

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Дроздов Евгений Дмитриевич

Моделирование снежного покрова на горных ледниках

Специальность 1.6.18. Науки об атмосфере и климате

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2026

Диссертация подготовлена на кафедре метеорологии и климатологии
географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель – ***Торопов Павел Алексеевич,***
кандидат географических наук, доцент

Официальные оппоненты – ***Хан Валентина Моисеевна,***
*доктор географических наук, заместитель
директора Гидрометеорологического научно-
исследовательского центра Российской
Федерации*

Елисеев Алексей Викторович,
*доктор физико-математических наук,
доцент, профессор кафедры физики
атмосферы физического факультета
Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова*

Попов Сергей Викторович,
*доктор геолого-минералогических наук,
доцент кафедры гидрологии суши Института
наук о Земле Санкт-Петербургского
государственного университета*

Защита диссертации состоится «17» сентября 2026 г. в 17 часов 00 минут
на заседании диссертационного совета МГУ.016.2 Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1,
Ленинские горы д. 1, ГЗ МГУ, Географический факультет, 18 этаж, ауд. 1801.

E-mail: Diss1102MSU@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной
библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на
портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3974>

Автореферат разослан « » августа 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук

А.В. Ольчев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Снежный покров является ключевой компонентой горной криосферы и очень активно реагирует на климатический форсинг [Lüthi et al., 2019], что определяет вариации баланса массы горных ледников [Hock, Rasul et al., 2019] и водного режима рек [Корнилова и др., 2024]. Это, в свою очередь, является одной из причин повышения уровня Мирового океана [Gardner et al., 2013], перераспределения водных ресурсов [Milner et al., 2017] и изменения природных экосистем [IPCC, 2018], а также увеличения повторяемости опасных гляциологических явлений. При этом для высокогорных районов существует набор специфических факторов, влияющих на формирование и динамику снежного покрова и требующих особого учета при его моделировании. К таковым относятся процессы интенсивного метелевого переноса и метелевой сублимации [Pomeroy, Jones, 1996; Thiery et al., 2012], ветрового уплотнения, влияния интенсивной солнечной радиации и замерзания жидкой влаги внутри снежной толщи.

Одним из векторов развития современных моделей Земной Системы (далее МЗС) [Володин, Грицун, 2020] являются элементы деятельного слоя суши, в частности, ледники и снежный покров в горных районах. В настоящий момент в отечественной МЗС ИВМ РАН – МГУ используется упрощенная схема расчета снежного покрова [Chernenkov et al., 2024], которая хорошо работает на планетарном масштабе, однако практически не учитывает специфические факторы его формирования в горах. Более реалистичное описание деятельного слоя в ячейках МЗС, попадающих на горные территории, подразумевает развитие параметризаций горного оледенения, что, в свою очередь, невозможно без подробного описания снежного покрова на горных ледниках и развития специализированных подходов к его моделированию.

Степень изученности темы исследования. В настоящее время известно множество моделей снежного покрова различной комплексности, принимающих участие в проектах ESM-SnowMIP [Krinner et al., 2018; Menard et al., 2021]. Однако некоторые из известных моделей являются вычислительно затратными и очень чувствительными к начальным данным (например, модели SNOWPACK [Bartelt, Lehning, 2002] и CROCUS [Vionnet et al., 2012]). В МЗС и моделях прогноза погоды применяются упрощенные схемы расчета снежного покрова, разработанные для равнинных территорий и слабо учитывающие специфические процессы, существенно влияющие на снежный покров в горах. К такому классу можно отнести схемы снежного покрова в моделях CLASS [Verseghy, 2012], TerM [Stepanenko et al., 2024], ИВМ РАН – МГУ [Chernenkov et al., 2024] и др.

Существует ряд других моделей, которые удачно сочетают физические подходы с эмпирической параметризацией ряда процессов, что делает их наиболее перспективными для задач моделирования климата. К таким относятся ECMWF HTESSEL-ML [Arduini et al., 2019], ISBA [Decharme et al., 2016], Noah-MP [Niu et al.,

2011] и др. Однако к программному коду большинства этих моделей доступ отсутствует. Аналогичные отечественные модели деятельного слоя суши SPONSOR [Шмакин и др., 2009] и SWAP [Гусев, Насонова, 2002] требуют отделения снежного блока и существенной переработки для применения в качестве блока параметризации горного оледенения, что, по сути, соответствует созданию новой модели. Поэтому было принято решение о создании новой схемы снежного покрова с описанием специфических процессов на горных ледниках для применения в качестве модуля глобальной гляциологической модели IGRICE [Toropov et al., 2025].

Целью данного исследования является создание вычислительно эффективного и физически обоснованного инструмента расчета характеристик снежного покрова, учитывающего специфические процессы в высокогорных районах.

Задачи работы:

- выявить набор физических процессов и параметров, необходимых для описания снежного покрова на горных ледниках и создать программный алгоритм модели, учитывающий эти процессы;
- оценить эффективность созданной модели промежуточной сложности для описания характеристик снежного покрова на горных ледниках на основе результатов сравнения с данными постоянного мониторинга на ледниках Эльбруса;
- получить пространственно-временное распределение характеристик снежного покрова на горных ледниках с помощью созданной модели;
- оценить роль сублимации ледяных кристаллов при интенсивном метелевом переносе в тепловом балансе и балансе массы снежного покрова в горах.

Предметом данного исследования являются физические закономерности и механизмы формирования и пространственно-временного распределения снежного покрова на поверхности горного ледника, а **объектом** – снежный покров на поверхности горного ледника.

Научная новизна:

1) Впервые в России организованы постоянные автоматические наблюдения за метеорологическим режимом в зонах абляции и аккумуляции горного ледника (ледник Гарабаши, Эльбрус) на годовом временном масштабе, а также получены прямые оценки интенсивности метелевого переноса.

2) Впервые на горных ледниках России на основе натурных данных получены численные оценки интенсивности сублимации ледяных кристаллов при метелях и показано, что этот процесс является значимой компонентой баланса массы горных ледников.

3) Представлена новая модель снежного покрова промежуточной сложности SnowDraw, предназначенная для воспроизведения пространственно-временного распределения характеристик снежного покрова на горных ледниках. Доказана целесообразность применения этой модели для научно-прикладных задач гляциологии и горной гидрологии на многолетнем временном масштабе.

4) На основе результатов разработанной модели снежного покрова SnowDraw получены первые оценки пространственно-временного распределения характеристик снежного покрова за последние 40 лет для двух контрастных горно-ледниковых районов Земли: Кавказа (на примере Эльбруса) и архипелага Шпицберген (на примере ледника Восточный Грэнфьорд).

Теоретическая и практическая значимость. Результаты расчетов с помощью модели снежного покрова SnowDraw могут быть использованы для научно-прикладных задач гляциологии и горной гидрологии, таких как оценка многолетней динамики оледенения и речного стока, оценка лавинной опасности и селевого потенциала, а также в рамках инженерно-гидрометеорологических изысканий в горных районах. Кроме того, предложенная модель используется в качестве снежного модуля глобальной гляциологической модели IGRICE [Торопов et. al., 2025], которая в перспективе будет внедрена в блок деятельного слоя суши модели Земной системы ИВМ РАН – МГУ.

Основные защищаемые положения:

1. Для описания снежного покрова на горных ледниках существенным является подробный учет в моделях процессов ветрового уплотнения снега, метелевой сублимации, проникновения солнечной радиации и замерзания жидкой влаги в снежной толще.

2. Разработанный алгоритм SnowDraw является физически обоснованным и вычислительно эффективным инструментом воспроизведения снежного покрова на горных ледниках в сравнение с другими доступными моделями.

3. Алгоритм SnowDraw целесообразно внедрить в отечественную Модель земной системы ARTS-ESM/INMCM, поскольку его совмещение с модулем орографических осадков и тепло-балансовым блоком кардинально улучшает картину пространственно-временного распределения снежного покрова в высокогорных районах по сравнению с результатами крупномасштабных атмосферных моделей.

4. Сублимация ледяных кристаллов при интенсивном метелевом переносе существенно влияет на баланс массы снежного покрова в высокогорных районах и перестраивает структуру теплового баланса поверхности, что делает значимым ее учет при моделировании.

Личный вклад автора. С 2018 г. автор работал в многочисленных экспедициях и полевых командировках на ледниках Гарабаши, Джанкуат и Микельчиран (Центральный Кавказ), принимая ключевое участие в подготовке, установке и обслуживании метеорологических комплексов на ледниках, сборе и обработке данных. Программный алгоритм предложенной модели снежного покрова и его реализация в виде кода на языке программирования Fortran, а также служебные скрипты на языке программирования Python для обработки результатов численных экспериментов созданы лично автором. Все материалы, приведенные в диссертации,

получены лично автором или при его непосредственном участии. Использование опубликованных архивных материалов и данных имеет соответствующие ссылки.

Степень достоверности и апробация результатов. Полученные результаты основаны на строгом математическом моделировании физических процессов. Последующая интерпретация и выводы основываются на сравнении результатов численных экспериментов с данными наблюдений при длине выборки более 7000 значений, а также корректной статистической обработке и сравнении с ранее опубликованными данными и результатами расчетов по другим ведущим моделям.

Результаты исследования докладывались автором на 9 конференциях, в том числе 2 зарубежных. На созданную модель получено свидетельство о регистрации прав на ПО.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 научных работ в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.18. Науки об атмосфере и климате (географические науки).

Результаты работы использованы в научном отчете по проекту РНФ № 23-17-00247 «Развитие параметризации горного оледенения для моделей Земной системы».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 227 источников и приложения. Работа изложена на 182 страницах текста, включает 72 иллюстрации и 14 таблиц. Список литературы включает 45 публикаций на русском языке и 172 публикаций на иностранном, а также 10 Интернет-источников.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю к.г.н., доц. Торопову П.А. за бесценную помощь в подготовке диссертации. Также выражаю благодарность д.ф.-м.н., зам. директора НИВЦ МГУ Степаненко В.М. за полезные консультации при построении алгоритма созданной модели и к.г.н., с.н.с. ИФА РАН и НИВЦ МГУ Шестаковой А.А. за работу над объединением модели снежного покрова с моделью IGRICE. За ценные замечания и идеи при разработке модели отдельная благодарность выражаю к.г.н., зам. декана по научной работе, зав. лабораторией лавин и селей географического факультета МГУ Сократову С.А., к.г.н., с.н.с. кафедры метеорологии и климатологии географического факультета МГУ Полюхову А.А., а также сотрудникам отдела гляциологии ИГ РАН в.н.с. Туркову Д.В., с.н.с. Чернову Р.А. и в.н.с. Носенко Г.А. За техническую поддержку при подготовке организации измерений на Эльбрусе автор выражает отдельную благодарность м.н.с. ИФА РАН Артамонову А.Ю. и сотруднику МГТУ им. Баумана Семенову К.А., аспиранткам ИФА РАН Новиковой Е.В. и Антипиной У.И. и студентам географического факультета МГУ Сушинцеву И.М., Гибадуллину Р.Р., Шкуриновой Е.А., Дегтяреву А.И. и Кускевич М.А.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, указана степень её изученности, сформулированы цели и задачи исследования, охарактеризована научная новизна и практическая значимость диссертации, представлены основные защищаемые положения, указана степень достоверности и апробация результатов.

Глава 1. Моделирование снежного покрова в задачах гляциоклиматологии

В главе выполнен обзор отечественной и зарубежной литературы, касающийся подходов к моделированию горных ледников и снежного покрова. Приведен подробный анализ современных моделей снежного покрова, в том числе в МЗС и моделях прогноза погоды на примере схемы в модели ИВМ РАН – МГУ [Володин, 1998; Chernenkov et al., 2024], моделей физики снежного покрова на примере SNOWPACK [Bartelt, Lehning, 2002], моделей промежуточной сложности на примере SPONSOR [Шмакин и др., 2009] и Noah-MP [Liu et al., 2011]. Обосновывается, почему для учета снежного покрова на поверхности горного ледника наиболее перспективным является класс моделей промежуточной сложности. Кроме того, приводится обоснование создания новой специализированной модели снежного покрова промежуточной сложности, в которой особую значимость имеют процессы, характерные для высокогорных условий.

На основе представленных в этой главе результатов сформулировано первое защищаемое положение: **Для описания снежного покрова на горных ледниках существенным является подробный учет в моделях процессов ветрового уплотнения снега, метелевой сублимации, проникновения солнечной радиации и замерзания жидкой влаги в снежной толще**

Глава 2. Особенности снежного покрова в горах

В главе приведена подробная характеристика и обоснование выбора района исследований, поскольку существенной частью работы стала организация серии метеорологических наблюдений на ледниках Эльбруса (Рис. 1). В главе описываются метеорологические комплексы, установленные в августе 2024 г. в зонах абляции ледника Гарабаши на южном склоне Эльбруса (3970 м над у.м.) и ледника Микельчиран на северном склоне Эльбруса (3900 м над у.м.), которые в настоящее время автономно работают в рамках постоянного мониторинга метеорологических условий над поверхностями типичных горных ледников Кавказа. Эти уникальные данные наблюдений позволяют проводить полноценную верификацию моделей снежного покрова в характерных природных условиях, а также могут быть использованы для прикладных задач.

На основе собранных данных наблюдений показано, что интенсивный метелевый перенос и, как следствие, метелевая сублимация являются распространенным явлением на горных ледниках в холодный период, а на примере данных шурфования показано влияние факторов ветрового уплотнения и замерзания

жидкой влаги внутри снежной толщи. Поэтому необходим подробный и физически обоснованный учет этих процессов при моделировании теплового баланса и баланса массы снежного покрова в горах.

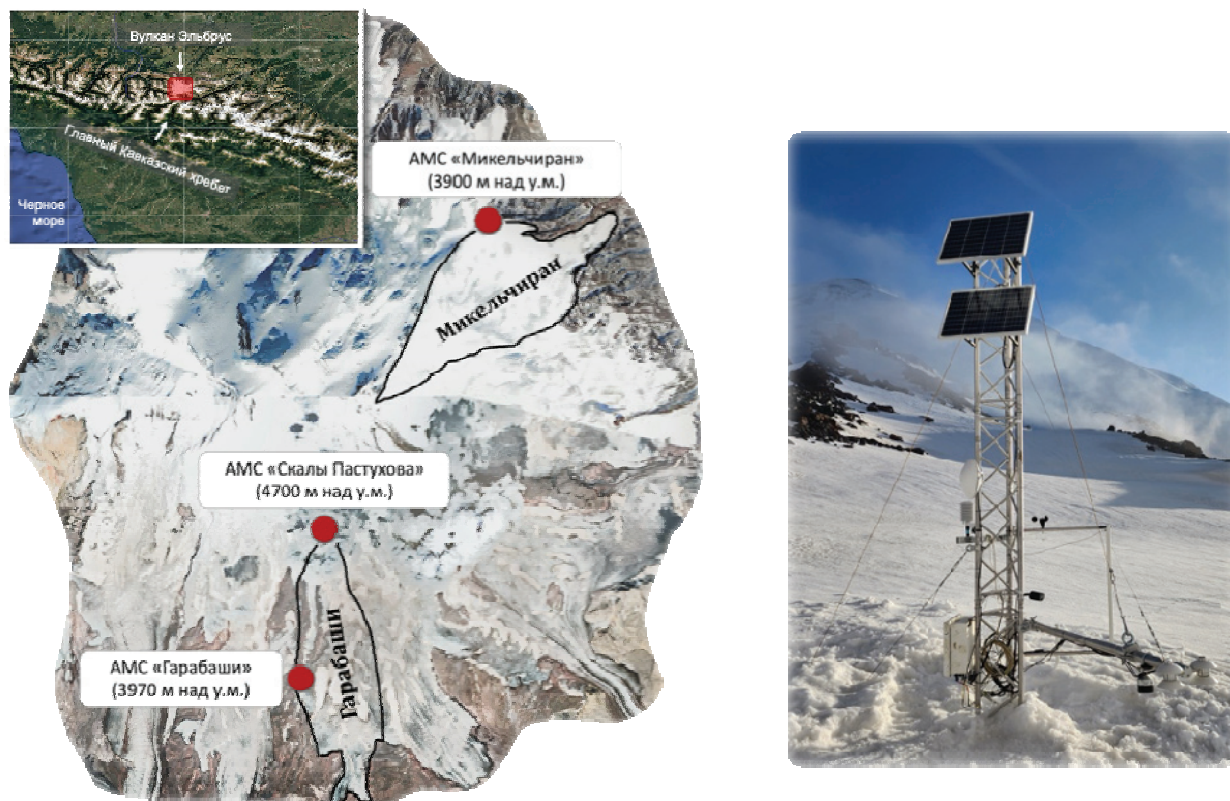


Рисунок 1 – Схема района исследований с точками установки оборудования на Эльбрусе, справа – автоматическая метеостанция в зоне абляции ледника Гарабаш (3900 м над у.м.)

Глава 3. Описание специализированной модели снежного покрова SnowDraw

В главе приведено подробное описание алгоритма разработанной модели промежуточной сложности SnowDraw (Рис. 2). Процесс теплопереноса в снеге обеспечивается неявной схемой решения одномерного уравнения теплопроводности на пространственно-временной сетке с заданным количеством уровней по вертикали, перенос влаги рассчитывается методом резервуаров для каждого слоя, а для расчета основных физических характеристик снежного покрова (альбедо, плотность, коэффициенты теплопроводности и теплоемкости) используются эмпирические и упрощенные зависимости. При этом внутри снежной толщи учитываются фазовые переходы воды и проникновение солнечной радиации. Для определения температуры поверхности снега используется итерационное решение уравнения теплового баланса поверхности методом хорд. Расчет турбулентных потоков явного и скрытого тепла на поверхности производится на основе теории подобия Монина-Обухова с применением безразмерных функций Бусингера-Дайера [Businger et al., 1971].

В рамках данной работы использовалась вертикальная сетка из 6 уровней, а шаг по времени составлял 1 или 3 часа. Расчеты основных характеристик снежного

покрова реализуются в отдельных точках моделируемого ледника для различной высоты над уровнем моря и азимута.

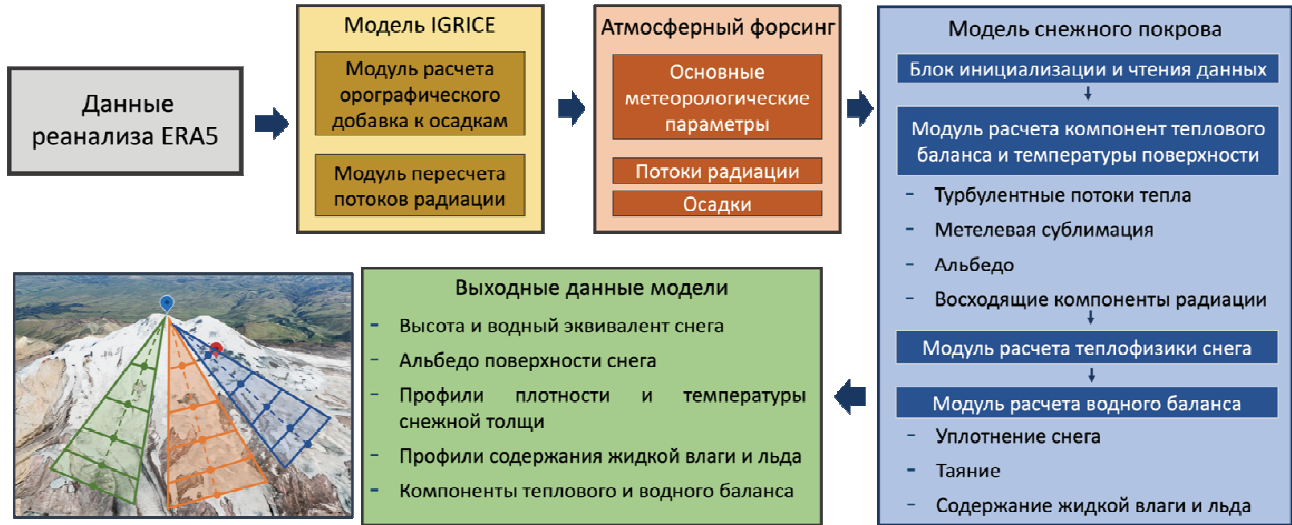


Рисунок 2 – Общая схема работы модели снежного покрова SnowDraw, ее входных данных и препроцессинга

Модель разработана на языке программирования Fortran 90 для компилятора GNU. В набор входных данных модели входит информация о температуре и влажности воздуха, скорости ветра, атмосферному давлению, сумме осадков, приходящей коротковолновой и длинноволновой радиации. В качестве граничных условий используются данные реанализа ERA5. Количество осадков рассчитывается с помощью модели орографической компоненты [Торопов и др., 2022]. Пересчет приходящей солнечной радиации реализуется с учетом геометрических параметров: азимута и среднего угла наклона ледовой поверхности, а также закрытости горизонта [Muller, 2005]. Также для нисходящих потоков прямой коротковолновой и длинноволновой радиации вводится поправка на абсолютную высоту по эмпирическим градиентам [Barry, 2008].

Важная особенность созданной модели – использование физически полного алгоритма расчета сублимации ледяных кристаллов при метелях [Bintanja, 2001; Dery et al., 1998]. Скорость метелевой сублимации по ней определяется следующим образом:

$$S_z = - \sum_r M_r \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{n_r}{4\pi r^2 \rho_p} \left(\frac{\partial m}{\partial t} \right)_r \right], \quad (1)$$

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 турбулизованности атмосферы.

Для определения альbedo снежного покрова используется параметризация интегрального альbedo, разработанная для модели снежного покрова SPONSOR [Турков и др., 2024]:

$$\alpha_{sn} = \max(\alpha_{melt}, \alpha_{new} - S_{alb}). \quad (2)$$

Здесь $\alpha_{melt} = 0.3$ – минимально возможное альbedo сплошного снежного покрова, α_{new} – альbedo свежего снега, S_{alb} – сумма факторов в изменение альbedo:

$$S_{alb} = \Delta\alpha_{den} + \Delta\alpha_{temp} + \Delta\alpha_{old} + \Delta\alpha_{gr} + d_{pol} - \Delta\alpha_{sol}, \quad (3)$$

где $\Delta\alpha_{den}$ отвечает за изменения альbedo 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 альbedo подстилающей поверхности, а $\Delta\alpha_{sol}$ учитывает увеличение альbedo при небольшой высоте Солнца.

Также модели была выбрана параметризация плотности снега из блока снежного покрова модели ISBA [Decharme et al., 2016], которая учитывает как гравитационное, так и ветровое уплотнение. Согласно ей изменение плотности снежного покрова ρ_{sn} на каждом шаге по времени и расчетном уровне i в снеге определяется как:

$$\frac{\partial \rho_{sn}}{\partial t} = \rho_{sn}(i) \cdot \frac{\sigma(i)}{\eta(i)} + \max\left(0, \frac{\rho_{max} - \rho_{sn}(i)}{\tau_w}\right), \quad (4)$$

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 [Brun et al., 1997].

Использование многоуровневой схемы и метода резервуаров позволяет учитывать повторное замерзание талой воды внутри снежной толщи, а также влияние диффузии водяного пара на её теплопроводность за счет параметризации [Sun et al., 1999].

Глава 4. Верификация модели снежного покрова SnowDraw

В главе описываются результаты серии численных экспериментов с представленной моделью снежного покрова, направленных на ее отладку и валидацию.

В первую очередь модель была протестирована на данных наблюдений продолжительностью 10–20 лет, реализованных на горных полигонах проекта ESM-SnowMIP [Menard et al., 2021] Weissfluhjoch (Швейцария), Senator Beck и Swamp Angel (США). Статистический анализ результатов сравнения с данными наблюдений по высоте снега (Табл. 1) показал, что созданная схема соответствует уровню лучших мировых моделей снежного покрова и показывает результаты несколько лучше среднего по ансамблю из 26 моделей. Таким образом показано, что созданная схема правильно отражает физические принципы формирования снежного покрова и может применяться для расчета его динамики на многолетнем временном масштабе.

Таблица 1 – Статистические метрики качества моделирования высоты снежного покрова по горным полигонам эксперимента ESM-SnowMIP

Метрика	Weissfluhjoch	Senator Beck	Swamp Angel
MAE, м	0.21	0.24	0.27
Коэффициент корреляции	0.93	0.89	0.91
Коэффициент детерминации	0.87	0.80	0.83
RMSE, м	0.33	0.33	0.35
Нормированное RMSE	0.41	0.60	0.50
Bias, м	0.02	0.14	0.50
NSE	0.83	0.64	0.75

На следующем этапе была проведена полноценная верификация созданной модели в условиях эльбрусского ледника Гарабаши для нескольких сезонов. Расчеты проводились для 9-месячного периода (с 01.09.2024 по 20.06.2025) с шагом по времени в 1 час на данных наблюдений по метеорологическому комплексу, установленному в зоне абляции ледника Гарабаши (3970 м над у.м.).

В сравнении с автоматическими наблюдениями за высотой снега и данными шурфования модель удачно воспроизвела малое накопление снега в начале зимы (Рис. 3), однако модельные значения водного эквивалента оказались несколько завышенными: ошибка составила 145 мм в.э. 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. К концу периода аккумуляции, 18.06.2025 модельное значение водного эквивалента снега (994 мм) оказалось весьма близким к полученному в шурфе (888 мм), что соответствует относительной ошибке 12%. Это указывает на адекватное описание в модели процесса снегонакопления.

Также была получена высокая степень соответствия расчетных значений наблюдаемым для температуры поверхности ($R^2 = 0.8$ при среднем смещении в 2.2°C) и плотности снега (ошибка 5 кг/м^3 для шурфа в конце января 2025 г.).

Кроме того, была проведена отдельная серия численных экспериментов с моделью SnowDraw для высоты 3800 м над у.м. на временном масштабе более года – с сентября 2023 г. по июль 2025 г. с шагом во времени 3 часа и использованием реанализа ERA5 в качестве входных данных. На идентичных входных данных и шаге по времени были проведены расчеты с моделью промежуточной сложности Noah-MP [Niu et al., 2011] и моделью полной физики снежного покрова SNOWPACK [Bartelt, Lehning, 2002], которые рассматривались в качестве «конкурентов» для представленной схемы.

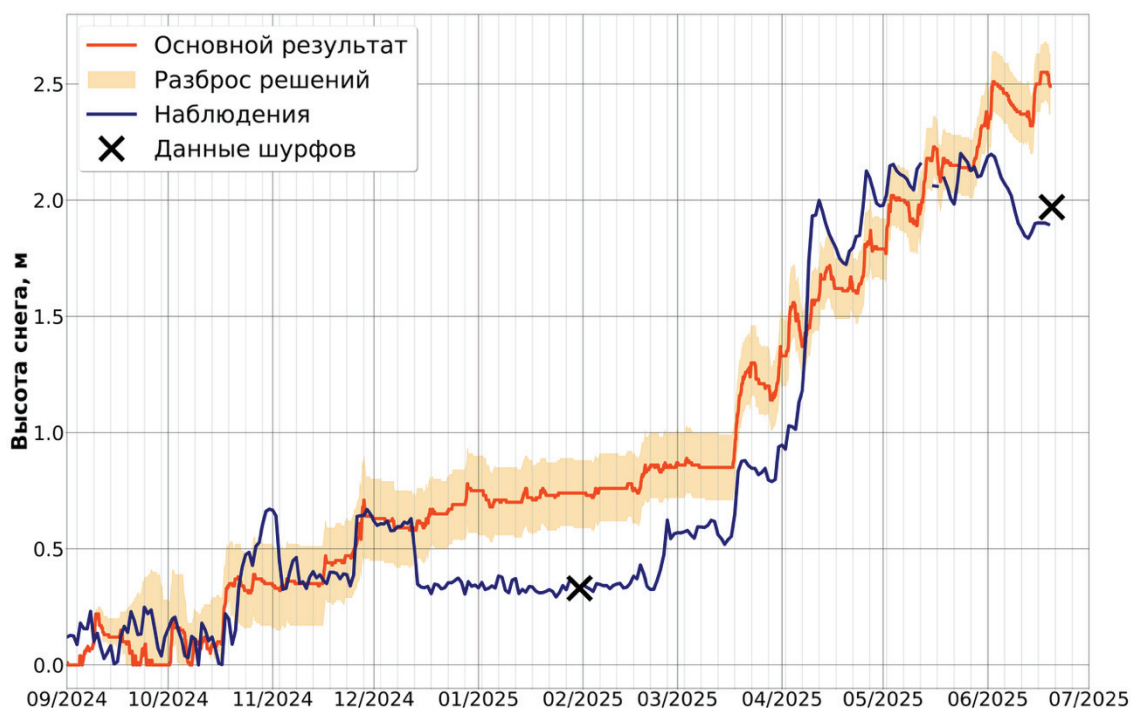


Рисунок 3 – Временной ход высоты снежного покрова в зоне абляции ледника Гарабаши в период с 01.09.2024 по 20.06.2025 по результатам моделирования, данным автоматических наблюдений и шурфования снега

Модель SnowDraw показала высокое качество воспроизведения водного эквивалента в сравнении с данными шурфования и существенно превзошла результаты других моделей (Рис. 4). Так, для января 2024 г. модель занизила величину водного эквивалента лишь на 28 мм (Табл. 2) или 5.2% относительно измеренного значения, для января 2025 г. – завысила на 80 мм (относительная ошибка – 73%), а в период максимального водозапаса в июне 2025 г. ошибка моделирования составила всего 48 мм в.э. (относительная ошибка – 5.4%). При этом прочие модели снежного покрова во всех случаях существенно завышают скорость накопления снега на леднике. Также показано, что разработанная модель успешно воспроизвела профили и средние значения плотности снежного покрова в сравнении с тремя шурфами за 2024–2025 гг., в то время как модель Noah-MP существенно занижает значения плотности за счет применения более простой схемы уплотнения снега.

Также для периода с сентября 2023 г. по июль 2025 г. были проведены численные эксперименты с представленной моделью SnowDraw и моделью Noah-MP для различных высотных зон ледника Гарабаши с шагом 300 м от 3200 м над у.м. (фронт ледника) до 4400 м над у.м. (зона питания ледника) на основе данных реанализа ERA5, приведенных к соответствующим высотам.

Модель SnowDraw адекватно воспроизводит основные особенности пространственно-временного изменения снежного покрова на леднике (Рис. 5): как активную аккумуляцию и интенсивное таяние на высотах 3200 и 3500 м над у.м., так и примерную высоту границы питания (около 4100 м над у.м.). Модель Noah-MP существенно завышает высоту снежного покрова практически во всех высотных

зонах, а время схода снежного покрова в диапазоне высот 3200–3800 м над у.м. запаздывает на месяц и более, что говорит о неадекватном описании таяния снега в данной модели.

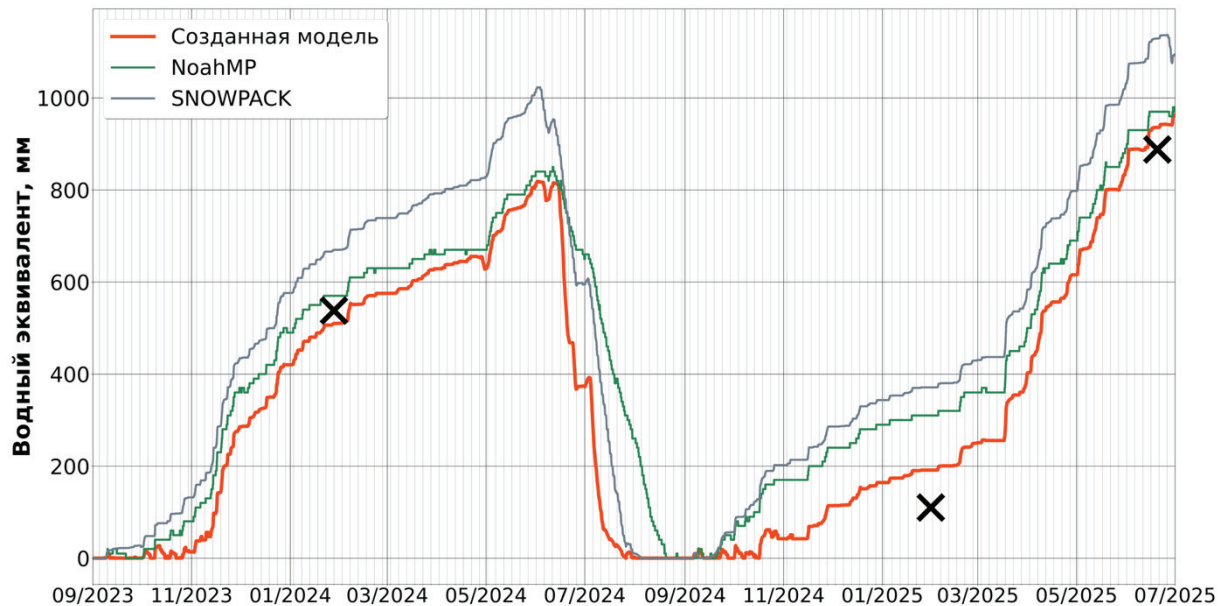


Рисунок 4 – Временной ход водного эквивалента снежного покрова в зоне абляции ледника Гарабаши в период с 01.09.2023 по 30.06.2025 по результатам моделирования на основе данных реанализа ERA5 и данным шурфования снега (черные крестики)

Таблица 2 – Сравнение высоты и водного эквивалента снежного покрова по данным шурфов и результатам моделей SnowDraw, SNOWPACK и Noah-MP (зеленым выделена наименьшая ошибка для каждого временного среза)

Дата	Шурф	Модель	Абсолютная ошибка		
			SnowDraw	SNOWPACK	Noah-MP
Высота снега, м					
28.01.2024	1.47	1.40	-0.07	0.72	0.30
31.01.2025	0.33	0.57	0.24	0.97	0.70
18.06.2025	1.97	2.30	0.33	0.64	0.45
Водный эквивалент, мм					
28.01.2024	538	510	-28	132	32
31.01.2025	110	190	80	261	200
18.06.2025	888	936	48	240	82

Сравнение дат схода снежного покрова в различных зонах ледника Гарабаши с космическими снимками Sentinel-2 за периоды абляции 2022–2024 гг. (Табл. 3) показало, что модель SnowDraw воспроизвела реалистичные даты схода снежного покрова в зоне абляции ледника (ошибка составила в 6–10 дней), что существенно ближе к реальности по сравнению с результатами модели Noah-MP (30–45 дней).

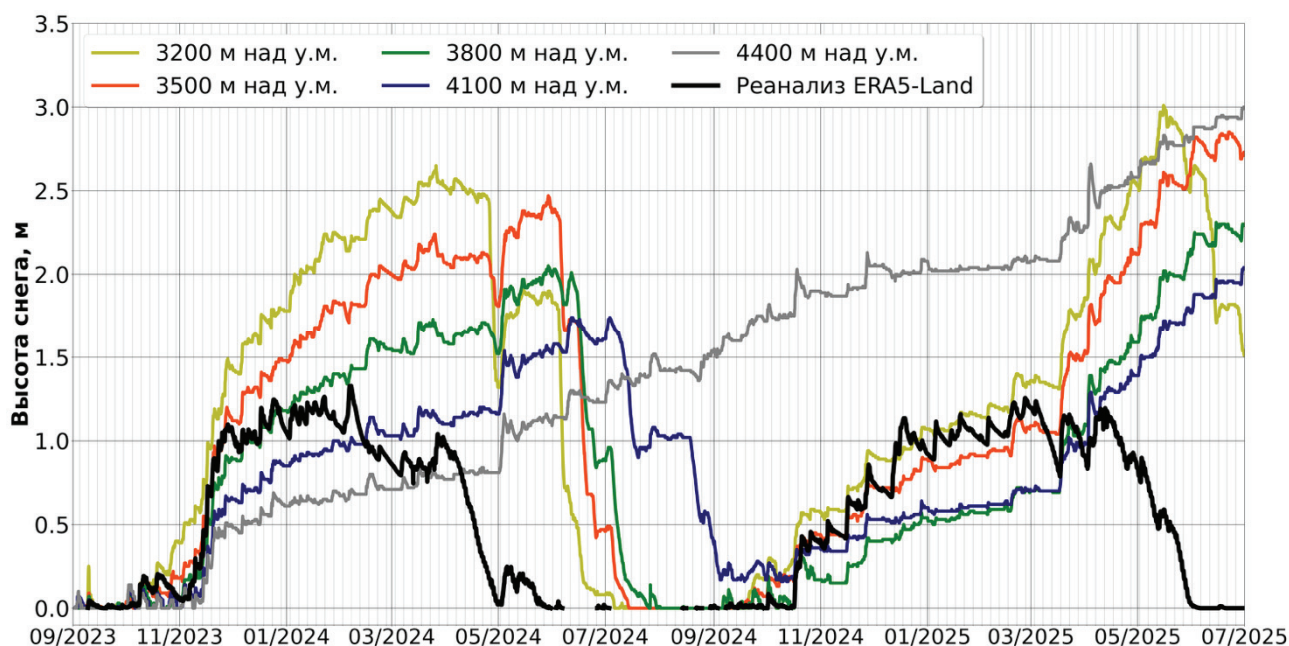


Рисунок 5 – Временной ход высоты снежного покрова в различных высотных зонах ледника Гарабаши в период с 01.09.2023 по 30.06.2025 по результатам моделирования и по данным реанализа ERA5-Land

Таблица 3 – Даты схода снежного покрова в различных высотных зонах ледника Гарабаши за 2024 г. по данным снимков Sentinel-2 и результатам моделирования

Вид данных	3200 м	3500 м	3800 м	4100 м	4400 м
Снимок Sentinel-2	25.06	05.07	20.07	25.08	Не сошел
SnowDraw	05.07	13.07	26.07	Не сошел	Не сошел
Noah-MP	10.08	14.08	20.08	Не сошел	Не сошел

Представленные в главе результаты позволяют утверждать, что модель SnowDraw показывает достаточно высокое качество воспроизведения сезонной динамики и характеристик снежного покрова на горном леднике. При этом модели снежного покрова Noah-MP и SNOWPACK продемонстрировали более слабые результаты расчета как скорости накопления и таяния снежного покрова, так и характеристик снежной толщи. Также стоит отметить, что время счета эксперимента в одной расчетной точке длительностью 22 месяца с шагом интегрирования 3 часа по модели SnowDraw занимает порядка 2–3 секунд, в то время как модель SNOWPACK затрачивает на тот же эксперимент порядка 3–5 минут. Поэтому с вычислительной точки зрения представленная модель является значительно более экономным инструментом расчета динамики и характеристик снежного покрова и подходит для задач прогноза климата.

На основе представленных в этой главе результатов было сформулировано второе защищаемое положение: **разработанный алгоритм SnowDraw является физически обоснованным и вычислительно эффективным инструментом**

воспроизведения снежного покрова на горных ледниках в сравнение с другими доступными моделями.

Глава 5. Описание процессов аккумуляции и абляции на горном леднике с помощью модели SnowDraw

В главе приведены результаты численных экспериментов с представленной моделью на многолетнем и климатическом временном масштабе.

В первую очередь было проведено сравнение результатов расчетов по модели SnowDraw с данными глобальной атмосферной модели по высотным зонам эльбрусского ледника Гарабаши для периода с сентября 2023 г. по июль 2025 г. В качестве примера такой модели были использованы данные реанализа ERA5-Land с шагом сетки 0.1x0.1 градуса [Muñoz Sabater, 2019], поскольку он является наиболее популярным источником данных при моделировании динамики горного оледенения, а также лавин и селей.

Сравнение результатов моделирования с данными реанализа ERA5-Land по высоте снежного покрова (см. Рис. 5) однозначно показывают абсолютно неверное воспроизведение сезонной динамики снежного покрова на леднике при использовании данных крупномасштабной модели как с точки зрения значения и периода максимального водозапаса, так и времени залегания снега.

Осреднение результатов по высотным зонам (Рис. 6) показывает, что даже в последние десятилетия снежный покров на всем леднике полностью не сходит. При этом использование для ледника Гарабаши данных реанализа ERA-Land приводит не только к существенному занижению максимального водозапаса, но и завышенному альбедо за счет открытой в летние месяцы поверхности ледника и, как следствие, чрезмерно интенсивной абляции. Для всего ледника Гарабаши было получено, что вследствие этого данные реанализа по снежному покрову занижают среднегодовой сток за счет таяния снега на 159 мм в.э. с 1 м² по сравнению с результатами расчетов по модели SnowDraw, что только для одного ледника Гарабаши дает недоучет объема стока в 560 000 м³/год.

Представленная выше верификация модели SnowDraw показала возможность ее применения в качестве блока параметризации горного оледенения IGRICE [Togorov et al., 2025]. С этим модельным комплексом, включающим разработанную модель SnowDraw, был проведен численный эксперимент на данных реанализа ERA5 для всего оледенения Эльбруса с 1983 по 2025 гг. по 12 азимутам и 9 высотным зонам (с 3200 до 5600 над у.м. с шагом 300 м) и впервые получена климатическая оценка распределения снежного покрова на Эльбрусе.

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. 7а). При этом с высотой наблюдается закономерное уменьшение

количества снежного покрова, связанное прежде всего с естественным уменьшением суммы осадков. Аналогично для августа (период максимальной абляции) снег полностью сходит в зонах абляции ледников (Рис. 7в) и сохраняется выше границы питания (4000–4100 м над у.м.).

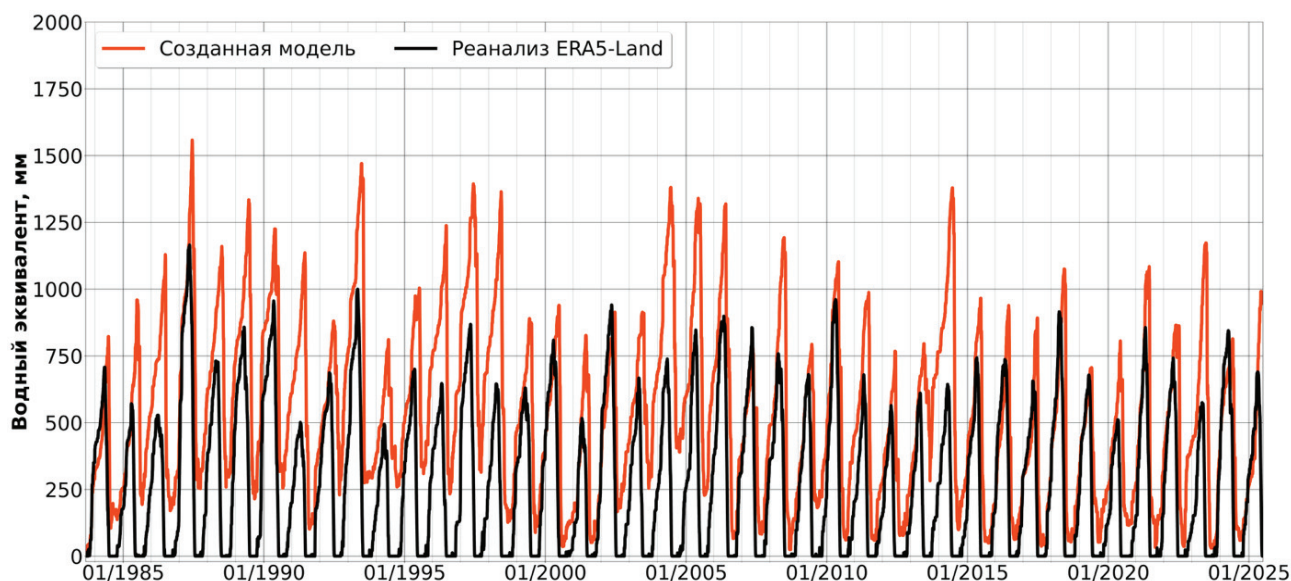


Рисунок 6 – Временной ход водного эквивалента снежного покрова, осредненной по высотам для ледника Гарабаши, по результатам моделирования и по данным реанализа ERA5-Land в период с 01.09.1983 по 30.06.2025

В качестве верификации результатов представленного модельного комплекса было проведено их сравнение с данными ежегодных наблюдений за скоростью аккумуляции на леднике Гарабаши, которое показало, что модель воспроизводит как средние темпы аккумуляции, так и годы с экстремально низкой и высокой аккумуляцией, допуская ошибки лишь в отдельные годы.

Стоит отметить, что по данным реанализа ERA5-Land в мае высота снега по всему массиву Эльбруса меняется от 1.2 до 1.5 м, при этом в августе снежный покров полностью сходит всюду, включая привершинные области (Рис. 7б, г), что абсолютно нереалистично. Данные реанализа неверно отражают как сроки залегания снежного покрова на леднике, так и время и величину максимального водозапаса.

Таким образом, на примере реанализа показано, что данные крупномасштабных атмосферных моделей не могут воспроизводить параметры снежного покрова на горных ледниках и непригодны для прогноза как динамики горного оледенения, так и речного стока в горах. Несмотря на кажущуюся очевидность этого утверждения, во многих гидрологических и гляциологических расчетах данные реанализов продолжают использоваться. Однако решение задач гляциоклиматического моделирования требует применения специализированных модельных подходов, в частности, представленного в данном исследовании. Такие подходы необходимо внедрять и в МЗС для более адекватного и физически обоснованного описания снежного покрова и речного стока в горных районах.

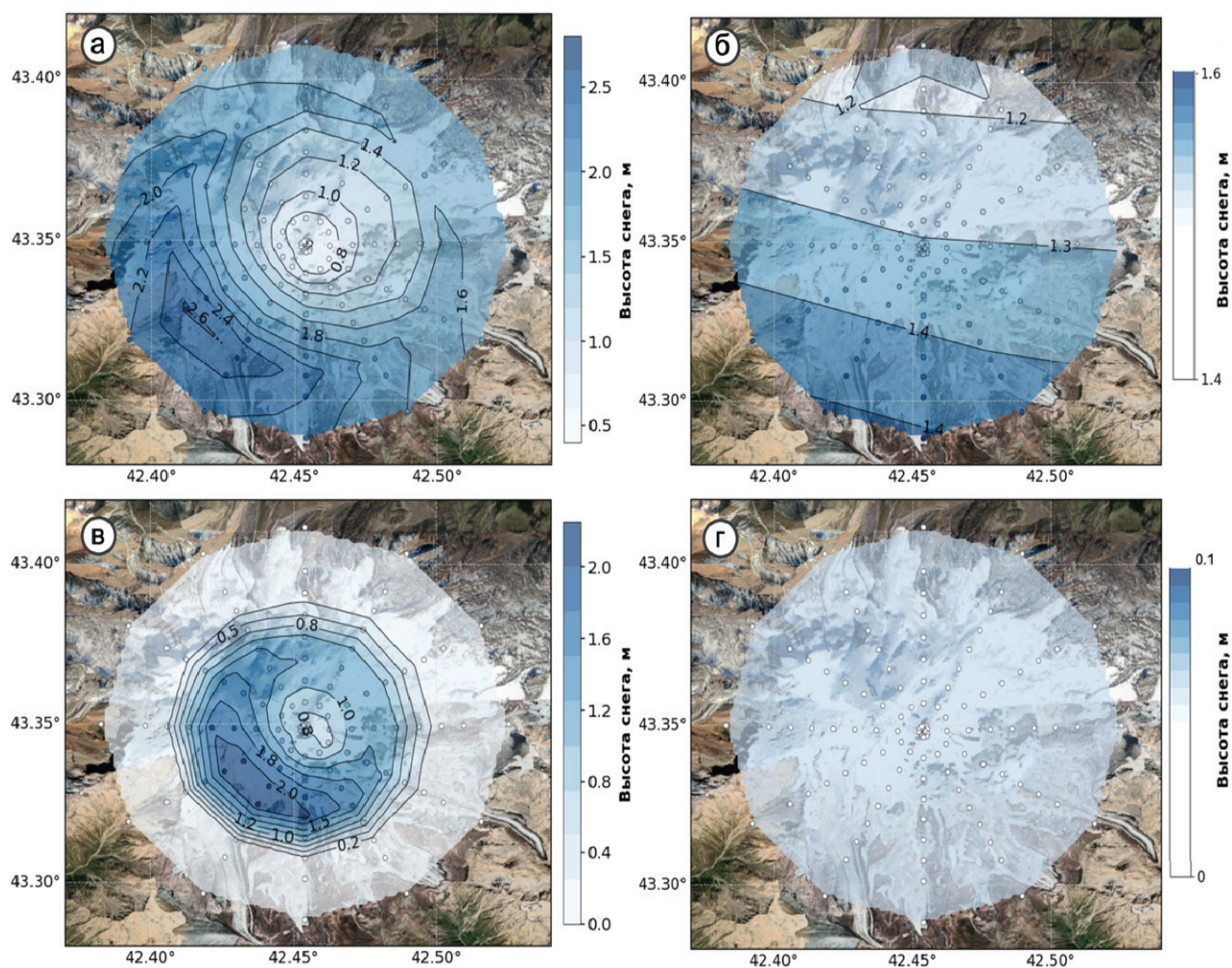


Рисунок 7 – Пространственное распределение средней многолетней высоты снежного покрова (с 1983 по 2025 гг.) по оледенению Эльбруса для мая (а, б) и августа (в, г) по результатам моделирования (а, в) и реанализу ERA5-Land (б, г)

На основе приведенных результатов выдвигается третье защищаемое положение: **Алгоритм SnowDraw целесообразно внедрить в отечественную Модель земной системы ARTS-ESM/INMCM, поскольку его совмещение с модулем орографических осадков и тепло-балансовым блоком кардинально улучшает картину пространственно-временного распределения снежного покрова в высокогорных районах по сравнению с результатами крупномасштабных атмосферных моделей.**

Глава 6. Оценка эффекта сублимации ледяных кристаллов при метелях

В данной главе продемонстрировано, что применение специализированного модельного комплекса позволяет получать оценки интенсивности различных физических процессов. В частности, было проведено исследование значимости метелевой сублимации в балансе массы и тепловом балансе ледников Эльбруса.

Учет в модели SnowDraw метелевой сублимации и перестройки теплового баланса при метелях в среднем оказывает незначительное влияние на температуру

поверхности, сравнимое с погрешностью измерений, однако при сильных метелях различия могут достигать 5–7°C.

В то же время метелевая сублимация является значимой компонентой водного баланса на ледниках Эльбруса (Рис. 8). Так, в привершинной части Эльбруса среднегодовая сумма слоя сублимации составила 16 мм в.э., то есть за счет этого процесса удаляется порядка 9% годовой суммы осадков. Таким образом, в зонах аккумуляции процесс сублимации удаляет 5–10% годовой суммы осадков, что оказывается значимым и указывает на необходимость учета этого процесса в балансе массы ледников и гидрологических расчетах. Полученные модельные оценки хорошо соотносятся с результатами для Антарктиды [Lenaerts et al, 2010; Thiery et al., 2012] и полярных районов [Pomeroy, Jones, 1996; Sauter et al., 2013].

Из представленных выше результатов следует четвертое защищаемое положение: **Сублимация ледяных кристаллов при интенсивном метелевом переносе существенно влияет на баланс массы снежного покрова в высокогорных районах и перестраивает структуру теплового баланса поверхности, что делает значимым ее учет при моделировании.**

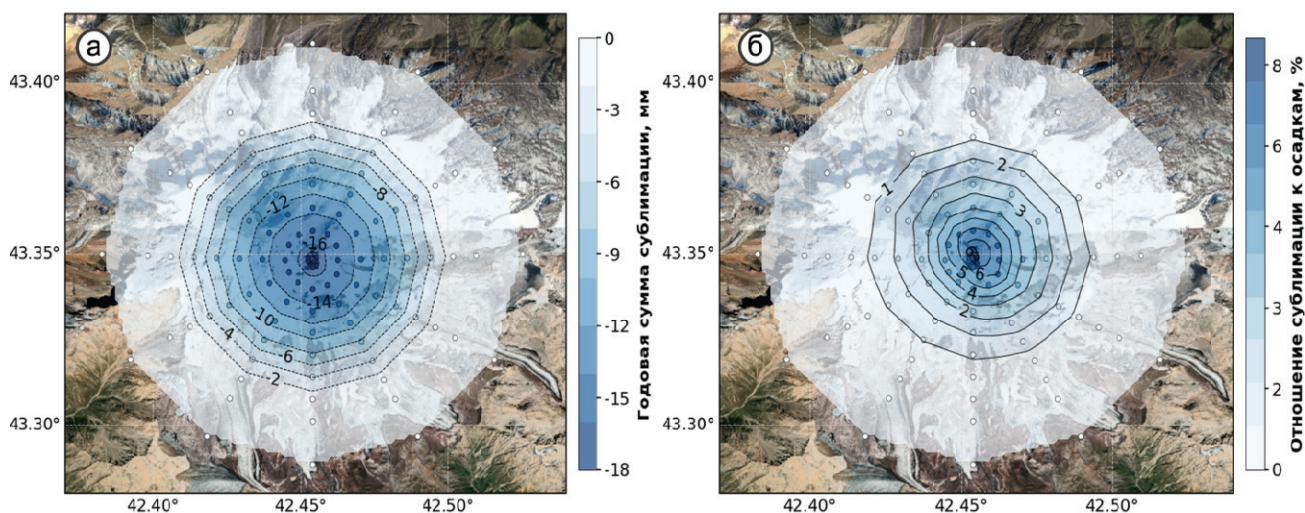


Рисунок 8 – Пространственное распределение средней многолетней (за период с 1983 по 2025 гг.) годовой суммы сублимации (а) и ее отношения к годовой сумме осадков (б) по оледенению Эльбруса по результатам применения модели SnowDraw

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках представленной диссертационной работы была создана новая модель снежного покрова промежуточной сложности SnowDraw, включающая описание специфических факторов формирования снежного покрова в горах и направленная на диагноз и прогноз динамики ледников и речного стока в горных районах на климатическом временном масштабе. Были получены следующие основные научные результаты.

1. В 2024 г. на ледниках Гарабаши и Микельчиран на южном и северном макросклоне Эльбруса установлены самые высокогорные в России стационарные метеорологические комплексы (около 3900 м. над у.м.). Полученные данные позволили произвести верификацию созданной модели снежного покрова для условий горного ледника для нескольких сезонов.

2. В рамках данной работы был составлен и реализован в виде кода на языке программирования GNU Fortran 90 алгоритм новой модели снежного покрова промежуточной сложности SnowDraw с включением описания специфических факторов, характерных для горных ледников.

3. В сравнении с данными наблюдений модель SnowDraw показала высокое качество воспроизведения сезонной динамики и водозапаса снежного покрова на горном леднике. Сравнение результатов с другими доступными моделями различного уровня сложности (Noah-MP, SNOWPACK) показало, что она является физически обоснованным и вычислительно эффективным инструментом для решения задач прогноза динамики снежного покрова и оледенения в горах и рекомендуется к использованию в качестве блока параметризации горного оледенения.

4. На основе численных экспериментов и сравнения с данными крупномасштабной модели (на примере реанализа ERA5-Land) показано, что использование специализированного модельного комплекса с параметризацией снежного покрова для горных ледников кардинально улучшает воспроизведение пространственного-временного распределения снежного покрова в высокогорных районах на сезонном и многолетнем масштабе.

5. В модели SnowDraw был реализован физически полный алгоритм расчета сублимации ледяных кристаллов при метелях [Bintanja, 2001; Dery et al., 1998]. Его применение в модели показало, что затраты тепла на метелевую сублимацию могут оказываться сравнимыми с прочими компонентами теплового баланса поверхности снега и при этом она является существенной компонентой баланса массы снежного покрова на ледниках Эльбруса, удаляя до 9% годовой суммы осадков в зонах аккумуляции.

РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности и отрасли наук:

1. **Дроздов Е.Д.**, Турков Д.В., Торопов П.А., Артамонов А.Ю. Термический режим снежного покрова зимой в высокогорной части Эльбруса по натурным данным и результатам моделирования // Лед и снег. 2023. Т. 63. № 2. С. 225–242. EDN: RUFSDM. 2,08 п.л. Импакт-фактор 0,847 (РИНЦ). Доля участия 1/2.

2. Торопов П.А., Дебольский А.В., Полюхов 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. EDN: RTBOUB. 1,62 п.л. Импакт-фактор 1,449 (РИНЦ). Доля участия 1/6.

3. Лаврентьев И.И., Смирнов А.М., Торопов П.А., Елагина Н.Э., Киселева Т.Д., **Дроздов Е.Д.**, Дегтярев А.И. Гляциологические исследования Института географии РАН на Эльбрусе в 2023 г. // Лед и снег. 2023. Т. 63. № 4. С. 553–557. EDN: IBTCAZ. 0,58 п.л. Импакт-фактор 0,847 (РИНЦ). Доля участия 1/7.

4. **Дроздов Е.Д.**, Торопов П.А., Авилов В.К., Артамонов А.Ю., Полухов 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. EDN: VYXITL. 1,85 п.л. Импакт-фактор 0,847 (РИНЦ). Доля участия 1/3.

5. Турков Д.В., **Дроздов Е.Д.**, Ломакин А.А. Альbedo снежного покрова и его параметризация для целей моделирования природных систем и климата // Лед и снег. 2024. Т. 64. № 3. С. 403–419. EDN: INVIGY. 1,96 п.л. Импакт-фактор 0,847 (РИНЦ). Доля участия 1/3.

6. Сушинцев И.М., **Дроздов Е.Д.**, Торопов П.А., Михаленко В.Н., Воробьев М.А., Хайрединова А.Г. Моделирование снежного покрова на ледниках Кавказа и Камчатки // Лед и снег. 2025. Т. 65. № 1. С. 21–36. EDN: GZPRUC. 1,85 п.л. Импакт-фактор 0,847 (РИНЦ). Доля участия 1/4.

7. Tоропов P.A., Shestakova A.A., Muraviev A.Y., **Drozдов E.D.**, Poliukhov A.A. The new IGRICE model as a tool for studying the mechanisms of glacier retreat // Climate. 2025. vol. 13. № 12. p. 248. EDN: YKKGGI. 3,70 п.л. Импакт-фактор 0,788 (SJR). Доля участия 1/5.

8. **Дроздов Е.Д.**, Торопов П.А. Тестирование новой модели снежного покрова SnowDraw для климатического прогноза динамики оледенения Эльбруса // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2025. № 4 (398). С. 74–93. EDN: YKWDSN. 1,16 п.л. Импакт-фактор 0,735 (РИНЦ). Доля участия 1/2.