

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

*На правах рукописи*

**Дроздов Евгений Дмитриевич**

**Моделирование снежного покрова на горных ледниках**

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,*  
*зам. 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 «    » июня 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор биологических наук



А.В. Ольчев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** В условиях современного изменения климата происходит интенсивная деградация горного оледенения [Hock, Rasul et al., 2019], что является одной из причин повышения уровня Мирового океана [Gardner et al., 2013], перераспределения водных ресурсов [Milner et al., 2017; Rets et al., 2020] и изменения природных экосистем [IPCC, 2018], а также увеличения повторяемости опасных гляциологических явлений, таких как лавины [Giacona et al., 2021], сели [Garitano, Guzzetti, 2016] и прорывы ледниковых озер [Лаврентьев и др., 2020]. Эти процессы часто становятся причиной гибели людей, наносят экономический ущерб в горных районах и предгорьях, ухудшают качество пресной воды и существенно влияют на развитие рекреационной сферы [Tielidze, 2017]. Поэтому при планировании экономического развития горных регионов должны учитываться риски, связанные с деградацией оледенения, что в свою очередь невозможно без развития соответствующих систем мониторинга и методов моделирования.

Снежный покров является ключевой компонентой горной криосферы и очень активно реагирует на климатический форсинг [Marty et al., 2017; Lüthi et al., 2019], что определяет вариации баланса массы горных ледников и водного режима рек [Корнилова и др., 2024]. 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.

Кроме того, одним из основных векторов эволюции наук о Земле в XXI веке является развитие моделей Земной Системы (далее МЗС) [Володин, Грицун, 2020], причем в последние 10–15 лет акцент смещается на моделирование тех элементов деятельного слоя суши, которые могут играть существенную роль в формировании региональных особенностей климата. Одним из таких элементов являются ледники и снежный покров в горных районах. В настоящий момент в отечественной модели Земной Системы 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 [Boone, Etchevers, 2001], принимающих участие в проектах ESM-SnowMIP по их сравнению и

улучшению [Krinner et al., 2018; Menard et al., 2021]. Однако некоторые из известных моделей являются вычислительно затратными и очень чувствительными к качеству и полноте начальных данных. В качестве примеров можно привести детальные модели SNOWPACK [Bartelt, Lehning, 2002] и CROCUS [Vionnet et al., 2012], основное назначение которых – оперативный диагноз и прогноз лавин. В МЗС и моделях прогноза погоды применяются упрощенные схемы расчета снежного покрова, в которых слабо учитываются некоторые специфические процессы, существенно влияющие на снежный покров в горах (метелевая сублимация, ветровое уплотнение и др.). Снежный покров в ячейках крупномасштабных моделей, соответствующих горным регионам, описывается так же как на равнинных территориях, что приводит к существенным погрешностям. 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. Поэтому многие современные блоки деятельного слоя суши, такие как ECMWF HTESSEL-ML [Arduini et al., 2019], ISBA [Decharme et al., 2016], Noah-MP [Niu et al., 2011] и др. перешли к многоуровневым схемам расчета снежного покрова. 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 [Тогоров et al., 2025]. В перспективе этот модуль будет включен МЗС ИВМ РАН–МГУ в виде параметризации горного оледенения и снежного покрова.

**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, организованного в высокогорных областях 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 натуральных 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 созданной 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 [Тогоров 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 метеорологического оборудования для всех полевых кампаний, установке и обслуживании метеорологических комплексов на ледниках, сборе и обработке данных, большая часть которых использована в данной работе. 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. Их последующая интерпретация и сделанные выводы основываются на предварительном сравнении результатов численных экспериментов с данными метеорологических наблюдений при длине выборки более 7000 значений и данными шурфов, а также корректной статистической обработке и сравнении с ранее опубликованными данными. Кроме того, полученные результаты сравниваются и согласуются с результатами расчетов других ведущих моделей.

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 выражается благодарность зам. директора НИВЦ МГУ д.ф.-м.н. Степаненко В.М. за полезные консультации при построении алгоритма созданной модели, с.н.с. ИФА РАН и НИВЦ МГУ к.г.н. Шестаковой А.А. за работу над объединением представленной модели снежного покрова с моделью IGRICE. За ценные замечания и идеи при разработке модели отдельная благодарность выражается зам. Декана географического факультета МГУ по научной работе, зав. лабораторией лавин и селей географического факультета МГУ к.г.н. Сократову С.А., с.н.с. кафедры Метеорологии и климатологии МГУ к.г.н. 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. За помощь в установке и обслуживании метеорологических комплексов в Приэльбрусье – аспиранткам ИФА РАН Новиковой Е.В. и Антипиной У.И., а также коллективу студентов 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 расчетных схем учета снежного покрова 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]. Выявлены основные преимущества и недостатки известных моделей снежного покрова и процессы, которые должны быть параметризованы в предлагаемой схеме снежного покрова. Также на основе приведенного анализа литературных источников 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, такие как метелевая сублимация, ветровое уплотнение, влияние интенсивной солнечной радиации и замерзание жидкой влаги внутри снежной толщи.

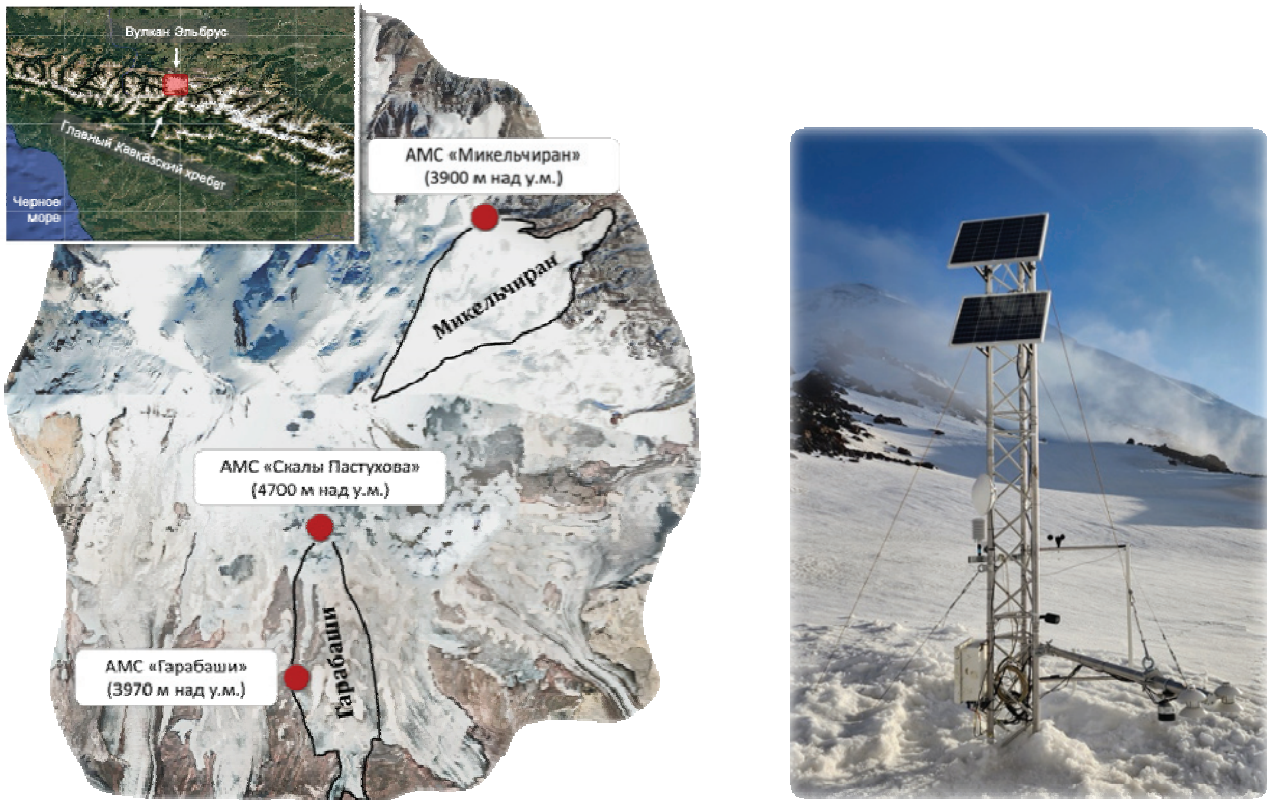
На основе представленных в этой главе результатов было сформулировано первое защищаемое положение: **Для описания снежного покрова на горных ледниках существенным является подробный учет в моделях процессов ветрового уплотнения снега, метелевой сублимации, проникновения солнечной радиации и замерзания 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 полевых экспедиций, в ходе которых были получены данные метеорологических наблюдений на леднике Гарабаши (южный склон вулкана Эльбрус) (Рис. 1). В данной главе обсуждаются результаты коротких измерительных кампании 2020 и 2022 гг. в сезоны аккумуляции на леднике Гарабаши (3870 м над у.м.). Отдельно описываются развернутые в начале сентября 2021 г. уникальные автоматические метеорологические наблюдения в области питания ледника Гарабаши на скалах Пастухова (4700 м над у.м.) продолжительностью 9 месяцев. Также описываются стационарные метеорологические комплексы, установленные в августе 2024 г. в зонах абляции ледника Гарабаши на южном склоне Эльбруса на высоте 3970 м над у.м. и ледника Микельчиран на северном склоне Эльбруса на высоте около 3900 м над у.м., которые автономно работают и в настоящее время в рамках постоянного мониторинга метеорологических условий над поверхностями типичных горных ледников Кавказа. Эти уникальные данные измерений позволяют проводить полноценную верификацию моделей снежного покрова на данных наблюдений в характерных природных условиях, а также могут быть использованы и для прикладных задач, таких как обеспечение безопасности горнолыжного отдыха, горного туризма и альпинизма в районе Эльбруса.

На основе собранных данных наблюдений показано, что интенсивный метелевый перенос и, как следствие, метелевая сублимация ледяных кристаллов являются распространенным явлением на горных ледниках в холодный период. Максимальное значение интенсивности метелевого переноса за период наблюдений в зоне аккумуляции составило  $0.87 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$  при интегральном значении за 9 месяцев в

$10^5 \text{ кг/м}^2$ , а затраты тепла на сублимацию ледяных кристаллов при интенсивных метелях могут достигать  $230 \text{ Вт/м}^2$ . Эти значения сходны условиям Восточной Антарктиды [Amory et al., 2020; Bintanja, 2001]. Кроме того, 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 (при использовании космических снимков Google Earth), справа – автоматическая метеостанция в зоне абляции ледника Гарабаши (3900 м над у.м.)*

Также приводятся результаты сравнения данных реанализа ERA5 [Hersbach et al., 2023] с автоматизированными измерениями на леднике Гарабаши. Данные наблюдений на Скалах Пастухова (4700 м над у.м.) позволили получить первую в России оценку качества реанализа в зоне аккумуляции ледников на основе продолжительного ряда. Сравнение показало, что реанализ весьма точно воспроизводит значения температуры воздуха (коэффициент корреляции  $R = 0.95$ , средняя абсолютная ошибка составляет  $0.58^\circ\text{C}$ ), и неплохо – среднюю скорость ветра и парциальное давление водяного пара ( $R = 0.65$  и  $R = 0.73$  соответственно), хотя согласованность рядов более слабая, а значения абсолютных ошибок – высокие. При этом для всех величин реанализ существенно недооценивает экстремальные значения.

Для зоны абляции ледника Гарабаши (3970 м над у.м.) для периода с 01.09.2024 по 19.06.2025 сравнение показало еще более точные результаты (Рис. 2) при том, что

средние ошибки реанализа составляют  $0.37^{\circ}\text{C}$  для температуры, менее  $1 \text{ г/кг}$  для удельной влажности и несколько больше для скорости ветра –  $1.5 \text{ м/с}$ . Таким образом, установлено, что реанализ ERA5 может применяться для оценок средних значений скорости ветра, температуры и влажности воздуха на высотах более  $3000 \text{ м}$  над у.м. (в том числе и в зоне аккумуляции ледников Эльбруса), а также в качестве начальных данных как для созданной модели, так и для расчетных модулей модели IGRICE (орографических осадков, теплобалансового блока и др.).

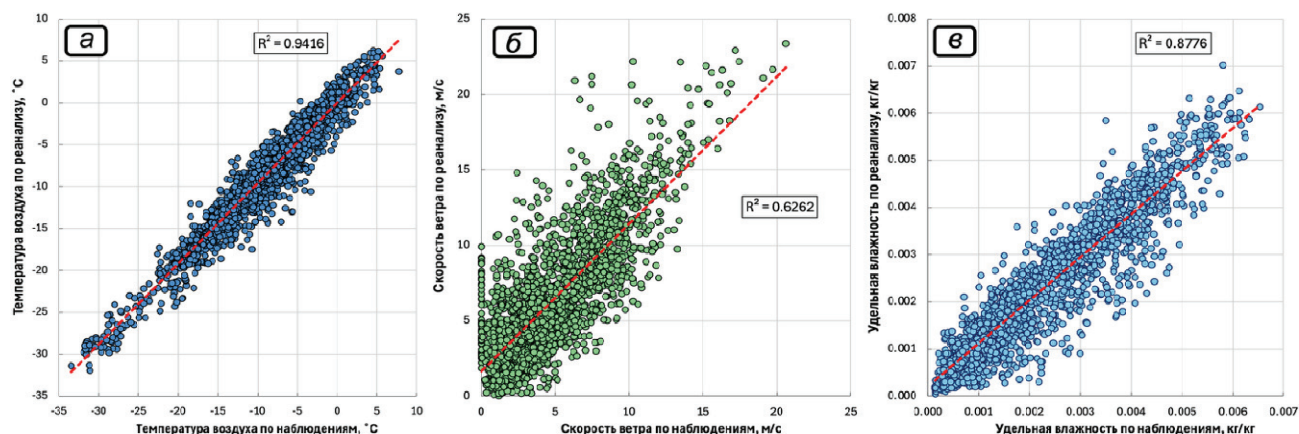


Рисунок 2 – Диаграммы рассеяния для температуры воздуха (а), скорости ветра (б) и удельной влажности (в) за весь период наблюдений по АМС Гарабаши (08.2024–06.2025). Все данные усреднены за 1 час, красной линией показаны кривые аппроксимации, а во вставках приведены коэффициенты детерминации

### Глава 3. Описание специализированной модели снежного покрова SnowDraw

В главе приведено подробное описание алгоритма модели промежуточной сложности SnowDraw, разработанной в рамках данной диссертационной работы. 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 базовых физических характеристик снежного покрова (альbedo, плотность, коэффициенты теплопроводности и теплоемкости) используются эмпирические и упрощенные зависимости. При этом внутри снежной толщи учитываются фазовые переходы влаги и проникновение солнечной радиации. Для определения температуры поверхности снега используется итерационное численное 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.

Модель разработана на языке программирования Fortran 90 для компилятора GNU и состоит (Рис. 3) из основного блока, в котором происходит инициализация

модели, чтение входных данных и формирование выходных массивов, а также модулей расчета компонент теплового баланса поверхности, переноса тепла внутри снежной толщи и водного баланса. В набор входных данных модели входит информация о температуре и влажности воздуха, скорости ветра, атмосферному давлению, приходящей коротковолновой и длинноволновой радиации и сумме осадков. Расчеты основных характеристик снежного покрова реализуются в отдельных точках моделируемого ледника для различной высоты над уровнем моря, азимутов, углов наклона поверхности и закрытости горизонта.



Рисунок 3 – Общая схема работы модели снежного покрова *SnowDraw*, ее входных данных и препроцессинга

В качестве граничных условий используется данные реанализа ERA5. Значения температуры, характеристик влажности и скорости ветра линейно интерполируются на высотные уровни, соответствующие расчетным точкам. Данные о радиационных потоках и осадках содержат значительные погрешности и неопределенности, поэтому для минимизации ошибок используются специализированные алгоритмы. Осадки уточняются с помощью модели орографической компоненты [Торопов и др., 2022], основанной на алгоритме расчёта скорости конденсации водяного пара в воздухе, вынужденно поднимающегося вдоль горного склона с наветренной стороны. Пересчет приходящей солнечной радиации реализуется с учетом геометрических параметров: азимута и среднего угла наклона ледовой поверхности, а также закрытости горизонта по модифицированным зависимостям Кондратьева [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 рассчитывается следующим образом:

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

где для каждого заданного радиуса метелевых частиц  $\overline{r}$  (м) с учетом их общей массы  $\overline{M_r}$  (кг) и количества  $\overline{n_r}$  вычисляется скорость изменения массы отдельной частицы за счет сублимации  $\overline{\partial m/\partial t}$  (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 и подробно описанная в работе [Турков и др., 2024]. Её преимуществом является учет большинства физических процессов, влияющих на альbedo снежного покрова, выраженных простыми зависимостями. Альbedo снежного покрова в схеме вычисляется по следующей формуле:

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

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

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

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

С учетом большой мощности снежного покрова и высоких скоростей ветра на горных ледниках и высоких скоростей ветра над их поверхностью 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 [Decharme et al., 2016]. Согласно ей изменение плотности снежного покрова  $\overline{\rho_{sn}}$  на каждом шаге по времени и каждом расчетном уровне  $i$  в снеге определяется следующим образом:

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

где  $\overline{\sigma}$  – вертикальное давление (Па),  $\overline{\eta}$  – вязкость снега (Па·с),  $\overline{\rho_{max}} = 350$  – максимальная плотность снега (кг/м<sup>3</sup>). Величина  $\overline{\sigma(i)/\eta(i)}$  отражает гравитационное уплотнение, а скорость ветрового уплотнения  $\overline{\tau_w}$  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, направленные 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 [Krinner et al., 2018; 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, было показано, что созданная схема правильно отражает физические принципы формирования снежного покрова и может применяться для расчета его динамики на горных ледниках 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 корреляция	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

В главе также проведено сравнение результатов модели SnowDraw с короткопериодными рядами наблюдений (10–20 дней) в зоне абляции ледника Гарабаши за 2020 и 2022 гг. Результаты свидетельствуют о корректном воспроизведении компонент теплового баланса для условий горного оледенения на примере южного склона Эльбруса. Кроме того, модель SnowDraw показала высокие результаты восстановления температуры поверхности снега ( $R = 0.92$ ;  $\text{bias} = 0.1^\circ\text{C}$ ) при низких затратах вычислительных ресурсов, в том числе и в сравнении с моделью промежуточной сложности SPONSOR.

На следующем этапе была проведена полноценная верификация созданной модели в условиях эльбрусского ледника Гарабаши на межсезонном временном масштабе. 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 стационарному метеорологическому комплексу, установленному в зоне абляции ледника Гарабаши (3970 м над у.м.). Для оценки чувствительности модели были проведены ансамблевые

расчеты с вариацией некоторых переменных параметров модели, таких как максимальное альbedo, максимальная водоудерживающая способность слоя снега и высота расчета турбулентных потоков.

В сравнении с автоматическими наблюдениями за высотой снега и данными шурфования модель удачно воспроизвела малое накопление снега в начале зимы (Рис. 4), однако модельные значения высоты снега и его 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 как на адекватное описание в модели процесса снегонакопления, так и на достаточно точное воспроизведение осадков моделью орографического добавка.

Также была получена высокая степень соответствия расчетных значений температуры поверхности наблюдаемым величинам. Коэффициент детерминации для этих рядов составляет  $R^2=0.8$  при среднем смещении в  $2.2^{\circ}\text{C}$ , что указывает на высокое качество воспроизведения временной изменчивости при небольшом занижении температуры поверхности снега в среднем. Представленные результаты позволяют утверждать, что созданная модель снежного покрова хорошо воспроизводит тепловой баланс и значения температуры поверхности снега.

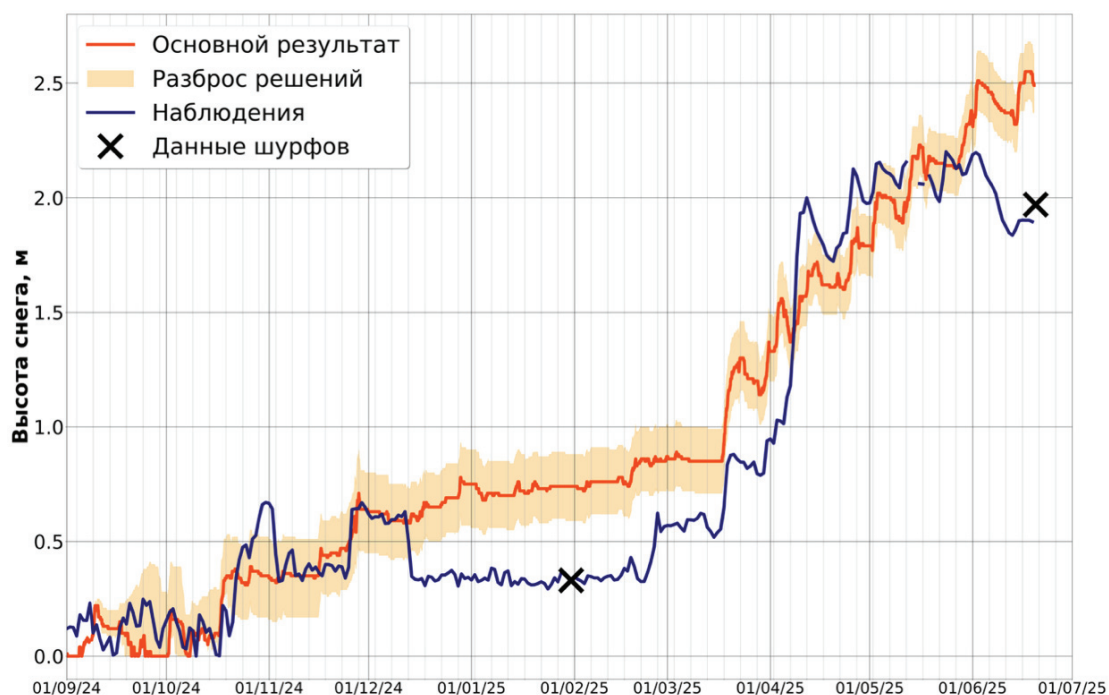


Рисунок 4 – Временной ход высоты снежного покрова в зоне абляции ледника Гарабаши в период с 01.09.2024 по 20.06.2025 по результатам моделирования, данным автоматических наблюдений и шурфования снега

Сравнение вертикальных профилей плотности снежного покрова по модели и данным шурфования за 18.06.2025 показало, что модель адекватно воспроизводит уплотнение снежного покрова, однако несколько занижает значения плотности снега к концу периода снегонакопления. При этом среднее значение плотности снежного покрова для конца января 2025 года ( $330 \text{ кг/м}^3$ ) оказалось близким к значению, полученному в шурфе ( $335 \text{ кг/м}^3$ ).

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 в работе схемы.

Модель SnowDraw показала высокое качество воспроизведения водного эквивалента в сравнении с данными шурфования и существенно превзошла результаты других моделей (Рис. 5). 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, что особенно ярко проявляется в начале зимы 2024–2025 гг., где модели Noah-MP и SNOWPACK завышают высоту снега в 2–3 раза (относительная ошибка – 200–300%). Также было показано, что разработанная модель на высоком уровне 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 Гарабаша с шагом 300 м от 3200 м над у.м. (язык ледника вблизи фронта) до 4400 м над у.м. (зона питания вблизи верхней границы ледника) на основе данных реанализа ERA5, приведенных к соответствующим высотам.

Показано, что модель SnowDraw адекватно воспроизводит основные паттерны пространственно-временного изменения снежного покрова на леднике (Рис. 6). Так, за счет роста количества осадков наибольшая высота снежного покрова наблюдается на высотах 3200 и 3500 м над у.м., однако таяние на этих высотах начинается раньше и идет интенсивнее, поэтому снег полностью сходит к началу июля. При этом в районе границы питания ледника (около 4100 м над у.м.) получено активное таяние снега, однако полностью снежный покров не разрушается. В зоне аккумуляции ледника

Гарабаши (4400 м над у.м.) по результатам созданной модели воспроизводится незначительное таяние, что несколько отличается от реальности. Модель Noah-MP существенно завышает высоту снежного покрова, что проявляется практически во всех высотных зонах, а время схода снежного покрова в диапазоне высот 3200–3800 м над у.м. практически не отличается и запаздывает на месяц и более, что говорит о неадекватном описании таяния снега в данной модели.

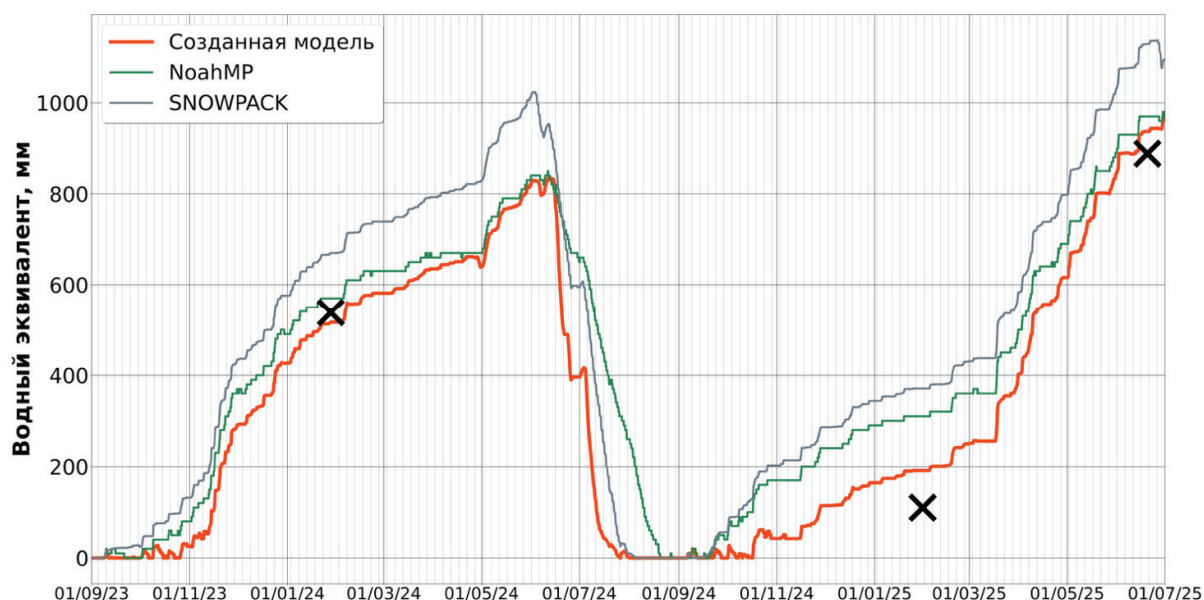


Рисунок 5 – Временной ход водного эквивалента снежного покрова в зоне абляции ледника Гарабаши в период с 01.09.2023 по 30.06.2025 по результатам моделирования на основе данных реанализа ERA5 и данным шурфования снега (черные крестики)

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

Была также проведено сравнение дат схода снежного покрова в различных зонах ледника Гарабаши с привлечением космических снимков Sentinel-2 за периоды абляции 2022–2024 гг. Подробное сравнения для 2024 г. (Табл. 3) показало, что представленная 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).

Представленные в главе результаты позволяют утверждать, что модель SnowDraw показывает достаточно высокое качество воспроизведения сезонной динамики снежного покрова на горном леднике. Более упрощенная модель снежного покрова Noah-MP продемонстрировала существенно худшие результаты воспроизведения как сезонной динамики снежного покрова, скорости его накопления и таяния, так и характеристик снежной толщи. Показано также, что модель полной физики снежного покрова SNOWPACK, являясь одним из наиболее совершенных инструментов для расчета стратиграфии снежного покрова и теплофизических свойств его толщи, не гарантирует высоких результатов воспроизведения сезонной динамики снежного покрова при отсутствии высококачественных входных данных. Также стоит отметить, что время счета эксперимента в одной расчетной точке длительностью 22 месяца с шагом интегрирования 3 часа с созданной моделью 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.

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

	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

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.**

В дополнение в главе приводится анализ чувствительности модели SnowDraw к выбору специализированных параметризаций. В серии численных экспериментов для высоты 3800 м над у.м. и периода с 01.09.2023 по 30.06.2025 на данных реанализа ERA5 последовательно отключались параметризации сублимации ледяных кристаллов и проникновения в снег солнечной радиации, либо параметризации альбедо, плотности и коэффициента теплопроводности снега заменялись на более простые. Было показано, что во всех случаях результаты модели ухудшились, а наиболее значимый вклад в высокие результаты модели SnowDraw имеет выбор параметризации плотности [Decharme et al., 2016]. При упрощении описания всех

перечисленных процессов в модели результаты расчетов оказываются близки к результатам модели Noah-MP.

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

В главе приведены результаты численных экспериментов с представленной моделью, направленных на описание процессов аккумуляции и абляции на горном леднике на многолетнем и климатическом временном масштабе.

В первую очередь было проведено сравнение результатов расчетов 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 крупномасштабной атмосферной модели были использованы данные реанализа ERA5-Land с шагом сетки  $0.1 \times 0.1$  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 (Рис. 6) однозначно показывают абсолютно неверное воспроизведение сезонной динамики снежного покрова на леднике при использовании данных крупномасштабной модели. Так, в каждый из сезонов аккумуляции заметна недооценка водозапаса снежного покрова к началу снеготаяния, а максимум снегонакопления смещен на март-апрель. Кроме того, по данным реанализа снежный покров полностью сходит к началу-середине июня, тем самым уменьшая альбедо поверхности.

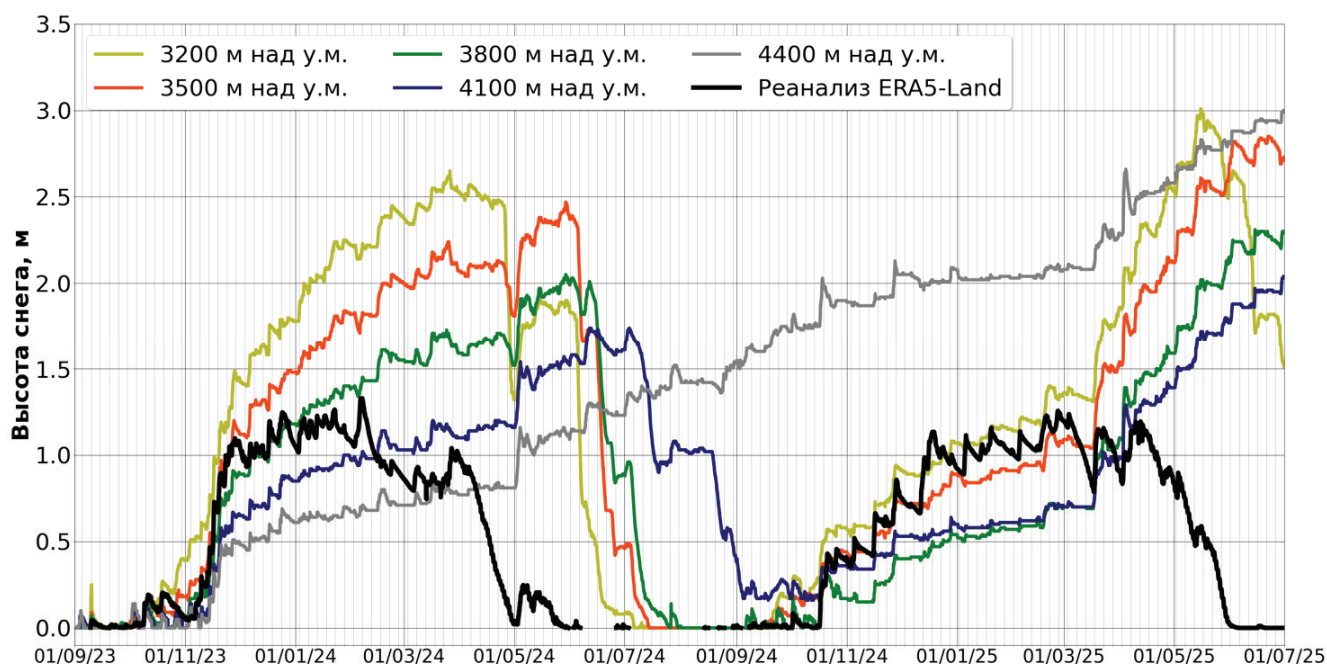


Рисунок 6 – Временной ход высоты снежного покрова в различных высотных зонах ледника Гарабаши в период с 01.09.2023 по 30.06.2025 по результатам моделирования и по данным реанализа ERA5-Land

Результаты расчетов (Рис. 7) показывают, что даже в последние десятилетия снежный покров на всем леднике полностью не сходит. При этом наблюдается тренд на уменьшение количества снега на леднике в летние месяцы: для периода 1985–1995 гг. средний водный эквивалент во время пика абляции составлял около 230 мм, в то время как в последнее десятилетие уменьшился до 60 мм в.э., что означает сохранение снежного покрова только в верхней зоне. При этом использование для ледника Гарабаши данных по снежному покрову 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  $1 \text{ м}^2$  по сравнению с результатами расчетов с представленным модельным комплексом, что только для одного ледника Гарабаши дает недоучет объема стока в  $560\,000 \text{ м}^3/\text{год}$ .

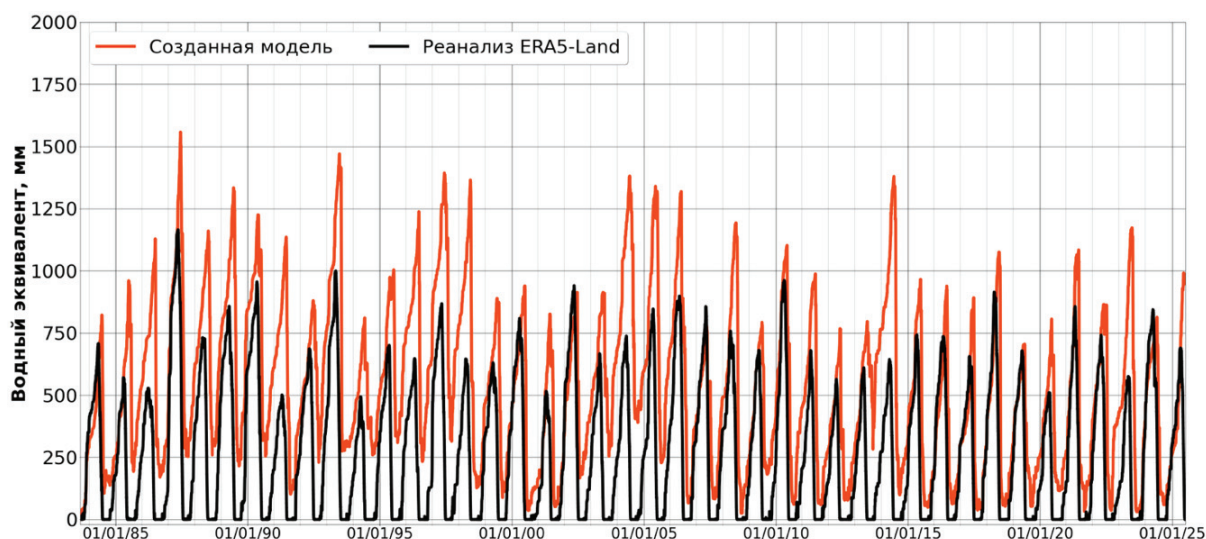


Рисунок 7 – Временной ход водного эквивалента снежного покрова, осредненной для ледника Гарабаши по высотам, по результатам моделирования и по данным реанализа ERA5-Land в период с 01.09.1983 по 30.06.2025

Представленная выше верификация модели SnowDraw показала возможность ее применения в качестве блока параметризации горного оледенения IGRICE [Тогоров 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 пространственно-временного 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. 8а). При этом с высотой наблюдается закономерное уменьшение

количества снежного покрова, связанное прежде всего с естественным уменьшением количества осадков (в силу уменьшения влагосодержания атмосферы). Аналогично для августа (период максимальной абляции на ледниках Эльбруса) снег полностью сходит в зонах абляции ледников (Рис. 8в) и сохраняется выше границы питания (4000–4100 м над у.м.).

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. 8б, г), что абсолютно нереалистично. Таким образом, данные реанализа неверно воспроизводят как сроки залегания снежного покрова на леднике, так и время и величину максимального водозапаса.

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 некоторые ошибки лишь в отдельные годы.

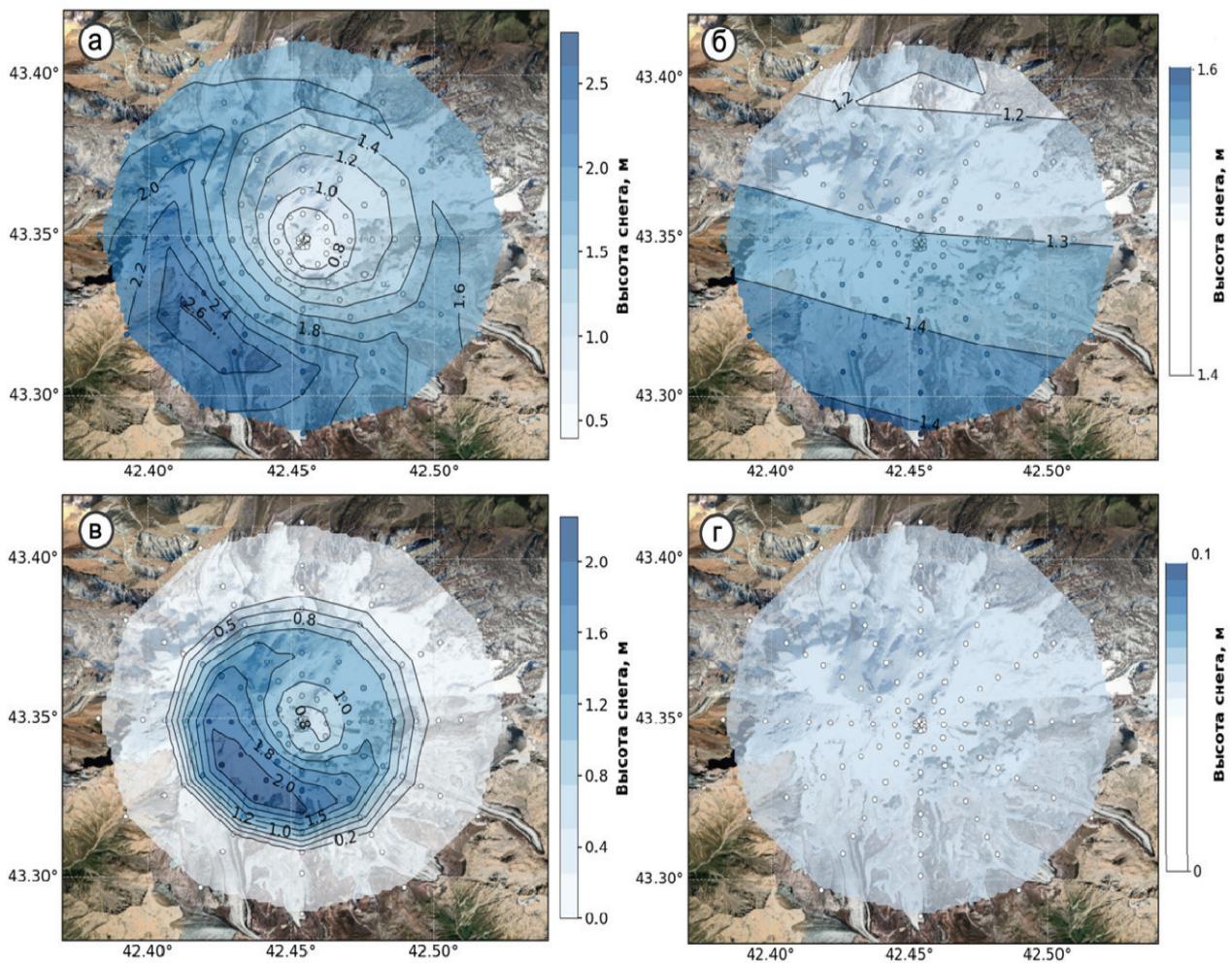


Рисунок 8 – Пространственное распределение средней многолетней высоты снежного покрова (с 1983 по 2025 гг.) по оледенению Эльбруса для мая (а, б) и августа (в, г) по результатам моделирования (а, в) и реанализу ERA5-Land (б, г)

Результаты сравнения показывают, что данные крупномасштабных атмосферных моделей (на примере реанализа) 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 в сложных орографических условиях до сих пор используются. Однако решение задач гляциоклиматического моделирования требует применения специализированных модельных подходов, в частности, представленного в данном исследовании. Такие подходы необходимо внедрять и в Модели земной системы для более адекватного и физически обоснованного описания снежного покрова и речного стока в горных районах, которые занимают около 25% всей суши.

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.**

В дополнение в главе на примере ледника Восточный Грэнфьорд, Шпицберген была продемонстрирована применимость модели SnowDraw для других горно-ледниковых районов с совершенно иными физико-географическими условиями. Представленные результаты расчетов для периода с 2006 по 2022 гг. согласуются с известными данными по времени схода снежного покрова на леднике [Чернов, 2023] и тенденцией быстрого сокращения оледенения [Elagina et al., 2021].

## **Глава 6. Оценка эффекта сублимации ледяных кристаллов при метелях**

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

На основе данных автоматических наблюдений за метелевым переносом было показано, что интенсивность метелевой сублимации кристаллов в значительной степени определяется скоростью приземного ветра. Максимальной интенсивности процесс достигает при скоростях ветра более 10 м/с: в этих условиях значения затрат тепла на сублимацию достигают  $70 \text{ Вт/м}^2$ , что сравнимо с основными компонентами теплового баланса. Метелевая сублимация не является прямой компонентой теплового баланса поверхности снега, однако существенно перестраивает его структуру [Deгу et al., 1998; Bintanja, 2000]. Использование представленной модели с учетом перестройки теплового баланса при метелях показало, что в среднем это оказывает незначительное влияние на температуру поверхности, сравнимое с погрешностью измерений, однако при сильных метелях различия могут достигать 5–7°C.

В то же время модельные расчеты показали, что сублимация является значимой компонентой водного баланса на ледниках Эльбруса (Рис. 9). В зонах абляции ледников среднее многолетнее значение этой величины не превышает 1%, поэтому на этих высотах учет сублимации ледяных кристаллов при метелях оказывается несущественным. Это связано с меньшими скоростями ветра и повторяемостью метелей на этой высоте, а также большей продолжительностью периода с положительной температурой и повторяемостью оттепелей в холодный период. Однако 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, следовательно, в гидрологических расчетах в высокогорных районах. Также полученные модельные оценки хорошо соотносятся с результатами, полученными в Антарктиде [Lenaerts et al, 2010; Thiery et al., 2012] и в полярных районах [Pomeroy, Jones, 1996; Sauter et al., 2013] а условия зон аккумуляции ледников Большого Кавказа с точки зрения интенсивности метелевой сублимации оказываются близкими к полярным районам.

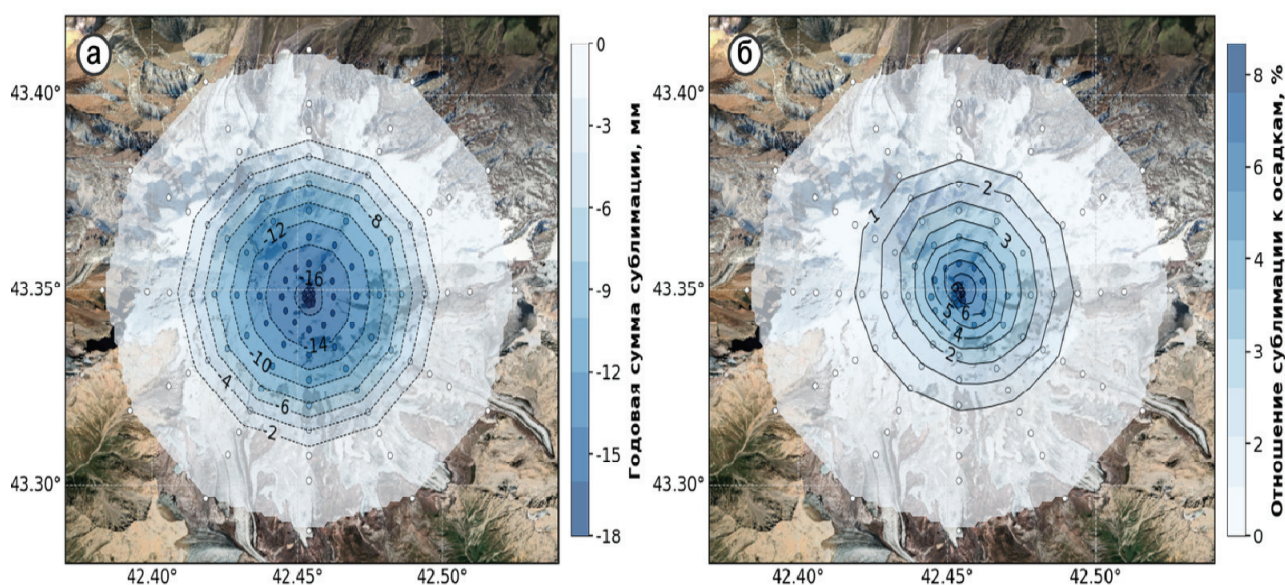


Рисунок 9 – Пространственное распределение средней многолетней (за период с 1983 по 2025 гг.) годовой суммы сублимации (а) и ее отношения к годовой сумме осадков (б) по оледенению Эльбруса по результатам применения модели SnowDraw

Для привершинной зоны Эльбруса было показано (Рис. 10), что среднегодовая сумма слоя сублимации составляет 16 мм в.э., то есть за счет этого процесса удаляется порядка 9% годовой суммы осадков. При этом межгодовые различия метелевой сублимации невелики в силу относительно малой изменчивости скоростей ветра в средней тропосфере.

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.

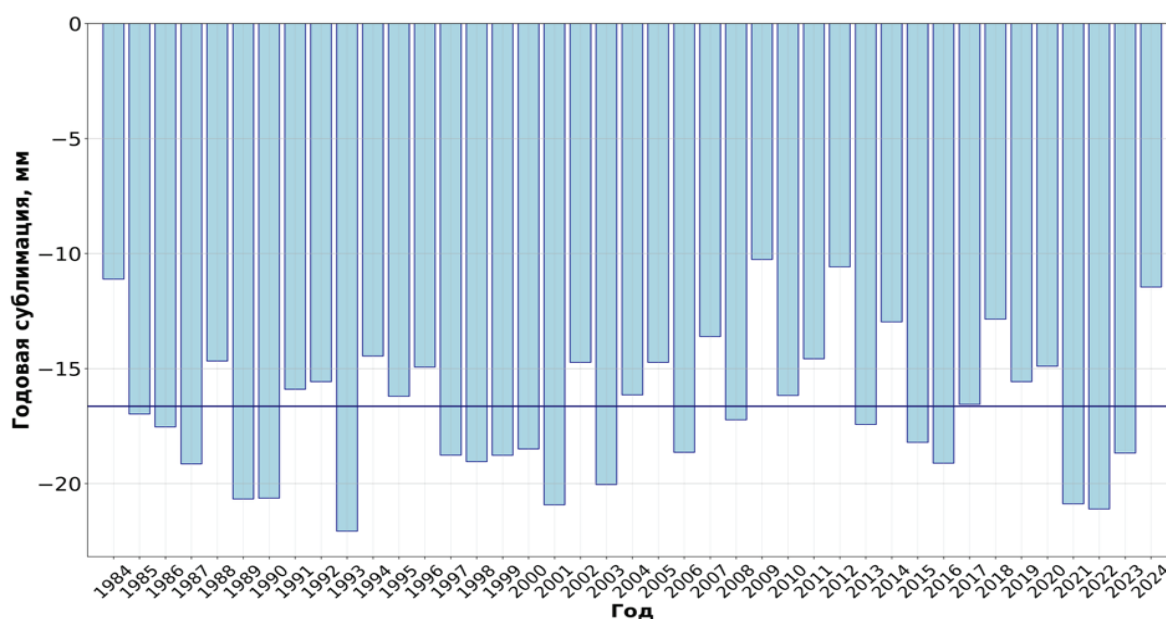


Рисунок 10 – Годовая сумма метелевой сублимации в привершинной части Эльбруса по результатам расчетов модели SnowDraw за 1984–2024 гг. Синей линией показано среднее многолетнее значение сублимации по результатам моделирования

## 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. Для холодного периода (с сентября по май) 2021–2022 гг. получены непрерывные ряды данных автоматических наблюдений в зоне аккумуляции эльбрусского ледника Гарабаши, типичного для Большого Кавказа. 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 уровнем моря), с помощью которых реализуется постоянный мониторинг основных метеорологических величин, собираются и передаются данные об эволюции снежного покрова и метелевом переносе непосредственно на поверхности горного ледника. Полученные данные позволили произвести верификацию созданной модели снежного покрова для условий горного ледника для нескольких сезонов. Также они являются уникальной информацией об особенностях горных метеорологических процессов и могут быть полезны в рамках задач инженерно-гидрометеорологических изысканий, обеспечения безопасности отдыхающих в горах и других прикладных задач.

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

3. На основе верификации модели SnowDraw в сравнении с данными наблюдений было получено высокое качество воспроизведения сезонной динамики и водозапаса снежного покрова на горном леднике. Сравнение результатов представленной модели 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 и применен физически полный алгоритм расчета сублимации ледяных кристаллов при метелях [Bintanja, 2001; Dery et al., 1998]. Расчет этой величины показал, 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.

**Направления дальнейшей работы.** На следующих этапах исследования предполагается доработка и развитие схемы созданной модели Snow Draw и полное ее совмещение с глобальной гляциологической моделью IGRICE [Tropov et al., 2025]. С ней будут проведены численные эксперименты по применению для других горноледниковых районов мира. Также планируется использовать представленный алгоритм в качестве блока модели деятельного слоя суши TerM [Stepanenko et al., 2024], и использовать в задачах инженерно-гидрометеорологических изысканий.

## **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., Полюхов 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. Toropov P.A., Shestakova A.A., Muraviev A.Y., **Drozdov 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. Т. 398. № 4. С. 74–93. EDN: YKWDSN. 1,16 п.л. Импакт-фактор 0,735 (РИНЦ). Доля участия 1/2.