

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2025-4-74-93>

УДК 551.578.462

Тестирование новой модели снежного покрова SnowDraw для климатического прогноза оледенения Эльбруса

Е.Д. Дроздов^{1,2}, П.А. Торопов^{1,2,3}

¹*Институт географии Российской академии наук, г. Москва, Россия;*

²*Московский государственный университет*

имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия;

³*Институт водных проблем Российской академии наук, г. Москва, Россия*
e.drozdov@igras.ru

Для условий горного ледника Эльбруса протестирована новая специализированная модель снежного покрова промежуточной сложности SnowDraw, направленная на климатический прогноз динамики ледников и речного стока в горных районах. Верификация модели на данных прямых наблюдений на леднике показала высокое качество воспроизведения сезонной динамики и водозапаса снежного покрова. Сравнение результатов представленной модели с другими доступными моделями различного уровня сложности (NoahMP, SNOWPACK) показало, что она является вычислительно эффективным и качественным инструментом для прогноза динамики снежного покрова и оледенения в горах. Использование представленной модели в качестве блока параметризации горного оледенения IGRICE позволило получить оценки многолетнего распределения снежного покрова и величины снеговой компоненты стока для оледенения Эльбруса.

Ключевые слова: численное моделирование, данные наблюдений, снежный покров, верификация, Эльбрус, ледник Гарабаши, модель IGRICE

Testing a new specialized SnowDraw snow cover model for climate forecasting of Elbrus glaciation dynamics

E.D. Drozdov^{1,2}, P.A. Toropov^{1,2,3}

¹*Institute of Geography of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;*

³*Water problems institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
e.drozdov@igras.ru

A new specialized SnowDraw snow cover model of intermediate complexity aimed at climate forecasting of glacier dynamics and river runoff in mountainous regions was tested for the Elbrus mountain glacier. The model verification versus direct observation data from the mountain glacier demonstrated a high-quality reproduction of the seasonal dynamics and water content of the snow cover. A comparison of results of the presented model with other available models of different complexity (NoahMP, SNOWPACK) demonstrated that it is a computationally efficient and high-quality tool for forecasting snowpack dynamics and glaciation in the mountains. Using the presented model as the IGRICE parameterization module for mountain glaciation allowed obtaining estimates of a long-term snow cover distribution and a snow component of runoff for the Elbrus glaciation.

Keywords: numerical modeling, observations, snow cover, verification, Elbrus, Garabashi glacier, IGRICE model

Введение

В условиях глобального потепления климата наблюдается существенная скорость сокращения площади и объема горных ледников в среднем на 0.5–1 % ежегодно [17]. Интенсивное отступление горных ледников и изменение количества снега в горах приводит к значительной перестройке водного режима рек [19], изменению доли ледникового и снегового питания [4, 20], а также вносит вклад в повышение уровня Мирового океана. На региональном масштабе подобные изменения приводят к изменению природных экосистем в горах [10] и существенно сказываются на сельском хозяйстве, строительстве, рекреационной сфере и благосостоянии населения горных и предгорных районов.

Основным инструментом современного климатического прогноза таких изменений являются модели Земной системы. Отечественная модель Земной системы ИВМ РАН – МГУ [1] продолжает развиваться, в частности, в направлении описания компонент деятельного слоя суши. Для модельных ячеек, попадающих на горные территории, это подразумевает развитие параметризаций горного оледенения, которые, в свою очередь, невозможны без специализированных моделей снежного покрова, который определяет энего- и массообмен ледника с атмосферой. В качестве такой параметризации горного оледенения предполагается использование глобальной гляциологической модели IGRICE [7], описывающей не только динамику ледника, но и снежного покрова на его поверхности.

В то же время для высокогорных районов существует набор специфических факторов, влияющих на формирование и динамику снежного покрова и требующих особого учета при его моделировании. Так, за счет высоких скоростей ветра существенное влияние на энергетический баланс и баланс массы снега оказывают процессы интенсивного метелевого переноса, ветрового уплотнения и сублимации снежных кристаллов [2, 21]. Ориентация и крутизна макросклонов приводят к изменению потока приходящей солнечной радиации и суммы осадков, с высотой изменяется и общее количество суммарной радиации и длинноволнового потока из атмосферы, что кардинальным образом определяет динамику снежного покрова. При этом в модели ИВМ РАН – МГУ применяется упрощенная схема расчета снежного покрова [15], слабо учитывающая специфические факторы формирования снежного покрова на горных ледниках.

В настоящее время известно множество различных моделей снежного покрова [18] различной комплексности. Однако некоторые из них являются вычислительно затратными и крайне требовательными к качеству входных данных, что делает их неприменимыми для задач прогноза климата. Другие модели пренебрегают многими эффектами, оказывающими влияние на снежный покров ледников, и направлены на описание снежного покрова равнинных территорий на крупном масштабе. К большинству моделей подходящей комплексности мы не имеем доступа. Прочие параметризации снежного покрова являются блоками моделей деятельного

слоя суши, что требует отделения снежного блока и существенной его переработки для применения в качестве блока параметризации горного оледенения, что, по сути, равноценно созданию новой модели.

Поэтому в рамках исследования была поставлена цель по созданию новой специализированной модели снежного покрова с включением описания специфических факторов на горных ледниках, которая сочетала бы в себе вычислительную эффективность и физическую обоснованность расчета характеристик снежного покрова и могла быть использована в качестве модуля глобальной гляциологической модели IGRICE [7]. В данной работе рассматриваются первые результаты применения разработанной модели на примере оледенения Эльбруса. В дальнейшем подходы, реализованные в данной модели, могут быть использованы в развитых отечественных моделях снежного покрова и в качестве блока модели деятельного слоя суши TerM [23].

Материалы и методы

Район исследований и данные наблюдений

Эльбрус является крупнейшим очагом оледенения в России, занимая около 20 % всего оледенения Кавказа по площади и объему [5]. Основные гляцио-климатические исследования на Эльбрусе проводятся на его южном склоне на опорном леднике Гарабаши (рис. 1а), что обусловлено его логистическим удобством и наличием рядов ежегодных наблюдений за балансом массы. Во время экспедиционной компании в августе 2024 г. в зоне абляции ледника Гарабаши на южном склоне Эльбруса на высоте 3970 м над у. м. был установлен современный автономный метеорологический комплекс (рис. 1б), направленный на постоянный мониторинг метеорологических условий на поверхности горного оледенения Эльбруса.

Монтаж металлических ферм проводился на скальных выступах таким образом, чтобы измерение радиационных компонент проводилось над снежно-ледовой поверхностью. На установленной ферме на высоте около 3 м над ледовой поверхностью проводятся измерения температуры и влажности воздуха, скорости ветра; на высоте около 2 м измеряются все компоненты радиационного баланса, а также слой накопления и стаивания снега и льда акустическим дальномером; также на высотах 2 и 3 м над поверхностью установлены два акустических метелемера, позволяющие оценить интенсивность метелевого переноса. Также вблизи АМС в снежно-фирновую толщу до глубины 2 м были забурены термокосы с шагом измерений 10 и 20 см.

Временная дискретность метеорологических измерений – 1 минута, слоя стаивания и температуры в снежно-ледовой толще – 1 час. Кроме того, рядом с метеорологической станцией в январе 2024 и 2025 гг., а также в июне 2025 г. проводились шурфования снежного покрова, что позволило получить данные о его плотности, водном эквиваленте и высоте. Более

подробно приборная база и некоторые результаты измерений на ледниках Эльбруса описаны в работах [3, 8].

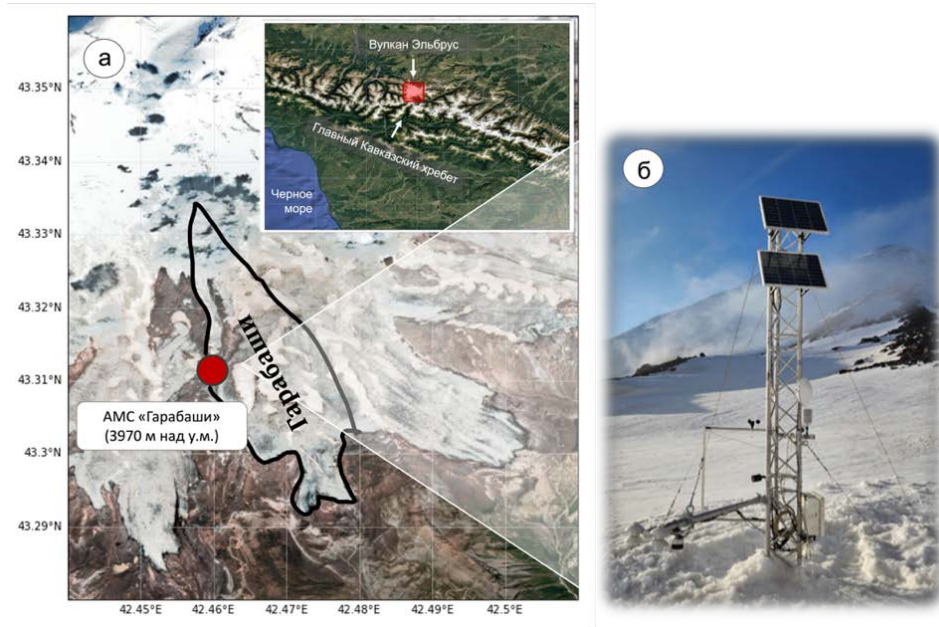


Рис. 1. Схема расположения района исследований и метеорологической станции (красный пунсон) на леднике Гарабаша на южном склоне Эльбруса (а), в качестве подложки использованы космические снимки с ресурса Google Earth; измерительный комплекс в зоне абляции ледника Гарабаша (б).

Fig. 1. Layout of the study area and meteorological station (red punch) on the Garabashi glacier on the southern slope of the Elbrus Mountain (a), with satellite images from Google Earth used as a background; the measuring complex in the ablation zone of the Garabashi glacier (б).

Комплекс практически бесперебойно функционирует более года, что делает эти наблюдения уникальными для района Большого Кавказа. Полученные данные прямых наблюдений не только дают представление о климатических параметрах на поверхности горного оледенения, но и служат для верификации реанализов и моделей снежного покрова. На данный момент доступны и использованы в исследовании данные за 10 месяцев: с августа 2024 по июнь 2025 года.

Описание модели снежного покрова SnowDraw

Разработанная модель снежного покрова может быть отнесена к классу схем промежуточной сложности. Она в явном виде описывает основные физические процессы, происходящие в снежном покрове, однако многие из них, например, такие как диффузия водяного пара вглубь

снежного покрова и образование отдельных ледяных прослоев, не рассматриваются. Многие из процессов параметризованы, а для вычисления радиационных и теплофизических характеристик снега используются эмпирические и упрощенные зависимости. При этом модель является многоуровневой, поскольку уравнения переноса тепла и влаги внутри снежного покрова разрешаются на равномерной пространственной сетке с фиксированным количеством уровней. В качестве входных данных модели на каждом шаге по времени необходимы сведения о температуре воздуха (К), атмосферном давлении (гПа), интенсивности выпадающих осадков (мм/ч), скорости (м/с) и направлении ветра (град.), относительной влажности воздуха (%), суммарной коротковолновой радиации ($\text{Вт}/\text{м}^2$) и длинноволновом излучении атмосферы ($\text{Вт}/\text{м}^2$). Также в качестве начальных условий могут задаваться профили температуры и плотности снега.

Особое внимание в модели уделяется бюджету потоков тепла на поверхности. В условиях горного оледенения затраты тепла на сублимацию кристаллов в метели $L_s S_z$ становятся существенной компонентой теплового баланса. Поэтому уравнение теплового баланса для поверхности снега на горном леднике может быть записано в следующем виде:

$$c \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \alpha)Q + E_a - \varepsilon \sigma_{SB} T_s^4 - L_i E - H_s - L_i S_z + B, \quad (1)$$

где Q – суммарная коротковолновая радиация ($\text{Вт}/\text{м}^2$); α – альbedo снежного покрова; E_a – встречное излучение атмосферы ($\text{Вт}/\text{м}^2$); $\varepsilon \sigma_{SB} T_s^4$ – собственное излучение поверхности ($\text{Вт}/\text{м}^2$); $L_i E$ – турбулентный поток скрытого тепла ($\text{Вт}/\text{м}^2$); H_s – турбулентный поток явного тепла ($\text{Вт}/\text{м}^2$); B – поток тепла в снег ($\text{Вт}/\text{м}^2$); $\sigma_{SB} = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{K}^4)$ – постоянная Стеффана – Больцмана; c – теплоемкость снега ($\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{K}$). Уравнение (1) является нелинейным относительно температуры поверхности T_s , поэтому для его решения используется итерационный метод хорд. Найденное значение температуры поверхности используется в качестве верхнего граничного условия для одномерного уравнения теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q(z) + L_i M(z), \quad (2)$$

где ρ – плотность снега ($\text{кг}/\text{м}^3$); λ – коэффициент теплопроводности снега ($\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{K}$). В качестве дополнительных источников тепла учитывается проникновение в снег солнечной радиации $Q(z)$ и фазовые переходы лед – вода внутри снежного покрова $L_i M(z)$. Для решения уравнения (2) используется неявная схема, что позволяет использовать пространственно-временную сетку с любым шагом. В данном исследовании использовалась версия с 6 уровнями по вертикали и шагом по времени 1 или 3 часа.

Изменение во времени количества водного эквивалента снежного покрова WE (м) происходит в зависимости от количества выпадающих осадков P (м за шаг по времени), скорости испарения E (м), метелевой

сублимации S_z (м) и слоя таяния M (м), что выражается в виде уравнения водного баланса снежного покрова:

$$\frac{\partial WE}{\partial t} = P - E - S_z - M. \quad (3)$$

Отдельно стоит выделить особенности разработанной модели, которые делают ее применимой для условий горного ледника и отличают от большинства прочих моделей снежного покрова.

Сублимация кристаллов льда при метелях является одной из важных составляющих теплового баланса и баланса массы снежного покрова на леднике [2]. Поэтому в модель SnowDraw был включен физически полный численный алгоритм расчета скорости сублимации кристаллов льда при метелях [13]. Скорость сублимации в метели рассчитывается следующим образом:

$$S_z = -\sum_r M_r \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{n_r}{4\pi r^2 \rho_p} \left(\frac{\partial m}{\partial t} \right)_r \right], \quad (4)$$

где для каждого заданного радиуса метелевых частиц r (м) с учетом их общей массы M_r (кг) и количества n_r вычисляется скорость изменения массы отдельной частицы за счет сублимации $\partial m / \partial t$ (кг/с) в зависимости от дефицита влажности над снежной поверхностью, а также параметров турбулентности атмосферы. Полностью алгоритм описан в работе [2].

Для определения альбедо снежного покрова используется параметризация интегрального альбедо, разработанная для модели снежного покрова SPONSOR и подробно описанная в работе [9]. Её преимуществом является учет большинства физических процессов, влияющих на альбедо снежного покрова, выраженных простыми зависимостями. Альбедо снежного покрова в схеме вычисляется по следующей формуле:

$$\alpha_{sn} = \max(\alpha_{melt}, \alpha_{new} - S_{alb}). \quad (5)$$

Здесь $\alpha_{melt} = 0.3$ – минимально возможное альбедо сплошного снежного покрова; S_{alb} – это сумма различных факторов в изменение альбедо:

$$S_{alb} = \Delta\alpha_{den} + \Delta\alpha_{temp} + \Delta\alpha_{old} + \Delta\alpha_{gr} + d_{pol} - \Delta\alpha_{sol}, \quad (6)$$

где $\Delta\alpha_{den}$ отвечает за изменения альбедо в зависимости от возраста и плотности верхнего слоя снега; $\Delta\alpha_{temp}$ – от температурного и радиационного метаморфизма снега; $\Delta\alpha_{old}$ и d_{pol} – за счет старения снега и фонового загрязнения; $\Delta\alpha_{gr}$ – за счет влияния альбедо подстилающей поверхности; $\Delta\alpha_{sol}$ – учитывает увеличение альбедо при небольшой высоте Солнца.

Важным процессом динамики снежного покрова является изменение его плотности со временем. С учетом большой мощности снежного покрова на горных ледниках, а также высоких скоростях ветра необходимо использование подробной и физически обоснованной параметризации уплотнения снежного покрова, которая учитывала бы и гравитационное

уплотнение нижних слоев снега, и ветровое уплотнение на его поверхности. Поэтому для добавления в представленную модель была выбрана параметризация из блока снежного покрова модели ISBA [16]. Согласно ей изменение плотности снежного покрова ρ_{sn} на каждом шаге по времени и каждом расчетном уровне i в снеге определяется следующим образом:

$$\frac{\partial \rho_{sn}}{\partial t} = \rho_{sn}(i) \cdot \frac{\sigma(i)}{\eta(i)} + \max\left(0, \frac{\rho_{max} - \rho_{sn}(i)}{\tau_w}\right), \quad (7)$$

где σ – вертикальное давление (Па); η – вязкость снега (Па·с); $\rho_{max} = 350$ – максимальная плотность снега (кг/м³). Величина $\sigma(i)/\eta(i)$ отражает гравитационное уплотнение, а скорость ветрового уплотнения τ_w в модели учитывается только на верхнем уровне и рассчитывается согласно [16].

Кроме того, корректная оценка динамики снежного покрова и горных ледников невозможна без качественных выходных данных по осадкам и приходящим компонентам радиационного баланса. Однако данные реанализов позволяют получать значения этих величин только для средней высоты ячейки и тем самым существенно недооценивают значения сумм осадков и приходящей солнечной радиации. В таком случае, чтобы получить наиболее качественные значения этих величин на леднике, необходимо производить модельный расчет их изменения с высотой.

Для получения входных данных модели снежного покрова по осадкам предварительно применялась модель орографической компоненты осадков [6], основанная на алгоритме расчёта скорости конденсации водяного пара в воздухе, вынужденно поднимающегося вдоль горного склона с наветренной стороны. Пересчет количества солнечной радиации происходит исключительно с учетом геометрических параметров: азимута и среднего угла наклона ледовой поверхности, а также закрытости горизонта по модифицированным зависимостям Кондратьева. Также для нисходящих потоков прямой коротковолновой и длинноволновой радиации вводится поправка на абсолютную высоту по эмпирическим градиентам [11].

Результаты и обсуждение

Верификация разработанной модели на данных наблюдений на леднике Гарабаши

Первая серия численных экспериментов с разработанной моделью была проведена с использованием в качестве граничных условий на поверхности данных прямых наблюдений в зоне абляции ледника Гарабаши на высоте 3970 м над у. м., а количество осадков было посчитано с использованием модели орографического добавка. Расчеты проводились с часовым временным шагом для всего периода, обеспеченного данными наблюдений, который составил более 9 месяцев: с 01.09.2024 по 20.06.2025.

Сравнение результатов моделирования по SnowDraw с данными автоматических наблюдений и шурфов (рис. 2) показывают, что созданная модель достаточно хорошо воспроизводит динамику накопления снежного

покрова за рассматриваемый период. Стоит отметить, что первая половина сезона аккумуляции снега на леднике оказалась аномально малоснежной: так на момент шурфования 31 января 2025 г. высота снега вблизи метеостанции составила лишь 33 см (110 мм в. э.), в то время как модель воспроизвела малое накопление снега в начале зимы, однако несколько завысила количество снега (55 см и 195 мм в. э.). Однако в других частях ледника на той же высоте были получены значения высоты снежного покрова до 1 м, а столь малое количество снега вблизи АМС может быть обусловлено локальными особенностями точки и метелевым переносом снега в другие части ледника.

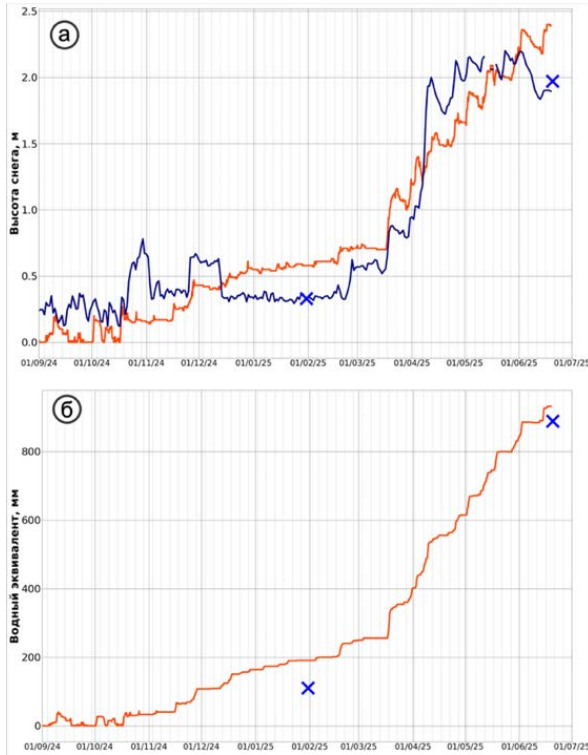


Рис. 2. Временной ход высоты (а) и водного эквивалента (б) снежного покрова в зоне абляции ледника Гарабаша в период с 01.09.2024 по 20.06.2025 по результатам моделирования (оранжевая линия), автоматических наблюдений (синяя линия) и данным шурфования снега (синие крестики).

Fig. 2. Time course of snow height (a) and water equivalent (b) in the Garabashi glacier ablation zone in the period from 09.01.2024 to 06.20.2025 by modelling results (orange line), automatic observations (blue line) and snow pitting data (blue crosses).

Также модель достаточно точно воспроизвела скорость накопления снежного покрова в весенний период, а к концу мая было получено практически полное соответствие расчетной высоты снежного покрова данным

автоматических наблюдений. Это указывает не только на адекватное описание в модели процесса накопления снежного покрова, но и на качественное воспроизведение суммы и времени выпадения осадков по модели орографического добавка [6]. До конца расчетного периода как по данным наблюдений, так и по результатам моделирования наблюдалась аккумуляция снега и на 18.06.2025 модель показала значение водного эквивалента снега (925 мм) весьма близкое к полученному в шурфе (890 мм). В то же время во второй половине июня началось появление жидкой влаги и уплотнение снежного покрова, что привело к уменьшению его высоты по данным наблюдений, что не было воспроизведено моделью, поэтому значение высоты снежного покрова оказалось завышенным на 40 см. В то же время полученные результаты позволяют говорить, что созданная модель адекватно воспроизводит динамику высоты снежного покрова в течение его аккумуляции, а также значение максимального водозапаса снежного покрова к началу снеготаяния.

Сравнение модельного значения температуры поверхности снега с радиационной температурой, восстановленной по данным наблюдений за восходящим длинноволновым потоком радиации, показало высокую степень соответствия расчетных значений температуры поверхности наблюдаемым (рис. 3).

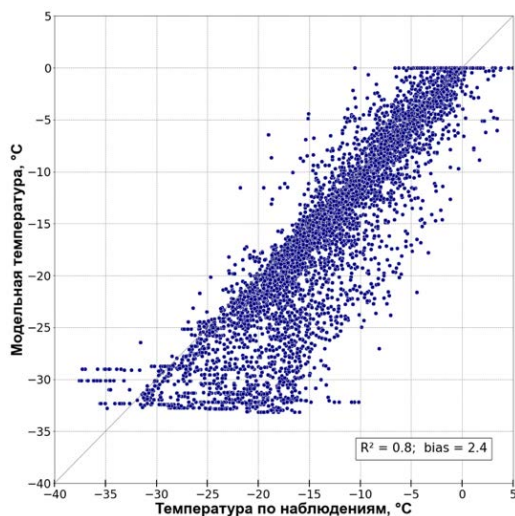


Рис. 3. Диаграмма рассеяния для температуры поверхности снежного покрова, полученной по результатам моделирования и данным наблюдений в зоне абляции ледника Гарабаши в период с 01.11.2024 по 18.06.2025.

Fig. 3. Scatterplot for snow surface temperature obtained from modelling results and observational data in the Garabashi glacier ablation zone in the period from 01.11.2024 to 18.06.2025.

Коэффициент детерминации для этих рядов составляет $R^2=0.8$, что указывает прежде всего на высокое качество воспроизведения временной изменчивости. Среднее смещение результатов моделирования составляет $2.4\text{ }^\circ\text{C}$, что является достаточно высоким результатом. Однако в отдельные сроки ошибка моделирования может составлять до $15\text{--}18\text{ }^\circ\text{C}$. При этом модель в среднем занижает значение температуры поверхности, особенно в ночные часы, что связано с проблемой определения турбулентных потоков явного и скрытого тепла над снегом. Тем не менее представленные результаты позволяют говорить, что созданная модель снежного покрова на высоком уровне воспроизводит тепловой баланс и значения температуры поверхности снега.

Также были проведены оценки воспроизведения созданной моделью плотности снежного покрова. Для доступных шурфов было получено очень близкое соответствие среднего значения плотности всей снежной колонки: ошибка воспроизведения средней плотности снега составила всего 13 и 14 кг/м^3 для шурфов к середине холодного периода и к началу снеготаяния. Столь незначительные ошибки определения плотности снежного покрова позволяют говорить о высоком качестве выбранной параметризации уплотнения снега [16]. Однако модель несколько завышает значения плотности снега в средней части толщи и не воспроизводит ветровой насти на поверхности снега.

Сравнение результатов созданной модели с другими моделями снежного покрова

Вторая серия численных экспериментов с моделью SnowDraw была проведена на временном масштабе более года – с 09.2023 по 07.2025. Выбранный период обусловлен наличием трех шурфов для верификации результатов модели: 28.01.2024, 31.01.2025 и 18.06.2025. В данном случае в качестве атмосферного форсинга модели использовались данные реанализа ERA5 Pressure levels, приведенные для высоты 3800 м , что соответствует верхней части зоны абляции ледника Гарабаши и высоте установки метеостанции. В данной серии экспериментов проводился как расчет сумм осадков с учетом орографического добавка к осадкам, так и пересчет количества солнечной и длинноволновой радиации в зависимости от высоты и характеристик склона. В начальный момент времени предполагалось отсутствие снега в модельной точке. Для снижения объема требуемых данных при подготовке атмосферного форсинга шаг интегрирования модели по времени был выбран равным 3 часам.

С использованием идентичных входных данных и шага по времени были проведены расчеты с более упрощенной моделью снежного покрова NoahMP [22], применяемой в мезомасштабной модели WRF, и моделью физики снежного покрова SNOWPACK [12]. Эти модели могут рассматриваться в качестве «конкурентов» для представленной модели снежного покрова.

Модель SnowDraw показала высокое качество воспроизведения водного эквивалента снега в сравнении с данными шурфов и существенно превзошла результаты других моделей (рис. 4а). Так, для января 2024 г. созданная модель занизила величину водного эквивалента лишь на 20 мм, для января 2025 г. – завысила на 40 мм, а к июню 2025 года ошибка моделирования составила всего 2 мм в. э. При этом прочие модели снежного покрова во всех случаях завывают скорость накопления снежного покрова на леднике, что особенно ярко проявляется в начале зимы 2024/2025 гг., где модели NoahMP и SNOWPACK завывают значение водного эквивалента более чем в 2.5 раза. Стоит, однако, отметить несколько более позднее начало таяния по представленной модели в оба года.

Аналогичные результаты были получены и для высоты снежного покрова (рис. 4б), где ошибка воспроизведения величины по разработанной модели не превышает 0.3 м и во всех трех случаях оказывается ниже, чем по другим моделям. Заметно также, что по более упрощенной модели NoahMP ошибка определения высоты снежного покрова оказалась больше, чем для водного эквивалента, что указывает на занижение в этой модели плотности снежного покрова и более слабое описание его уплотнения.

Также аналогичная серия численных экспериментов для этого же периода с 09.2023 по 07.2025 была проведена с моделями SnowDraw и NoahMP для различных высотных зон ледника Гарабаши от 3200 м над у. м. (язык ледника) до 4400 м над у. м. (зона питания ледника) с шагом по высоте 300 м. В качестве атмосферного форсинга использовались данные реанализа ERA5 Pressure levels, приведенные для соответствующих расчетных высот, а также производился пересчет сумм осадков с учетом орографического добавка и потоков приходящей радиации. В начальный момент времени предполагалось отсутствие снега в модельной точке, что, вообще говоря, неверно для высот выше линии равновесия ледника (около 4000–4100 м над у. м. для ледника Гарабаши). Проведенное сравнение модельных результатов с космическими снимками Sentinel-2 в различные даты лета 2024 г. позволяют оценить качество воспроизведения сроков залегания снежного покрова в различных зонах ледника, а значит, и существенного эффекта на альбедо поверхности.

Результаты моделирования высоты снежного покрова в различных высотных зонах (рис. 5) демонстрируют, что модель SnowDraw адекватно воспроизводит основные паттерны пространственно-временного изменения снежного покрова на леднике. Так, за счет увеличения количества осадков наибольшая высота снежного покрова в холодный период наблюдается на языке ледника (высоты 3200 и 3500 м над у. м.), однако таяние на этих высотах начинается раньше и идет интенсивнее – снег полностью сходит в начале июля. Процесс накопления и таяния снежного покрова на больших высотах запаздывает по сравнению с нижними зонами. При этом в районе линии равновесия ледника (4100 м над у. м.) получено активное таяние снега, но неполный его сход. В зоне аккумуляции ледника Гарабаши (4400 м над у. м.) по созданной модели таяния практически не происходит.

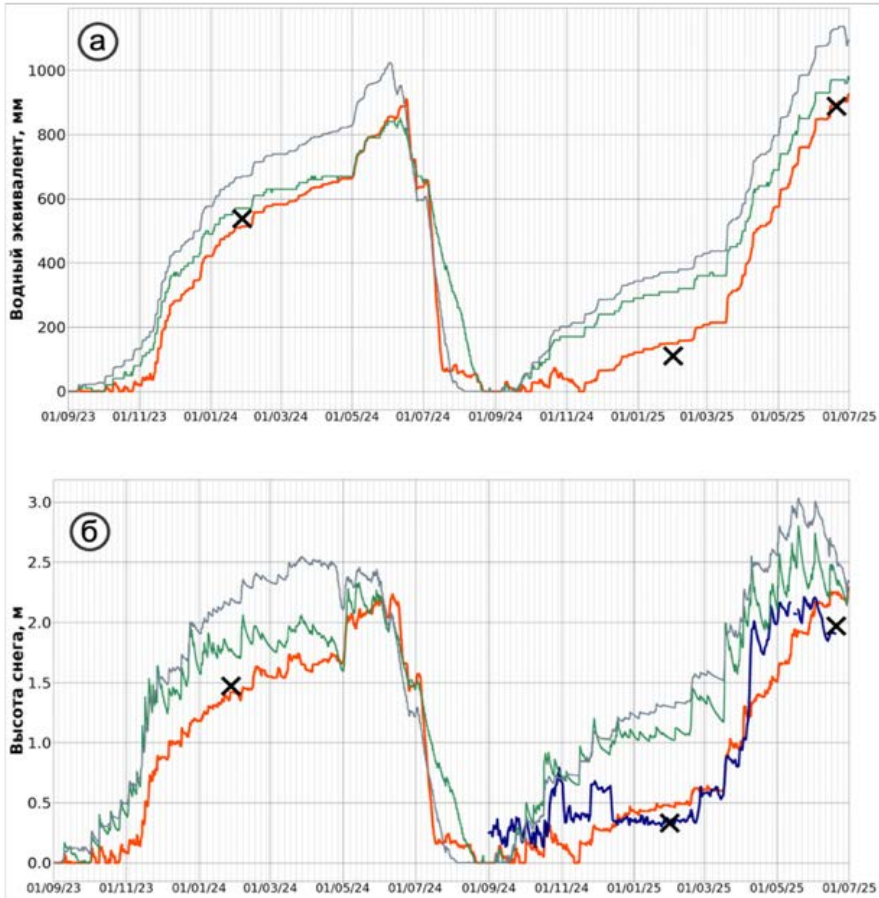


Рис. 4. Временной ход водного эквивалента (а) и высоты (б) снежного покрова в зоне абляции ледника Гарабаша в период с 01.09.2023 по 30.06.2025 по результатам моделирования на данных реанализа ERA5 с помощью моделей SnowDraw (оранжевая линия), SNOWPACK (серая линия) и NoahMP (зеленая линия), а также по данным автоматических наблюдений (синяя линия) и данным шурфования снега (черные крестики).

Fig. 4. Time course of the snow water equivalent (a) and depth (b) in the Garabashi glacier ablation zone in the period from 01.09.2023 to 30.06.2025 by modelling results based on ERA5 reanalysis data using the SnowDraw (orange line), SNOWPACK (gray line) and NoahMP (green line) models, as well as automatic observation data (blue line) and snow pitting data (black crosses).

При этом модель NoahMP, во-первых, существенно завышает высоту снежного покрова практически во всех высотных зонах, а, во-вторых, время схода снежного покрова на высотах от 3200 до 3800 м над у. м. практически не отличается и является поздним, что указывает на слабое

воспроизведение в этой модели физических процессов изменения характеристик снежного покрова в горах и, как следствие, отсутствие реакции на изменение атмосферного форсинга. В то же время на высоте 4400 м над у. м. наблюдается небольшое таяние, которое не наблюдается в разработанной модели.

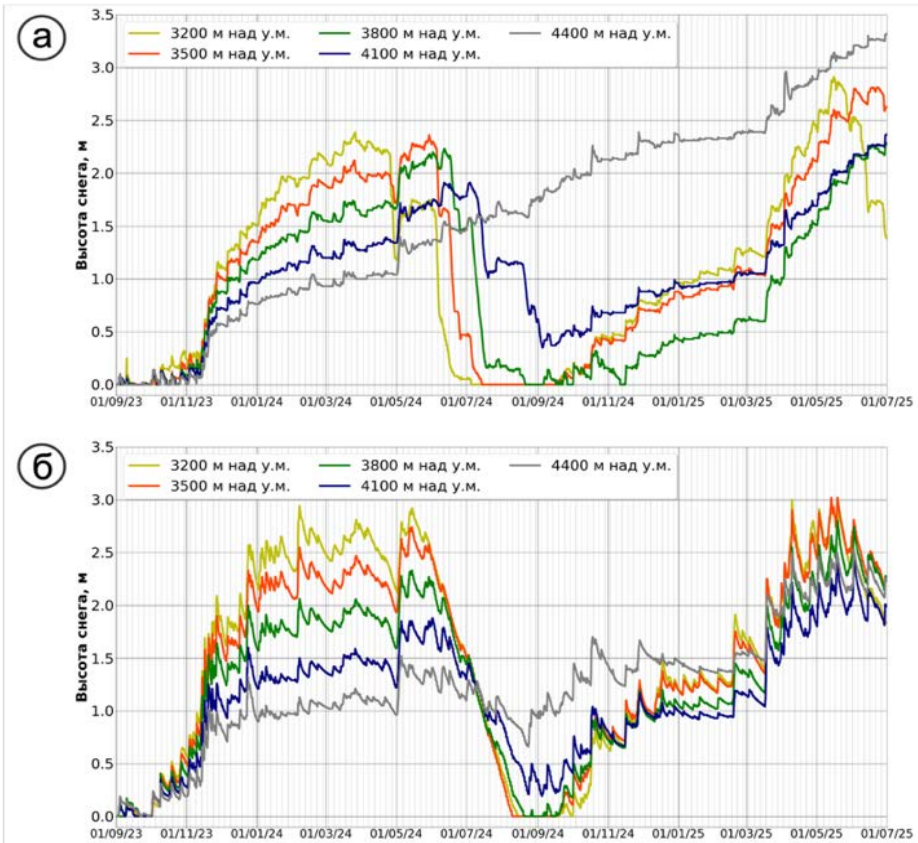


Рис. 5. Временной ход высоты снежного покрова в различных высотных зонах ледника Гарабаша в период с 01.09.2023 по 30.06.2025 по результатам моделирования по моделям SnowDraw (а) и NoahMP (б) на данных реанализа ERA5.

Fig. 5. Time course of snow cover depth in different altitude zones of the Garabashi glacier in the period from 01.09.2023 to 30.06.2025 by modelling results using the SnowDraw (a) and NoahMP (б) models based on ERA5 reanalysis data.

Космические снимки Sentinel-2 позволяют установить, что в начале июня снеговая линия лежит на высотах порядка 3000 м над у. м., а сход снега на высоте 3200 м над у. м. происходит в 20-х числах июня. По созданной модели сход снежного покрова на 3200 м над у. м. происходит 4 июля, а по NoahMP – лишь 10 августа. На высоте 3500 м над у. м. снег

полностью сошел около 5 июля (13 июля в созданной модели и 15 августа по NoahMP). Таким образом, специализированная модель SnowDraw адекватно описывает время схода снежного покрова на языке ледника с ошибкой в 7–10 дней, в то время как модель NoahMP во всех перечисленных случаях опаздывает со сходом снега на месяц и более, что вносит существенный и ошибочный вклад в летнюю абляцию ледника.

Однако по космическому снимку за 09.08.2024 было установлено, что снеговая линия соответствует высоте около 4200–4300 м над у. м., а это указывает на практически полное отсутствие снега на леднике Гарабаши к середине-концу августа 2024 г. Однако ни одна из моделей не воспроизвела полного стаивания снега на высотах 4100 и 4400 м над у. м. Столь слабые результаты в зоне аккумуляции ледника могут быть связаны с низким качеством входных данных в модель, поскольку данные реанализа ERA5 Pressure levels не учитывают влияния Эльбруса на атмосферу на этой высоте и существенного прогрева поверхности на его южном склоне летом, а соответствуют скорее свободной атмосфере.

Представленные выше результаты позволяют утверждать, что представленная модель снежного покрова показывает высокое качество воспроизведения сезонной динамики снежного покрова на горном леднике. При этом более упрощенная модель снежного покрова NoahMP показала более слабые результаты с точки зрения воспроизведения как скорости накопления и таяния снега, так и характеристик снежной толщи. Показано также, что модель полной физики снежного покрова SNOWPACK, являясь наиболее продвинутым инструментом для расчета стратиграфии снежного покрова и теплофизических свойств его толщи, не гарантирует высоких результатов воспроизведения сезонной динамики снежного покрова при отсутствии достаточного количества входных данных. Стоит отметить, что время счета эксперимента в одной расчетной точке по представленной модели SnowDraw аналогично времени по модели NoahMP, в то время как модель SNOWPACK затрачивает на тот же эксперимент в 100 раз больше компьютерного времени. Поэтому с вычислительной точки зрения представленная модель является значительно более экономным инструментом расчета динамики и характеристик снежного покрова и подходит для задач прогноза климата.

Пример расчета многолетней динамики снежного покрова для оледенения Эльбруса

Представленная выше верификация новой модели SnowDraw показала возможность ее применения в качестве блока параметризации горного оледенения IGRICE [7]. С этим модельным комплексом, включающем разработанную модель снежного покрова, был проведен численный эксперимент на данных реанализа ERA5 для всего оледенения Эльбруса с 1983 по 2025 г. Расчеты проводились по 12 азимутам и 9 высотным зонам (с 3200

до 5600 над у. м. с шагом 300 м), что позволило получить климатическую оценку пространственно-временного распределения снежного покрова на Эльбрусе.

Было получено, что среднемноголетняя высота снежного покрова для мая (период максимального снегонакопления) в зонах абляции достигает максимума в 2.7 м на наветренном юго-западном склоне и уменьшается до 1.5 м на северо-восточном склоне (рис. 6а). При этом с высотой наблюдается закономерное уменьшение количества снежного покрова (менее 1 м в привершинной части), связанное как с уменьшением количества осадков, так и его ветровым переносом в нижние зоны. Аналогично для августа (период максимальной абляции на ледниках Эльбруса) снег полностью сходит в зонах абляции ледников (рис. 6в) и сохраняется выше линий равновесия (4000–4100 м над у. м.).

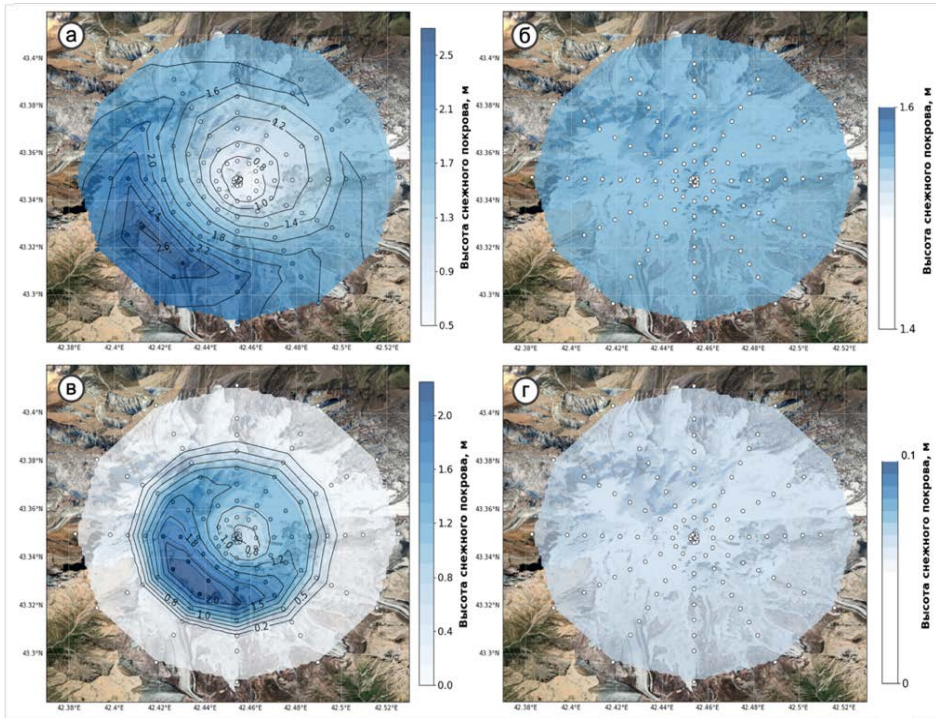


Рис. 6. Пространственное распределение средней многолетней высоты снежного покрова (за период с 1983 по 2025 г.) по оледенению Эльбруса для мая (а, б) и августа (в, г) по результатам моделирования с помощью модели SnowDraw (а, в) и данным реанализа ERA5-Land (б, г).

Fig. 6. Spatial distribution of the average long-term snow cover depth (for the period from 1983 to 2025) for the Elbrus glaciation for May (а, б) and August (в, г) based on results using the SnowDraw model (а, в) and ERA5-Land reanalysis data (б, г).

Стоит отметить, что по данным по снежному покрову из реанализа ERA5-Land в мае его высота по всему Эльбрусу составляет около 1.5 м, а в августе снег полностью отсутствует (рис. 6б, г). Кроме того, максимум снегонакопления по реанализу наблюдается в феврале-марте с более низким значением высоты снежного покрова, чем по данным наблюдений. Таким образом, данные реанализа неверно воспроизводят как сроки залегания снежного покрова на леднике, так и время и величину максимального водозапаса. Для ледника Гарабаши было получено, что вследствие этого данные реанализа по снежному покрову занижают среднегодовой сток за счет таяния снега на 151 мм в. э. с 1 м^2 по сравнению с результатами расчетов с представленным модельным комплексом, что только для одного ледника Гарабаши дает недоучет объема стока в $755\,000 \text{ м}^3/\text{год}$.

Все это позволяет утверждать, что использование данных реанализов не дает получать реалистичные параметры снежного покрова на горных ледниках и они непригодны для прогноза динамики горного оледенения. В то время как использование модельного комплекса, включающего специализированную модель снежного покрова, позволяет воспроизводить пространственно-временную изменчивость снежного покрова на леднике и получать более достоверные оценки динамики оледенения и величины снегового питания в стоке.

Заключение

В рамках исследования была создана новая модель снежного покрова промежуточной сложности SnowDraw с включением описания специфических факторов снежного покрова в высокогорных районах, направленная на климатический прогноз динамики ледникового покрова и речного стока в горных районах. На основе верификации представленной модели на собранных данных прямых наблюдений на леднике Гарабаши на южном склоне Эльбруса было получено высокое качество воспроизведения как сезонной динамики и водозапаса снежного покрова на горном леднике, так и температуры поверхности снега и его средней плотности.

Сравнение результатов представленной модели с другими доступными моделями различного уровня комплексности (NoahMP [22], SNOWPACK [12]) для ледника Гарабаши показало, что она демонстрирует более высокие результаты воспроизведения мультисезонной динамики снега на горном леднике: ошибка моделирования не превысила 40 мм в. э. На основе анализа космических снимков Sentinel-2 было показано, что модель SnowDraw адекватно воспроизводит время схода снежного покрова на языке ледника, однако недооценивает скорость таяния в зоне аккумуляции. В то же время использование специализированной модели SnowDraw позволяет существенно улучшить описание характеристик снежного покрова на леднике по сравнению с другими моделями при низких затратах компьютерного времени, что делает представленную модель вычислительно

эффективным и качественным инструментом для прогноза динамики снежного покрова и оледенения в горах и пригодной к использованию в качестве блока параметризации горного оледенения.

По расчетам с помощью гляциологической модели IGRICE была получена оценка климатического распределения снежного покрова по всему оледенению Эльбруса. Показано, что использование модельного комплекса, включающего специализированную модель снега, позволяет воспроизводить пространственно-временную изменчивость снежного покрова на леднике и получать более достоверные оценки динамики оледенения и речного стока по сравнению с данными реанализов.

Помимо дальнейшей доработки и усовершенствования модели SnowDraw планируется полное ее совмещение с глобальной гляциологической моделью IGRICE [7] с последующим проведением численных экспериментов для других горно-ледниковых районов России и мира. В дальнейшем данный модельный комплекс может быть использован в качестве блока модели деятельного слоя суши TerM [23].

Благодарности

За консультации по построению схемы модели выражается благодарность зам. директора НИВЦ МГУ д.ф.-м.н. Степаненко В.М.; за помощь в работе с космическими снимками – в.н.с. ИГ РАН к.г.н. Носенко Г.А.

Развитие и тестирование модели снежного покрова SnowDraw выполнена по проекту РФФ № 23–17–00247; оценка снежно-ледовой составляющей речного стока на Эльбрусе выполнена в рамках проекта РФФ № 24–17–00152.

Acknowledgements

We would like to thank V.M. Stepanenko, Dep. Dir. of the MSU RCC, for consultations on developing the model. We would also like to thank G.A. Nosenko, Leading Researcher at the IG RAS, for assistance with satellite imagery.

The development and testing of the SnowDraw snow cover model was carried out under RSF project № 23–17–00247; the assessment of the river runoff snow-ice component on Elbrus was carried out under RSF project № 24–17–00152.

Список литературы

1. Володин Е.М. Воспроизведение современного климата моделью климатической системы INMCM60 // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59, № 1. С. 19-26.

2. Дроздов Е.Д., Торопов П.А., Турков Д.В., Шестакова А.А., Андросова Е.Е.. Оценка эффекта сублимации ледяных кристаллов при метелях над поверхностью горного ледника на основе натуральных данных и численного моделирования // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, приуроченной к Году науки и технологий. 2021. С. 397-404.

3. Дроздов Е.Д., Торопов П.А., Авиллов В.К., Артамонов А.Ю., Полохов А.А., Железнова И.В., Ярынич Ю.И. Метеорологический режим высокогорной зоны Эльбруса в период аккумуляции // Лед и снег. 2024. Т. 64, № 1. С. 25-40.
4. Корнилова Е.Д., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Мотовилов Ю.Г., Корнева И.А., Постникова Т.Н., Рыбак О.О. Влияние изменений климата и деградации оледенения на водный режим в высокогорной части бассейна р. Терек // Лёд и Снег. 2024. Т. 64, № 2. С. 173-188. DOI: 10.31857/S2076673424020014
5. Михаленко В.Н. и др. Ледники и климат Эльбруса. СПб.: Нестор-История, 2020. 372 с.
6. Торопов П.А., Шестакова А.А., Ярынич Ю.И., Кутузов С.С. Моделирование орографической составляющей осадков на примере Эльбруса // Лед и снег. 2022. Т. 62, № 4. С. 485-503.
7. Торопов П.А., Дебольский А.В., Полохов А.А., Шестакова А.А., Поповнин В.В., Дроздов Е.Д. Минимальная модель Урлеманса как возможный инструмент описания горного оледенения в моделях Земной системы // Водные ресурсы. 2023. Т. 50, № 5. С. 524-537.
8. Торопов П.А. и др. Гляциологические исследования Института географии РАН на Эльбрусе в 2024 г. // Лёд и Снег. 2024. Т. 64, № 4. С. 480.
9. Турков Д.В., Дроздов Е.Д., Ломакин А.А. Альbedo снежного покрова и его параметризация для целей моделирования природных систем и климата // Лёд и снег. 2024. Т. 64, № 3. С. 403-419.
10. Adler C., Huggel C., Orlove B., Nolin A. Climate change in the mountain cryosphere: impacts and responses // Regional Environmental Change // 2019. Vol. 19, № 5. P. 1225-1228.
11. Barry R.G. Mountain weather and climate. London: Cambridge University Press, 2008. 505 p.
12. Bartelt P.A., Lehning M. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part I: numerical model // Cold Reg. Sci. Technol. 2002. Vol. 35, no. 3. P. 123-145.
13. Bintanja R. Snowdrift Sublimation in a Katabatic Wind Region of the Antarctic Ice Sheet // J. Appl. Meteorol. 2001. Vol. 40. P. 1952-1966.
14. Chernenkov A.Yu., Volodin E.M., Kostrykin S.V., Tarasevich M.A., Vorobyeva V.V. Modification and validation of the soil-snow module in the INM RAS climate model // Atmosphere. 2024. Vol. 15, no. 4. P. 422.
15. Decharme B., Brun E., Boone A., Delire C. et al. Impacts of snow and organic soils parameterization on northern Eurasian soil temperature profiles simulated by the ISBA land surface model // The Cryosphere. 2016. Vol. 10, no. 2. P. 853-877.
16. Hock R., Rasul G. et al. High Mountain Areas. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. (The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019). 2019.
17. Krinner G. et al. ESM-SnowMIP: assessing snow models and quantifying snow-related climate feedbacks // Geosci. Model Dev. 2018. Vol. 11. P. 5027-5049.
18. Milner A.M., Khamis K., Battin T.J. Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2017. Vol. 114, no. 37. P. 9770-9778.
19. Pellicciotti F., Bauder A., Parola M. Effect of glaciers on streamflow trends in the Swiss Alps // Water Resources Research. 2010. Vol. 46, № 10. <https://doi.org/10.1029/2009WR009039>
20. Pomeroy J.W., Jones H.G. Wind-Blown Snow: Sublimation, transport and changes to polar snow // Chemical exchange between atmosphere and polar snow. NATO ASI Series, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 1996. Vol. 43. P. 453-489.
21. Smirnova T.G., Brown J.M., Benjamin S.G., Kenyon J.S. Modifications to the Rapid Update Cycle Land Surface Model (RUC LSM) Available in the Weather Research and Forecasting (WRF) Model // Mon. Weather Rev. 2016. Vol. 144. P. 1851-1865.
22. Stepanenko V.M. et al. Land surface scheme TerM: the model formulation, code architecture and applications // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2024. Vol. 39, no. 6. P. 363-377.

References

1. Volodin E.M. Vosproizvedenie sovremennogo klimata model'ju klimaticheskoj sistemy INMCM60 [Reproduction of the modern climate using the INMCM60 climate system model]. *Izv., Atmos. Oceanic Phys.* 2023, vol. 59, № 1, pp. 19-26 [in Russ.].
2. Drozdov E.D., Toropov P.A., Turkov D.V., Shestakova A.A., Androsova E.E. Ocenka jefekta sublimacii ledjanyh kristallov pri meteljah nad poverhnost'ju gornogo lednika na osnove naturnyh dannyh i chislennogo modelirovaniya [Estimation of the effect of sublimation of ice crystals during snowstorms over the surface of a mountain glacier based on field data and numerical simulation]. *Sovremennye tendentsii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii: Materialy IV Vserossiyskoj nauchno-prakticheskoy konferentsii, priurochennoj k Godu nauki i tehnologii [Modern trends and prospects for the development of hydrometeorology in Russia: Proceedings of the IV All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the Year of Science and Technology]*. 2021, pp. 397-404 [in Russ.].
3. Drozdov E.D., Toropov P.A., Avilov V.K., Artamonov A.Yu., Polyukhov A.A., Zheleznova I.V., Yarinich Yu.I. Meteorological regime of the Elbrus high-mountain zone during the accumulation period. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2024, vol. 60, no. S2, pp. S202-S213.
4. Kornilova E.D., Krylenko I.N., Rets E.P., Motovilov Yu.G., Korneva I.A., Postnikova T.N., Rybak O.O. Vlijanie izmenenij klimata i degradacii oledeneniya na vodnyj rezhim v vysokogornoj chasti bassejna r. Terek [The impact of climate change and glacier degradation on the water regime in the high-mountain part of the Terek River basin]. *Led i Sneg [Ice and Snow]*. 2024, vol. 64, no. 2, pp. 173-188 [in Russ.].
5. Mikhailenko V.N. et al. Ledniki i klimat Elbrusa. [Glaciers and climate of Elbrus]. Saint-Petersburg, Nestor-Istoria publ., 2020, 372 p. [in Russ.].
6. Toropov P.A., Shestakova A.A., Yarinich Yu.I., Kutuzov S.S. Modeling orographic precipitation using the example of Elbrus. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2023, vol. 59, no. S1, pp. S8-S22. DOI: 10.1134/s0001433823130108.
7. Toropov P.A., Debol'skii A.V., Polyukhov A.A., Shestakova A.A., Popovnin V.V., Drozdov E.D. Oerlemans Minimal Model as a Possible Instrument for Describing Mountain Glaciation in Earth System Models. *Vodnye resursy [Water resources]*. 2023, vol. 50, no. 5, pp. 524-537 [in Russ.].
8. Toropov P.A., Lavrentiev I.I., Artamonov A.Yu., Drozdov E.D., Kiseleva T.D., Abramov A.A., Sushintsev I.M., Degtyarev A.I., Khairedinova A.G., Elagina N.E.. Gljaciologicheskie issledovanija Instituta geografii RAN na Jel'bruse v 2024 g. [Glaciological research by the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences on Elbrus in 2024]. *Led i Sneg [Ice and Snow]*. 2024, vol. 64, no. 4, pp. 480 [in Russ.].
9. Turkov D.V., Drozdov E.D., Lomakin A.A. Al'bedo snezhnogo pokrova i ego parametrizacija dlja celej modelirovaniya prirodnyh sistem i klimata [Snow cover albedo and its parameterization for the purposes of modeling natural systems and climate]. *Led i Sneg [Ice and Snow]*. 2024, vol. 64, no. 3, pp. 403-419 [in Russ.].
10. Adler C., Huggel C., Orlove B., Nolin A. Climate change in the mountain cryosphere: impacts and responses. *Regional Environmental Change*. 2019, vol. 19, no. 5, pp. 1225-1228.
11. Barry R.G. Mountain weather and climate. London: Cambridge University Press publ., 2008, 505 p.
12. Bartelt P.A., Lehning M. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part I: numerical model. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2002, vol. 35, pp. 123-145.
13. Bintanja R. Snowdrift Sublimation in a Katabatic Wind Region of the Antarctic Ice Sheet. *J. Appl. Meteorol.* 2001, vol. 40, pp. 1952-1966.
14. Chernenkov A.Yu., Volodin E.M., Kostykin S.V., Tarasevich M.A., Vorobyeva V.V. Modification and validation of the soil-snow module in the INM RAS climate model. *Atmosphere*. 2024, vol. 15, no. 4, pp. 422.
15. Decharme B., Brun E., Boone A., Delire C. et al. Impacts of snow and organic soils parameterization on northern Eurasian soil temperature profiles simulated by the ISBA land surface model. *The Cryosphere*. 2016, vol. 10, no. 2, pp. 853-877.

16. Hock R. et al. "High Mountain Areas" in IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019), 2019.
17. Krinner G. et al. ESM-SnowMIP: assessing snow models and quantifying snow-related climate feedbacks. *Geosci. Model Dev.* 2018, vol. 11, pp. 5027-5049.
18. Milner A.M., Khamis K., Battin T.J. Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 2017, vol. 114, no. 37, pp. 9770-9778.
19. Pellicciotti F., Bauder A., Parola M. Effect of glaciers on streamflow trends in the Swiss Alps. *Water Resources Research*, 2010, vol. 46, no. 10. <https://doi.org/10.1029/2009WR009039>
20. Pomeroy J.W., Jones H.G. Wind-Blown Snow: Sublimation, transport and changes to polar snow. *Chemical exchange between atmosphere and polar snow.* NATO ASI Series, Berlin, Heidelberg, 1996, vol. 43, pp. 453-489.
21. Smirnova T.G., Brown J.M., Benjamin S.G., Kenyon J.S. Modifications to the Rapid Update Cycle Land Surface Model (RUC LSM) Available in the Weather Research and Forecasting (WRF) Model. *Mon. Weather Rev.* 2016, vol. 144, pp. 1851-1865.
22. Stepanenko V.M., Medvedev A.I., Bogomolov V.Yu. et al. Land surface scheme TerM: the model formulation, code architecture and applications. *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling.* 2024, vol. 39, no. 6, pp. 363-377.

*Поступила 13.10.2025; принята в печать 26.11.2025.
Submitted 13.10.2025; accepted for publication 26.11.2025.*