

ЛЕДНИКИ И ЛЕДНИКОВЫЕ ПОКРОВЫ

УДК 551.578.462

МОДЕЛИРОВАНИЕ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ЛЕДНИКАХ КАВКАЗА И КАМЧАТКИ

© 2025 г. И. М. Сущинцев^{1,2,*}, Е. Д. Дроздов^{1,2}, П. А. Торопов^{1,2},
В. Н. Михаленко¹, М. А. Воробьев¹, А. Г. Хайрединова¹

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*e-mail: sushintsev@yahoo.com

Поступила 20.09.2024 г.

После доработки 12.11.2024 г.

Принята к печати 25.12.2024 г.

Проведена валидация модельного комплекса из SNOWPACK и орографической модели осадков с данными реанализа для вулканов Эльбрус и Ушковский. В сравнении с ледниковым керном показано, что модельный комплекс может применяться для воспроизведения структуры снежной толщи, а также снегонакопления на длительных временных масштабах. Проанализировано изменение типа льдообразования на вулкане Ушковский за последние 40 лет.

Ключевые слова: снежный покров, осадки, ледяные прослой, моделирование, Камчатка, Эльбрус, модель SNOWPACK

DOI: 10.31857/S2076673425010025, EDN: GZPRUC

ВВЕДЕНИЕ

Корректное воспроизведение физических механизмов формирования снежной толщи играет важную, а порой и ключевую роль при решении многих прикладных и научных задач. В частности, от плотностной стратиграфии снежного покрова зависит интенсивность его таяния и сроки схода, что ключевым образом влияет на интенсивность и продолжительность весеннего половодья на реках умеренных и субарктических широт. Стратиграфия снежного покрова играет определяющую роль в формировании снежных лавин на горных склонах (Beniston et al., 2018). Наконец, она определяет прочностные характеристики снега, что важно при планировании транспортных маршрутов в Арктике и малонаселённых районах Северной Евразии и Канады (прокладка зимников, прохождение тяжёлой техники по снегу, создание сезонных аэродромов в условиях Арктики и т.д.). Кроме того, метеорологические условия формирования снежного покрова на ледниках определяют физические механизмы льдообразования, что, с одной стороны, определяет скорость этого процесса, а с другой — термическую структуру и вертикальное строение ледовой толщи. В итоге от этих факторов существенно зависит динамика ледников, в том числе

их потенциальная опасность (пульсации, айсберговый сток, ледовые обвалы, скорость таяния и т.д.). Также структура фирновой и ледовой толщ, зависящая от типа льдообразования, существенно влияет на реконструкцию климатических условий и природных ландшафтов по данным ледниковых кернов. Например, современные изменения климата приводят к тому, что на большей части горных ледников всё ярче проявляется сезонное таяние, в результате которого жидкая влага просачивается в снежно-фирновую толщу (Thompson et al., 2021).

В результате в полученных ледниковых кернах (особенно в их верхней, снежно-фирновой части) практически отсутствует сезонность стабильных изотопов и остаётся только одна группа методов датировки — с помощью микроэлементов (Clifford et al., 2023), что усложняет интерпретацию результатов. С учётом логистической сложности и дороговизны получения ледниковых кернов на подготовительном этапе буровых экспедиций имеет смысл применять модельные оценки снегонакопления и структуры снежного покрова на площадках предполагаемого бурения, а также оценивать многолетнюю динамику характеристик снежного покрова для точек, где керны уже были получены.

Перечисленные аспекты существенно мотивируют исследования, посвящённые синтезу методов

численного моделирования и мониторинга снежного покрова на горных ледниках.

Для оценки состояния верхней части снежно-фирновой толщи и типа льдообразования могут быть применены модели физики снежного покрова, рассчитанные на воспроизведение не только многолетнего накопления снега, но и его вертикальной структуры, в том числе ледяных прослоев. Одной из наиболее развитых моделей, способных сравнительно полно описать стратиграфию снежной толщи, является модель SNOWPACK (Lehning et al., 2002a). Однако существенным ограничением для детального воспроизведения стратиграфии снежно-фирновой толщи служит отсутствие длинных рядов прямых наблюдений на поверхностях горных ледников, в то время как данные реанализов могут содержать серьёзные ошибки, что, в первую очередь, касается данных осадков (Тогоров et al., 2019). В то же время, эти данные могут быть существенно улучшены за счёт модельного учёта орографической составляющей осадков (Торопов и др., 2022). Подобный модельный подход к восстановлению стратиграфии верхней части снежно-фирновой толщи на масштабе десятилетий с применением модели снежного покрова в связке с данными реанализа и модели орографического добавка осадков требует специальной верификации, которая может быть проведена в сравнении с доступными данными ледниковых кернов.

Одним из индикаторов типа льдообразования могут служить ледяные слои и прослои, имеющие различные механизмы формирования (Фирц и др., 2012). Так, для рекристаллизационных зон аккумуляции горных ледников (Кренке, 1973) характерны ледяные прослои и корки, имеющие малую толщину (0.5–2 мм) и связанные с радиационным прогревом и появлением поверхностной ледяной плёнки (Ozeki, Akitaya, 1998) или диффузией водяного пара при значительном градиенте температуры в приповерхностной части снежной толщи (Pinzer et al., 2012), а также вблизи контакта снежного покрова с фирново-ледовыми слоями. Эти процессы характерны, например, для зон аккумуляции ледников Кавказа, где в кернах встречаются подобные ледяные прослои (Mikhaleenko et al., 2015), Центральной Антарктиды и Якутии (Котляков, 1961). В фирновой зоне ледяные прослои имеют преимущественно инфильтрационную природу и связаны с поверхностным таянием снега при положительных температурах воздуха.

В то же время, сочетание жидких осадков с отрицательной температурой поверхности снежного покрова приводит к образованию ледяных корок гололедного генезиса. Предполагается, что этот механизм типичен для горных ледников Камчатского полуострова в силу высокой повторяемости синоптических ситуаций, характеризующихся адвекцией тёплого влажного воздуха с Тихого океана. В итоге

стратиграфия снежного покрова и фирновой толщи здесь может быть очень сложной, что было показано в результате исследований кернов льда, полученных на вулканах Ичинский и Ушковский (Matoba et al., 2007; Sato et al., 2013, Chizhova et al., 2024). При этом в кернах, полученных на вулкане Ушковский в различные десятилетия (Муравьев, Саламатин, 1989; Shiraiwa et al., 1997; Chizhova et al., 2024), наблюдается изменение числа ледяных прослоев и возможное изменение факторов льдообразования. Специфика процессов формирования снежной толщи на Камчатке в сочетании с наличием данных ледовых кернов мотивирует выбирать в качестве одного из «тестовых полигонов» вулкан Ушковский. Вторым таким «полигоном» стал эльбрусский ледник Гарабаши, по причине его наиболее полной обеспеченности метеорологическими данными среди всех горных регионов России (Ледники..., 2020). Кроме того, Кавказский горно-ледниковый район находится в совершенно других метеорологических условиях формирования снежной толщи по сравнению с Камчатским, что делает верификацию предлагаемого модельного комплекса более полной и обоснованной.

В данной работе поставлены две задачи. Первая — выполнить верификацию комплекса из двух моделей: снежного покрова SNOWPACK и модели орографической компоненты осадков с использованием данных реанализа для вулканов Эльбрус и Ушковский. Вторая — оценить результаты моделирования ледяных прослоев с помощью данного модельного комплекса на примере вулкана Ушковский и попытаться выявить возможное изменение типа льдообразования в условиях высокогорного района Камчатки на фоне изменяющегося климата.

Успешная верификация модельного комплекса может показать, что даже в горной местности, на основе далеко не самых точных данных реанализа, можно получить подробную и достаточно разумную информацию о строении снежно-фирновой толщи, что может быть использовано в ряде прикладных и научных задач гляциологии и горной метеорологии, обозначенных выше, а также оценить многолетнюю динамику льдообразования в различных ледниковых районах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Характеристика районов исследования. Полуостров Камчатка — крупный горно-ледниковый район России, он занимает третье место по числу и площади горных ледников после Кавказа и Алтая (Хромова и др., 2021). Вулкан Ушковский (3950 м над ур. моря, 56.04° с. ш., 160.28° в. д.) входит в восточный вулканический пояс полуострова и расположен в Ключевской группе вулканов, примерно в 10 км к северо-западу от Ключевской сопки (рис. 1, а). Он относится к активным

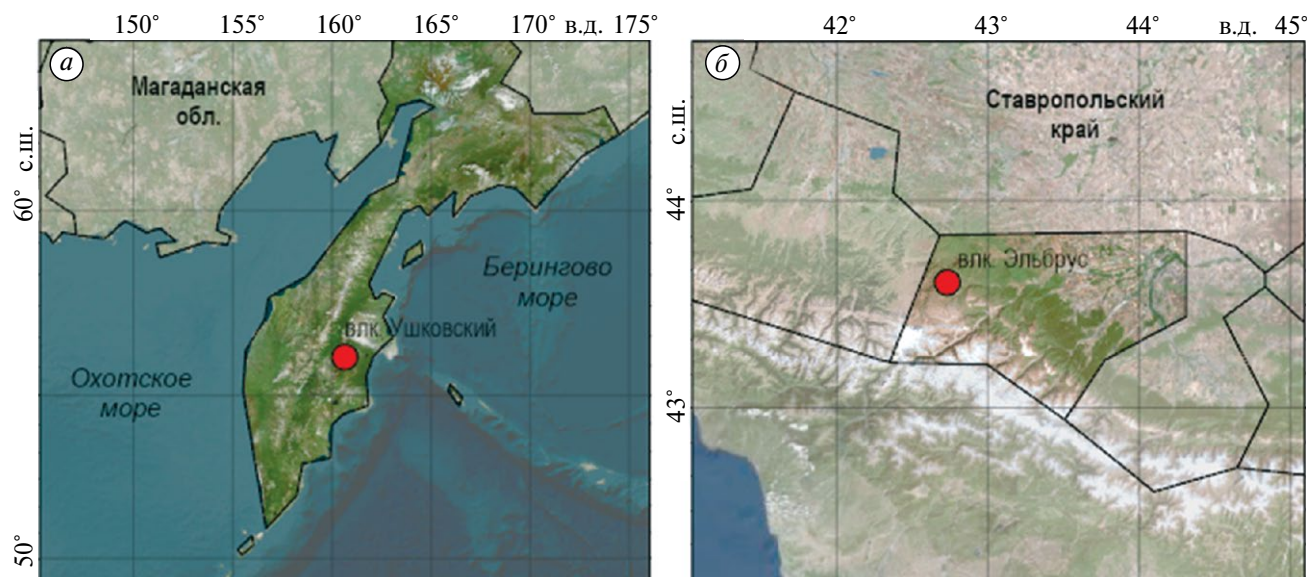


Рис. 1. Карта районов исследований для вулкана Ушковский (а) и вулкана Эльбрус (б)

Fig. 1. Map of study areas for Ushkovsky Volcano (a) and Elbrus Mountain (b)

стратовулканам: последнее извержение отмечалось в 1890 г. В настоящее время Ушковский покрыт ледниками общей площадью 43 км² (это примерно треть от общей площади ледников Эльбруса). Вулкан представляет научный интерес, поскольку в кратере Горшкова (3950 м над ур. моря) ранее были получены ледниковые керны К-2 (Kodama et al., 1996; Shiraiwa et al., 1997; Sato et al., 2013), а также 14-метровый керн в сентябре 2022 г. (Chizhova et al., 2024), что даёт возможность оценить температуру и стратиграфию снежно-фирновой толщи. В то же время для вулкана Ушковский, как и для всей высокогорной зоны Камчатки, отсутствуют какие-либо длительные ряды метеорологических наблюдений. Ближайшая из доступных метеорологических станций сети Росгидромета находится в пос. Ключи в 13 км от вулкана на высоте 50 м над ур. моря и не является репрезентативной ни по одному из метеорологических параметров.

Климат Камчатки отличается значительным влиянием Охотского моря и Тихого океана, что определяет его муссонные черты, а также очень высокой циклонической активностью, особенно в течение холодного периода (Shkaberda, Vasilevskaya, 2014). В этих условиях типично чередование аномальной адвекции тёплого воздуха на больших высотах, нередко сопровождающееся жидкими осадками, с резкими понижениями температуры, что особенно характерно для конца лета и осеннего сезона и связано с выходом на территорию полуострова трансформировавшихся тайфунов и интенсификации полярного фронта. По этим причинам структура снежно-фирновой, а впоследствии

и ледовой толщи, оказывается очень сложно стратифицированной.

Эльбрус — это крупный стратовулкан, расположенный в Боковом хребте Большого Кавказа (рис. 1, б). Последнее извержение одного из паразитических кратеров Эльбруса, расположенного под массивом Восточной вершины на северном макросклоне горы, произошло около 1500 лет назад (Ледники и климат..., 2020). Площадь ледниковой системы Эльбруса равна примерно 112.6 км², что составляет около 10% всего оледенения Кавказа. Метеорологические условия Эльбруса соответствуют южной части умеренного климатического пояса вблизи среднего положения средиземноморской ветви полярного фронта (Ледники..., 2020). В тёплое полугодие высока повторяемость антициклонов субтропического происхождения, которая на климатических картах выражается в виде отрога азорского антициклона. Это приводит к увеличению приходящей солнечной радиации, что вызывает прогрев поверхности снежного покрова и его таяние. В результате в высокогорных зонах Эльбруса типично образование инфильтрационных прослоев и радиационных корок.

Квазиоднородный субгоризонтальный участок ледника Гарабаши на южном склоне Эльбруса на высоте 3900 м над ур. моря был выбран для верификации модели по следующему причинам. Во-первых, этот участок отражает типичные условия формирования толщи в высокогорных районах Большого Кавказа, отличаясь при этом относительной легкодоступностью. Во-вторых, он неплохо обеспечен метеорологическими и снегомерными

измерениями, выполненными на достаточно высоком современном уровне (Дроздов и др., 2024). В январе–феврале 2024 г. в этой точке были получены вертикальные профили плотности и температуры снега, что позволило провести сравнение результатов моделирования с данными наблюдений. Точка измерений находится вблизи границы питания ледника Гарабаши, где максимальная высота снега составляет около 2–2.5 м при средней температуре самого холодного месяца (январь) –16 °С. В июле среднемесячная температура воздуха достигает +2 °С (Ледники..., 2020), а снежный покров, как правило, полностью сходит к началу–середине августа.

Модель SNOWPACK. SNOWPACK – многоцелевая модель снежного покрова с открытым кодом, которая сфокусирована на детальном описании массо- и энергообмена между снежным покровом, атмосферой и, при необходимости, с растительностью и почвой; она создана для оперативного прогноза в лавинной службе в Швейцарских Альпах. Поэтому данная модель направлена на подробное описание микроструктурных свойств снега как трёхкомпонентного пористого материала и включает в себя детальный расчёт его фазовых изменений и переноса воды в снежной толще. Также для потоков массы и энергии на поверхности доступны различные варианты параметризации эрозии снега и коррекции турбулентных потоков для различной стратификации атмосферы (Schlögl et al., 2017). В качестве граничных условий на поверхности в модели используются значения приходящей коротковолновой и длинноволновой радиации, температуры воздуха, относительной влажности, скорости ветра и суммы осадков. В качестве начальных условий могут задаваться вертикальные профили температуры и плотности снежной толщи, размера снежных кристаллов, содержания льда, воды и воздуха. Описание методов расчёта микроструктуры снежного покрова и образования ледяных прослоев приведено в работах (Lehning et al., 2002a; Lehning et al., 2002b).

Модель SNOWPACK применялась и развивалась для ряда различных исследовательских задач, а её верификация на декадном масштабе для альпийских условий полигона Weissfluhjoch (Wever et al., 2015) показала достаточную высокую степень согласованности с натурными данными по высоте снежного покрова, температуре и плотности снега на глубинах. В то же время показано (Wever et al., 2016), что данная модель способна воспроизводить лишь «некоторые ледяные прослои». Так или иначе модель SNOWPACK остаётся одной из наиболее физически полных моделей снежного покрова и, с учётом открытого доступа к модели, служит наиболее доступным инструментом для моделирования формирования ледяных прослоев в снежном покрове.

Орографическая модель осадков. Важно отметить проблему, связанную с воспроизведением осадков в горных районах даже современными глобальными и мезомасштабными моделями атмосферы с пространственным шагом 0.25 градусов. Например, в случае Кавказа месячные суммы осадков могут воспроизводиться с ошибкой, превышающей значения межгодовой изменчивости (Торопов et al., 2019). Поэтому использование данных об осадках, взятых из архивов реанализов для отдельных ледников или горных склонов, некорректно. Для улучшения ситуации в данной работе была использована модель орографической компоненты осадков, основанная на алгоритме расчёта скорости конденсации водяного пара в воздухе, вынужденно поднимающегося вдоль горного склона с наветренной стороны. Эта схема представляет собой комбинацию уравнения Клаузиуса–Клайперона с упрощённым уравнением притока тепла для случая адиабатического охлаждения воздушной частицы, вынужденно поднимающейся вдоль горного склона (Торопов и др., 2022). Такого рода схему можно отнести к «моделям промежуточной сложности». С одной стороны, она существенно проще полного мезомасштабного моделирования, требующего огромных вычислительных ресурсов и мало реалистичного для климатических задач, с другой – существенно более физически обоснована, чем статистические подходы. Подробнее с обзором методов моделирования осадков в горных районах и обоснованием выбора «моделей склонов» можно ознакомиться в работах (Barry, 2008; Торопов и др., 2022).

Отмечено, что при использовании данного подхода орографический добавок к осадкам складывается с крупномасштабными осадками, которые могут быть получены либо отдельно по данным о доступном количестве влаги в столбе атмосферы над расчётной точкой, либо по данным реанализов. Таким образом, согласованность времени и интенсивности выпадения осадков по данным приземного реанализа и по результатам модели зависит от выбранного метода получения крупномасштабных осадков.

Описание численных экспериментов. Прежде, чем использовать модель SNOWPACK для моделирования снежного покрова на вулкане Ушковский, были проведены тестовые численные эксперименты, нацеленные на оценку качества воспроизведения снежной толщи. В качестве «тестового полигона» был использован эльбрусский ледник Гарабаши, по которому собрано значительное количество натурных данных (Дроздов и др., 2024). В ряде работ (Huss et al., 2005; Торопов и др., 2016; Торопов et al., 2019) было показано, что данные реанализов в высокогорных районах в целом достаточно корректны, за исключением, например, осадков. Однако для такой тонкой задачи как

моделирование снежного покрова погрешности реанализов могут быть критичными. Поэтому одна из первых задач — доказать или опровергнуть правомерность использования связки данных реанализов с параметризацией орографического добавка к осадкам для расчётов с моделью SNOWPACK в условиях горного оледенения.

Исходя из этих соображений, проведён численный эксперимент с моделью SNOWPACK по воспроизведению снежного покрова с сентября по февраль 2024 г. с использованием реанализа ERA5 (Hersbach et al., 2023), а также применением модели орографической составляющей осадков на наветренном склоне (Торопов и др., 2022). В данном случае сумма крупномасштабных атмосферных осадков была взята из реанализа для уровня земной поверхности ERA5 Single levels, а затем к этому количеству осадков добавлялись осадки для конкретной точки на основе модели орографического добавка к осадкам. Все прочие метеорологические параметры, входящие в список граничных условий модели SNOWPACK, получены из данных реанализа для различных барических поверхностей ERA5 Pressure levels для уровня 600 гПа. В качестве эталона для сравнения использовались данные о температуре, полученные с помощью термокосы Geoprecision, а также плотномерной съёмки, выполненной в январе—феврале 2024 г. Начальный профиль снега не задавался, так как вблизи границы питания ледника Гарабаши на Эльбрусе (3900 м над ур. моря) снежный покров полностью сходит к сентябрю, обнажая фирновую облицовку.

Вторым этапом после валидации модели стала серия численных экспериментов для вулкана Ушковский. Был выбран период с 1986 по 1997 г., поскольку в этот период в кратере Горшкова на вулкане Ушковский производилось несколько керновых бурений фирновой и ледовой толщи. Для керна, полученного в 1986 г. (Муравьев, Саламатин, 1989), имеются подробные условия по температуре и плотности снежного покрова, которые были заданы для верхних 4 м для всей серии численных экспериментов в качестве начальных условий модели. Для верификации результатов модели SNOWPACK по аккумуляции за данный период, а также по температуре внутри снежно-фирновой толщи использовались данные глубокого бурения 1996 года (Kodama et al., 1996; Shiraiwa et al., 1997).

Для этих расчётов мы использовали данные реанализа ERA5, аналогичные данным из эксперимента для Эльбруса. Варьировались только данные о сумме осадков: использовались прямые данные реанализа ERA5 Single levels, данные прямых наблюдений на метеостанции Ключи, а также результаты применения параметризации орографического добавка к осадкам. Отмечено, что данные реанализа ERA5 Single levels в среднем соответствуют высоте 485 м над ур. моря, поэтому, помимо суммы

осадков, значения приходящей суммарной радиации также были пересчитаны на уровень 3950 м над ур. моря по высотному градиенту согласно (Barry, 2008).

Верификация модели для этих параметров производилась по серии численных экспериментов с различными параметрами модели SNOWPACK: варьировались доступные параметризации (Schlögl et al., 2017) параметра стабильности при расчёте турбулентных потоков тепла, температура замерзания жидких осадков, используемая в модели, а также некоторые доступные параметризации фазовых изменений и переноса воды в снежной толще (Wever et al., 2014). В итоге наиболее удовлетворительные результаты были получены при использовании теории подобия Мони́на—Обухова с одномерным параметром стабильности, разделении выпадающих осадков на жидкие и твёрдые при температуре воздуха 1.2 °C и базовыми моделями метаморфизма и влагопереноса в снеге (Lehning et al., 2002a).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Верификация модельного комплекса с использованием данных реанализа. В результате описанного выше численного эксперимента получена временная изменчивость высоты, стратиграфии и температуры снежного покрова с 01.09.2023 по 10.02.2024 г. для ледника Гарабаши (южный склон Эльбруса). Поскольку доступны данные наблюдений по вертикальному распределению плотности и температуры снежной толщи, а также фактическая высота снежного покрова для конца расчётного периода, то предлагаемый модельный комплекс может быть верифицирован именно для этих величин.

Первое, что хотелось бы отметить, это весьма высокая точность воспроизведения аккумуляции снега к концу расчётного периода. Разница модельных и фактических результатов толщины снежного покрова по итогам шурфования 27.01.2024 составила всего 3 см: так, по модели величина снегонакопления для точки шурфа составила 137 см, а по натурным данным — 140 см. Этот результат демонстрирует адекватность применения параметризации орографического добавка к осадкам с использованием данных по крупномасштабным осадкам из реанализа ERA5.

Кроме того, значения температуры в толще снежного покрова для периода измерений также достаточно хорошо согласуются с данными наблюдений (рис. 2). Представленная выборка соответствует данным за 4 и 5 февраля на глубинах от 60 до 120 см. Эти глубины были взяты для того, чтобы исключить различия в суточном ходе температур у поверхности, которые слабо воспроизводятся

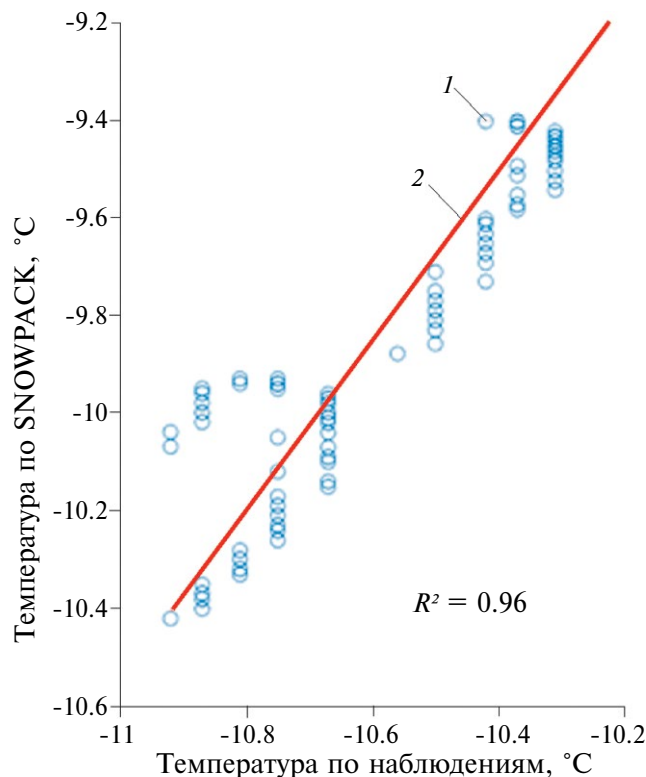


Рис. 2. Диаграмма рассеяния для температуры снежного покрова на глубинах от 60 до 120 см за период 04–05.02.2024 на леднике Гарабаша на вулкане Эльбрус по результатам модели SNOWPACK и данным наблюдений по термокосу Geoprecision (1) и линия аппроксимации для всех точек (2). R^2 – коэффициент детерминации

Fig. 2. The scatterplot for the temperature of the snow cover at depths from 60 cm to 120 cm for the period 04–05.02.2024 for the Garabashi glacier on the Elbrus volcano based on the results of the SNOWPACK model and Geoprecision thermistor observations (1) and the approximation line for all the points (2). R^2 is the coefficient of determination

с учётом использования в качестве граничных условий данных реанализа. Кроме того, термокоса была помещена в нарушенный снежный покров и засыпана свежим снегом, для которого характерна более низкая теплопроводность, что давало дополнительные ошибки наблюдений. Тем не менее суточная амплитуда температуры по результатам моделирования оказалась ещё ниже.

Для данной выборки получена высокая степень соответствия временной изменчивости рядов (коэффициент детерминации R^2 составил 0.96), однако было получено смещение результатов моделирования относительно наблюдаемых значений: средняя абсолютная ошибка моделирования составила 1.1 °C. При сравнении полных полученных профилей температуры среднее смещение для всех

глубин возрастает до 1.4 °C. Увеличение ошибки для уровней вблизи поверхности может быть связано не только с ошибками реанализа и измерений, но и с необходимостью интерполяции результатов модели SNOWPACK на уровни измерений по термокосу.

Можно заключить, что результаты моделирования по воспроизведению высоты и температурного профиля в снежном покрове с достаточной в рамках задач исследования точностью соотносятся с фактическими измерениями. Эксперимент показал, что использование модели SNOWPACK с входными данными реанализа ERA5 и использованием модели орографического добавка к осадкам возможно для моделирования снежной толщи в высокогорных районах и может применяться для воспроизведения снегонакопления и основных физических характеристик снега. Правда, необходимо отметить, что такие эксперименты возможны только при условии орографической коррекции осадков для наветренного склона, что будет более подробно показано далее в эксперименте для вулкана Ушковский.

Воспроизведение снежного покрова на вулкане Ушковский. На втором этапе исследования были проведены численные эксперименты по воспроизведению снежной толщи в кратере Горшкова на вулкане Ушковский за период с 1986 по 1997 г. с тремя видами данных об атмосферных осадках: по данным наблюдений на метеостанции Ключи, реанализу ERA5 Single levels и результатам расчётов по параметризации орографического добавка к осадкам.

Первый эксперимент проводился с осадками с ближайшей метеостанции в посёлке Ключи. Расстояние до вулкана составляет 13 км, что более, чем в 2 раза меньше, чем размер шага сетки реанализа. Сумма осадков по данным метеостанции за выбранный период составила 5000 мм. Результаты моделирования показали, что 4 м снежного покрова, заданные в качестве начальных условий, полностью стояли за 10 лет модельного времени. Этот эксперимент демонстрирует, что данные об осадках с ближайшей для Ключевской группы вулканов метеостанции вполне нерепрезентативны.

Во втором эксперименте использовались те же входные данные модели, но осадки взяты из реанализа ERA5 Single levels. Уровень ячейки реанализа оказался в среднем выше метеостанции в пос. Ключи на 400 м. При этом сумма осадков за весь период оказалась вдвое больше, чем в первом эксперименте. По результатам моделирования было получено, что снегонакопление в кратере Горшкова за выбранный период составило около 6 м, в то время как по результатам бурения 1996 г. (Shiraiwa et al., 1997) за этот же период аккумуляция составила около 10 м. Таким образом, использование данных по осадкам

из реанализа ERA5 приводит к существенному занижению высоты снежного покрова при относительной ошибке моделирования для высоты снежного покрова в 40%. При этом в смоделированной снежно-фирновой толще не было получено ни одного ледяного прослоя. Полученный в этом численном эксперименте результат можно считать неудовлетворительным.

В третьем случае были использованы результаты расчётов по модели орографического добавка к осадкам. Полученные высота и стратиграфия снежного покрова приведены на рис. 3. Суммарное снегонакопление с июня 1986 по июль 1997 г. составило 12.5 м. Таким образом, использование орографической модели осадков позволило уменьшить ошибку моделирования с 40 до 25%. Ошибка остаётся довольно значительной и, помимо несовершенства модели орографических осадков, может быть связана с упрощенным пересчётом приходящей суммарной радиации на высоту

вершины Ушковского, в результате чего её величина скорее всего занижается. Второй источник ошибок, вероятно, заключается в неточном задании граничных условий модели и, прежде всего, температуры воздуха из-за того, что данные реанализа берутся с ближайшего доступного уровня, с изобарической поверхности 600 гПа, в то время как высота кратера Горшково соответствует в среднем уровню 625 гПа.

Также было проведено сравнение выявленных по результатам моделирования сведений о плотности снежного покрова с фактическими данными, полученными из керна jím (Kodama et al., 1996) – результаты представлены на рис. 4. Из-за различий в высоте снежного покрова на 2.5 м модельный профиль был приведён к длине профиля по керну. При непосредственном статистическом сравнении профилей их корреляция оказывается пренебрежимо малой. Это может объясняться грубым шагом натурных данных, а также крайне

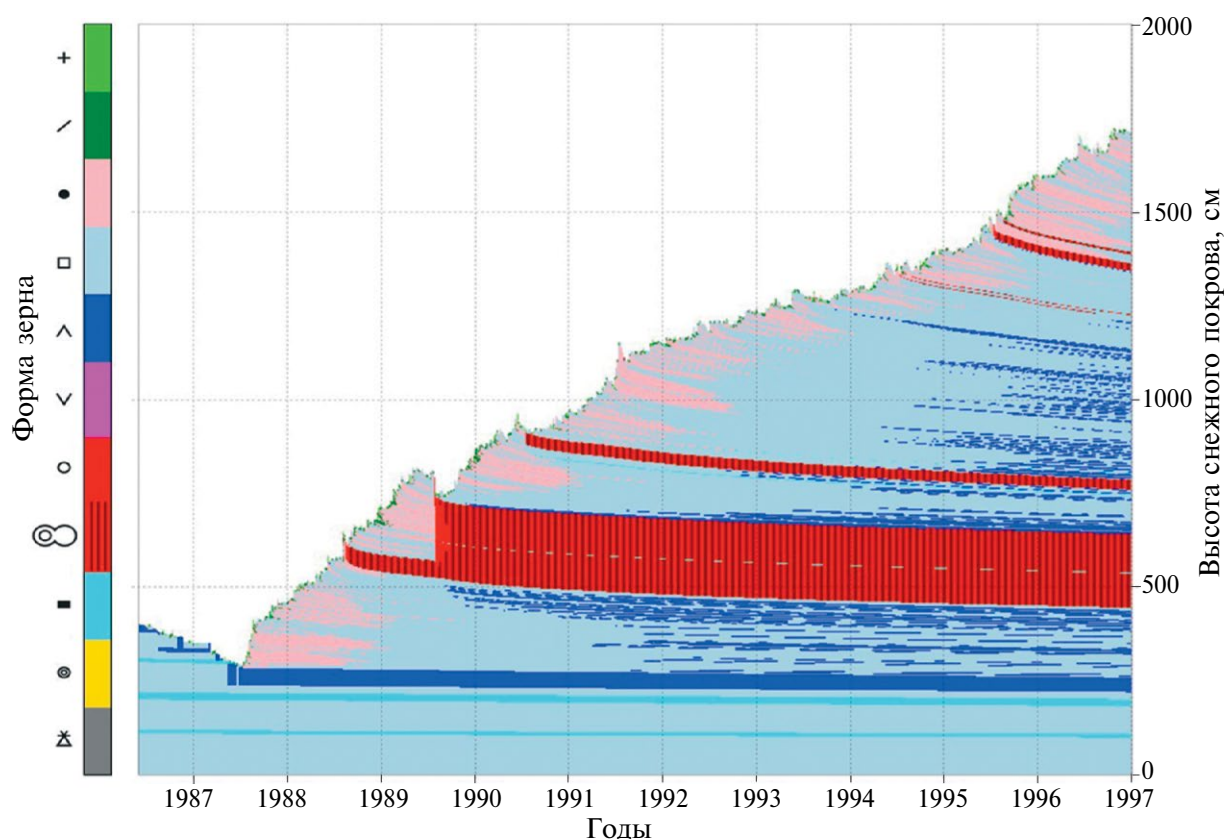


Рис. 3. Распределение стратиграфии и высоты снежного покрова в кратере Горшково на вулкане Ушковский по результатам модели SNOwPACK по данным реанализа ERA5 и с использованием параметризации орографического добавка к осадкам для периода с 1986 по 1997 г. Цветная шкала показывает форму снежных зёрен и кристаллов в соответствии с (Фирц и др., 2012)

Fig. 3. Distribution of stratigraphy and snow depth in the Gorshkov crater on Ushkovsky volcano based on the results of the SNOwPACK model with ERA5 reanalysis data with using the parameterization of orographic precipitation addition for the period from 1986 to 1997. The color scale shows the shape of snow grains and crystals according to (Fierz et al., 2012)

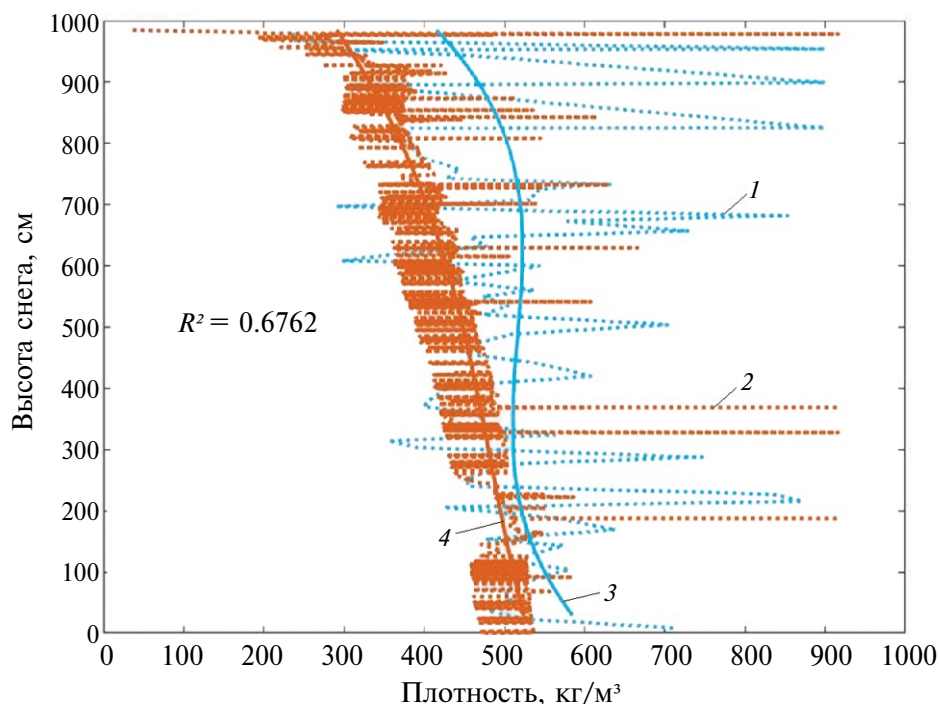


Рис. 4. Вертикальные профили плотности снежного покрова по данным керна 1996 года (Kodama et al., 1996) (1) и результатам моделирования с помощью SNOWPACK (2), а также аппроксимирующие кривые (3) и (4) для этих профилей соответственно. R^2 — коэффициент детерминации между двумя аппроксимирующими кривыми

Fig. 4. Vertical snow cover density profiles according to 1996 core data (Kodama et al., 1996) (1) and the results of SNOWPACK modelling (2), as well as approximation curves (3) and (4) for these profiles, respectively. R^2 is the coefficient of determination between the two approximation curves

высокой неоднородностью как измеренного, так и смоделированного профилей. Поэтому для обоих профилей были построены аппроксимирующие кривые по полиному 3-й степени, что позволяет показать высокую степень совпадения средних профилей (коэффициент детерминации R^2 между этими кривыми составил 0.67). Значения модели сходятся с аппроксимацией намного лучше, чем данные керна (коэффициент детерминации R^2 для аппроксимации выборки данных составил 0.6 для SNOWPACK и 0.04 для керна соответственно).

Рассматривая воспроизведение ледяных прослоев, отмечено, что в некоторых случаях совпадение с керном достаточно точное. Например, по результатам моделирования для 24 декабря 1996 г. (что соответствует высоте снега 9.5 м снега на рис. 4) сформировался плотный ледяной прослой толщиной 1 см, который близок по плотности и глубине тому, что получен в керне: по расположению и плотности ошибки составили всего 10 см и 10 кг/м³ соответственно. Подобные совпадения отмечаются на отметке 175 см, где керн практически совпал с модельными данными (расхождение плотности не более 30 кг/м³, при толщине ледяного прослоя менее 1 см). Так же на отметках 7 и 8.3 м модель SNOWPACK воспроизвела

уплотнённые фирновые прослои, которые наблюдаются в керне, однако они не совпали по плотности с фактическими данными. На глубинах 3.2 и 3.7 м были смоделированы два ледяных прослоя, которые не наблюдаются в керне. Таким образом, модель воспроизвела четыре ледяных прослоя, в то время как по фактическим данным их количество составляет пять.

Отмечено, что в предыдущем эксперименте с использованием данных реанализа ERA5 по осадкам модель SNOWPACK вообще не воспроизвела ледяные прослои. При использовании параметризации орографического добавка к осадкам модель также не всегда воспроизводит вариации плотности и точную глубину ледяных прослоев, тем не менее представленные результаты всё же позволяют получить более или менее достоверную информацию о строении снежно-фирновой толщи. С учётом отсутствия качественных входных данных и невозможности корректировки результатов модели полученный результат можно считать приемлемым. Данный подход существенно улучшает результаты по сравнению с применением данных по осадкам непосредственно из реанализа и с сети станций Росгидромета.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Причины полученных различий модельных результатов и данных ледяного керна в кратере Горшкова вулкана Ушковский могут, с одной стороны, заключаться в некорректности метеорологических данных (реанализа и модели орографических осадков), а с другой — в ограничениях модели SNOWPACK.

Для воспроизведения ледяных прослоев важна корректность входных данных модели снежного покрова на как можно меньшем временном масштабе. При этом известно, что данные реанализа ERA5 более надёжны на больших временных масштабах, чем на часовых сроках, где наблюдается недооценка экстремальных величин, особенно в высокогорных районах (Дроздов и др., 2024), которая может оказать определяющее влияние на воспроизведение подробной стратиграфии снежного покрова.

В то же время, исследования по воспроизведению ледяных прослоев в модели SNOWPACK показывают, что рассчитывать просачивание жидкой влаги и появление ледовых образований внутри снежного покрова очень проблематично даже при наличии фактических метеоданных для точки моделирования. Так, для полигона Weissfluhjoch за период в 16 лет модель смогла воспроизвести лишь 20% всех ледяных прослоев (Wever et al., 2016). Позже в модель SNOWPACK была добавлена новая параметризация инфильтрации и замерзания влаги на глубинах (Quéno et al., 2020), которая существенно улучшила воспроизведение ледяных прослоев в модели. Однако она в настоящее время недоступна в открытой версии модели SNOWPACK.

Кроме того, в (Wever et al., 2016) также показано, что данная модель не может воспроизводить ледяные корки при выпадении переохлаждённых осадков. Однако именно этот тип ледяных образований ожидалось получить для вулкана Ушковский, поэтому с этим может быть связано занижение моделью общего количества прослоев и невозпроизведение некоторых из прослоев, наблюдающихся в керне. В то же время, параметризация ледяных корок при гололёдах была добавлена и успешно протестирована в модели CROCUS (Quéno et al., 2018). Но представленная методика требует также достоверных данных о содержании жидкой влаги в атмосфере над точкой моделирования.

Для оценки изменения процессов льдообразования на климатическом масштабе для вулкана Ушковский доступны данные 27 м ледникового керна j1m, полученного в 1996 г. (Kodama et al., 1996), и 14 м керна, пробуренного в 2022 г. (Chizhova et al., 2024), которые представлены на рис. 5, б. Отмечены практически неизменные значения по средней многолетней скорости аккумуляции:

за период 1986–1996 гг. она составила около 0.96 м/год, а за период 2008–2022 гг. — около 0.97 м/год. Однако в керне 2022 г. количество ледяных прослоев составляет около 53% от общей длины керна, при этом в керне j1m 1996-го года эта же величина составляет лишь 4%. Отмечено, что для керна j1m шаг анализа был значительно ниже, чем в керне 2022 г., что может приводить к занижению значений плотности и невозможности выделения всех ледяных прослоев. Но общий профиль плотности и различия в относительном содержании льда в верхней части снежно-фирновой толщи на порядок однозначно указывают на изменение процессов льдообразования в кратере Горшкова на вулкане Ушковский.

С одной стороны, это является следствием нескольких вулканических извержений и осаднения пепла на поверхности, что приводило к усилению поглощения солнечной радиации, прогреву и таянию снежного покрова, однако с другой — реакцией на изменения климатических параметров для данной точки. По данным реанализа ERA5, на уровне 600 гПа с 1997 г. среднегодовое количество часов с положительными температурами воздуха увеличилось почти втрое (рис. 5, а). В период с 1986 по 1997 г. можно наблюдать всего два года, когда сумма часов с положительными температурами была больше 48, а среднегодовое количество часов за данный период составило 21.9. С 1997 по 2022 г. участилась повторяемость положительных температур: за этот период наблюдается всего 6 лет, когда сумма часов с положительными температурами была меньше 48, а среднегодовое количество равняется 57.

В вышеописанных экспериментах для периода 1986–1997 гг. отмечено отсутствие глубокого промачивания снежно-фирновой толщи жидкой влагой, что характерно для рекристаллизационного типа льдообразования. Активное таяние наблюдалось только в летние периоды 1988, 1989 и 1990 гг., когда максимальные значения температуры воздуха достигали +2 °C. Для последующего периода можно отметить 11 подобных случаев. Эти результаты согласуются с последними климатическими оценками для Камчатского полуострова (Korneva et al., 2024), которые показывают увеличение летних температур воздуха по данным станций наземной сети на 0.2 °C/10 лет.

Предположено, что за последние 40 лет на полуострове Камчатка происходит смена циркуляционного режима, который напрямую влияет на климатические параметры. Рост высоты геопотенциальных поверхностей 850 и 500 гПа за последние десятилетия (2000–2020 гг.), по всей видимости, связан с распространением Северотихоокеанского антициклона на север, а также с увеличением повторяемости адвекции тепла из тропических районов Тихого океана, уменьшением балла облачности

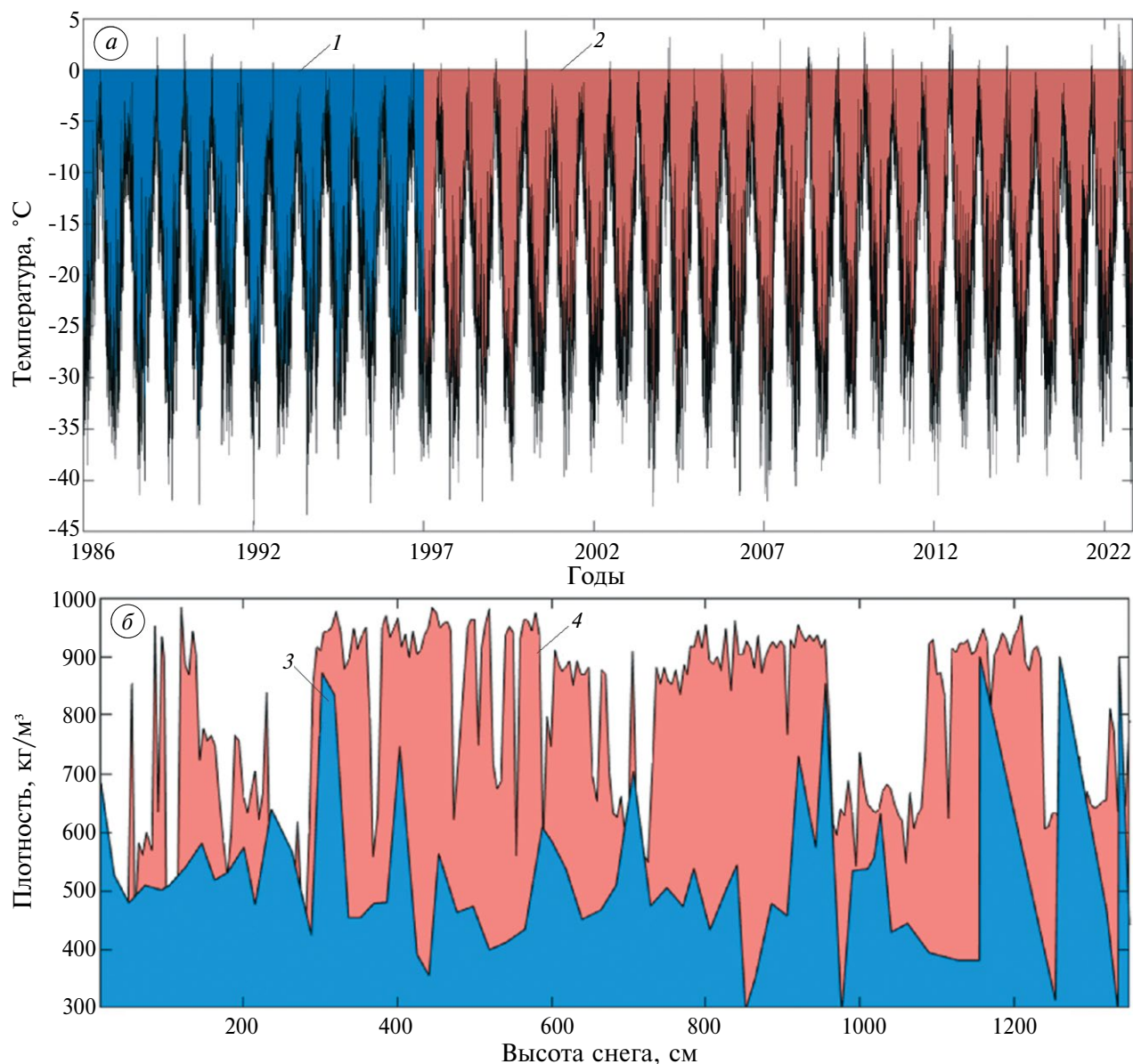


Рис. 5. Температура воздуха на изобарической поверхности 600 гПа за период 1986–2022 гг. по данным реанализа для различных барических поверхностей ERA5 Pressure levels (а), где синим цветом показан период моделирования 1986–1997 гг. (1), красным цветом – 1998–2023 гг. (2). Вертикальные профили плотности снежного покрова (б) по данным керна 1996 года (Kodama et al., 1996) (3) и 14-метрового керна, пробуренного в 2022 г. (4)

Fig. 5. The air temperature on the 600 hPa pressure level for the period 1986–2022 according to the data of the reanalysis of ERA5 Pressure levels (a), where the blue fill shows the modelling period 1986–1997 (1), and the red one shows the 1998–2023 period (2). Vertical profiles of the snow cover density (b) according to the 1996 ice core (Kodama et al., 1996) (3) and the 14-meter ice core drilled in 2022 (4)

и увеличением баланса коротковолновой радиации. Показано, что эти процессы приводят к увеличению абляции ледников в Камчатском регионе (Korneva et al., 2024).

Анализ ледовых прослоев, полученных по результатам численных экспериментов, с точки зрения их генезиса и метеорологических условий образования показал, что образование ледяных

прослоев наблюдается преимущественно при адвекции тёплого влажного воздуха с Тихого океана и Охотского моря как в условиях циклонической циркуляции, так и при положении на периферии антициклонов. Как было отмечено выше, в последние десятилетия увеличивается повторяемость именно этих синоптических процессов над Камчатским полуостровом.

Полученные в настоящем исследовании результаты позволяют говорить, что представленный подход к воспроизведению структуры снежно-фирновой толщи на основе данных реанализа ERA5 и модельного комплекса из SNOWPACK и модели орографического добавка к осадкам может приближённо воспроизводить количество и положение ледяных прослоев в снежно-фирновой толще. Вероятно, этот результат может быть улучшен в будущих исследованиях за счёт использования модели снежного покрова CROCUS или обновлённой параметризации инфильтрации и замерзания влаги в модели SNOWPACK, указанных выше. Последующие этапы исследования предполагают развитие представленного метода и его верификацию на большем временном масштабе и для других горно-ледниковых районов с доступными данными ледниковых кернов. В частности, такие расчёты могут быть проведены для кратера Горшкова на Ушковском вулкане на климатическом временном масштабе с 1986 по 2022 г. Кроме того, использование атмосферного форсинга из климатических моделей может позволить применять описанный модельный инструмент для прогноза изменений состояния снежно-фирновой толщи и типа льдообразования ледников в будущем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе впервые воспроизведена аккумуляция и стратиграфия снежного покрова для условий горного оледенения Эльбруса и Камчатки с помощью вычислительного комплекса, состоящего из модели снежного покрова SNOWPACK (Lehning et al., 2002a) и параметризации орографического добавка к осадкам (Торопов и др., 2022), при использовании в качестве «форсинга» данных реанализа ERA5. Тестирование данного модельного подхода на сезонном масштабе для ледника Гарабаши на Эльбрусе показало высокую степень совпадения с данными прямых наблюдений по аккумуляции и воспроизведению термического режима снежной толщи. Отклонение по высоте снежного покрова составило всего 3 см, а коэффициент детерминации для температурного профиля — 0.96 при средней абсолютной ошибке результатов моделирования 1.4 °C.

Для 10-летнего периода на вулкане Ушковский показано, что применение модели орографического добавка к осадкам улучшает воспроизведение скорости аккумуляции снега по сравнению с использованием в качестве входных данных реанализа ERA5 или данных прямых наблюдений по ближайшей метеостанции. Ошибка воспроизведения многолетней аккумуляции была уменьшена до 25% по сравнению с 40% при использовании данных реанализа ERA5 по осадкам.

Также, по результатам модели SNOWPACK, в кратере Горшкова на вулкане Ушковский воспроизведено четыре ледяных прослоя, что в целом соответствует пяти ледяным прослоям, полученным по ледниковому керну jim (Kodama et al., 1996). Два ледяных прослоя показали близкое соответствие натурным данным с различиями по глубине и плотности не более 30 см и 30 кг/м³. При аппроксимации модельного и натурального профилей плотности была получена высокая степень совпадения средних профилей с коэффициентом детерминации $R^2 = 0.67$. В целом модельный комплекс удовлетворительно воспроизвёл основные характеристики ледяных прослоев в снежно-фирновой толще и общее снегонакопление на Ушковском.

Долгосрочный анализ показал, что за последние 40 лет на Камчатке наблюдается тенденция к увеличению случаев положительных температур в летний период, что приводит к увеличению таяния и инфильтрации воды в снежно-фирновую толщу. Это подтверждается увеличением количества ледяных прослоев в керне, пробуренном в 2022 г., по сравнению с предыдущими результатами. Всё это указывает на изменение типа льдообразования в кратере Горшкова на вулкане Ушковский.

Таким образом, данное исследование показывает, что модельный комплекс из SNOWPACK, данных реанализа ERA5 и модели орографического добавка к осадкам может быть использован для детального анализа стратиграфии и динамики снежного покрова на горных ледниках. Такой подход может быть полезен для решения научных и прикладных задач, в частности изучения климатических изменений в труднодоступных горных районах и оценки изменений в структуре снежной толщи горных ледников. В то же время, приведённый в работе метод может быть улучшен за счёт применения обновлённых параметризаций инфильтрации и замерзания жидкой влаги внутри снежного покрова и воспроизведения ледяных образований гололёдного генезиса. В дальнейшем возможно развитие представленного метода и его верификация на большем временном масштабе и для других горно-ледниковых районов с доступными данными ледниковых кернов.

Благодарности. Численные эксперименты и верификация модели снежного покрова SNOWPACK на основе данных ледниковых кернов Камчатки выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-17-00159. Верификация модели SNOWPACK по данным измерений на Эльбрусе и модели орографической составляющей осадков выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-17-00247.

Acknowledgements. Numerical experiments and verification of the SNOWPACK snow cover model based on data from Kamchatka glacial cores were carried out with the financial support of the RSF grant № 22-17-00159.

Verification of the SNOWPACK model based on measurements on Elbrus and the model of orographic component of precipitation was carried out with the financial support of the RSF grant № 23-17-00247.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дроздов Е.Д., Торопов П.А., Авиллов В.К., Артамонов А.Ю., Полюхов А.А., Железнова И.В., Ярынич Ю.И. Метеорологический режим высокогорной зоны Эльбруса в период аккумуляции // *Лёд и Снег*. 2024. Т. 64 (1). С. 25–40.
<https://doi.org/10.31857/S2076673424010022>
- Котляков В.М. Снежный покров Антарктиды и его роль в современном оледенении материка. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1961. 246 с.
- Кренке А.Н. Зоны льдообразования на ледниках // *Геофизический бюллетень*. Вып. 25. М.: Наука, 1973. С. 44–56.
- Ледники и климат Эльбруса / Отв. ред. В.Н. Михаленко. М.—СПб.: Нестор-История, 2020. 372 с.
- Муравьев Я.Д., Саламатин А.Н. Баланс массы и термодинамический режим ледника в кратере Ушковского вулкана // *Вулканология и сейсмология*. 1989. № 3. С. 85–92.
- Торопов П.А., Михаленко В.Н., Кутузов С.С., Морозова П.А., Шестакова А.А. Температурный и радиационный режим ледников на склонах Эльбруса в период абляции за последние 65 лет // *Лёд и Снег*. 2016. Т. 56. Вып. 1. С. 5–19.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-1-5-19>
- Торопов П.А., Шестакова А.А., Ярынич Ю.И., Кутузов С.С. Моделирование орографической составляющей осадков на примере Эльбруса // *Лёд и Снег*. 2022. Т. 62. Вып. 4. С. 485–503.
<https://doi.org/10.31857/S2076673422040146>
- Фицц Ш., Армстронг Р.Л., Дюран И., Этхиви П., Грин И., Маккланг Д.М., Нишимура К., Сатьявали П.К., Сокрытов С.А. Международная классификация для сезонно выпадающего снега (руководство к описанию снежной толщи и снежного покрова): Русское издание // *Материалы гляциологических исследований*. 2012. № 2. 80 с.
- Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Глазовский А.Ф., Муравьев А.Я., Никитин С.А., Лаверентьев И.И. Новый Каталог ледников России по спутниковым данным (2016–2019 гг.) // *Лёд и Снег*. 2021. Т. 61. Вып. 3. С. 341–358.
<https://doi.org/10.31857/S2076673421030093>
- Barry R.G. Mountain weather and climate. London: Cambridge University Press, 2008. 505 p.
- Beniston M., Farinotti D., Stoffel M., Andreassen L.M., Coppola E., Eckert N., Fantini A., Giacona F., Hauck C., Huss M., Huwald H., Lehning M., López-Moreno J.-I., Magnusson J., Marty C., Morán-Tejeda E., Morin S., Naaïm M., Provenzale A., Rabatel A., Six D., Stötter J., Strasser U., Terzago S., Vincent C.
- The European Mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future challenges // *Cryosphere*. 2018. № 12. P. 759–794.
<https://doi.org/10.5194/tc-12-759-2018>
- Chizhova Yu.N., Mikhaleenko V.N., Korneva I.A., Hayredinova A.G., Vorobiev M.A., Muravyov Ya.D. New Data on Deuterium Excess Values of Glacial Ice in Kamchatka Peninsula // *Doklady Earth Science*. 2024. V. 517. P. 1387–1392.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X24602190>
- Clifford H.M., Potocki M., Rodda C., Dixon D., Birkel S., Handley M., Mayewski P.A. Prefacing unexplored archives from Central Andean surface-to-bedrock ice cores through a multifaceted investigation of regional firn and ice core glaciochemistry // *Journ. of Glaciology*. 2023. V. 69. № 276. P. 693–707.
<https://doi.org/10.1017/jog.2022.91>
- Essery R., Kim H., Wang L., Bartlett P., Boone A., Brutel-Vuillet C., Burke E., Cuntz M., Decharme B., Dutra E., Fang X., Gusev Y., Hagemann S., Haverd V., Kontu A., Krinner G., Lafaysse M., Lejeune Y., Marke T., Marks D., Marty C., Menard C. B., Nasonova O., Nitta T., Pomeroy J., Schädler G., Semenov V., Smirnova T., Swenson S., Turkov D., Wever N., Yuan H. Snow cover duration trends observed at sites and predicted by multiple models // *The Cryosphere*. 2020. V. 14. P. 4687–4698.
<https://doi.org/10.5194/tc-14-4687-2020>
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Rozum I., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., Thépaut J.-N. (2023): ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). Accessed 30.03.2024.
<https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>
- Huss M., Hock R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss // *Natural Climate Changing*. 2018. 8 (2). P. 135–140.
<https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>
- Kodama Y., Shiraiwa T., Kobayashi D., Matsumoto T., Yamaguchi S., Muravyev Ya.D., Glazirin G.E. Hydro-meteorological and glaciological observations in the Koryto and Ushkovsky Glaciers, Kamchatka // *Low Temperature Science*. Ser. A. 1996. 55. P. 107–136.
- Korneva I.A., Toropov P.A., Muraviev A.Ya., Aleshina M.A. Climatic factors affecting Kamchatka glacier recession // *International Journ. of Climatology*. 2024. V. 44 (2). P. 345–369.
<https://doi.org/10.1002/joc.8328>
- Lehning M., Bartelt P., Brown B., Fierz C., Satyawali P. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part II. Snow microstructure // *Cold regions science and technology*. 2002a. 35 (3). P. 147–167.
[https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(02\)00073-3](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(02)00073-3)
- Lehning M., Bartelt P., Brown B., Fierz C. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche

- warning: Part III: Meteorological forcing, thin layer formation and evaluation // *Cold Regions Science and Technology*. 2002b. 35 (3). P. 169–184.
[https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(02\)00072-1](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(02)00072-1)
- Matoba S., Ushakov S.V., Shimbori K., Sasaki H., Yamasaki T., Ovshannikov A.A., Manevich A.G., Zhideleva T.M., Kutuzov S., Muravyev Ya.D., Shiraiwa T.* The glaciological expedition to Mount Ichinsky, Kamchatka, Russia // *Bulletin of Glaciological Research*. 2007. 24. P. 79–85.
- Mikhailenko V., Sokratov S., Kutuzov S., Ginot P., Legrand M., Preunkert S., Lavrentiev I., Kozachek A., Ekaykin A., Fan X., Lim S., Schotterer U., Lipenkov V., Toropov P.* Investigation of a deep ice core from the Elbrus western plateau, the Caucasus, Russia // *The Cryosphere*. 2015. V. 9. P. 2253–2270.
<https://doi.org/10.5194/tc-9-2253-2015>
- Ozeki T., Akitaya E.* Energy balance and formation of sun crust in snow // *Annals of Glaciology*. 1998. V. 26. P. 35–38.
- Pinzer B.R., Schneebeli M., Kaempfer T.U.* Vapor flux and recrystallization during dry snow metamorphism under a steady temperature gradient as observed by time-lapse micro-tomography // *The Cryosphere Discussions*. 2012. V. 6 (3). P. 1673–1714.
<https://doi.org/10.5194/tc-6-1141-2012>
- Quéno L., Vionnet V., Cabot F., Vrécourt D., Dombrowski-Etchevers I.* Forecasting and modelling ice layer formation on the snowpack due to freezing precipitation in the Pyrenees // *Cold Regions Science and Technology*. 2018. V. 146. P. 19–31.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.11.007>
- Quéno L., Fierz C., van Herwijnen A., Longridge D., Wever N.* Deep ice layer formation in an alpine snowpack: monitoring and modeling // *The Cryosphere*. 2020. V. 14 (10). P. 3449–3464.
<https://doi.org/10.5194/tc-14-3449-2020>
- Sato T., Shiraiwa T., Greve R., Seddik H., Edelmann E., Zwinger T.* Accumulation reconstruction and water isotope analysis for 1735–1997 of an ice core from the Ushkovsky volcano, Kamchatka, and their relationships to North Pacific climate records // *Climate of the Past Discussions*. 2013. V. 9 (2). P. 2153–2181.
<https://doi.org/10.5194/cpd-9-2153-2013>
- Schlögl S., Lehning M., Nishimura K., Huwald H., Cullen N.J., Mott R.* How do Stability Corrections Perform in the Stable Boundary Layer Over Snow? // *Boundary-Layer Meteorol.* 2017. V. 165. P. 161–180.
<https://doi.org/10.1007/s10546-017-0262-1>
- Shiraiwa T., Muravyev Ya.D., Yamaguchi S.* Stratigraphic Features of Firn as Proxy Climate Signals at the Summit Ice Cap of Usnkovsky Volcano, Kamchatka, Russia // *Arctic and Alpine Research*. 1997. V. 29 (4). P. 414–421.
- Shkaberda O.A., Vasilevskaya L.N.* Long-term variability of the temperature and humidity regime on the Kamchatka peninsula // *Izvestiya TINRO*. 2014. V. 178 (3). P. 217–233.
<https://doi.org/10.26428/1606-9919-2014178-217-233>
- Thompson L.G., Davis, M.E., Mosley-Thompson E., Porter S.E., Corrales G.V., Shuman C.A., Tucker C.J.* The impacts of warming on rapidly retreating high-altitude, low-latitude glaciers and ice core-derived climate records // *Global and Planetary Change*. 2021. V. 203. P. 103538.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103538>
- Toropov P.A., Aleshina M.A., Grachev A.M.* Large-scale climatic factors driving glacier recession in the greater caucasus, 20th–21st century // *International Journal of Climatology*. 2019. V. 39. P. 4703–4720.
<https://doi.org/10.1002/joc.6101>
- Wever N., Schmid L., Heilig A., Eisen O., Fierz C., Lehning M.* Verification of the multi-layer SNOWPACK model with different water transport schemes // *The Cryosphere*. 2015. V. 9. P. 2271–2293
<https://doi.org/10.5194/tc-9-2271-2015>
- Wever N., Würzer S., Fierz C., Lehning M.* Simulating ice layer formation under the presence of preferential flow in layered snowpacks // *The Cryosphere*. 2016. V. 10 (6). P. 2731–2744.
<https://doi.org/10.5194/tc-10-2731-2016>

Citation: *Sushintsev I.M., Drozdov E.D., Toropov P.A., Mikhlenko V.N., Vorobiev M.A., Hayredinova A.G. Modeling of snow cover on glaciers of the Caucasus and Kamchatka Peninsula. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2025, 65 (1): 21–36. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673425010025*

Modeling of snow cover on glaciers of the Caucasus and Kamchatka Peninsula

© 2025 I. M. Sushintsev^{a,b,#}, E. D. Drozdov^{a,b}, P. A. Toropov^{a,b},
V. N. Mikhlenko^a, M. A. Vorobiev^a, A. G. Hayredinova^a

^a*Institute of Geography RAS, Moscow, Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: sushintsev@yahoo.com*

Received September 20, 2024; revised November 12, 2024; accepted December 25, 2024

The paper evaluates the possibility of using a computing complex that includes a SNOWPACK model and an algorithm for calculating orographic precipitation addition to reproduce snow cover in mountainous areas. This model complex was tested in the conditions of two contrasting mountain-glacial systems provided with in-situ data: the Central Caucasus (using the example of Mount Elbrus), and Kamchatka (using the example of the Ushkovsky volcano). Numerical experiments were carried out for the period of 09.2023–02.2024 for Elbrus and for the period of 1986–1997 for Ushkovsky, ERA5 reanalysis data was used as a forcing. It is shown that on a seasonal scale for the Elbrus volcano, the simulation results are in good agreement with the field data: the error in the amount of snow accumulation was 3 cm, for the temperature inside the whole snow column mean average error was 1.4 °C with a coefficient of determination $R^2 = 0.96$. For Ushkovsky, 3 numerical experiments were conducted with different input data on precipitation. The simulation results were compared with the data from the 1996 ice core. When using the orographic precipitation model, the error in reproducing accumulation over 10 years was reduced to 25% compared to 40% according to the ERA5 reanalysis. At the same time, the model described the stratigraphy of the snow cover well: 4 out of 5 ice formations were reproduced. It is shown that the presented model tool can be used to approximate the dynamics of snow accumulation on long time scales and to analyze changes in ice formation conditions on mountain glaciers. Possible ways of the model complex developing are also discussed, which will allow more accurate assessment of snow column structure and reproduction of ice formations. According to the drilling data of 2022, it was revealed that the density profile of the Ushkovsky volcano is very different from that presented in the 1996 study. Previously, only about 4% of ice was observed in the snow-firn stratum, currently its content has increased to 53% of the entire profile. Thus, climate change has affected the snow cover structure of Kamchatka's high-altitude glaciers. This is manifested in an increase in the frequency of positive summer temperatures over the past decades, which leads to melting and infiltration of liquid moisture into the snow-firn stratum.

Keywords: snow cover, precipitation, ice layers, modeling, Kamchatka, Elbrus, SNOWPACK model

REFERENCES

- Drozdov E.D., Toropov P.A., Avilov V.K., Artamonov A.Y., Polyukhov A.A., Zheleznova I.V., Yarinich Y.I.* Meteorological regime of the Elbrus high-mountain zone during the accumulation period. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 1 (64): 25–40.
<https://doi.org/10.31857/S2076673424010022> [In Russian].
- Kotlyakov V.M.* The Snow Cover of the Antarctic and Its Role in the Present-Day Glaciation of the Continent. Jerusalem, 1966: 256 p.
- Krenke A.N.* Zones of ice formation on glaciers. *Geofizicheskii bulletin*. Geophysical bulletin. Moscow: Nauka Publ., 1973, 25: 44–56 [In Russian].
- Ledniki i klimat Elbrusa. Glaciers and climate of Elbrus /* Resp. ed. V.N. Mikhlenko. Moscow; St. Petersburg: Nestor-Istoria Publ., 2020: 372 p. [In Russian].
- Muraviev Ya.D., Salamatina A.N.* Mass balance and thermodynamic regime of the glacier in the crater of Ushkovsky volcano. *Vulkanologiya i seismologiya. Volcanology and seismology*. 1989, 3: 85–92 [In Russian].
- Toropov P.A., Mikhlenko V.N., Kutuzov S.S., Morozova P.A., Shestakova A.A.* Temperature and radiation regime of glaciers on slopes of the Mount Elbrus in the ablation period over last 65 years. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2016, 1 (56): 5–19.
<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2016-1-5-19> [In Russian]

- Toropov P.A., Shestakova A.A., Yarynich Yu.I., Kutuzov S.S.* Simulation of orographic precipitation's component on the Mount Elbrus example. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2022, 4 (62): 485–503.
<https://doi.org/10.31857/S2076673422040146> [In Russian].
- Fierz C., Armstrong R.L., Durand Y., Etchevers P., Green E., McClung D.M., Nishimura K., Satyawali P.K., Sokratov S.A.* International classification for seasonally falling snow (a guide to the description of snow thickness and snow cover). 2012, 2: 80 p. [In Russian]
- Khromova T.Y., Nosenko G.A., Glazovsky A.F., Muraviev A.Y., Nikitin S.A., Lavrentiev I.I.* New Inventory of the Russian glaciers based on satellite data (2016–2019). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021, 3 (61): 341–358.
<https://doi.org/10.31857/S2076673421030093> [In Russian].
- Barry R.G.* Mountain weather and climate. London: Cambridge University Press, 2008: 505 p.
- Beniston M., Farinotti D., Stoffel M., Andreassen L.M., Coppola E., Eckert N., Fantini A., Giacona F., Hauck C., Huss M., Huwald H., Lehning M., López-Moreno J.-I., Magnusson J., Marty C., Morán-Tejeda E., Morin S., Naaim M., Provenzale A., Rabatel A., Six D., Stötter J., Strasser U., Terzago S., Vincent C.* The European Mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future challenges. *Cryosphere*. 2018, 12: 759–794.
<https://doi.org/10.5194/tc-12-759-2018>
- Chizhova Yu.N., Mikhaleiko V.N., Korneva I.A., Hayredinova A.G., Vorobiev M.A., Muravyov Ya.D.* New Data on Deuterium Excess Values of Glacial Ice in Kamchatka Peninsula. *Dokl. Earth Sc.* 2024, 517: 1387–1392.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X24602190>
- Clifford H.M., Potocki M., Rodda C., Dixon D., Birkel S., Handley M., Mayewski P.A.* Prefacing unexplored archives from Central Andean surface-to-bedrock ice cores through a multifaceted investigation of regional firn and ice core glaciochemistry. *Journ. of Glaciology*. 2023, 69 (276): 693–707.
<https://doi.org/10.1017/jog.2022.91>
- Essery R., Kim H., Wang L., Bartlett P., Boone A., Brutel-Vuilmet C., Burke E., Cuntz M., Decharme B., Dutra E., Fang X., Gusev Y., Hagemann S., Haverd V., Kontu A., Krinner G., Lafayssse M., Lejeune Y., Marke T., Marks D., Marty C., Menard C. B., Nasonova O., Nitta T., Pomeroy J., Schädler G., Semenov V., Smirnova T., Swenson S., Turkov D., Wever N., Yuan H.* Snow cover duration trends observed at sites and predicted by multiple models. *The Cryosphere*. 2020, 14: 4687–4698.
<https://doi.org/10.5194/tc-14-4687-2020>
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Rozum I., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., Thépaut J.-N.* (2023): ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). Accessed March 30, 2024.
<https://doi.org/10.24381/cds.bd0915c6>
- Huss M., Hock R.* Global-scale hydrological response to future glacier mass loss // *Nat. Clim. Chang.* 2018, 8 (2): 135–140.
<https://doi.org/10.1038/s41558-017-0049-x>
- Kodama Y., Shiraiwa T., Kobayashi D., Matsumoto T., Yamaguchi S., Muravyev Ya.D., Glazirin G.E.* Hydro-meteorological and glaciological observations in the Koryto and Ushkovsky Glaciers, Kamchatka // *Low Temp. Sci. Ser. A*. 1996, 55: 107–136.
- Korneva I.A., Toropov P.A., Muraviev A.Ya., Aleshina M.A.* Climatic factors affecting Kamchatka glacier recession // *International Journ. of Climatology*. 2024, 44 (2): 345–369.
<https://doi.org/10.1002/joc.8328>
- Lehning M., Bartelt P., Brown B., Fierz C., Satyawali P.* A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part II. Snow microstructure. *Cold regions science and technology*. 2002a, 35 (3): 147–167.
[https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(02\)00073-3](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(02)00073-3)
- Lehning M., Bartelt P., Brown B., Fierz C.* A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning: Part III: Meteorological forcing, thin layer formation and evaluation. *Cold Regions Science and Technology*. 2002b, 35 (3): 169–184.
[https://doi.org/10.1016/S0165-232X\(02\)00072-1](https://doi.org/10.1016/S0165-232X(02)00072-1)
- Matoba S., Ushakov S.V., Shimbori K., Sasaki H., Yamasaki T., Ovshannikov A.A., Manevich A.G., Zhidelyeva T.M., Kutuzov S., Muravyev Ya.D., Shiraiwa T.* The glaciological expedition to Mount Ichinsky, Kamchatka, Russia // *Bulletin of Glaciological Research*. 2007, 24: 79–85.
- Mikhaleiko V., Sokratov S., Kutuzov S., Ginot P., Legrand M., Preunkert S., Lavrentiev I., Kozachek A., Ekaykin A., Fan X., Lim S., Schotterer U., Lipenkov V., Toropov P.* Investigation of a deep ice core from the Elbrus western plateau, the Caucasus, Russia // *The Cryosphere*. 2015, 9: 2253–2270.
<https://doi.org/10.5194/tc-9-2253-2015>
- Ozeki T., Akitaya E.* Energy balance and formation of sun crust in snow // *Annals of Glaciology*. 1998, 26: 35–38.
- Pinzer B.R., Schneebeli M., Kaempfer T.U.* Vapor flux and recrystallization during dry snow metamorphism under a steady temperature gradient as observed by time-lapse micro-tomography // *The Cryosphere Discussions*. 2012, 6 (3): 1673–1714.
<https://doi.org/10.5194/tc-6-1141-2012>
- Quéno L., Vionnet V., Cabot F., Vrécourt D., Dombrowski-Etchevers I.* Forecasting and modelling ice layer formation on the snowpack due to freezing precipitation in the Pyrenees. *Cold Regions Science and Technology*. 2018, 146: 19–31.
<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.11.007>
- Quéno L., Fierz C., van Herwijnen A., Longridge D., Wever N.* Deep ice layer formation in an alpine snowpack: monitoring and modeling.

- The Cryosphere. 2020, 14 (10): 3449–3464.
<https://doi.org/10.5194/tc-14-3449-2020>
- Sato T., Shiraiwa T., Greve R., Seddik H., Edelmann E., Zwinger T.* Accumulation reconstruction and water isotope analysis for 1735–1997 of an ice core from the Ushkovsky volcano, Kamchatka, and their relationships to North Pacific climate records // *Climate of the Past Discussions*. 2013, 9 (2): 2153–2181.
<https://doi.org/10.5194/cpd-9-2153-2013>
- Schlögl S., Lehning M., Nishimura K., Huwald H., Cullen N.J., Mott R.* How do Stability Corrections Perform in the Stable Boundary Layer Over Snow? // *Boundary-Layer Meteorol.* 2017, 165: 161–180.
<https://doi.org/10.1007/s10546-017-0262-1>
- Shiraiwa T., Muravyev Ya.D., Yamaguchi S.* Stratigraphic Features of Firn as Proxy Climate Signals at the Summit Ice Cap of Ushkovsky Volcano, Kamchatka, Russia // *Arctic and Alpine Research*. 1997, 29 (4): 414–421.
- Shkaberda O.A., Vasilevskaya L.N.* Long-term variability of the temperature and humidity regime on the Kamchatka peninsula // *Izvestiya TINRO*. 2014, 178 (3): 217–233.
<https://doi.org/10.26428/1606-9919-2014178-217-233>
- Thompson L.G., Davis, M.E., Mosley-Thompson E., Porter S.E., Corrales G.V., Shuman C.A., Tucker C.J.* The impacts of warming on rapidly retreating high-altitude, low-latitude glaciers and ice core-derived climate records. *Global and Planetary Change*. 2021, 203: 103538.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103538>
- Toropov P.A., Aleshina M.A., Grachev A.M.* Large-scale climatic factors driving glacier recession in the greater caucasus, 20th–21st century // *International Journal of Climatology*. 2019, 39: 4703–4720.
<https://doi.org/10.1002/joc.6101>
- Wever N., Schmid L., Heilig A., Eisen O., Fierz C., Lehning M.* Verification of the multi-layer SNOWPACK model with different water transport schemes // *The Cryosphere*. 2015, 9: 2271–2293.
<https://doi.org/10.5194/tc-9-2271-2015>
- Wever N., Würzer S., Fierz C., Lehning M.* Simulating ice layer formation under the presence of preferential flow in layered snowpacks. *The Cryosphere*. 2016, 10 (6): 2731–2744.
<https://doi.org/10.5194/tc-10-2731-2016>