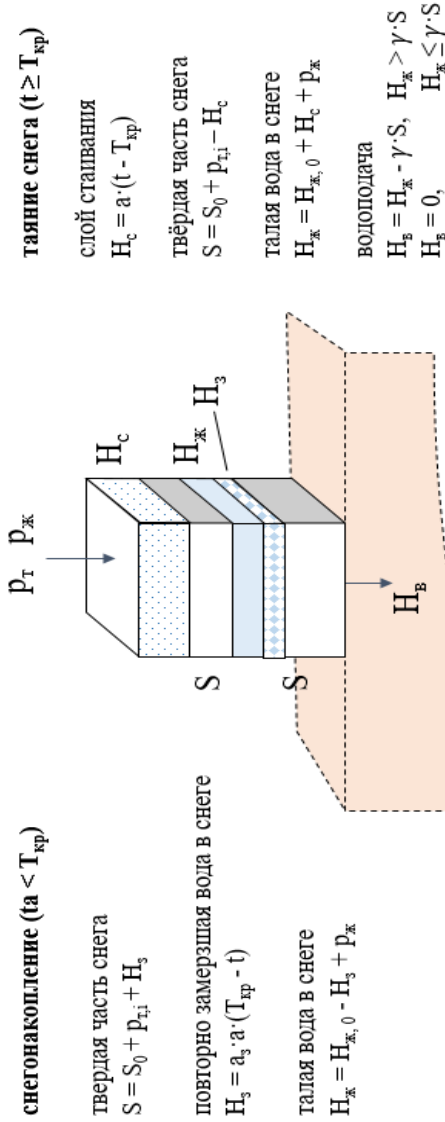


Рис. 1. Схематизация динамики снежного покрова (обозначения в тексте).
 Fig. 1. Schematization of snow cover dynamics (notations in the text).

С целью включения в расчет используемой модели высоты снежного покрова использован алгоритм расчета плотности снега, предложенный В.И. Корнем [20] и реализованный в модели SNOW-17 [9, 12], а также схематизаций снежного покрова в атмосферных моделях [17, 20]. Расчет плотности основан на эмпирическом подходе, который учитывает увеличение плотности снежного покрова за счет метаморфизма сухого снега и метаморфизма таяния – замерзания.

Данная схематизация представляет собой однослойную модель снега и не учитывает изменение плотности по глубине снежного покрова. При этом принимается, что плотность свежевыпавшего снега ρ_c зависит главным образом от температуры воздуха и по многочисленным данным измерений и результатам исследований [6, 8, 11, 23] может быть рассчитана следующим образом:

$$\rho_c = 0.13 + 0.0135 \cdot t + 0.00045 \cdot t^2.$$

Процесс уплотнения снежного покрова, связанный с перечисленными выше факторами, основан на использовании подхода, учитывающего в эмпирическом виде метаморфизм снега:

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(\frac{e^{0.1 \cdot S \cdot B} - 1}{0.1 \cdot S \cdot B} \cdot e^A \right)$$

где ρ – плотность снега (г/см³) в момент времени t ; ρ_0 – плотность снега (г/см³) на начало расчетного интервала времени; S – твердая составляющая снежного покрова, мм;

$$B = c_1 \cdot \Delta t \cdot e^{0.08 \cdot t_s - c_2 \rho_0},$$

$$A = c_3 \cdot c_5 \cdot \Delta t \cdot e^{c_4 \cdot t_s - c_6 \beta (\rho_0 - \rho_d)},$$

где t_s – температура снега (средняя), °C; ρ_d – пограничное значение плотности снега, равное 0,15 г/см³, выше которого влияние изменения кристаллической структуры снега на плотность снега уменьшается; β – коэффициент учета изменения кристаллической структуры снега, принимает значение 0, если $\rho \leq \rho_d$, и 1, если $\rho > \rho_d$; c_1, \dots, c_6 – константы, определяемые в соответствии с исследованиями [11, 19].

Учет метаморфизма снега, учитывающего процессы таяния и повторного замерзания талой воды ($RFRZ$, мм.), удерживаемой в снеге, происходит в упрощенном виде в соответствии с [12]:

$$\rho_{t^*} = \rho \cdot \frac{S}{S - RFRZ}$$

Плотность снежного покрова с учётом влияния свежевыпавшего снега и его плотности ρ_c вычисляется с учётом высоты h и плотности ρ снежного покрова до снегопада, а также высоты h_c и плотности ρ_c свежевыпавшего снега:

$$\rho = \frac{h \cdot \rho + h_c \cdot \rho_c}{h + h_c}$$

Высота снежного покрова h (см) рассчитывается исходя из значения твердой составляющей снежного покрова S и его плотности:

$$h = \frac{0.1 \cdot S}{\rho}$$

Средняя температура снежного покрова t_s рассчитывается в модели как средневзвешенное значение из температур лежалого снега и свежеевыпавшего снега.

Температура лежалого снега рассчитывается с помощью приближенного решения уравнения переноса тепла с использованием изменения температуры воздуха Δt за последний расчетный интервал:

$$t_s = t_{s,0} + \Delta t \cdot \left[\frac{1 - e^{-\alpha 0.01H}}{\alpha \cdot 0.01h} \right],$$

где $\alpha = \sqrt{\frac{\pi \cdot c}{2 \cdot 3600 \cdot \Delta t \cdot \lambda}}$; λ – теплопроводность снега (Вт/м·°C), определяемая как $0.0442 \cdot e^{5.181 \cdot \rho}$ [5]; c – эффективная объемная теплоемкость снежного покрова (Вт/с·м³·°C), определяемая следующим образом:

$$c = c_l \rho_{t-1} + c_a (1 - \rho_{t-1} - \theta) + c_b \theta,$$

где c_l – теплоемкость льда; c_a – теплоемкость воздуха; c_b – теплоемкость воды; θ – доля талой воды в снежном покрове. Средневзвешенная температура снежного покрова рассчитывается как

$$t_s = \frac{(t_{s,0} \cdot h_0) + (t_s \cdot h)}{h_0 + h}$$

Представленная модель позволяет производить расчет основных переменных снежного покрова, используемых в оперативной гидрологии для последующих расчетов компонент речного стока.

Параметризация и верификация модели

Используемая модель динамики снежного покрова имеет параметры, которые необходимо рассчитывать либо с помощью оптимизационных процедур, либо задавать априорно на основе экспериментальной информации и литературных источников. Параметры модели приведены в табл. 1 с указанными рекомендуемыми диапазонами значений.

Кроме того, модель использует ряд коэффициентов, которые оказывают влияние на расчет и итоговые модельные значения характеристик снежного покрова:

– нижний порог температуры, ниже которого осадки выпадают в виде снега (-3 – -3 °C);

- верхний порог температуры, выше которого осадки выпадают в виде дождя (0–3 °С);
- предельная температура таяния снега (-2,5–3,5 °С);
- коэффициент коррекции осадков, выпадающих в виде дождя (0,3–1,7);
- коэффициент коррекции осадков, выпадающих в виде снега (0,3–1,7).

Таблица 1. Основные параметры модели динамики снежного покрова
Table 1. Main parameters of the snow cover dynamics model

Параметр	Обозначение в тексте	Единицы измерения	Диапазон принимаемых значений
Коэффициент стаивания	a	мм/сут·°С	1.2–7.0
Коэффициент повторного замерзания	a_3	мм/сут·°С	0.05 – 1.0
Водоудерживающая способность снега	γ	доли 1	0.05 – 0.3

Выполнена оптимизация параметров модели и верификация качества моделирования по данным наблюдений на 985 маршрутных снегосъемках Росгидромета (617 полевых маршрутов, 368 лесных маршрутов), расположенных на всей территории России (рис. 2) за период 11 лет (использовался период 2010–2020 гг.). При этом для оптимизации использован период 2010–2015 гг., а период 2015–2020 гг. использован для проверки качества (верификации) модели на независимой выборке с оптимизированными параметрами. Для оптимизации в качестве входных данных использованы данные суточного разрешения по температуре воздуха и сумме осадков за сутки для каждого маршрута.

Использован алгоритм оптимизации параметров SCE-UA, рассмотренный в [16, 24]. Алгоритм SCE-UA (Shuffled Complex Evolution – University of Arizona) – метод глобальной оптимизации, разработанный для решения задач калибровки моделей с большим числом параметров, которые могут иметь сложные и нелинейные зависимости. Алгоритм работает путем создания начальных наборов параметров модели, которые затем делятся на несколько групп. Каждая группа параметров независимо изменяется, чтобы исследовать различные части параметрического пространства и получить улучшение качества модели.

После нескольких итераций комплексы объединяются и перемешиваются, что позволяет обмениваться информацией между ними. Данный процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнута сходимость или выполнены условия остановки.

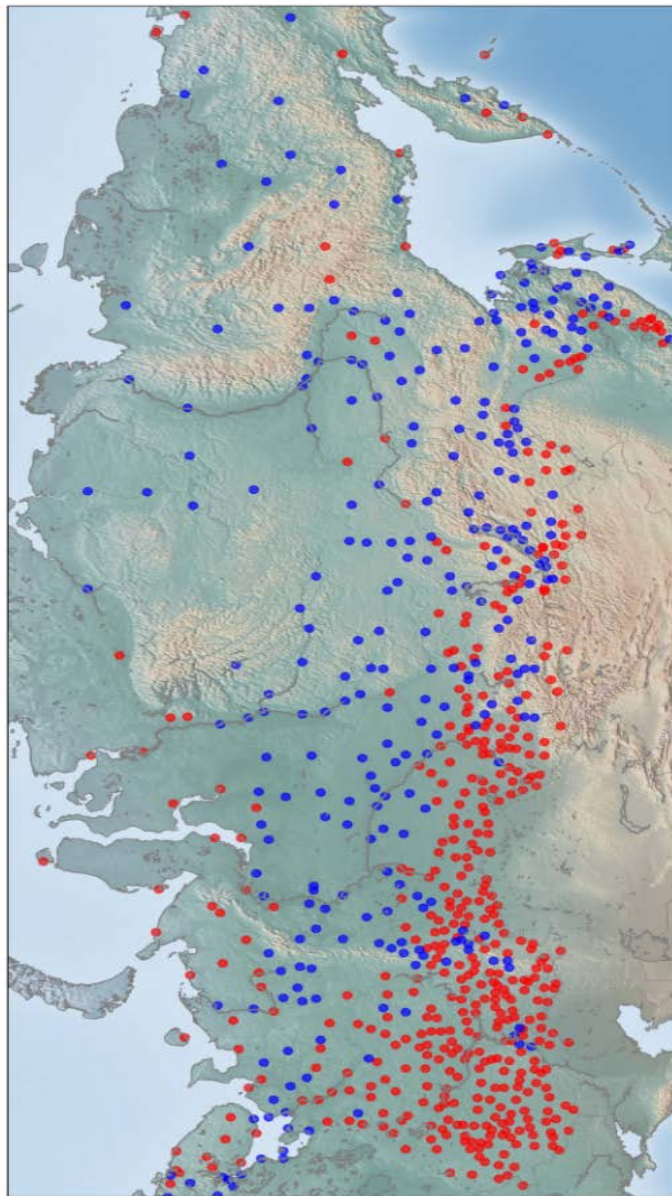


Рис. 2. Расположение снегомерных маршрутов. Красные точки – полевые маршруты, синие точки – лесные маршруты.

Fig. 2. Location of snow measurement routes. Red dots – field routes, blue dots – forest routes.

Оптимизация и верификация параметров проводилась отдельно для полевых и лесных частей снегомерных маршрутов. В качестве целевой функции при оптимизации использовался коэффициент детерминации R^2 .

Верификация проводилась для водного эквивалента снега и высоты снега. Для верификации использованы следующие критерии качества: среднеквадратическая ошибка (СКО), нормализованное значение среднеквадратической ошибки (НСКО), а также коэффициент детерминации R^2 между фактическими и смоделированными характеристиками снежного покрова.

В табл. 2 и 3 для полевых и лесных частей представлены средние значения критериев качества по всем используемым снегомерным маршрутам на территории Российской Федерации.

Таблица 2. Средние значения характеристик качества моделирования для полевых маршрутов

Table 2: Average values of modelling quality characteristics for field routes

Характеристики снега	СКО		НСКО		R^2	
	к	в	к	в	к	в
Полевые маршруты Количество маршрутов – 617						
SWE (мм)	10.9	21.8	0.34	0.56	0.87	0.65
H (см)	6.6	8.5	0.52	0.57	0.71	0.66

Примечание. «к» – калибровочный период, «в» – верификационный период.

Таблица 3. Средние значения характеристик качества моделирования для лесных маршрутов

Table 3: Average values of modelling quality characteristics for forest routes

Характеристики снега	СКО		НСКО		R^2	
	к	в	к	в	к	в
Лесные маршруты Количество маршрутов – 368						
SWE (мм)	12.1	20.1	0.29	0.47	0.91	0.71
H (см)	11.3	11.4	0.84	0.82	0.52	0.51

Примечание. «к» – калибровочный период, «в» – верификационный период.

В целом, для полевых частей снегомерных маршрутов среднее значение коэффициента детерминации равно около 0,65, показывающее удовлетворительную связь между фактическими и смоделированными значениями водного эквивалента снежного покрова и высоты снега (табл. 2). Для

лесных частей снегомерных маршрутов (табл. 3) значение R^2 для водного эквивалента снега 0,71, для высоты снежного покрова – 0,51.

На рис. 3 представлено распределение количества маршрутов по коэффициенту детерминации для водного эквивалента снежного покрова SWE.

Границы прямоугольника на рис. 3 – значения 25 % ($X_{25\%}$, первый квартиль) и 75 % ($X_{75\%}$, третий квартиль) значений коэффициента детерминации; черта внутри прямоугольника соответствует медиане. Нижняя граница определяется как разность $X_{25\%} - 1,5(X_{75\%} - X_{25\%})$, а верхняя граница – как сумма $X_{75\%} + 1,5(X_{75\%} - X_{25\%})$.

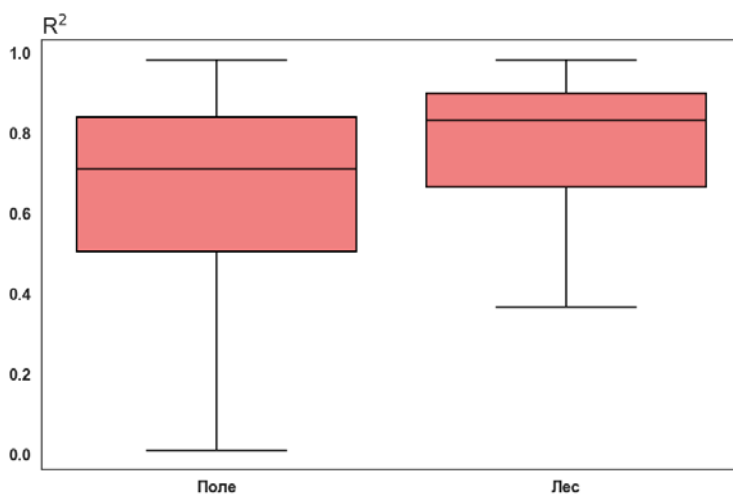


Рис. 3. Распределение значений коэффициентов R^2 величины водного эквивалента снежного покрова SWE для лесных и полевых маршрутов на валидационной выборке.

Fig. 3. Distribution of R^2 coefficient values of SWE snow cover water equivalent values for forest and field routes in the validation sample.

На рис. 4 и 5 представлены результаты моделирования водного эквивалента снежного покрова SWE и высоты снежного покрова на примере шести снегомерных маршрутов.

На рис. 6 и 7 представлены результаты верификации параметра SWE для всех рассматриваемых маршрутов.

Заключение

Представленные в статье результаты по использованию модели динамики снежного покрова показали хорошее и удовлетворительное качество моделирование основных характеристик снега, которые необходимы для работы концептуальных моделей формирования стока для моделирования и прогнозирования основных характеристик стока.

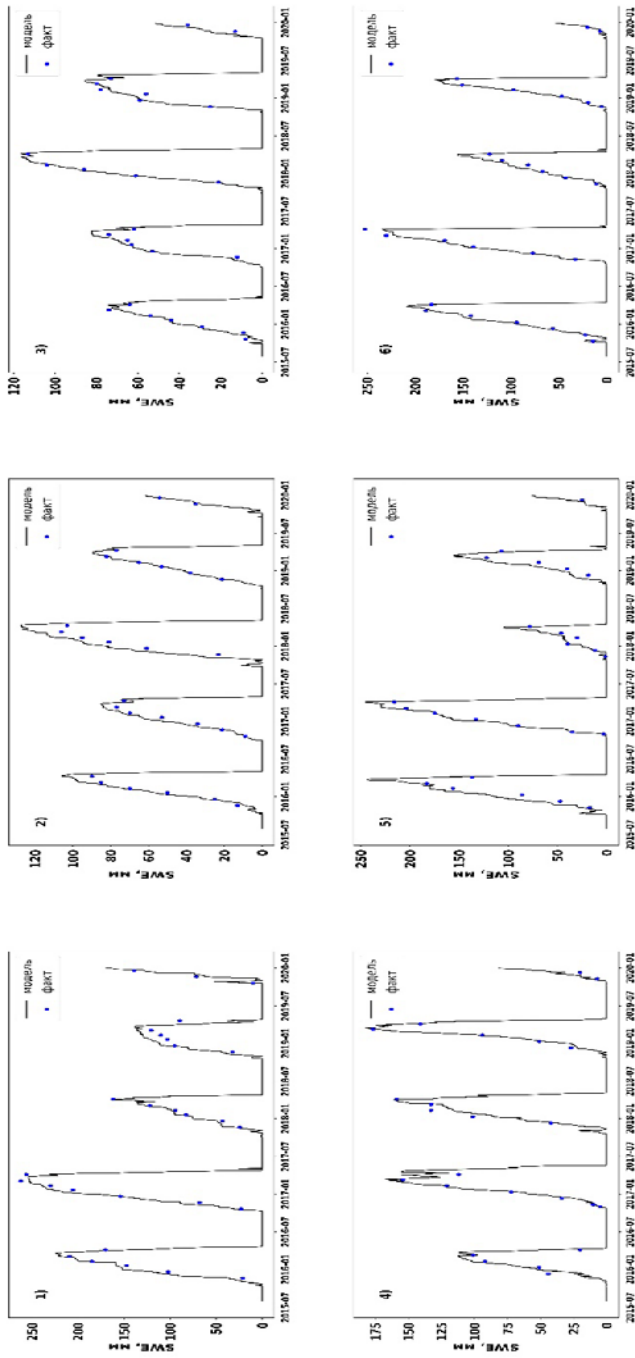


Рис. 4. Результаты моделирования SWE для лесных (1–3) и полевых (4–6) маршрутов на верификационной выборке: 1 – Усть-Кабурза; 2 – Джикимда; 3 – Новая Игirma; 4 – Двинский Березник; 5 – Кун; 6 – Ирбит.
Fig. 4. Results of SWE modelling for forest (1–3) and field (4–6) routes on the validation sample: 1 – Ust-Kaburza; 2 – Dzhikimda; 3 – Novaya Igirma; 4 – Dvinsky Bereznik; 5 – Kun; 6 – Irbit.

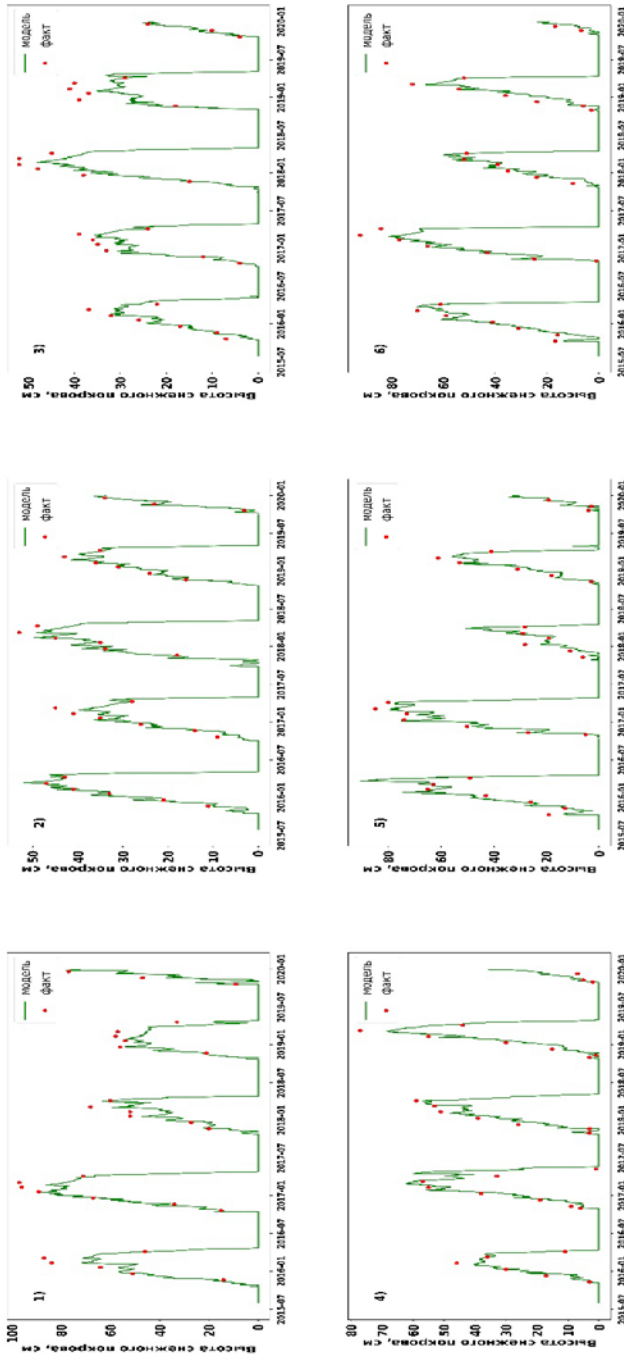


Рис. 5. Результаты моделирования высоты снежного покрова для лесных (1–3) и полевых (4–6) маршрутов на верификационной выборке: 1 – Усть-Кабурза; 2 – Джикимда; 3 – Новая Игирма; 4 – Двинский Березник; 5 – Кун; 6 – Ирбит.
Fig. 5. Results of snow cover height modeling for forest (1–3) and field (4–6) routes on the verification sample: 1 – Ust-Kabyrza; 2 – Dzhikimda; 3 – Novaya Igirma; 4 – Dvinsky Bereznik; 5 – Kun; 6 – Irbit.

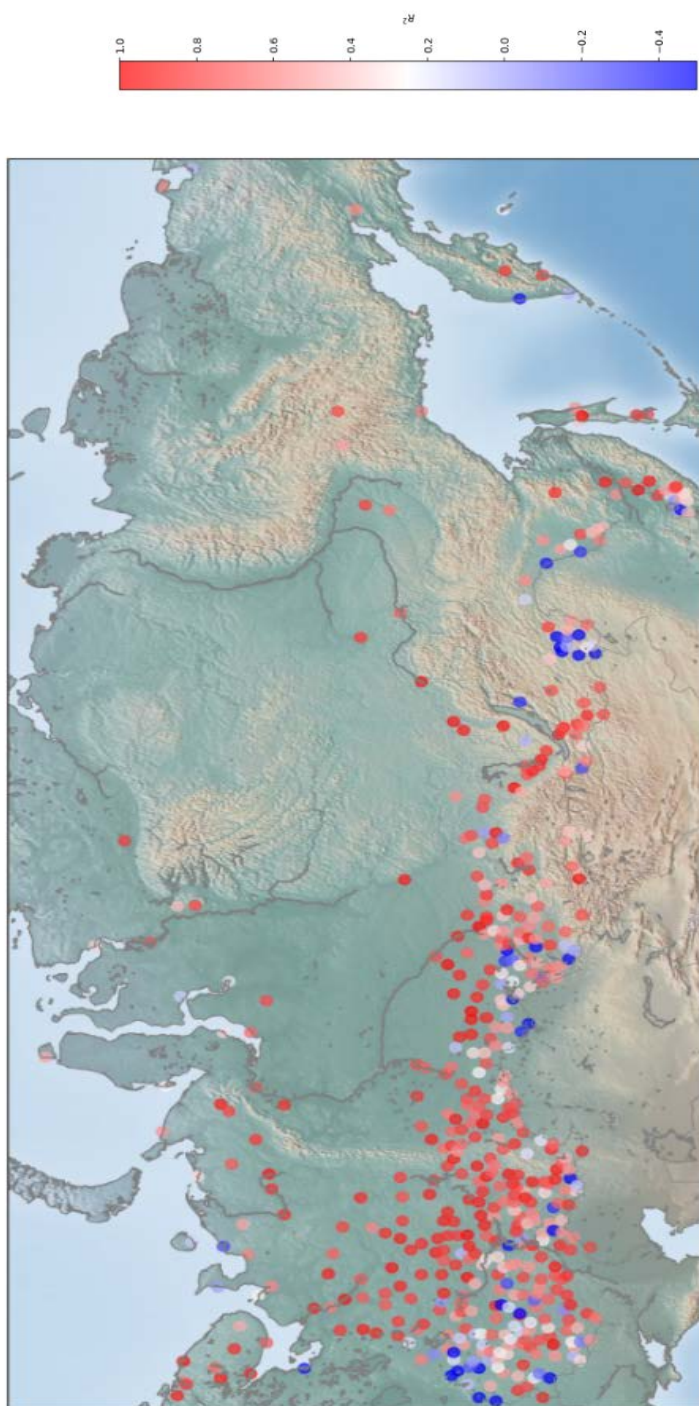


Рис. 6. Верификация модели динамики снежного покрова для полевых маршрутов (значения коэффициента детерминации R^2 водного эквивалента снежного покрова SWE)
Fig. 6. Verification of the model of snow cover dynamics for field routes (values of the coefficient of determination R^2 of SWE water equivalent of snow cover).

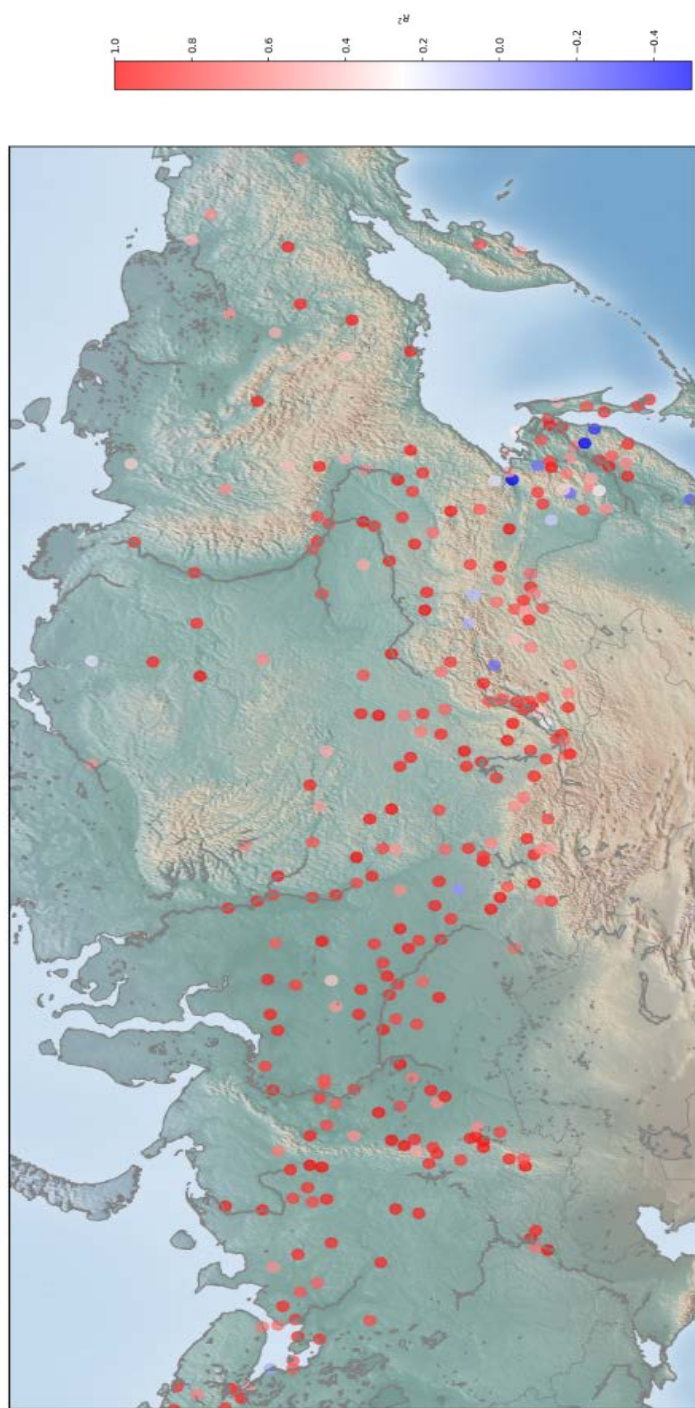


Рис. 7. Верификация модели динамики снежного покрова для лесных маршрутов (значения коэффициента детерминации R^2 водного эквивалента снежного покрова SWE)
Fig. 7. Verification of the model of snow cover dynamics for forest routes (values of the coefficient of determination R^2 of the SWE snow water equivalent).

С использованием данных многолетних наблюдений на снегомерных маршрутах Росгидромета была выполнена оптимизация параметров модели, а также верификация результатов моделирования на независимой выборке. Верификация показала хорошие и удовлетворительные результаты для большинства снегомерных маршрутов по всей территории России, для которых выполнялась проверка качества модели.

Для оценки применимости модели в местах с отсутствием исходной информации для оптимизации параметров модели, был произведен расчет априорных значений параметров с учетом рекомендаций различных литературных источников и ВМО. С использованием спутниковой информации и ГИС-технологий получены цифровые карты значений априорных параметров и выполнена проверка качества модели с их использованием, которая показала удовлетворительную сходимость модельных результатов и данных наблюдений на снегомерных маршрутах Росгидромета. Это позволит в дальнейшем применить модель в местах с отсутствием данных наблюдений.

Выполненное исследование позволяет усовершенствовать концептуальную гидрологическую модель Гидрометцентра России путем включения в нее рассмотренной модели динамики снежного покрова, что в свою очередь позволит упростить использование модели Гидрометцентра России в оперативной практике путем расчета высоты снега и его температуры. Также, что немаловажно, открываются перспективы для использования модели динамики снежного покрова отдельно и самостоятельно для расчета характеристик снега в рамках задач оперативной гидрологии Росгидромета.

Список литературы

1. Бельчиков В.А., Жидиков А.П., Полунин А.Я. Краткосрочный прогноз весеннего стока рек, впадающих в волжские водохранилища (Костромы, Унжи и Ветлуги) // Труды Гидрометцентра России. 2004. Вып. 339. С. 68-79.
2. Бориц С.В., Силантьева Т.П. Об усовершенствовании метода расчета разрушения ледяного покрова рек и водохранилищ // Труды Гидрометцентра СССР. 1989. Вып. 309. С. 113-120.
3. Гельфан А.Н., Морейдо В.М. Динамико-стохастическое моделирование формирования снежного покрова на европейской территории России // Лёд и снег. 2014. Т. 54, № 2. С. 44-52.
4. Голубцов В.В. Моделирование стока горных рек в условиях ограниченной информации. Алматы, 2010. 232 с.
5. Корень В.И. Математические модели в прогнозах речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 199 с.
6. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 348 с.
7. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочные прогнозы расхода и уровня воды на реках. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 245 с.
8. Савельев Б.А., Лаптев М.Н., Лаптева Н.И. Строение, состав, физико-механические свойства снега в Хибинах и их изменения в процессе метаморфизма // Снег и лавины Хибин. М.: Изд-во Московского университета, 1967. С. 201-239.

9. Симонов Ю.А., Ликарь Э.-Л.Д., Фролова Н.Л. Оценка применимости модели динамики снежного покрова SNOW-17 в практике оперативного гидрологического прогнозирования в России // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 360. С. 95-112.

10. Симонов Ю.А., Семенова Н.К., Христофоров А.В. Методика краткосрочных прогнозов расходов воды на реках бассейна Камы на основе использования модели HBV // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 55-65.

11. Anderson E.A. A Point Energy and Mass Balance Model of a Snow Cover // NOAA Technical Report NWS 19. February 1976. 150 p.

12. Anderson E.A. Snow Accumulation and Ablation Model – SNOW-17 // NOAA Technical Report NWS. January 2006. 44 p.

13. Bergström S. The HBV model // V.P. Singh, ed. Computer models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highland Ranch CO, 1995.

14. Burek P.A., Van Der Knijff J., De Roo A. LISFLOOD – Distributed Water Balance and Flood Simulation Model – Revised User Manual. EUR 26162. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union; 2013. JRC 78917.

15. De Roo A., Thielen J., Gouweleeuw B. LISFLOOD – Distributed Water-Balance, Flood Simulation and Flood Inundation Model. User Manual version 1.2. Internal report, Joint Research Center of the European Communities, Ispra, Italy, 2003. 74 p.

16. Eckhardt K., Arnold J. Automatic calibration of a distributed catchment model // Journal of Hydrology. 2001. Vol. 251 (1-2). P. 103-109.

17. Follum M.L., Niemann J.D., Parno J.T., Downer C.W. A simple temperature-based method to estimate heterogeneous frozen ground within a distributed watershed model // Hydrology and Earth System Sciences. 2018. Vol. 22. P. 2669-2688.

18. Guide to Hydrological Practices. V. 2. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO-No. 168. 2009. 302 p.

19. Kojima K. Densification of seasonal snow cover // Physics of snow and ice. Sapporo, Hokkaido University, Institute of Low Temperature Science, 1967. P. 929-952.

20. Koren V., Schaake J., Mitchell K., Duan Q.Y., Chen F., Baker J.M. A parameterization of snowpack and frozen ground intended for NCEP weather and climate models // J. Geophys. Res. 1999. Vol. 104 (D16). P. 19569-19585.

21. Manual on Flood Forecasting and Warning // WMO-No. 1072. 2011. 138 p.

22. Marsh C.B., Pomeroy J.W., Wheeler H.S. The Canadian Hydrological Model (CHM) v1.0: a multi-scale, multi-extent, variable-complexity hydrological model – design and overview // Geoscientific Model Development. 2020. Vol. 13(1). P. 225-247.

23. Pomeroy J.W., Gray D.M., Shook K.R., Toth B., Essery R.L.H., Pietroniro A., Hedstrom N. An evaluation of snow accumulation and ablation processes for land surface modelling // Hydrol. Process. 1998. Vol. 12. P. 2339-2367.

24. Rahnamay N.M., Analui B., Gupta H.V., Duan Q., Sorooshian S. Three decades of the Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) optimization algorithm: Review and applications // Scientia Iranica. 2019. DOI: 10.24200/SCI.2019.21500.

References

1. Bel'chikov V.A., Zhidikov A.P., Polunin A.Ya. Kratkosrochnyy prognoz vesennego stoka rek, vpadayushchih v volzhskie vodohranilishcha (Kostromy, Unzhi i Vetlugi). *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2004, vol. 339, pp. 68-79 [in Russ.].

2. Borshch S.V., Silant'eva T.P. Ob usovershenstvovanii metoda rascheta razrusheniya ledyanogo pokrova rek i vodohranilishch. *Trudy Gidromettsentra SSSR [Proceedings of the Hydrometcentre of the USSR]*, 1989, vol. 309, pp. 113-120 [in Russ.].
3. Gelfan A.N., Moreido V.M. Dynamic-stochastic modeling of snow cover formation on the European territory of Russia. *Led i sneg [Ice and Snow]*, 2014, vol. 54, no. 2, pp. 44-52. DOI: 10.15356/2076-6734-2014-2-44-52 [in Russ.].
4. Golubcov V.V. Modelirovanie stoka gornyh rek v usloviyah ogranichennoy informacii. *Almaty*, 2010, 232 p. [in Russ.].
5. Koren' V.I. Matematicheskie modeli v prognozakh rechnogo stoka. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1991, 199 p. [in Russ.].
6. Kuz'min P.P. Process tayaniya snezhnogo pokrova. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1961, 348 p. [in Russ.].
7. Rukovodstvo po gidrologicheskim prognozam. Vyp. 2. Kratkosrochnye prognozy raskhoda i urovnya vody na rekah. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1989, 245 p. [in Russ.].
8. Savel'ev B.A., Laptev M.N., Lapteva N.I. Stroenie, sostav, fiziko-mekhanicheskie svojstva snega v Hibirinah i ih izmeneniya v processe metamorfizma. *Sneg i laviny Hibirin*. Moscow: Izd-vo Moskovskogo universiteta, 1967, pp. 201-239.
9. Simonov Y.A., Licar E.-L.D., Frolova N.L. Assessment of the SNOW-17 snow cover dynamics model potential usage in the operational hydrologic forecasting practice in Russia. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2016, vol. 360, pp.95-112 [in Russ.].
10. Simonov Y.A., Semenova N.K., Khristoforov, A.V. Short-range Streamflow Forecasting of the Kama River Based on the HBV Model Application. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2021, vol. 46, pp. 388-395. DOI: 10.3103/S1068373921060054.
11. Anderson E.A. A Point Energy and Mass Balance Model of a Snow Cover. NOAA Technical Report NWS 19. February 1976, 150 p.
12. Anderson E.A. Snow Accumulation and Ablation Model – SNOW-17. NOAA Technical Report NWS. January 2006, 44 p.
13. Bergström S. The HBV. V.P. Singh, ed. Computer models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Highland Ranch CO, 1995.
14. Burek P.A., Van Der Knijff J., De Roo A. LISFLOOD – Distributed Water Balance and Flood Simulation Model – Revised User Manual. EUR 26162. Luxembourg (Luxembourg): Publications Office of the European Union; 2013. JRC 78917.
15. De Roo A., Thielen J., Gouweleeuw B. LISFLOOD – Distributed Water-Balance, Flood Simulation and Flood Inundation Model. User Manual version 1.2. Internal report, Joint Research Center of the European Communities, Ispra, Italy, 2003, 74 p.
16. Eckhardt K., Arnold J. Automatic calibration of a distributed catchment model. *Journal of Hydrology*, 2001, vol. 251, no. 1-2, pp. 103-109.
17. Follum M.L., Niemann J.D., Parno J.T., Downer C.W. A simple temperature-based method to estimate heterogeneous frozen ground within a distributed watershed model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, vol. 22, pp. 2669-2688.
18. Guide to Hydrological Practices. V. 2. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices. *WMO-No. 168*, 2009, 302 p.
19. Kojima K. Densification of seasonal snow cover // Physics of snow and ice. Sapporo, Hokkaido University, Institute of Low Temperature Science, 1967, pp. 929-952.

20. Koren V., Schaake J., Mitchell K., Duan Q.Y., Chen F., Baker J.M. A parameterization of snowpack and frozen ground intended for NCEP weather and climate models. *J. Geophys. Res.*, 1999, vol. 104 (D16), pp. 19569-19585.

21. Manual on Flood Forecasting and Warning. *WMO-No. 1072*, 2011, 138 p.

22. Marsh C.B., Pomeroy J.W., Wheeler H.S. The Canadian Hydrological Model (CHM) v1.0: a multi-scale, multi-extent, variable-complexity hydrological model – design and overview. *Geoscientific Model Development*, 2020, vol. 13, no. 1. pp. 225-247.

23. Pomeroy J.W., Gray D.M., Shook K.R., Toth B., Essery R.L.H., Pietroniro A., Hedstrom N. An evaluation of snow accumulation and ablation processes for land surface modelling. *Hydrol. Process.*, 1998, vol. 12, pp. 2339-2367.

24. Rahnamay N.M., Analui B., Gupta H.V., Duan Q., Sorooshian S. Three decades of the Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) optimization algorithm: Review and applications. *Scientia Iranica*, 2019. DOI: 10.24200/SCI.2019.21500.

*Поступила 06.07.2024; одобрена после рецензирования 24.09.2024;
принята в печать 15.10.2024.*

*Submitted 06.07.2024; approved after reviewing 24.09.2024;
accepted for publication 15.10.2024.*